

卫星导航定位技术文集

Selected Papers on Satellite Navigation and Positioning Techniques

(2020)

中国卫星导航定位协会 编

测绘出版社

·北京·

目 录

中国的北斗 世界的北斗

- 纪念北斗一号卫星发射二十周年和协会成立二十五周年 曹 冲(1)
- 北斗三号助力中国船联网转型升级 周儒欣, 郭 飏, 范智鹏, 张 密(9)
- 从协同到融合
- 航天宏图导航与遥感双擎发展之路 任 凌, 刘东升(15)
- 国际卫星导航定位基准站网建设的政府逻辑分析 薛 超, 陈 熙(20)
- 美国综合 PNT 体系及其对北斗系统建设的启示与思考 郭 强, 蒋 超, 谭周正(24)
- GNSS 高精度天线发展概述 王晓辉, 李建辉, 张 捷(30)
- 北斗系统在自动驾驶动态高精地图领域的技术与行业应用 黄以琳, 杨德刚, 杨 帅, 车国兴(34)
- 车道级导航中交通诱导方式与数据组织 于迅文, 李宏利, 殷志东, 杜 坤, 申亚倩(41)
- 浅谈基于深度学习的自动化视觉道路要素提取技术在自动驾驶中的应用 刘秋平(47)
- 自主泊车系统中停车位遍历路径算法研究 胡存蔚(50)
- 基于地图场景和速度方向信息辅助的道路匹配方法 刘庆军, 罗 军, 张绍瑞, 聂 斌(56)
- 浅谈时空大数据与数据可视化在疫情地图中的应用 赵 娟(61)
- 深度轨迹网络在移动终端定位中的应用 王东清, 陈绍建, 秦 博, 孙 翔, 段 航(64)
- 铱星系统加入全球海上遇险与安全系统分析及北斗短报文国际海事应用借鉴及思考
..... 窦 路, 孙 倩, 胡彩波(68)
- 基于电子海图和船舶自动识别系统的海上交通场景三维可视化研究 夏启兵, 吴功栋, 李 巍(73)
- 宏图“风·景”:北斗遥感双引擎,助力农业新发展 高志军, 柳杨华, 梁 楠, 徐士儒(77)
- “北斗+”技术在智慧交通系统中的应用 谢士琴, 汪泽民, 牛鹏飞, 崔文俊, 邓 鑫(81)
- 北京朝阳区大山子路口即刻分流导航技术研究 张启明(86)
- 基于关键帧的非线性优化惯性视觉紧耦合定位方法研究 莫 钊, 郭 杭, 熊 剑(97)
- 中国区域北斗全星座 PPP 定位性能与质量研究分析 岳彩亚, 党亚民, 许长辉, 谷守周, 戴华阳(102)
- GNSS 反射信号多星模拟和仿真平台设计 李博闻, 杨东凯, 张 波(111)
- 北斗三号全球导航卫星系统授时性能分析评估
..... 蔺玉亭, 韩春好, 杨玉婷, 李国俊, 刘 利, 蔡志武, 徐世依(121)
- VMF3 对流层延迟及其在国内 IGS 站点上的精度分析 柴军兵, 胡志贵, 何 虎, 张新宇, 易昌华(130)
- 2020 年两个 MGEX 测站的 BDS 动态 PPP 定位性能初步评估 杜彦君, 马下平, 姚顽强(139)
- 基于 CORS 一张网的对流层延迟误差拟合特性研究 田宗彪, 章 磊, 周 进, 杨绪峰, 吕霖冰(149)
- 基于 GPS-BD2 的组合定位精度分析 杨旭东, 刘博文, 王 森, 纪雷鸣, 黄迎春, 秦 飞, 余永欣(154)
- 基于 VRS 的 BDS 定位精度分析 王何鹏, 郭 杭, 陈新东(160)
- 基于天空地多层次观测的地质灾害识别监测应用研究
- 以矿山为例 吴 雨, 况长虹, 胡文蓉, 张帅毅(164)
- 高频岸基 GNSS 监测站探测海面风速研究 刘 奇, 张双成, 刘 宁, 王丽霞, 马中民(169)
- 北斗卫星搜救地面测试验证系统综述 尚丽娜, 陈付亮, 何泽骅(175)
- 地球自转参数对北斗导航卫星轨道的影响及一致性分析
..... 张龙平, 周万振, 于含章, 田先才, 龚宵雪(180)
- 基于北斗三号 RDSS 链路的语音传输技术研究 李明凡, 张红领(185)
- 一种基于 HD8040 北斗导航芯片的音频方案 闫 岩(190)

GPS 经费预算研究·····	林 悦, 窦长江	(193)
北斗卫星导航系统在水汽探测的应用研究·····	周悌慧, 刘晋虎, 吕霖冰, 田宗彪	(199)
水下考古实时定位监控系统的构建与应用研究·····	朱世乾, 梁国庆, 马 深	(203)
面向自然资源调查的北斗定位关键技术研究·····	余永欣, 刘博文, 龚 芸, 秦 飞, 杨旭东, 张 译	(211)
基于 CORS 增强的移动智能终端定位测试分析·····	熊先才, 黄 凯, 杨 凯	(215)
大型水利枢纽水源工程三维 GNSS 施工控制网测量技术研究·····	吴恒友, 胡 君, 刘怀林	(219)
北斗导航卫星系统在深海石油勘探方面的应用探讨·····	蒋冬伟, 郭海荣, 李林花, 李金龙	(224)
基于视觉与 IMU 融合的室内定位方法研究·····	黄 涛, 郭 杭, 熊 剑	(229)
网络化导航定位技术在韩国“世越号”沉船打捞中的应用·····	吴 昊, 隋海琛	(233)
基于北斗的油库监控预警系统设计·····	蒋 超, 郭 强, 谭周正, 邓仕海, 曹锴源	(237)
BDS/GPS 超短基线解算的非线性模型研究·····	张 遼, 郭 杭, 王何鹏	(241)
基于多模导航的新型渔船监控系统设计与应用 ·····	陈付亮, 薛 超, 万 祥, 薛玉斌, 黄途文, 刘 昂, 王伊冰	(246)
视觉惯性组合导航系统发展综述·····	吴建峰, 郭 杭, 熊 剑	(251)
多源信息融合的智能手机室内定位技术·····	王刚刚, 李素敏, 姜利辉, 任建国, 杨 春	(255)
结合双目相机和 IMU 的室内定位方法研究·····	汪志刚, 郭 杭	(262)
异构集群融合通信系统研究与应用·····	张 钺, 李志华, 冯 建	(266)

中国的北斗 世界的北斗

——纪念北斗一号卫星发射二十周年和协会成立二十五周年

曹 冲

(环球新时空(北京)信息技术研究院,北京 100041)

天净沙·北斗人家

环球时空云霞,旷古烁今韶华,
眺望北斗人家,日月同辉,
经天纬地生涯。

摘 要:2020 年是中国北斗发展历程中具有里程碑意义的一年。6 月 23 日我国北斗三号的最后一颗卫星发射成功,标志着中国北斗系统全球星座布网完成,即将全面投入全球服务。中国的北斗系统出发点和落脚点都是为全中国、全世界、全人类服务,从此“中国的北斗,世界的北斗”的广大普惠之意真正成为现实。本文重点介绍四个方面:分别是全球导航卫星系统现状、定位导航授时产业发展态势、今后三年间导航定位行业的主要看点和我国卫星导航未来十年能做的工作。
关键词:GNSS;新时空产业

1 全球导航卫星系统(GNSS)的发展和现状

1.1 概 述

1957 年 10 月 4 日,苏联成功发射世界上第一颗人造地球卫星,远在美国约翰斯·霍普金斯大学应用物理实验室的两个年轻学者接收该卫星信号时,发现了卫星与接收机之间形成的多普勒频移效应,并断言此效应可以用来进行导航定位。在他们的建议下,美国于 1964 年建成了世界上第一个导航卫星系统即“子午卫星系统”,由 6 颗卫星构成星座,用于海上军用舰艇船舶的定位导航。1967 年,“子午卫星系统”被解密,提供了民用的功能。由此可见,开始于 20 世纪 70 年代后期的全球定位系统(GPS),至 2020 年多星座构成的全球导航卫星系统(GNSS),均属于第二代导航卫星系统,它们包括美国的 GPS、俄罗斯的格洛纳斯导航卫星系统(GLONASS)、中国的北斗导航卫星系统(BDS)和欧盟的伽利略导航卫星系统(Galileo)等全球系统,以及日本准天顶卫星系统(QZSS)和印度导航星座(NavIC)2 个区域系统。除中国在 BDS 中已经包括的增强系统外,其他 5 个国家和地区(美、俄、欧、印、日)作为 GNSS 服务提供商均持有相应的星基增强系统——美国广域增强系统(WAAS)、俄罗斯差分改正监测系统(SDCM)、欧洲地球静止卫星重叠导航服务(EGNOS)、印度 GPS 辅助型静地轨道增强导航系统(GAGAN)和日本多功能卫星星基增强系统(MSAS)。而中国由于导航卫星系统的发展之路与其他国家不同,所建设的北斗二号(BDS-2),就是区域系统,而建设的北斗三号(BDS-3)还包括星基增强系统功能。综上所述,所谓的第二代导航卫星系统,就是指 GNSS,它是泛指的全局导航卫星系统,是个涵盖全球系统、区域系统和星基增强系统在内的体系概念。那么会不会有第三代导航卫星系统出现呢?应该有,因为所有已经建设全球导航卫星系统的国家,均在考虑或者推进导航卫星系统的下一步创新行动计划。

1.2 GNSS 发展演变过程及其现状

1.2.1 GPS 的由来和发展及其现代化

美国国防部于 1973 年决定成立 GPS 计划联合办公室,由军方联合开发全球测时与测距导航定位系统 NAVStar/GPS。整个系统的建设分三个阶段实施:第一阶段(1973—1979 年),系统原理方案可行性验证阶段(含设备研制);第二阶段(1979—1983 年),系统试验研究(对系统设备进行试验)与系统设备研制阶段;第三阶段(1983—1988 年),工程发展和完成阶段。1978 年发射第 1 颗 GPS 卫星,1994 年 3 月 10 日完成 21 颗工作卫星加 3 颗备用卫星的卫星星座配置,1995 年 4 月美国国防部正式宣布 GPS 具备完全工作能力。GPS 的建设历经 20 年,其系统由空间段、地面段、用户段 3 大部分组成,整个星座额定有 24 颗卫星,分置在 6 个轨道面内,由于性能优良,GPS 被誉为是一场导航领域的革命。GPS 提供标准定位服务 (SPS)和精密定位服务 (PPS),在包含选择可用性技术 (SA)影响时,SPS 的定位精度为 100 m(95%的概率),不含 SA 影响的定位精度为 20~30 m,定时精度为 340 ns;PPS 定位精度可在 10 m 以内。

1996 年美国提出 GPS 现代化计划,第一个标志性行动是从 2000 年 5 月 1 日起取消人为恶化 GPS 卫星定位精度的 SA 技术,使定位精度有数量级的提升。20 多年来,美国持续推进 GPS 现代化计划,先后投入 200 多亿美元,主要目标是提高空间段卫星和地面段运控的水平,将军用和民用信号分离,在强化军用性能的同时,将民用信号从 1 个增加到 4 个,除保留 L1 频点上的 C/A 码民用信号外,在原先的 L1 和 L2 频点上又加上民用 L1C 和 L2C 码,还新增 L5 频点民用信号,这大大增加了民用信号的冗余度,从而改进了系统的定位精度、信号的可用性和完好性、服务的连续性,以及抗无线电干扰能力,也有助于高精度的实时动态 (RTK)差分测量和长短基线应用,还有利于飞机的精密进场和着陆、测绘、精细农业、机械控制、民用室内增强应用,以及地球科学研究。GPS 现代化是项系统性工作,它包括:空间卫星段、地面运控段和新的运控系统 (OCX)及用户设备段现代化,其核心是增加 L5 频点和民用信号数量及改变制式,实现与其他 GNSS 信号的互操作。最后一颗 GPS III F 卫星预计于 2034 年发射,将宣告 GPS 现代化进程结束。

1.2.2 GLONASS 的由来和发展及其现代化

1976 年苏联颁布建立 GLONASS 的政府令,并成立相应的科学研究机构,进行工程设计。1982 年 10 月 12 日,成功发射第一颗 GLONASS 卫星。1996 年 1 月 24 颗卫星全球组网完成,宣布进入完全工作状态。之后,GLONASS 步入艰难维持阶段,2000 年初,该系统仅有 7 颗卫星正常工作,几近崩溃边缘。2001 年 8 月,俄罗斯政府通过了 2002—2011 年间的 GLONASS 恢复和现代化计划。2001 年 12 月发射成功第一颗现代化卫星 GLONASS-M。直到 2012 年该系统回归到 24 颗卫星完全服务状态。

GLONASS 至今已有三代卫星:第一代卫星是传统的基本型 GLONASS 卫星;第二代是 GLONASS-M 现代化卫星;第三代就是最新开发的 GLONASS-K 卫星,到目前为止,K 星系列又分为 K1 和 K2 两种型号。GLONASS 星座是由 3 个轨道面上的 24 颗卫星构成的。其传统的信号使用频分多址 (FDMA),而不是其他 GNSS 所用的码分多址 (CDMA)。与传统的 GPS 信号一样,GLONASS 信号包括 2 个伪随机噪声码 (PRN)测距码,即标准精度 ST 码和精密精度 VT 码,调制到 L1 和 L2 载波上。GLONASS ST 码已经在 GLONASS-M 卫星的 L2 频率上传输。发送的信号像 GPS 和其他 GNSS 信号一样是右旋圆极化的。GLONASS-K1 在新的 L3 频率上传输 CDMA 信号,还将在 GLONASS-K2 的 L1 和 L2 频率上提供 CDMA 信号,从而实现与其他 GNSS 的兼容与互操作。GLONASS-K1 星的空间信号测距误差约为 1 m,而 K2 星为 0.3 m。

1.2.3 北斗系统的三步走发展进程

20 世纪后期,中国开始探索适合国情的导航卫星系统发展道路,逐步形成了“三步走”发展战略:2000 年底,建成北斗导航卫星试验系统即北斗一号 (BDS-1),向中国提供服务;2012 年底,建成北斗二号区域系统,向亚太地区提供服务;2020 年,建成北斗三号全球系统,向全球提供服务。正如习近平总书记指出的那样,“2035 年前还将建设完善更加泛在、更加融合、更加智能的综合时空体系”。

中国坚持“自主、开放、兼容、渐进”原则建设发展北斗系统:①所谓自主,是坚持自主建设、发展和运行北斗系统,具备向全球用户独立提供卫星导航服务的能力;②所谓开放,是免费提供公开的卫星导航服务,

鼓励开展全方位、多层次、高水平的国际合作与交流;③所谓兼容,是提倡与其他导航卫星系统开展兼容与互操作,鼓励国际合作与交流,致力于为用户提供更好的服务;④所谓渐进,是分步骤推进北斗系统建设发展,持续提升北斗系统服务性能,不断推动卫星导航产业全面、协调和可持续发展。

如今,我国已经完成北斗三号全球组网。这一全球组网工作是从2017年11月5日开始的,根据系统建设总体规划,一箭双星首次发射北斗三号中圆地球轨道2颗卫星;2018年底,完成19颗卫星发射组网,完成基本系统建设,向全球提供初始服务;2019年继续成功发射9颗卫星;2020年6月23日成功发射本年度任务的第2颗卫星,这是北斗三号全球组网的30颗卫星中的最后1颗卫星;2020年7月31日宣布北斗三号全球网络开通。北斗三号全部30颗卫星由24颗中圆地球轨道(MEO)卫星、3颗地球静止轨道(GEO)卫星和3颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星构成。北斗三号的定位精度优于10 m,测速精度为0.2 m/s,授时精度达20 ns,服务可用性超过99%,在亚太地区的服务质量更好。

北斗系统由空间段、地面段和用户段3部分组成:空间段由若干地球静止轨道卫星、倾斜地球同步轨道卫星和中圆地球轨道卫星3种轨道卫星组成混合导航星座;地面段包括主控站、时间同步/注入站和监测站等若干地面站;用户段包括北斗系统兼容其他导航卫星系统的芯片、模块、天线等基础产品,以及终端产品、应用与服务系统等。

1.2.4 Galileo的发展进程

欧盟伽利略导航卫星系统第一、第二颗试验卫星 GIOV-A 和 GIOV-B,已于2005年和2008年发射升空,目的是考证关键技术。2011年与2012年用一箭双星方式各发射2颗在轨验证卫星,验证 Galileo 空间段和地面段的相关技术。在轨验证(on-orbit verification, IOV)阶段完成后,从2014年开始发射完全运行能力(FOC)卫星,在2014年至2018年间,用一箭双星方式发射共计10颗卫星,用一箭四星方式发射12颗卫星。目前, Galileo 在轨工作卫星数量共计24颗,其中有2颗处于测试状态,实际正式工作卫星为22颗,尚未达到额定星座的24颗数量。在2016年达到18颗卫星时, Galileo 宣布实现系统的初始服务,2020年宣布进入全球完全服务,但是现在看来有些困难。

Galileo 也由空间段、地面段和用户段组成。星座有24颗卫星分置于3个中地球轨道面内。Galileo 信号工作的主要频段为 E1、E5 和 E6,它们各自发射独立的信号,发射的中心频率分别为 1 575.42、1 191.795 和 1 278.75 MHz。其中, E5 又分为 E5a 和 E5b 2 个子信号。为了实现与 GPS 的兼容互操作, Galileo 的 E1 和 E5a 2 个信号的中心频率与 GPS 的 L1 和 L5 相互重合。

Galileo 提供5种服务,分别是:①公开服务,与 GPS 的 SPS 相类似,免费提供;②生命安全服务;③商业服务;④公共特许服务;⑤搜救服务。以上所述的前4种是 Galileo 的核心服务,最后1种则是支持搜救卫星服务。Galileo 的公开服务提供定位、导航和授时免费服务,供大批量导航市场应用。商业服务是对公开服务的一种增值服务,它具备加密导航数据的鉴别认证功能,为测距和授时专业应用提供有保证的服务承诺。生命安全服务,它可以同国际民航组织(ICAO)标准和推荐条款中的“垂直制导方法”相比拟,并提供完好性信息。公共特许服务是为欧盟国家安全应用专门设置的,是特许的或关键的应用,以及具有战略意义的活动,其卫星信号更为可靠耐用,受成员国控制。Galileo 提供的公开服务定位精度通常为 15~20 m(单频)和 5~10 m(双频)2种档次。公开特许服务有局域增强时定位精度能达到 1 m,商用服务有局域增强时为 10 cm~1 m。

1.3 北斗系统的特色和性能特点

当前北斗系统是 GNSS 中最复杂的系统,它不仅是北斗二号区域系统与北斗三号全球系统的过渡性组合,也是融合 GEO、IGSO、MEO 3 种轨道类型的复杂星座,还是同时提供定位、导航、授时(PNT)服务和双向短信通信服务的卫星系统,还提供高精度精密单点定位(PPP)服务、星基增强服务与应急救援服务等。目前北斗系统在轨卫星总数量为49颗,除30颗北斗三号工作卫星外,还有14颗北斗二号卫星在正常工作,此外有5颗北斗三号试验卫星在轨测试维修。现在是所有 GNSS 中卫星数量最大的星座。实际测试表明,北斗三号全球服务的性能指标是,空间信号测距误差优于0.5 m,定位精度单频测量为7 m,双频测量为3 m,测速精度为0.2 m/s,授时精度为20 ns,可用性为99%。北斗系统在亚太区域的服务性能

明显优于全球。北斗三号系统可提供 6 种服务,具体见表 1。

表 1 北斗三号系统提供的 6 种服务及其参与服务的卫星数量分布

序号	服务类型	卫星类型与数量
1	卫星无线电导航服务 (radio navigation satellite service, RNSS)	3 颗 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星和 24 颗 MEO 卫星
2	星基增强系统 (satellite based augmentation system, SBAS)	3 颗 GEO 卫星
3	区域短信息通信服务 (regional short message communication service, RSMCS)	3 颗 GEO 卫星
4	全球短信息通信服务 (global short message communication service, GSMCS)	14 颗 MEO 卫星
5	国际 SAR 服务 (international SAR service, ISARS)	6 颗 MEO 卫星
6	精密单点定位服务 (precise point positioning service, PPPS)	3 颗 GEO 卫星

北斗系统具有以下特点:①空间段采用 3 种轨道卫星组成的混合星座,与其他卫星导航系统相比高轨卫星更多,抗遮挡能力更强,尤其低纬度地区性能特点更为明显;②提供多个频点的导航信号,能够通过多频信号组合使用等方式提高服务精度;③创新融合了导航与通信能力,具有实时导航、快速定位、精确授时、位置报告和短报文通信服务五大功能。

2 北斗与 GNSS 星星之火,让新时空产业成燎原之势

近年来,我们一直宣传一个观点,这就是:2020 年是北斗与 GNSS 系统和产业发展的转折点,从此 GNSS 系统建设告一段落,其整体上转入应用与服务产业高速度发展阶段。GNSS 多星座多频率的兼容互操作,给产业带来一个全新的发展机遇。

北斗与 GNSS 系统是科技发展的一个奇迹,每个系统用二三十颗卫星,实现全球性、全天候的覆盖,而且具有无限量的用户,还提供免费服务,为国计民生带来巨大的经济社会效益。21 世纪以来,GNSS 的发展已经不仅仅是美俄两个大国的事情,几乎有实力的大国,都有计划发展自己的导航卫星系统,继 GPS、GLONASS 之后,中国北斗系统、欧盟伽利略系统相继上马,全球导航卫星系统的大家庭,具有美国、俄罗斯、中国和欧盟四大成员,而日本和印度也建立起自己的区域导航系统和星基增强系统,使导航卫星系统国际俱乐部的成员增加到 6 个。因而 2020 年全部系统均投入正式服务之时,天上将有接近一百五十颗卫星在工作。

GNSS 多星座多频率的特点,以及各 GNSS 兼容互操作的推进,带来的定位精度、可用性、可靠性的提高是显而易见的。用好已有的 GNSS,并切实推进且实现 GNSS 的兼容互操作,将卫星导航产业做强做大,发挥其科技引领作用,带动相关产业的升级换代,让导航卫星系统的星星之火,发展成新时空产业的燎原之势,是今后中国北斗人和世界导航界的机遇,也是全体中国人民和全人类的一大福音。

我们可以从两幅产业产值发展图来看这种星星之火的燎原之势。图 1 是我国卫星导航产业产值的发展增长态势。在 2012 年之前,我国导航卫星产业主要是利用 GPS 信号实现定位导航授时应用,将近 20 年的时间,中国导航卫星产业年产值一直没有突破 500 亿元。2012 年北斗区域系统投入工作后,北斗产业的年增长值一举突破 300 亿、400 亿、500 亿,2015 年后,年年增长 500 亿元左右,现在完全可以期盼在 2020 年产值突破 4 000 亿元,这意味着届时给国家上缴的利税达到上千亿元。但是,这仅仅是星星之火,在此基础上发展新时空科技和智能信息产业的燎原之势,还将紧随其后,它们是北斗系统的升级跨越版。

这种产业发展态势,在美国也有体现。最近,美国的研究贸易研究院(RTI)发布了《GPS 经济效益最终报告》。该报告显示,GPS 从 20 世纪 80 年代投入使用以来,截至 2017 年,其在民用领域应用与服务产

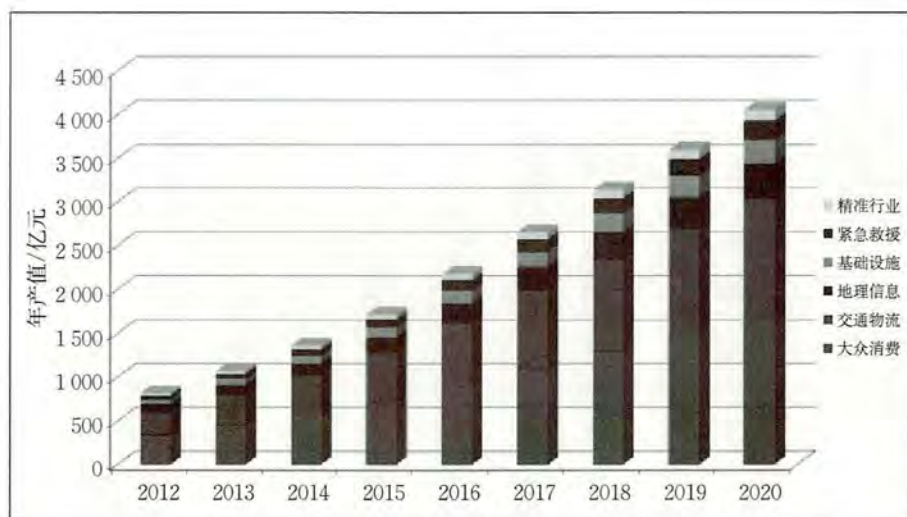


图1 中国导航卫星产业产值增长

生的经济效益累计高达 1.4 万亿美元，90% 的贡献是在 2010 年之后，其中后五年的份额占有率达到 86%，五年间平均每年增加 430 多亿美元效益，2017 年的民用经济效益超过 3 000 亿美元，而且这仅仅是 GPS 对于美国(或者说是北美地区)的经济效益贡献。总之，在低成本导航技术、智能手机和快速发展的无线网络等领域的效益占总效益的 90% 以上，具体的领域为：电子信息通信系统贡献率 51%，车辆信息系统贡献率 24%，基于位置服务贡献率 16%，测量绘图贡献率 4%，石油与天然气贡献率 3%，矿业贡献率 1%，电力系统贡献率 1%，以及精准农业贡献率 0.43%。

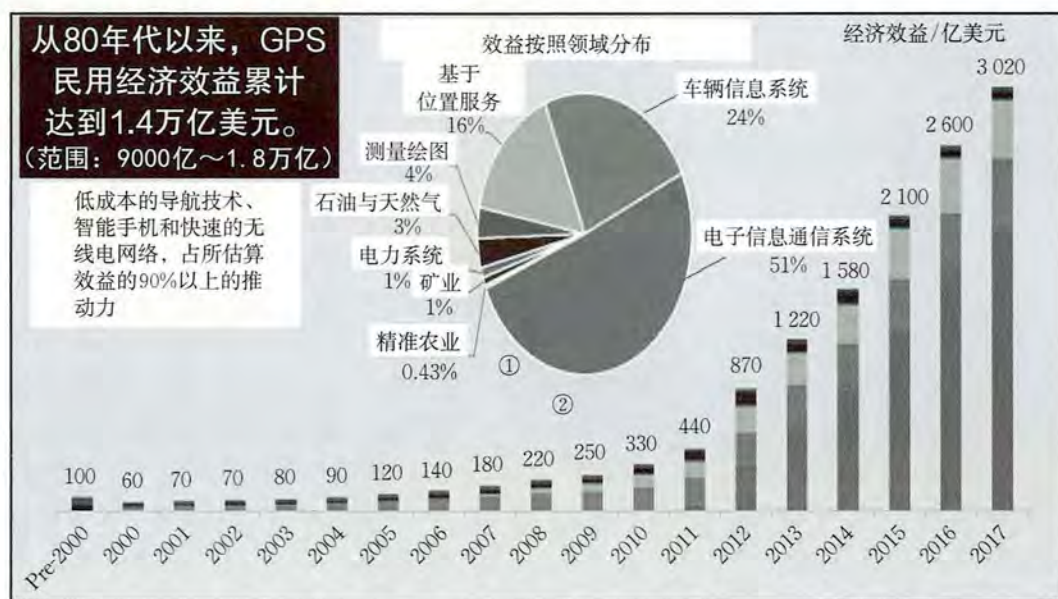


图2 美国 GPS 对于美国提供的经济效益

根据图 1 和图 2，可以得出以下几点：一是一个科技产业真正取得效益，往往需要很长的时间，美国 GPS 在 1995 年投入正式使用，但是真正产生经济效益，是在 2010 年以后；二是近年来，全球多个导航卫星系统建设并逐步开通服务，形成了集聚效应，卫星导航逐渐进入大众化应用，尤其是在智能手机和汽车领域，把全球市场推动起来；三是目前产业发展势头强劲，尤其是北斗与 GNSS 进入安全相关的关键基础设施领域，进入无人机、无人船、无人车辆和自动驾驶系统这些长远发展需求领域。GNSS 与其他传感器、其他产业的融合，特别是从天基 PNT 发展进入泛在 PNT，确切地说进入新时空科技和智能信息产业的发展转折阶段，今后会从星星之火，发展成为燎原之势。

3 2020年北斗与GNSS产业的五大看点

在世界经济疲软的情况下,2019年全球GNSS产业仍然以7%的年增长率领先全球经济,而中国以北斗为代表的卫星导航应用与服务产业,虽然受到大环境影响,增长速度有所放缓,但还是一枝独秀地以两位数增长率的速度增长。那么,2020年北斗与GNSS产业究竟有哪些看点,我们不妨做个预测和展望。

3.1 北斗产业全球化市场化大发展的黄金期

随着北斗三号全球系统的建设完成,将加强利用北斗二号和三号的系统基础,特别是北斗三号的技术优势,全面推进其五大服务:基本导航服务、星基增强服务、短信通信服务、搜索救援服务和精密单点服务。通过标量化等积极有效措施,将技术优势转化为产业强势,进一步调动中国市场的口红红利,把应用与服务产业做大做强,将产业深化到国计民生的各部门、各地区、各领域、各角落,大力推进技术国际化、产品系列化、应用规模化、服务产业化、市场全球化的“五化”进程,将迎来北斗产业发展的黄金期,目标是在“十四五”期间,北斗产业核心产值和带动产值有数量级的增长,进入万亿俱乐部。

3.2 GNSS从系统建设至产业发展的转折期

在群星汇聚、星光灿烂的GNSS时代,GNSS多星座多频率的特点,会通过兼容互操作实现从量变到质变,促进产业跨越式发展,其转折性革命性变化所带来的产业发展势能、动能、赋能效应,将会出乎人们意料。北斗与伽利略系统利用新信号的能力,在L1C(B1C)上首先实现全星座服务,赢得先机,而GPS III和GLONASS-K2上新信号能力的全部发挥,尚需时日。在系统建设告一段落的条件下,如何把产业,尤其是服务产业做好,完全是个新课题,2020年是转折期的关键一年,一定要抓住北斗三号全球成功组网的契机,着力推进北斗与其他GNSS的系统兼容互操作,把“中国的北斗、世界的北斗”概念逐步拓展到全球,服务好全人类。

3.3 从“北斗+”到“+北斗”的深化发展变革期

“北斗+”主要强调北斗技术本身的发展应用,是就技术言技术,而“+北斗”是以各行各业的需求为前提,充分利用北斗系统的高新技术,为新旧动能转换、产业转型、升级改造、换代更新、跨越发展服务,是将北斗新时空信息技术,服务于智能信息产业全方位、多层次、体系化发展,发挥其引领性作用。可见,“+北斗”是在科学技术革命的基础上,推进产业经济和社会发展,这种深化融合发展的趋势是时代的要求。北斗新时空服务体系,承担整合过去、现在、将来的发展责任,承担推动行业、区域、国家、全球发展的责任,所以从2021年开始,将在“十四五”规划里部署“中国服务2030”行动计划,打造“中国服务”国家品牌,服务全中国全人类。2020年最有意义的一件大事,是开始通过混合所有制方式,着力创建一个中国北斗时空智能服务领头羊公司,一个在五年之内产值达到千亿元、十年内达到万亿元的中国服务品牌公司,这不仅是需要的,而且是完全可能的。

3.4 以导航与通信融合发展为主轴的实操期

融合是信息社会的主要特征和发展大趋势,技术融合、产业融合、跨界融合,成为大趋势。首先应该是导航与通信的融合,导航离不开通信,通信需要定位,导航与通信的结合是必然趋势。这不仅需要通信与导航在天基上的融合,而且更需要它们在地基上的融合,特别是在5G的部署发展过程中。要着力打造时空多信源、感知、传输、服务一体化网络,包括天基地基、室内室外、通信导航等。在部署5G的过程中,我们要充分利用现有的各种各样的通信资源,尤其是通信导航融合资源,如移动蜂窝、Wi-Fi、蓝牙、UWB、NFC、机会信号等,进行挖潜改造,拓展整合。更加可以用众筹众包众创模式,群策群力地推进基础设施建设,将服务提供商、消费用户群吸纳进来,实现共建共享共赢,这将是融合发展的重大创新。在系统层面上,应该借助商业航天快速发展的东风,把低轨宽带卫星星座的建设与导航结合起来,低轨卫星星座不仅

是用来增强导航定位,而且是成为定位导航授时的重要角色,做 PNT 舞台上的主角,实现卫星导航与通信的真正一体化融合。

3.5 以新时空为主线的智能信息产业成长期

北斗与 GNSS 及其延续的产业,在信息时代,具有强大的生命力,成为继数字化、网络化阶段到现在的智能化发展阶段的重要技术基础设施,也是智能信息化或者信息智能化的重要基础设施,它们将一直持续发展到 21 世纪中期。我们一定要以北斗新时空技术为主线,融合其他技术与产业,构建智能信息产业及其服务体系,把多种多样的新兴信息技术,如大数据、物联网、边缘计算与云计算、人工智能、区块链、虚拟增强现实、信息通信技术等基础性技术板块,进行整体性组装、有机性连接、合理性配置,打造感知网、传输网、服务网产业链与价值链,形成总体集成的态势、跨界融合的趋势、资源整合的优势,由北斗新时空科技创新中心引领,从高端制造、现代服务、先进软件、综合数据四大产业入手,通过集聚发展、融合发展、持续发展、共享发展的大平台,为全中国全世界全人类服务。

4 中国卫星导航未来十年的发展方向

北斗三号全球组网已经完成,并且向全球提供服务。未来十年,我国卫星导航做什么?众所周知,随着卫星导航应用与服务不断深入发展,卫星导航已经逐步成为现代信息社会的一种生活方式,渗透到国民经济和社会民生的方方面面,卫星导航已经在我们的汽车上、在我们的口袋中、在我们的掌心里。未来十年,卫星导航还有什么要做的?简单地说,就是要用好用足北斗,并且通过将其升级换代实现新时空体系的跨越发展。归根结底一句话,应该将卫星导航的两个“想不到”做到“极致”。从最初的 GPS 到现在的 GNSS,人们一直在惊叹卫星导航的两个“想不到”:第一个“想不到”是卫星导航的应用如此广泛,乃至无限,其服务只受到人们想象力的限制,只有想不到,没有做不到;第二个“想不到”是卫星导航的软肋如此明显,多种多样的日地空间的太阳黑子、耀斑和地磁等地球物理异常扰动,各式各样的物理阻隔、屏蔽与多径和反射,以及层出不穷的干扰威胁和攻击,都会导致 GNSS 信号接收的异常中断和操纵失败,从而造成严重后果。所以,必须从国家层面采取积极有效的应对措施,确保其应用与服务的可靠、可信、精准、安全、智能。

未来十年的主要目标应该是把以上两个“想不到”做到“极致”,这就是说,要将第一个“想不到”的应用服务效益做到极大化,要将第二个“想不到”的不利影响做到极小化。这样的任务看似简单,实际上难度极大。但由于在这两个方面,我们已经有了以前十几年甚至二十几年的发展基础,我们可以实现高起点高质量高速度的发展演变。这也就是说,我们不是重打锣鼓另开张,而是充分利用原有的技术与产业基础,通过新基建进一步驱动促进其发展,做到“更上一层楼”。应该指出,由于近些年来我国的主要人力物力财力重点放在北斗系统建设上,在应用服务效益极大化和不利影响极小化方面还有许多事情要做,特别是在不利影响极小化方面,我们仅仅处于起步阶段,与欧美相比,特别是与处于国际领先水平的美国相比,还有较大差距。美国在卫星导航领域,自始至终一直站在世界的最前列,其根本的诀窍是技术上的领先和不断更新。1995 年 GPS 正式投入全面服务,第二年就开始 GPS 的现代化。2004 年美国成立天基 PNT 委员会,2008 年就提出《国家 PNT 发展规划总体架构(2025)》,并且在 2010 年推出相关的实施方案第一稿。十多年来,美国一直针对 GPS 的脆弱性问题,进行多种多样的备份和替代技术以及系统解决方案的研究,同时推进 PTA(保护、优化、增强)发展对策与策略,政府领军打造坚韧性 PNT,逐步实现从 GPS 向 PNT 的升级换代发展。从 2013 年开始,美国政府从政策文件、标准规范、检测测试多方面推进网络和关键基础设施安全保障行动,并且在 2020 年 2 月美国总统特朗普签署了《通过负责任地使用 PNT 服务加强国家的坚韧性》执行令,把时空信息服务提高到确保国家安全、经济安全和社会公共安全的坚韧性层面,并且要求相关政府部门机构负起责任,以促进民用企事业的科技创新和应用服务推广。

未来十年卫星导航应用服务效益的极大化和不利影响的极小化任务,其重点内容可以归纳为四大方面:

(1)北斗与GNSS多星座多频率系统的系统再设计再利用再推广。GNSS面临多星座多频率系统体系的消化吸收,再设计再创新再利用再推广,在用好用足北斗系统资源和优势能力的基础上,要充分用好用足GNSS资源和能力,实现融合创新,尤其是将我国的GNSS兼容互操作的后发优势和超前竞争力发扬光大,往深化实化精化方面进发,让技术与产业向高端进发,引领全球发展。

(2)GNSS向新时空技术与系统的升级换代。GNSS最核心的作用是高精度地提供无所不在的时空信息,必然推进天基地基、室内室外、导航通信等技术渗透和系统集成多模融合,实现时空信息的泛在服务、精准服务、智能服务。这一任务的关键是多种技术和系统的跨界融合,尤其是导航与通信的融合,首先是目前和未来几年间,将有成千上万颗卫星上天,进入低地球轨道,形成巨大的星座。它们不应该仅仅是通信和遥感卫星,而应该更多的是卫星导航与通信的融合,正如前面已经说过的那样,我们经过认真研究断言:只有卫星导航与卫星通信真正融合之日,才是中国商业航天成功之时。历史会证明这一点。

(3)在新时空技术体系中政府的工作重点是引领锤炼国家坚韧性。从国家安全、经济安全和社会公共安全角度出发,网络安全和国家重大基础设施安全保障是关键,而负责任地使用新时空服务是不可或缺的主要抓手。相关政府部门的重点应该是引领打造新时空服务的坚韧性(或者安全性),确保智能时空信息服务的完好性、可靠性、可信度与精准度。因此,必须认真建立防干扰、反欺诈的组织与行动体系,监测威胁攻击源,并且采取缓解消除行动措施,同时要通过技术创新与系统集成,形成抗衡干扰和威胁的集成融合系统,或者备份替代系统,确保国家的网络与关键基础设施安全,确保国民经济与人民的生命和财产安全。

(4)新时空服务体系产业的重点是完善构建中国智能信息产业。时间和空间是人类最重要的参照系,因为北斗与GNSS一体化提供了高精度的时空基准,所以它们会有这么大的影响力。而新时空服务体系大平台,能够通过时空这一主线把许多技术与系统、产业与社群有机地联系在一起,时空的总体性、基础性、通用性、精准性成为不可或缺、不可替代的黏合剂,成为当代智能信息产业的整体架构师,把当前流行的所有热门科技领域,如大数据、物联网、云计算、区块链、人工智能等,统统集中于麾下,推动信息服务的数字化、网络化和智能化,形成智能信息产业群体的集群发展态势,涉及整体布局、国民经济、社会民生,包括城乡一体与均衡发展、基础设施与网络安全、应急救援与公共管理、科技创新与动能转换、智能交通与物流联运、智能制造与无人系统、时空服务与精准施策、移动健康与数据支撑,推进无所不在的新时空(智能)服务,打造领先世界的中国服务国家品牌。

参考文献:(略)

作者简介:曹冲,男,1940年生,中国卫星导航定位协会首席专家,环球新时空(北京)信息技术研究院院长,近二十多年来主要从事北斗与GNSS应用技术及其产业化推广工作。

北斗三号助力中国船联网转型升级

周儒欣¹, 郭 颢², 范智鹏², 张 密¹

(1. 北京北斗星通导航技术股份有限公司, 北京 100094; 2. 北斗星通信息服务有限公司, 北京 100094)

摘要:新一代“北斗卫星海洋渔业综合信息服务系统”作为基于北斗三号、智慧海洋的新基建, 融合了多项技术创新, 是卫星互联网的重要组成部分, 促进了军民融合, 是北斗系统最为典型、最具规模的示范应用之一。农业农村部正在编制“十四五”规划, 将加快推进生产现代化。系统有利于保供给、保增收、保小康, 将为海洋强国、“一带一路”国际合作贡献力量。

关键词:北斗三号; 海洋渔业; 转型升级; 未来发展

1 引言

我国地处亚洲大陆东南部, 海域面积辽阔。渔业作为农业的重要构成, 是沿海地区支柱产业之一。为构建“平安渔业”, 北京北斗星通导航技术股份有限公司(简称“北斗星通”)早在 2002 年通过实施国家高技术研究发展计划(863 计划)“北斗一号信息服务系统”, 开创性地将科技成果转化应用在海洋渔船上。2012 年北斗二号系统面向亚太地区提供服务, 北斗星通同期推出了第二代“北斗渔船船位监控系统”, 构建了海天一体的通信网络, 连接起人、船、港, 强化对渔船监管工作的信息支撑。2020 年, 北斗三号系统建成并向全球提供服务, 北斗星通将发布新一代“北斗卫星海洋渔业综合信息服务系统”, 充分利用北斗三号提供全球短报文、提供国际搜救、提升区域短报文能力等方面的便利, 建设彻底消除信息孤岛、实现大渔业范畴数据共享及深度利用的综合信息服务平台, 助力我国渔业转型升级。

新一代“北斗卫星海洋渔业综合信息服务系统”根据渔船作业的特点设计, 兼顾远、中、近海等各种作业船只, 进行统一管理。不同的作业范围选用不同的通信方式, 同时与原有的电台结合管理, 可大大提高通信的可靠性和准确性, 为渔业生产生活提供保障, 为处理和周边国家的渔业纠纷提供证据。

2 工作原理及系统功能

2.1 工作原理

“北斗卫星海洋渔业综合信息服务系统”主要由四大部分组成, 分别为北斗卫星及卫星地面站、渔业管理部门用户陆地监控台站、北斗星通北斗运营中心和北斗海洋渔业船载终端。上述四个部分都有各自独立的功能, 需要共同配合完成海上作业船舶的安全生产监控管理。系统总体工作原理见图 1。

2.2 技术线路

北斗星通为我国东南沿海 50 海里以外的中远海渔船安装了北斗海上通信设

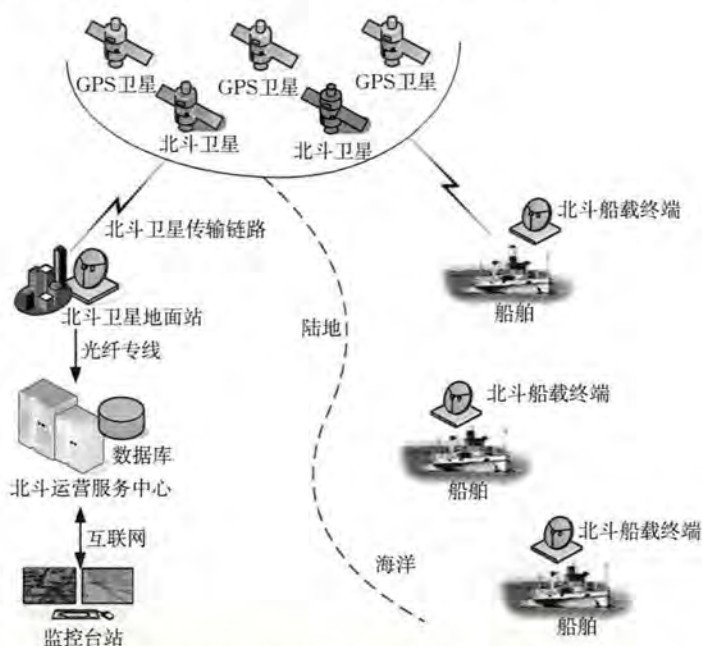


图 1 “北斗卫星海洋渔业综合信息服务系统”总体工作原理

2.4 核心功能

2.4.1 监管平台

(1)船位监控:基于北斗三号,系统通信服务范围扩大到全球,可向远洋渔船与商船提供服务;同时随着发射功率降低至3W,车载终端的供电能力和体积得到极大优化,可向我国沿海的大量近海渔船提供位置跟踪服务。

(2)救援辅助:北斗三号的新型车载终端推出后,将在信号层面直接对接国际搜救卫星,实现无国界、跨部门的紧急救助,从而显著提高安全救助能力,保障渔民生命财产安全。

(3)船岸通信:过渡到北斗三号之后,预计可将通信频度缩短至30秒/次,并提高单次通信容量至1000个汉字(以上为估计数据,实际数据以官方公布数据为准)。北斗三号系统与移动通信系统的进一步融合,也将为船岸之间的沟通联络提供更直接和便捷的体验。

(4)执法管理:基于GIS、动态船位及电子围栏数据,系统可为执法管理工作提供越界预警、伏季休渔管理、船员管理、执法船巡航管理等功能,并依托互联网为执法人员提供渔港移动执法终端,满足各种场景下的执法管理需求。

(5)渔港监管:依托物联网、大数据、云计算建设智慧渔港综合信息可视化平台,提供船舶进出港管理、应急事件处置、船舶避险停泊、非接触式移动执法、渔港生态监测、渔获物上岸管理等多样化的业务功能,辅助渔业管理部门进行渔港监管与决策分析。

(6)军民融合:利用北斗系统自主、安全、可靠的优势,系统在军民融合方面可发挥重要作用,如民兵船管理、海上密文通信等场景。

2.4.2 公众服务平台

系统可通过微信公众(服务)号、小程序、APP等方式向渔民亲友群体提供船位追踪、私信联络、气象信息推送及政策法规宣传等功能。基于电子海图页面,提供亲友渔船的实时位置跟踪,并支持对渔船进行历史轨迹回放。具备岸上用户与船上用户的北斗短消息互通功能。提供灾难获知功能,岸上公众用户可第一时间获知渔船的报警状态。可对海洋气象信息进行推送,例如用户关注海域24小时海洋预报、台风信息、潮汐信息或渔场气象信息等,支持在第一时间通知亲友渔船回港避险。还可以推送航行通告、政策法规、新闻资讯等信息。

2.4.3 综合信息服务平台

(1)电子捕捞日志管理:北斗三号提供服务后,可基于区域短报文及全球短报文服务搭建电子捕捞日志采集分析系统,适用于包括远洋渔船、中远海渔船、近海渔船在内的各类船舶;利用北斗卫星作为数据传输信道,实现捕捞日志的填写、上报与统计分析。

(2)限额捕捞管理:综合利用电子捕捞日志、船位监控、电子围栏等技术,实现专项渔捞品种的限额捕捞管理,实时对捕捞总量变化情况进行监控,针对非法作业渔船可及时发布预警并取证留存。

(3)渔获物定点上岸及溯源管理:提供渔获物定点上岸管理功能,统筹渔船、渔运船和采购方系统,实现基于电子捕捞日志、运输日志、交易日志的数据核准系统,促进“依港管渔”目标的达成;系统还提供渔获物溯源管理功能,可利用北斗短报文实现从捕捞到餐桌的全程追溯,追溯过程如图4所示。

(4)渔业电商信息服务:利用北斗短报文通信,渔业贸易双方可进行船岸间的信息共享和交易撮合,还能与渔获物上岸管理及电子捕捞日志管理功能结合,形成完整数据链条,共同为渔业电商贸易服务。



图4 渔获物溯源管理流程

(5)气象预警信息发布:系统提供天气、台风、潮汛等海洋气象信息的数值预报服务,通过北斗短报文,可进行预警发布和渔船避险管理。

2.5 北斗运营服务中心

北斗星通建成的北斗运营服务中心的互联网采用中国网通、中国电信的高速双接入的方式,使系统的地面和卫星链路全线达到双路备份,极大地加强了系统通信的可靠性,提供 24 小时不间断运营服务。

北斗运营服务中心是处理北斗数据的中枢机构,由两个互为备份的基础数据中心和若干个行业中心组成。基础数据中心负责全行业北斗数据的接收、播发、交换及行业调度。行业数据中心提供行业基础数据管理服务。基础数据中心除可以直接提供船舶综合信息服务外,还可以基于行业交换标准,为各地海洋渔业的本地数据服务中心提供数据支撑和北斗短报文播发服务。通过以上设计,实现基础与行业、行业与客户的多层级结构,同时对复杂的数据管理进行解耦,提升了系统的可靠性、处理能力与可伸缩性,系统的逻辑结构如图 5 所示。

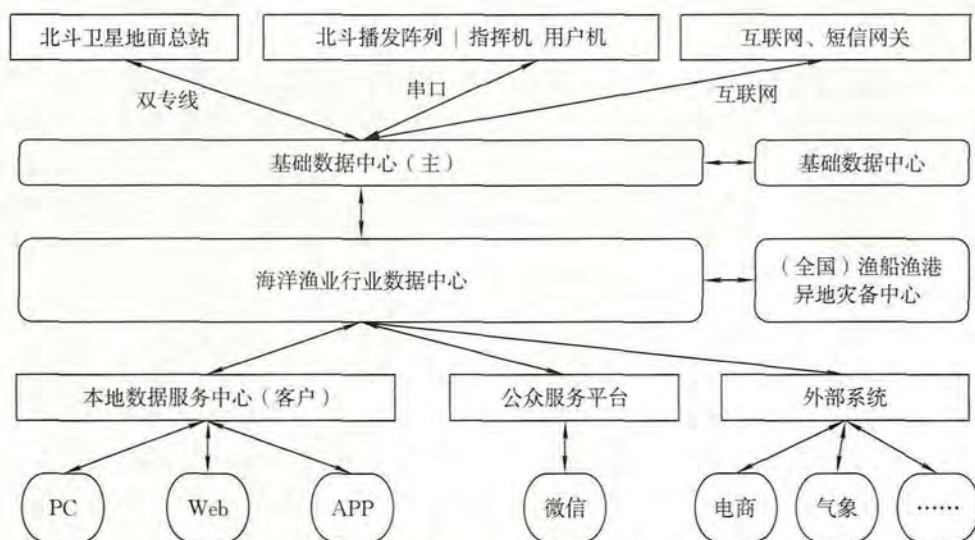


图 5 多层级数据中心结构

2.6 北斗车载终端

北斗车载终端拥有多个系列,采用模块化设计,由天线、显控(屏幕)、手写板及相关线缆组成,用户还可以选配北斗 Wi-Fi 模块、海事卫星通信底座、身份识别模块、船员救生基站模块等,以针对不同场景使用。终端支持位置上报、北斗短报文、紧急报警、防拆卸报警、进出港报告等基础功能,且在发生沉船灾难后可触发天线弹射装置,继而持续 24 小时发送沉船报警,海上搜救力量则根据沉船报警所含的位置信息组织施救。目前支持北斗三号的新型车载终端已经在设计研发中,未来可一键报警至国际搜救卫星,并提供更强大的北斗短报文功能,利用海上北斗 Wi-Fi 模块,可外接多达 20 个智能设备进行电子捕捞日志、海洋环境信息等数据的透明上传,如图 6 所示。



图 6 北斗海洋渔业车载终端

3 现有应用及产生效益

3.1 现有应用

北斗星通现有北斗用户数量约7万个,伴随机手机用户约20万个,在保障渔民生命财产安全、维护国家海洋渔业权益和促进渔业现代化管理等方面发挥了重要的作用,构建了中国最大的“北斗船联网”。

每年夏季台风,通过系统平台发布气象预警信息,指挥渔船回港避风,实时监控渔船回港情况。

“北斗船联网”已成为海上搜救工作的“利器”。系统使对遇险对象的搜寻效率提高30%以上,人命救助成功率达到98%以上,节约近1.5亿元的人身伤害赔偿费,海上碰撞事故发生率下降约90%。系统充分利用北斗链路,进行危险水域警告、台风预警等服务,渔船及时规避风险,为涉海企业和人员减少数十亿元的遇险财产损失。

3.2 产生效益

(1)保障渔民生命财产安全。系统的海上救助功能深受渔民认可,被渔民兄弟形象地比喻为“海上的保护神”,称为“千里眼”和“顺风耳”。

(2)维护国家海洋权益。中国渔政肩负维护我国海洋权益重大责任。系统在维护我国南沙主权权益、渔船越界捕捞事件中都发挥了重要作用。

(3)促进渔业现代化信息化管理。系统为各级渔业主管部门加强对出海渔船的规范化管理提供了科技手段。一是及时阻止渔船在伏休期非法从事捕捞生产、在台风时期冒险出海生产,也使渔船防台避灾能力有新的提高;二是使陆地和海上的信息传递、通信联络更加便捷,有利于主管部门指导海上渔业生产。

(4)提高海洋渔业信息化水平,推动海洋经济发展。利用北斗短报文通信功能,使海上与陆上通信联系渠道变得通畅、便捷,可获得天气、海浪、赤潮、鱼汛、渔市价格等增值信息,促进海洋渔业生产、交易的集团化和规模化发展。

4 发展前景及展望

4.1 发展前景

(1)国家大力支持渔业科技现代化装备。国家将构建一批新型系统模式,研发一批先进设施装备,来有效提升渔业装备精准化、信息化水平。构建深远海“养-捕-加”相结合、“海-岛-陆”相结合的渔业生产模式,形成规模化、工业化的深蓝渔业生产体系,为渔业转型升级、调整产业结构、可持续发展提供有力的技术支撑。

(2)各类船舶特别是近海渔船导航需求旺盛。目前,“北斗船联网”已为中远海渔船、执法船、工程船、运输船、游艇、大帆船等各类船舶提供了运营管理服务。随着北斗三号提供全球服务,未来市场除扩展至远洋渔船及国际商船领域外,北斗三号高精度定位导航服务也将在近海渔船、智慧渔港服务等领域大显身手。

(3)加大力度支持北斗导航卫星系统在海洋渔业应用。渔业船舶导航、渔业生产信息服务、渔业船舶管理、渔业船舶安全救助、渔业资源研究、渔业水域环境监测、渔场环境及生态综合信息的采集与传输等环节都需要卫星技术的支持,建议加大对基于北斗三号的海洋渔业的支持力度,加大对北斗三号终端设备的推广、技术融合创新、系统开发升级扩容,并支持研发自主芯片化产品,服务渔业市场。

4.2 展望

北斗星通自主研发开发了一系列北斗船载终端产品,可服务于行业监管、科学研究、海上文体及涉渔

公众,随着北斗三号全球覆盖及国家“一带一路”倡议推进,将助力新一代“北斗卫星海洋渔业综合信息服务系统”转型升级,成为“国家名片”,将在更大领域发挥更多更好的效能。

2000年9月,北斗星通伴随我国第一颗北斗卫星发射而创建,秉持“共同的北斗、共同的梦想”理念,20年发展历程紧扣北斗系统“三步走”战略。面向未来,北斗星通“云+IC/端”将实现国产自主北斗“芯”产品面向智能网联及大众应用;构建新型“云”平台,提供北斗三号新兴高精度应用服务;智能网联业务将实现北斗与先进技术和应用场景融合,以北斗核心芯片及关键技术为核心基础承载,与智能网联、生物识别、5G通信、大数据、云服务等技术融合,形成“北斗+智能网联及云服务平台”的规模化产业生态。

参考文献:(略)

作者简介:周儒欣,男,1963年生,北京北斗星通导航技术股份有限公司董事长兼总裁,中国卫星导航定位协会副会长,曾获“中国自主创新领军人物”“北斗风云成就奖”等荣誉。

从协同到融合

——航天宏图导航与遥感双擎发展之路

任 凌,刘东升

(航天宏图信息技术股份有限公司,北京 100195)

摘 要:卫星导航、卫星遥感是卫星应用的两个重要领域,在各自的垂直领域都开创出一片天地,具有鲜明的应用特点及用户群体,但彼此之间发展并不均衡,尤其在我国这一问题尤为突出。随着北斗三号系统卫星组网完成,将催生 4 000 亿投资空间,能否从中切到一块蛋糕,不仅需要从业者努力发掘垂直领域的应用,还要开阔视野,让北斗与遥感、通信、AI、低轨通信等新兴技术彼此赋能,从平台、服务、数据、应用、终端等不同层次深度融合,才能真正做大做强卫星应用产业。作为国内领先的卫星应用服务商,航天宏图在这方面进行了一些有益的尝试,并规划了未来的技术路径,真正让卫星应用服务于大众的日常生活。

关键词:北斗;遥感;通导遥;协同;融合

1 引 言

2020 年 6 月 23 日,北斗三号导航卫星系统最后一颗组网卫星从西昌卫星发射中心成功发射升空,标志着北斗三号已经完成星座组网,即将正式提供服务。并将进一步催生 4 000 亿元投资空间,要从中抢占先机,融合与跨界应用就显得尤为重要,尤其是卫星应用领域协同融合,需要在导航、遥感等各自垂直应用的基础上,进行充分协同甚至最终融合,以实现更大范围、更深层次的融合应用,真正造福人类。

2 卫星应用现状

信息技术产业即将进入空天信息时代,空天信息资源已经成为各个国家的重要战略资源。以卫星通信、导航和遥感为代表的卫星应用已在各自的垂直行业得到广泛的应用,构成各自垂直领域的应用体系。在我国,卫星应用的整体规模和应用效果与发达国家相比仍有不小的差距,存在发展不均衡、大众应用门槛高、体系融合不足等问题。随着国民经济飞速发展和各类新兴技术的普及,我国对空天信息也提出更高层次的需求。不论是覆盖范围、处理速度甚至对用户的服务模式,都发生着深刻的变化。要实现天基信息全天时、全天候、全地域服务于每个人的目标,从根本上解决现有天基信息系统覆盖能力有限、响应速度慢、体系融合能力弱的问题,亟须构建更强大的卫星通信、导航、遥感一体卫星应用服务体系。

2.1 北斗导航卫星系统发展现状

北斗系统是我国出于自身战略考量和基于国民经济建设需求发展建立的卫星导航系统,是国家重要的时空基础设施。经过“三步走”发展,北斗三号系统服务范围已经从区域扩展到了全球,性能达到国际先进水平,多项全新功能、性能及信号体制的开发与完善,使得全新的北斗系统能够为用户带来诸多激动人心的变化,可提供高品质的定位、导航、授时、短报文、搜救、增强及 PPP 等服务,如图 1 所示。由于具备区域和全球短报文通信功能,因此北斗系统本身就在一定程度上具备通导一体的能力。

在一系列新体制、新标准、新技术的引领下,北斗三号不仅实现了全球覆盖,其功能也得到了极大地丰富与提升,例如区域短报文通信能力提升了近 10 倍,针对海事应用增加了全球短报文功能。以前做不了的,不敢做、不敢想的,现在已经不是问题,这些功能特性甚至会颠覆我们以往对北斗系统应用的认识。

随着 5G 商用时代的到来,北斗正在与新一代移动通信、区块链、人工智能等新技术加速融合,北斗应用的新模式、新业态、新经济不断涌现,必将深刻改变人们的生产生活方式。

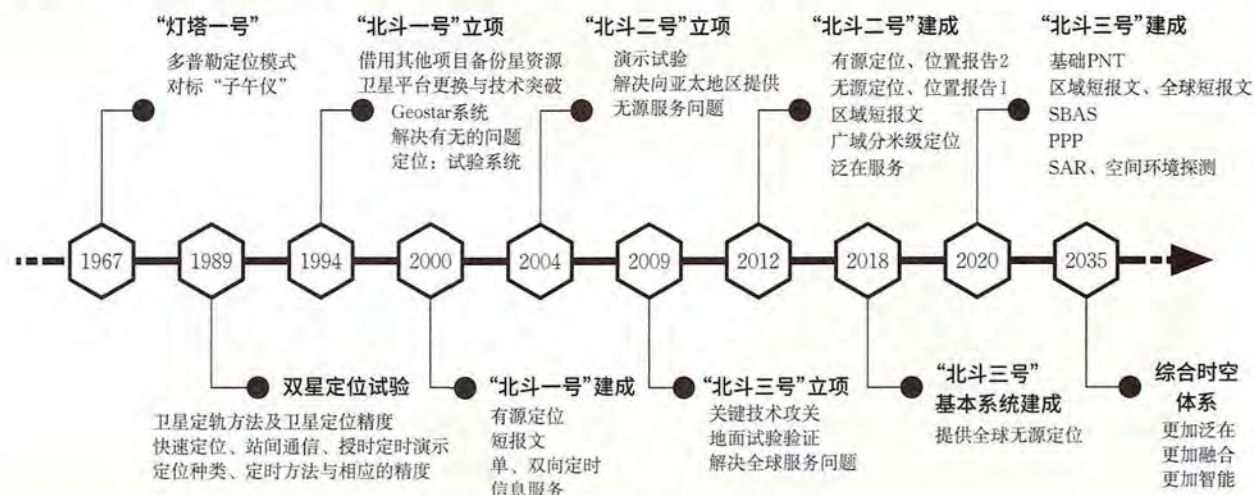


图1 我国导航卫星系统的演进发展

中国卫星导航定位协会最新发布的《2020 中国卫星导航与位置服务产业发展白皮书》显示,2019 年我国卫星导航与位置服务产业总体产值达 3 450 亿元,随着“北斗+”和“+北斗”应用的深入推进,北斗创新应用已经深入融合到许多产业的转型升级发展中,各个行业推动“+北斗”发展,逐步开拓形成企业新增业务,成为产业新生力量。

由于微波通信固有的问题,卫星导航信号非常微弱,极易受到干扰和欺骗,而且在高楼林立的大城市和森林密集的特殊地区,导航信号又易受遮挡,因此北斗三号系统全面建成后,如何基于卫星导航系统构建综合时空体系,将是北斗系统建设者要重点解决的下一个问题。

2.2 我国遥感技术发展现状

我国遥感应用的发展大体可以分为萌芽期(1972—2000 年)、追赶期(2000—2010 年)和自主创新期(2010—至今)三个阶段,国内遥感应用市场也由萌芽期的以国外遥感数据及处理软件占据垄断地位逐步



图2 卫星遥感系统的演进发展

发展成现阶段的国内遥感数据及软件占有重要市场份额,如图2所示。现阶段,我国通过高分专项和民用空间基础设施中长期发展规划等战略性工程推动国产遥感卫星自主创新性发展,使整颗遥感卫星的实现自主率极大提高。资源三号、高分一号至高分七号及北京一号/二号、欧比特等商业遥感卫星星座的不断成功发射,国内卫星制造能力不断提升,使我国跻身于世界遥感科技强国的行列。与此同时,国产遥感数据水平的显著提升,也使得遥感图像处理软件的发展达到一个新的高度。以云计算、大数据、人工智能为代表的新技术为遥感图像处理注入了新的活力,也为实现卫星数据的大规模自动处理和智能信息提取提供了创新技术手段,对于深入挖掘数据价值、促进遥感应用新型生态圈的形

2.3 卫星应用融合发展是大势所趋

2016年5月30日,国家主席习近平在两院院士大会上强调:“必须推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展。”推动以天基信息服务为代表的卫星应用技术发展,应以空间应用为抓手和突破点,带动中国空间科学、空间技术的创新发展,进而全面提升中国空间科技的创新能力。作为重要空间基础设施的卫星导航,与遥感的融合一马当先。在长期的摸索和实践中我们发现,只有充分开展“通导遥”(通信、导航、遥感)一体化的设计与应用,才能真正做大做强卫星应用产业。这既是我国抢占国际竞争战略制高点的重大机遇,也是我国航天事业做大做强、推进大众化应用的迫切需求,更是推动形成我国天基信息商业化大众服务格局的基础条件。

3 卫星应用融合发展的技术路线

卫星应用融合发展涵盖两层内容:一是解决各自专业领域内的融合问题;二是解决“通导遥”一体化的跨界融合问题。再进一步,随着 AI、卫星互联网、边缘计算、AR/VR 等新兴技术的出现,必将还存在一个更大范围、更大规模、更深层次的融合,最终让卫星应用不再是遥不可及、高大上的应用,而是实实在在地走进每一个人的日常生活,并改变我们的生活。

3.1 垂直应用领域的整合

3.1.1 导航实现以北斗为核心地综合 PNT 体系构建

构建以北斗为核心的综合 PNT 体系是导航系统的融合发展方向,主要目的是确保 PNT 服务的可用性、连续性、可靠性、完好性、稳健性,基于统筹、融合、协调原则,实现全空域、全时域、全信息、高可靠的使用要求,为用户提供无处不在、无时不在的 PNT 服务。需要实施多技术融合增强、多手段补充和备份系统建设,建成基准统一、覆盖无缝、安全可信、高效便捷的北斗综合 PNT 体系,满足国家安全、经济社会时空信息保障需求。解决卫星导航定位的用户痛点。

3.1.2 遥感实现“天空地”一体化协同观测与众源融合体系构建

天空地多源遥感数据融合包括空间融合和信息融合,其中空间融合可以实现多传感器数据在空间上的严格对齐,信息融合则是对空间融合后的多源数据按照一定规则(或算法)进行运算处理,获得比任何单一数据更精确、完整、有效的信息,如图 3 所示。相比于单一数据来源,多源遥感数据融合具有明显的优势,可以提高数据来源的完整性和可靠性,可以提高目标检测和识别的准确性,可以提高变化检测和更新的能力。

3.2 “通导遥”一体化的整合

3.2.1 3S 协同阶段

通过不同层级、不同尺度、不同视角及多种现代科技融合的方式来解决生态环境保护、林业管护、应急管理、灾害监测等领域内的问题。推出“四位一体”的科技监测与防护手段,充分利用卫星遥感宏观性强、无人机监测机动性强、地面视频监控时效性强、北斗巡查真实性强的特色,发挥各个系统的最大优势,协同解决问题。

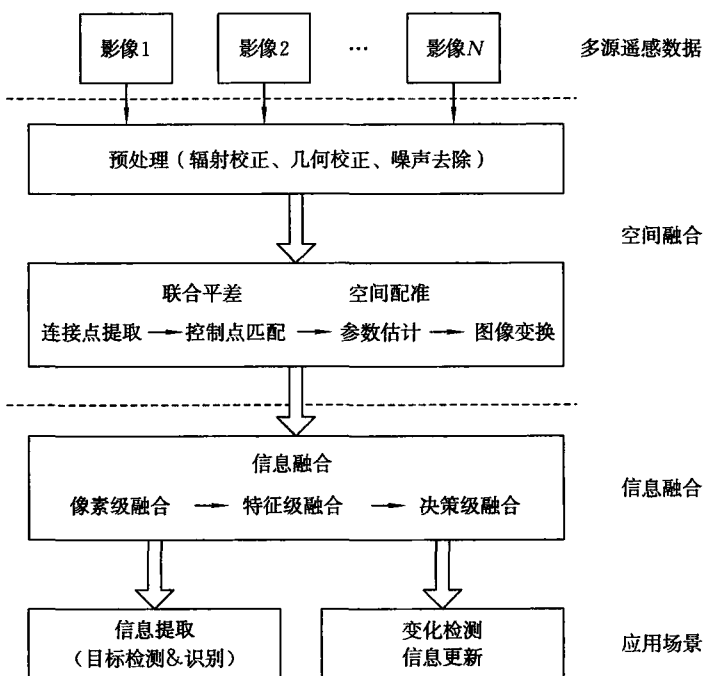


图3 “天空地”一体化协同观测与众源融合遥感处理体系

同时随着计算机和空间技术的发展,根据信息共享的需要及地球空间与生态环境数据的空间分布式和动态时序等特点,客观上进一步推动 3S 领域的一体化进程。卫星导航为遥感对地观测提供实时或准实时的定位信息和地面高程模型;遥感为地理信息系统提供自然环境信息,为地理现象的空间分析提供定位、定性和定量的空间动态数据;地理信息系统为遥感影像处理提供辅助,用于图像处理时的几何配准和辐射校正、选择训练区及辅助关心区域等。在环境模拟分析中,遥感与地理信息系统的结合可实现环境分析结果的可视化。3S 一体化将最终建成新型的地面三维信息和地理编码影像的实时或准实时获取与处理系统(图 4)。

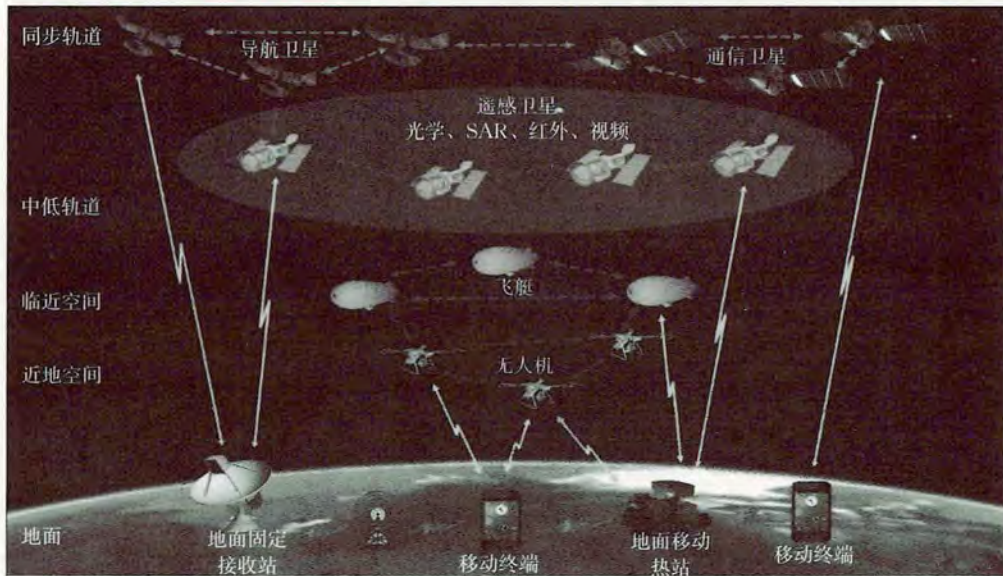


图 4 3S 一体化融合发展路线

3.2.2 全面融合阶段

基于互相赋能的基本思考,“通导遥”一体化发展的最终阶段将从平台、数据、信息、应用和服务等各个层面进行深度融合,通信、导航、遥感在各个层面的边界已经不再清晰,通过卫星遥感、通信与导航应用技术的集成创新,带动以实时位置服务为代表的天基信息增值服务产业的发展,在更大范围及更微观粒度上获取目标信息,为事物、事件乃至社会某个方面的演化提供检测、监控、辅助决策服务。

笔者认为,卫星应用的融合应该着力解决从数据服务向信息服务的转变,从半自动化向智能化的转变,从单一向“空天地海”一体化的转变,从事后处理向实时推送的转变,从专业化应用向大众化服务的转变,从集群式向云服务的转变,最终实现从垂直领域向一体化交叉领域的转变,如图 5 所示。



图 5 “通导遥”全面融合发展路线

4 航天宏图在卫星应用领域的融合发展

航天宏图信息技术股份有限公司凭借多年技术积累,紧抓导航发展机遇,汇聚各路英才,集智攻关,深

度参与了北斗导航卫星系统工程的建设,先后承担了北斗数据管理、导航信息服务、性能分析评估等多个系统建设任务,致力于解决导航时频数据管理与应用、系统服务性能监测评估,全面提升北斗信息泛在服务能力。包括北斗在内的任何卫星系统建设的出发点和落脚点都在应用,有人说“现在北斗应用才真正开始”。作为北斗导航领域的后起之秀,笔者深以为然,也在奋力深度参与其中,期望通过我们的努力,为北斗带来更多的应用成果、更丰富的应用产品和更精准的时空服务,为卫星应用科技的进步与发展做出更大贡献。

作为国内领先的卫星应用服务提供商,凭借在卫星应用领域多年技术积累,我们以地理信息系统为载体,制定了北斗、遥感双引擎协同发展战略规划,紧跟云计算、大数据、AI、物联网技术趋势,打造“宏图位智‘通导遥’一体化空间智能体系”。在全力为客户做好卫星导航和遥感等方面的垂直应用解决方案外,我们更注重各种卫星资源整合体现出来的效能。笔者认为只有充分开展“通导遥”一体化设计与应用,才能真正做大做强卫星应用产业。目前重点融合北斗卫星定位、卫星遥感、地理信息系统、无线通信与大数据分析等高新技术,以北斗、遥感与其他信息技术协同集成方式为客户提供全面解决方案,与此同时我们紧跟 AI、物联网、LEO 低轨卫星等技术趋势,依托公司长期积累的卫星应用技术和参与北斗系统、风云气象系统、海洋卫星系统建设的工程经验,并结合公司遥感、导航、气象、海洋、减灾、环保等产品在各行各业应用的客户优势,大力拓展导航应用市场,提供“通导遥”一体化空天信息实时智能服务与解决方案,实现全域感知、综合可视、科学决策、智能管控,将业务拓展到城市治理、社会管理、气象服务、海洋权益、水利水务、减灾防灾、环境保护、能源管理、安全保障、金融电力等广大领域。

5 总 结

业内常说,“北斗应用只受想象力的限制”,但这是有前提的。因为北斗本身并不能解决太多问题,但是北斗能够与很多新技术、新体制相互赋能,进而发挥出更大的作用,突破我们的想象力。即“北斗+”、“+北斗”,特别是北斗正在与新一代 5G 移动通信、低轨卫星通信、人工智能、物联网等新技术加速融合,从而产生出北斗应用新模式、新业态、新经济。航天宏图作为北斗导航领域为数不多的能够实现北斗、遥感双引擎协同发展的资深卫星应用服务商,努力挖掘与探索北斗与遥感应用在这些方向的技术路线,并更加深入地推进“通导遥”更大程度、更大范围、更加广义的融合,借助北斗系统和商业航天所带来的发展机遇,真正让卫星应用服务于大众的日常生活。因为我们公司的使命是“科技改变世界,遥感走进生活”,这也是我们的社会责任所在。

参考文献:(略)

作者简介:任凌,男,1975年生,航天宏图信息技术股份有限公司副总经理、首席品牌官,具有卫星导航 20 年以上的从业经历。

国际卫星导航定位基准站网建设的政府逻辑分析

薛超,陈熙

(自然资源部测绘发展研究中心,北京 100036)

摘要:卫星导航定位基准站网作为重要基础设施已经进入经济社会发展主战场。本文首先从世界主要国家卫星导航定位基准站网建设的管理体系、应用领域、合作机制、战略部署等方面分析了某些国外政府在利用卫星导航定位基准站网资源中的政府逻辑和角色定位;然后总结提炼了某些国外政府在开展卫星导航定位基准站网建设中的主要特点和逻辑;最后对比我国卫星导航定位基准站网建设现状,对下一步更好利用基准站网资源提出三点建议:一是持续发挥卫星导航定位基准站网在维护国家空间基准体系中的作用;二是完善法律法规技术标准推动站网建设中的北斗应用;三是探索政府与商业合作模式发挥站网资源价值。

关键词:卫星导航定位基准站;自然资源;测绘地理信息;基础设施

1 引言

卫星导航定位基准站是对卫星导航信号进行长期连续观测,并由通信设施将观测数据实时或定时传送至数据中心的固定观测站。当前,基准站网的应用领域已经从测绘、导航定位、地质灾害监测扩展至自动驾驶车路协同、精准农业、城市基础设施自动化监测等领域。基准站是组成国家空间参考基准体系的重要基础设施,世界主要国家非常重视基准站的发展建设,并在法律体系、合作机制上开展了先行探索。国内方面,政府和企业建立的全国性基准站网在开展高精度定位服务领域越来越深入,位置信息与5G、大数据的融合应用更加多元,但国内基准站网也出现了重复建设、缺乏统筹的情况。研究国外政府在基准站网建设中的政府逻辑与角色定位,可以为下一步更好统筹利用站网资源打好基础。

2 世界某些国家和地区卫星导航定位基准站网建设现状

2.1 发达国家卫星导航定位基准站网建设情况

发达国家近年来建立了多个国家级卫星导航定位基准站网络,如表1所示。美国商务部下属的国家大地测量局统筹建立了全国性连续运行基准站(CORS)网络,目前正常运行站点1883个。美国CORS网采取各部门和各州分别建设运营、美国国家大地测量局统筹站网资源的方式建设。联邦地质调查局、各州交通和地质部门、大学及研究机构是站点主要承建单位。应用领域主要集中在测绘、地质和地壳监测等传统公益领域,商业化应用和位置智能应用较少。法律体系上,美国国家大地测量局编制了CORS站建立和管理导则,并按需将符合要求的CORS站纳入国家站网网络。联邦部门和各州也出台了规定,对测绘等工作中CORS站的应用进行了规范约束,例如美国林业局规定进行地籍测量应当使用CORS站进行参考,得克萨斯州运输部规定从事测绘活动时应当考虑将CORS站作为参考。

英国采取政府机构和企业合作开展差异化CORS服务的思路。英国军械测量局建立并管理全国CORS网络OS Net。该网络目前拥有115个站点,主要功能是维持国家测绘基准、开展测绘活动、支持工程项目建设。OS Net免费对用户开放,本身不开展商业化运营。英国军械测量局通过合作将OS Net原始数据提供给Leica、Trimble等商业公司,由这些公司向客户提供厘米级高精度商业服务。

日本政府在建立全国 CORS 网络的同时也积极与商业公司开展合作。为开展地震监测与预报、工程控制与监测、测绘业务、气象监测与预报等业务,日本国土地理院牵头建设了全球密度最高的 CORS 站网 GEONET,可以做到地震秒级实时响应。目前站网共有 1 318 个站点,站点间隔为 20 千米。应用服务方面,日本国内外用户可通过申请免费获取日本 GEONET 数据。国土地理院与 TERASAT 公司、日本 GPS 数据服务公司(NGSC)和 JENOBA 等公司合作,授权公司利用 GEONET 数据开展更精准多元的商业应用服务。法律体系上,日本测绘相关法律没有明确国家 CORS 站网的法定地位。国土地理院在长期战略规划中提出将 GEONET 网络建设、多模卫星环境兼容、站网商业化合作和利用 GEONET 开展得灾防护作为“掌握日本地理国情向公众提供相关信息”的战略举措。

表 1 世界某些国家和地区卫星导航定位基准站网建设情况

国家和地区	系统名称	站点数量	建设管理主体	主要应用领域
中国	全国卫星导航定位基准站网	2 700	各地自然资源主管部门和地震、气象等机构建设,自然资源部负责管理备案	测绘、土地调查、地震等领域
国际组织	国际 GNSS 服务基准站网	400	国际 GNSS 服务组织	开展大地测量、地球物理研究
美国	美国国家 CORS 站网	1 883	主要由美国交通管理和地质部门、商业组织、大学及研究机构等共同建设(数据向合作组织开放),美国国家大地测量局领导和管理	开展测绘领域差分定位、地壳形变、大气层监测,智能化位置服务应用较少
英国	OS Net	115	英国军械测量局建设运营,授权企业应用	维持国家测绘基准、开展测绘活动,授权 Leica、Trimble 等公司获取原始数据开展市场化服务
日本	GEONET	1 318	日本国土地理院牵头建设运营管理	地震监测与预报、工程控制与监测、测绘业务等,与 TERASAT 和 JENOBA 等公司形成合作,授权公司开展更精准多元的商业应用服务
澳大利亚	澳大利亚和南太平洋区域 GNSS 网络	100	澳大利亚地球科学局负责建设管理	维持澳大利亚空间基准体系和开展地壳活动监测等公益性活动
	CORSnet-NSW	206	新南威尔士州政府负责建设管理	测绘、农业和建筑领域,与 AllDayRTK、Hexagon、Trimble 等形成合作关系
澳大利亚	Vicmap GPSNet	70	维多利亚州环境、土地、水与规划局负责建设管理	测绘、地质服务和提升政府管理能力,与 AllDayRTK、Hexagon、Trimble 等形成合作关系
印度尼西亚	IPGSN 网络	51	印度尼西亚国家测绘局	维护空间基准,开展测绘、土地管理工作
中国香港	香港卫星定位参考站网(SatRef)	18	地政署测绘处负责建设管理	开展高精度定位等商业应用
中国台湾	e-GNSS 即时动态定位系统	184	国土测绘中心与地震测报中心等机构联合建设运营	地震监测、高精度定位等
印度	筹建中	0	印度测绘局	无

澳大利亚国家和各州 CORS 网属于独立建设运营,企业在整合国家、州站网资源的同时建设商业 CORS 网络提供服务。澳大利亚地球科学局在澳大利亚及南太平洋地区设立了由 100 个 CORS 站组成的公益性服务网络 ARGN 和 SPRGN,主要作用是维持澳大利亚空间基准体系和开展地壳活动监测等。在州层面上主要有新南威尔士州建立的用于测绘、农业和建筑领域的 CORSnet-NSW(206 个站点)和维多利亚州环境、土地、水与规划局建立的用于测绘、地质服务和提升政府管理能力的 Vicmap GPSNet(70 个站点)。法律体系上,昆士兰州、新南威尔士州在开展地籍测绘导则中强调必须使用现有 CORS 站

网资源。澳大利亚各州政府与 AllDayRTK、Hexagon、Trimble 等服务商形成合作关系,允许公司使用政府 CORS 网数据并结合公司自建 CORS 网资源开展商业化服务。

2.2 其他地区卫星导航定位基准站网建设情况

我国香港地政署测绘处建设运营了由 18 个站点组成的 CORS 网络 SatRef,用于开展高精度定位相关商业应用。我国台湾国土测绘中心与地震测报中心等联合建设运营了包含 184 个基站的 e-GNSS 即时动态定位系统用于开展高精度定位。我国周边国家也在积极开展相关建设,如表 1 所示。印度尼西亚国家测绘局建立了由 51 个站点组成的国家 CORS 网络,主要用于维护国家空间基准和开展测绘、土地管理和地质灾害防护等领域服务。印度一直没有建立自己的 CORS 站网,近期正在筹建准备中。

除政府站网建设外,Hexagon、Trimble、Sapcorda 等商业公司也面向欧洲、大洋洲、亚洲的部分国家的高精度定位服务领域建立了商业基准站网络。这些公司在本土或者经济发达国家开展了针对精准农业、资产管理、施工工程、自动驾驶等高附加值领域的高精度应用服务,依托在装备制造方面的优势迅速占领国际市场,并在位置服务产业中下游提供了多元、个性的位置服务解决方案。

3 国外卫星导航定位基准站网建设中的政府逻辑

3.1 基准站网作为重要基础设施开展建设

卫星导航定位基准站网建立之初的主要目的是维护国家空间基准体系,并作为重要空间基础设施在国土空间规划、地质灾害预防等领域发挥作用。随着导航位置服务、移动互联、车联网等高附加值应用对位置信息的需求越来越密集,现代坐标基准框架在开展高精度位置服务中的作用越来越显著。可以看出,世界主要国家政府部门建设卫星导航定位基准站网的总体思路基本趋同,政府部门仍然是建设国家卫星导航定位基准站网的主要力量。政府主导利用站网开展地震监测、地壳形变监测和测绘活动等公益性活动,并出台政策法规确保基准站网的权威地位。随着技术发展,卫星导航定位基准站网不仅是各国维护空间基准体系的重要基础设施,更成为支持高精度定位和经济社会发展的一种泛在的基础设施。

3.2 围绕基准站网建设应用相关法律规划体系不断完善

各国政府对于国家级 CORS 网的建设规模、技术路线、服务模式和统筹管理方式都进行了比较明确的规范,并对未来 CORS 发展进行了准确的研判。政府管理角色突出的背后是法律法规和战略规划体系不断健全。近年来,围绕建设国家空间参考体系、最大化利用 CORS 站网资源和开展高精度应用等重点方向,美国、日本、澳大利亚等国在法律和规划上对 CORS 资源应用进行了明确,印度、印度尼西亚等国对未来国家级站网建设提出明确部署。可以看出,各国政府在利用管理角色引导国家级 CORS 站网建设和优化 CORS 资源利用效率上都进行了相应制度建设。

3.3 保证公益服务前提下商业合作开展社会化应用成为常态

移动互联、车载导航与自动驾驶、室内导航等新业态的出现促使对位置信息的需求从单纯的点需求扩展为对精密定位、智能导航等技术的需求,利用 CORS 站网开展高精度定位已经成为各国在发展高精度定位服务时选择的普遍技术路线。当前,资本市场对基准站网的建设也加大了投入力度,Trimble、Hexagon 等也已经在全球范围布局商业站网获取位置服务红利。面向社会需求,各国政府已在数据共享、基准站运营方面与商业公司开展合作,利用企业在管理运营方面的优势促进基准站更好的应用。目前,美国、英国、日本、澳大利亚政府都已经与商业机构开展合作,利用政府建设的基础设施结合商业站网资源在高精度定位、自动驾驶、精准农业等领域开展增值服务。

4 思考与建议

4.1 持续发挥基准站网在维护国家空间基准体系中的作用

我国卫星导航定位基准站网作为现代测绘基准体系中的重要基础设施,在基准站数量、密度、地区差异、整体应用能力上仍然与先进国家有一定差距。卫星导航定位基准站网是各国政府非常重视的基础设施,其重要性已经在应急、防灾、国防和自然资源领域中充分体现。建立统一的卫星导航定位基准服务系统不仅是《测绘法》的明确要求,更是新时期开展自然资源公共服务的立业之基。在高精度位置信息需求不断扩展、商业站网加速建立的现实基础上,仍需要确保国家卫星导航定位基准站网在维护国家空间基准体系方面的权威地位,继续做好站网加密、自主可控、应用能力提升和相关法律法规完善工作,充分发挥好基准站网在关键领域的保障能力。

4.2 完善法律法规技术标准推动站网建设中北斗应用

随着北斗三号系统完成全球组网,北斗卫星导航系统已经全面具备提供全球服务的能力,能够在包括“一带一路”沿线国家的全球任何一个地方提供高质量北斗服务。目前,我国卫星导航定位基准站网政策标准仍然缺乏统筹规划,对北斗卫星导航系统应用不充分,测绘基准坐标系仍然采取单 GPS 信号路线。北斗在构建空间基准体系方面的重要作用没有完全发挥。此外,北斗在境外提供高精度服务所必需的海外基准站建设尚未落地,国外自主可控基准站建设基本空白。政府应当在引导我国自主可控导航定位系统在基准站网建设应用中发挥更大作用,将站网资源采用北斗解决方案明确写入相关法律法规,通过完善卫星导航定位基准站相关标准体系带动北斗在高精度位置服务中的应用。

4.3 探索政府与商业合作模式发挥站网资源价值

目前,千寻位置网络有限公司、中国移动通信集团公司等企业在国内开展了全国性商业站网建设,并在智慧农业、电力巡查、建筑施工等领域取得了较好应用。全国卫星导航定位基准服务系统已经建设多年,拥有较好的专业服务经验,但是在提供社会化服务方面还需连通各地资源、统一平台标准。商业站点资源与全国卫星导航定位基准服务系统建设存在缺乏统筹、重复建设的问题。可以看出,为促进高精度位置智能应用,政府与企业开展站网数据资源合作已成为大势所趋。企业在运用盘活资源、开展增值服务方面有着先天优势。下一步为更好发挥卫星导航定位基准服务系统作用,政府应当主动转变思路,统一调配省级站网资源,加快研究全国卫星导航定位基准服务系统企业化运行的技术路线,探索将相关数据资源主动提供给有能力的企业开展增值服务的模式,允许卫星导航定位基准站网资源更好地服务经济社会发展。

参考文献:(略)

作者简介:薛超,男,1991年生,自然资源部测绘发展研究中心助理研究员,从事测绘地理信息战略研究和国际测绘地理信息发展跟踪研究。

美国综合 PNT 体系及其对北斗系统建设的启示与思考

郭强, 蒋超, 谭周正

(61920 部队, 四川 成都 610505)

摘要: GPS 在深度服务各领域的同时, 自身弱点也愈加突显, 已经成为影响美国国家安全和经济发展的重要设施。为降低对 GPS 的依赖, 美国从 2010 年开始构建旨在降低 GPS 核心地位、融合多信息源的综合 PNT 体系。2019 年 8 月, 美国国防部发布最新版的《国防部定位、导航与授时体系战略》报告, 重申了这一立场。本文通过解读报告内容、分析美国综合 PNT 体系的主要优势和特点, 对建设我国的北斗卫星导航系统提出建议。

关键词: GPS; 综合 PNT 体系; 多信息源; 北斗卫星导航系统

1 引言

伴随全球定位系统(GPS)的广泛应用, 其弱点也愈发突出, 总体来说, 就是信号弱、易受干扰、穿透能力差, 这在一定程度上影响了美国应用定位、导航、授时(PNT)信息的安全。因此, 美国一直在努力构建具有统一架构和标准并融合各类来源不同、原理不同的多信息源的综合 PNT 体系, 用以支撑美国在该领域的领先地位。综合 PNT 体系建设的核心是降低 GPS 的主导地位, 强调信息的冗余性和原理的多样性, 通过深度融合 GPS、地基无线电、惯性导航等信息源, 以集成多类型传感器等的方式提高 PNT 服务的抗欺骗、抗干扰、连续服务等能力。

2 美国综合 PNT 体系的目标

作为全球科技创新中心, 美国在 GPS 广泛应用后, 通过 PTA 等计划的实施, 逐步建立了以 GPS 为基础的综合 PNT 体系, 改善了 PNT 体系的安全性、连续性, 也强化了美国在联合作战中的信息优势。图 1 为 PNT 体系在联合作战中发挥作用示意。

根据《国防部定位、导航与授时体系战略》, 美国的综合 PNT 体系包括信息来源、分配使用和管理、信息综合应用以及导航战中的 PNT 体系等内容。其建立目的主要有以下三个方面:

- (1) 保护本国及合作方对 GPS 及其他 PNT 服务的军事应用安全。
- (2) 阻止非合作方使用 PNT 对美国及其盟友实施打击。
- (3) 保持 GPS 在民用领域正常提供 PNT 服务。

2.1 保护本国及合作方对 GPS 及其他 PNT 的军事应用安全

获取稳定、有效、安全的 PNT 服务对于国民经济建设和国防军事安全, 尤其是部队任务执行中的指挥控制、态势感知等具有重要作用。因此, 美国要始终保持在获取 PNT 信息上的优势地位, 支援其在全球的军事行动。

2.2 阻止非合作方使用 PNT 对美国及盟友实施打击

随着 PNT 系统的广泛应用, 非合作方对它的使用已经越来越熟练, 并开发了具有独立知识产权的 PNT 系统。美国在保持自身能力的同时, 要具有阻止非合作方使用 PNT 服务的能力, 降低非合作方的信

息作战能力。图 2 为美国军事行动各阶段的 PNT 目标。

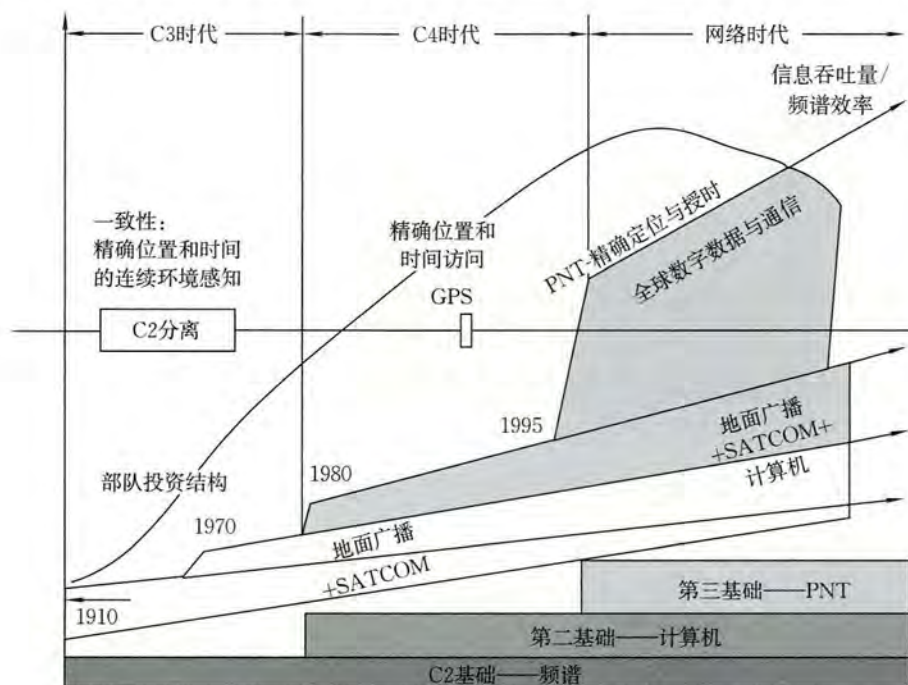


图 1 PNT 体系在联合作战中发挥作用示意



图 2 美国军事行动各阶段的 PNT 目标

2.3 保持 GPS 在民用领域正常提供 PNT 服务

鉴于 GPS 在经济社会发展领域的广泛应用,美国已充分认识到它的巨大价值,并努力将导航战的影响限制在军事领域,尽力保持 GPS 在交战区以外的地区提供民用服务。

总的来说,美国 PNT 体系的目标就是确保美国在需要的地区令对手无法接收 PNT 服务,而在其他区域依然发挥作用。这与 GPS 联合计划办公室于 1996 年提出的导航战的作战概念和目标一脉相承。

3 美国综合 PNT 体系的组成和功能

作为空间信息系统的重要基础设施,GPS 是综合 PNT 体系的核心力量,尤其是在国防军事领域的广泛应用已经改变了传统的作战样式和作战理念。但美国高层也逐步认识到对 GPS 的过度依赖会导致国家安全行为的可靠性和安全性下降,于是从 2010 年开始谋划建立国家综合 PNT 体系。为更好地发挥综

合 PNT 体系的独特优势,美国试图建立一个区分层级的 PNT 体系架构,由全球、区域、本地信息源共同组成。

(1)在综合 PNT 体系全球层中,其核心是基于空基或天基系统,提供覆盖全球的 PNT 服务体系。在军事应用上,通过强化保密通信、信号重构等技术优势增强其抗干扰能力。

(2)在综合 PNT 体系区域层中,其核心是信息来源更加广泛,服务重点区域。其信息来源多样,例如极端恶劣环境下的空间、时间及定位信息可作为 GPS 的潜在补充,防止重点区域因 GPS 不可用而导致灾难性后果。

(3)在综合 PNT 体系本地层中,其核心是服务地区更小,兼容开放程度更高,利用一切可以利用的信息源,如互联网、地基增强等,以实现最好的服务。

4 美国综合 PNT 体系的主要特点和优势

4.1 降低 GPS 的核心作用,逐步解决对 GPS 的过度依赖

由于 GPS 的自身属性和天然劣势,在极端恶劣情况下,用户极有可能因为卫星故障、信号干扰等原因而无法接收 PNT 信息,最终引发灾难性后果。外加 BDS、Galileo、GLONASS 等系统的快速发展,GPS 一枝独秀的局面面临挑战。综合 PNT 体系利用统一架构和标准融合 GPS、地基无线电、惯性导航、天文导航、激光导航等信息源和多种传感器,可以提高 PNT 服务的可靠性和连续性,保持美国的领先地位。

4.2 注重顶层设计以形成开放包容的体系架构

美国非常注重系统的顶层设计,通过系统融合、统一标准、模块化接入等方式建立开放包容的体系架构,信息源使用将更加灵活。图 3 为美国海军天文台对不同军事区域进行时间分配的应用流程,可以看出其大量使用模块化方法来融合各类信息,用以支持美军的行动。

美国将 PNT 技术思路由系统组合逐渐转向系统融合,更加注重系统间的信息整合,而且加强顶层规划,提高多系统融合后的整体合力。一是努力建设不同系统的接口、性能、服务等标准体系,以实现即插即用的综合 PNT 体系结构;二是统一各系统的时间、空间坐标框架,与世界标准同步,并努力维持其长期性;三是设立业务牵头部门,统一管理、协调业务建设,并管理地磁场、重力场等数据资源,防止令出多门导致力量分散。

4.3 利用体系构建牵引技术创新,催生了一批颠覆性技术成果,确保了美国的科技领先地位

美国通过综合 PNT 体系的实施加速了新型导航卫星技术、适应性导航技术等尖端科技的发展,有效带动了相关技术的发展进步,进一步巩固了美国在 PNT 领域的领先地位。

一是促进了美国导航技术卫星的研发。2018 年 3 月,美军航天飞行局开始发包新式导航技术卫星-3 (NTS-3)的研制合同。该合同是美军自 NTS-2 之后 40 年来首次进行的新型卫星导航技术任务,重点验证弹性、分散式 PNT 的能力。该类型卫星计划于 2023 年发射,旨在测试具有新技术的空间设备,包括可在轨重新编程的数字信号发射器、新式相控阵天线等。

二是加速发展了适应性导航技术。为解决 GPS 易受干扰和极端环境下无法获取服务的问题,美国国防高级研究计划局(DARPA)提出“适应性导航系统”(ANS)。该计划的提出有效推动了美国在“精密惯性导航系统”(PINS)和“全源定位和导航”(ASPN)方面的技术发展。

三是加快了可靠定位、导航和授时等独立性更强的 PNT 体系的构建。在国防部的指导下,美国陆军开展了“可靠 PNT”(APNT)技术研究,并于 2017 年成立了 APNT 跨职能团队,2018 年 1 月批准了 APNT 跨职能团队的技术路线图。从公开发布的资料可知,该团队的“可拆卸可靠定位、导航和授时”“安装的可靠定位、导航和授时/抗干扰天线系统”和“伪卫星”等项目可以有效提高美军单兵、车辆装备等作战要素的 PNT 使用效率和质量。

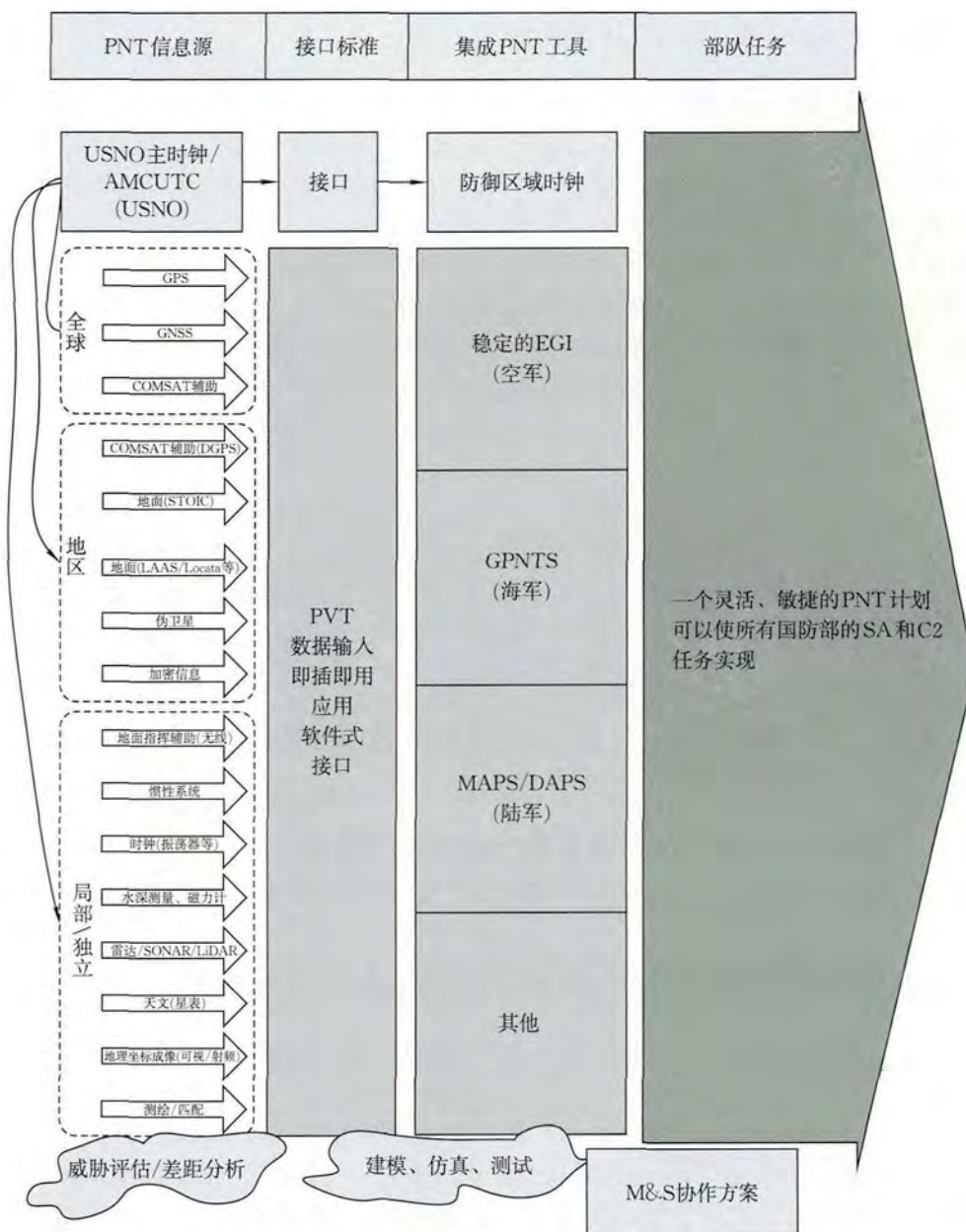


图3 美国海军天文台提供时间分配应用流程

经过长时间的政策引导和科技创新,长期以来围绕GPS建立的多技术、装备并存但无法融合统一的现象逐渐消失。可以预见,美国努力建设得更加稳健、互补、可靠、弹性的国家综合PNT体系将具有更大的信息优势。

5 对我国北斗系统建设的启示与思考

作为国家核心信息基础设施,北斗卫星导航系统是服务于国计民生、外交国防的重要依托,也是我国建立综合PNT体系的核心设施。比起美国导航卫星系统,综合PNT体系的建设,我国虽然发展快,但毕竟起步晚,配套建设、体系完善还有一定差距。美国PNT体系发展的有益经验,对建设我国的北斗系统,乃至建设综合PNT体系具有一定启发意义。

5.1 加强顶层设计,前瞻考虑 PNT 体系的融合发展

PNT 体系建设涉及众多领域、学科和力量的整合优化,规模巨大、实施复杂。要实现以北斗卫星导航系统为核心,融合其他 GNSS、天文、伪卫星等众多原理不同、背景各异的 PNT 信息源的 PNT 体系建设,必须要有统一的时空基准、技术标准和体系架构,确保信息源的有效融合、高效利用。要实现这些目标,必须加强顶层设计,统筹军地双方各领域。

一是要提前布局,完善优化国家 PNT 体系架构。可以依托北斗新一代卫星导航系统等重大工程实施,设计统一接口、标准,并着眼于未来的技术发展趋势,预留政策和技术接口,形成开放包容的体系架构。

二是要建立完善统一的基准体系和信息合理配置机制,推进其他系统向北斗全球系统的有效融合。这包括建立统一的时空基准,为各系统、信息源融合提供基础条件,建立可以转换使用且比较成熟的算法模型和随机模型,充分考虑不同场合、领域对不同信息源的依赖度,做到有效筛选信息源并合理配置比例,提高系统的冗余度和纠错能力。

三是加强力量统筹,避免缺乏规划、各自为战。国家 PNT 体系建设涉及军地多个部门,必须加强力量统筹,既要防止令出多门、重复建设,又要防止缺乏规划、路径不清。以时频基准维持为例,涉及中国科学院国家授时中心、中国计量科学研究院等 5 家单位,虽然彼此之间存在时间溯源,可以满足基本的时频需求,但总体上还存在基础薄弱、自主创新较差、系统布局不合理等问题。着眼于未来的发展趋势,可以整合资源,探索建立军地联合守时、授时系统,在系统时间准确性和自主性上更进一步。

5.2 加大核心装备、元器件的技术研发力度,避免关键领域受制于人

从本质上讲,卫星导航系统是一个信息集中系统,结构复杂,比较脆弱,涵盖卫星、测控、运控、应用等领域,涉及芯片、集成电路,以及原子钟、接收机等核心部件。要实现各类 PNT 系统的融合,还需要惯性导航器件、传感器等设备,都是难度极大的基础科学研究,这些技术必须牢牢掌握在自己手中,避免受制于人。

5.3 推进关键技术领域研究,提升卫星导航系统的抗干扰能力,尤其是极端恶劣环境下的生存能力

卫星导航系统的天然劣势决定了其抗干扰能力和防护水平的提升是一个长期性任务,基础重在平时构建,战时方便使用。

一是探索建立北斗卫星导航系统的干扰监测系统,实现干扰信号的有效预警和处置。干扰监测平台对于北斗系统运行稳定和为 PNT 体系提供有效预警作用重大。一方面,可以借助军民融合的发展战略,综合考虑平时的经济性和战时的急需性,做到监测状态自由切换。针对导航战等复杂环境背景,可以增加机动监测分队,加强重点目标防护,确保平战结合、有序切换。另一方面,有必要探索建立干扰信号数据库。电磁环境日益复杂,战时干扰信号也越来越具有“针对性”和打击性,应该注重平时干扰信号和实战背景下干扰信号的搜集,并进行实战演练和应急处置,提升抗干扰压制能力。

二是推进星上信号重构、星间链路、抗干扰接收机等关键技术领域的技术研究,从空间、地面、用户等各方面提升北斗系统的抗干扰能力。

5.4 完善北斗卫星导航系统的建设应用和新技术融合程度,提高服务的广度和深度

对比行业领先国家,北斗卫星导航系统在深度融入国防军事和社会民生方面还有一定的进步空间。

一是可以完善产业立法,加强知识产权和系统运行的保护。通过规范行业秩序、加强产权保护、引导系统整合等方式鼓励自主创新,打击卫星导航领域的违法犯罪,为建立公正、竞争、繁荣的产业环境保驾护航。

二是聚焦供给,推动形成以北斗系统为核心的产业生态链。通过市场需求牵引提高应用水平,增强北斗系统的服务能力。

三是顺应时代发展趋势,更好地融入国家网络信息体系。通过政策、资金等引导大数据、物联网、云计

算、人工智能等先进技术向北斗系统深度融合,突破学科限制,建立体系新业态。

6 结 语

美国在认识到高度依赖 GPS 的巨大风险后,通过调整体系架构、加大科技投入等方式努力升级改造 GPS,并构建具有更强连续性、安全性的国家综合 PNT 体系。本文在分析解读美国综合 PNT 体系的目标、组成和功能的基础上,理清了美国综合 PNT 体系的主要优势和特点。

通过借鉴美国在综合 PNT 体系构建上的有益经验,本文建议从加强顶层设计、加大核心部件研发、提升抗干扰能力、提高建设应用水平四个方面加强北斗卫星导航系统的建设。这对加快构建具有自主知识产权、独具中国特色的综合 PNT 体系具有一定意义。

参考文献:(略)

作者简介:郭强,男,1989年生,硕士,助理工程师,主要研究方向为卫星导航与应用。

GNSS 高精度天线发展概述

王晓辉,李建辉,张捷

(深圳市华信天线技术有限公司,广东 深圳 518055)

摘要:本文对 GNSS 高精度天线做了简单介绍,重点阐述了其在不同行业的应用和国内外高精度天线的技术现状,并对其市场状况和发展趋势进行了概述。

关键词:GNSS;高精度天线;测量天线;无人机天线

1 引言

随着卫星定位技术的不断发展完善,高精度定位技术已经应用于现代生活的各行各业中,例如在测绘、精准农业、无人机监测、无人驾驶等领域,高精度定位技术的身影随处可见。特别是随着北斗新一代卫星导航系统组网完成,以及 5G 时代的到来,北斗+5G 不断发展,有望推动高精度定位技术在机场调度、机器人巡检、车辆监控、物流管理等领域的广泛应用。高精度定位技术的实现,离不开高精度天线、高精度算法以及高精度板卡的支持,本文主要就高精度天线的发展应用、技术现状等进行介绍。

2 GNSS 高精度天线发展应用

2.1 高精度天线介绍

在 GNSS 领域中,高精度天线是对天线相位中心稳定性有特殊要求的一类天线,通常与高精度板卡配合实现厘米级或者毫米级的高精度定位。在高精度天线的设计中,通常对天线的天线波束宽度、低仰角增益、不圆度、滚降系数、前后比、抗多径能力等有特殊要求。这些指标都会直接或间接影响天线的相位中心稳定性,进而影响定位精度。

2.2 高精度天线应用及分类

高精度 GNSS 天线最初主要应用于测绘领域,用于在工程放样、地形测图以及各种控制测量过程中实现静态毫米级的定位精度。随着高精度定位技术的日益成熟,高精度天线逐渐应用在越来越多的领域中,包括连续运行基准站、变形监测、地震监控、无人机监测、精准农业、自动驾驶、驾考驾培、工程机械等领域,不同应用对天线的指标要求也有明显差异。

2.2.1 CORS 系统、变形监测、地震监控——基准站天线

高精度天线应用于连续运行基准站中时,经过长期观测获取准确的位置信息,并通过数据通信系统实时地将观测数据传输至控制中心,控制中心解算出区域内的误差改正参数后,再通过地基增强系统、广域增强系统、星基增强系统等,将误差信息发给流动站(用户端),最终使用户得到准确的坐标信息。

在变形监测、地震监控等应用中,需要对变形量进行精确的监测,探测微小的形变,从而预测自然灾害等情况的发生。

因此在设计用于连续运行基准站、变形监测、地震监控的高精度天线时,首先必须考虑的就是优秀的相位中心稳定性和抗多径干扰能力,这样才能为各种增强系统实时提供准确的位置信息。另外,为了提供尽可能多的卫星改正参数,天线必须接收尽可能多的卫星信号,四系统全频段已经成为标准配置。在此类应用中,通常采用覆盖四系统全频段的基准站天线作为系统的观测天线。

2.2.2 测绘——内置测量天线

在测绘领域中,需要设计便于集成的内置测量天线,天线通常内置于 RTK 接收机的顶部,实现实时

高精度定位。

内置测量天线在设计中的主要考虑因素有频段覆盖、波束覆盖、相位中心稳定性、天线尺寸等,特别是随着网络 RTK 的应用普及,集成了 4G、蓝牙、Wi-Fi 的全网通内置测量天线逐渐占据市场主要份额,自 2016 年一经推出就受到广大 RTK 接收机厂商的青睐,得到广泛的应用推广。

2.2.3 驾考驾培、无人驾驶——外置测量天线

传统的驾考系统存在诸多弊端,如投入成本大、运维费用高、受环境影响大、精度低等,高精度天线应用于驾考系统后,驾考系统由人工评判转变为智能化评判,评判精度高,大大降低了驾考的人力、物力成本。

近年来,无人驾驶系统发展迅速,在无人驾驶中,通常采用 RTK 高精度定位与惯导组合定位的定位技术,可以在大多数环境下实现很高的定位精度。

在驾考驾培、无人驾驶等系统中,常采用外置测量天线,需要天线具备多系统多频率的工作频段,能够实现较高的定位精度,对多径信号有一定的抑制作用,以及较好的环境适应性,能够在户外环境下长期使用而不发生故障。

2.2.4 无人机监测——高精度无人机天线

近年来无人机行业发展迅猛,无人机已经在农业植保、测绘、电力巡线等场景中广泛应用。在此类场景中的应用,只有配备了高精度天线才能保证各种作业的准确、高效和安全。由于无人机具有速度快、载重轻、续航短等特点,无人机高精度天线在设计时主要关注重量、尺寸、功耗等因素,并且在保证重量和尺寸的前提下尽可能实现宽带设计。

3 GNSS 天线国内外技术现状

3.1 国外高精度天线技术现状

国外对高精度天线的研究开始较早,也开发了一系列性能较好的高精度天线产品,如 NovAtel 的 GNSS-750 系列扼流圈天线、Trimble 的 Zephyr 系列天线、Leica 的 AR25 天线等,如图 1 所示,其中不乏具有较大创新意义的天线形式。因此在过去很长的一段时间内,我国的高精度天线市场都被国外产品垄断。但是近十年来,随着一大批国内厂商的兴起,国外 GNSS 高精度天线在性能上已经基本没有优势,国内高精度厂商开始向国外开拓市场。



图 1 国外高精度天线产品

此外,国外近年来也发展了一些新的 GNSS 天线厂商,如 Maxtena、Tallysman 等,其产品主要是用于无人机、车载等系统的小型 GNSS 天线,天线形式通常是高介电常数的微带天线或者四臂螺旋天线,此类

天线的国内外产品正在进入同质化竞争时期。

3.2 国内高精度天线技术现状

国内高精度天线的产品化起步较晚,但是发展迅速,过去十年,有一批国内高精度天线厂商开始发展壮大,如华信天线、中海达、鼎耀、佳利电子等,开发了一系列具有自主知识产权的高精度天线产品。

在基准站天线和内置测量天线领域,华信天线的 3D 扼流圈天线、全网通组合天线等,如图 2 所示,不但性能达到国际领先水平,而且产品可靠性高,使用寿命长,故障率极低,可以满足各种环境应用。在车载、无人机等行业,外置测量天线和四臂螺旋天线的设计技术已经比较成熟,如图 2 所示,在驾考系统、无人驾驶、无人机监测等行业应用中得到大规模使用,取得了良好的经济效益和社会效益。

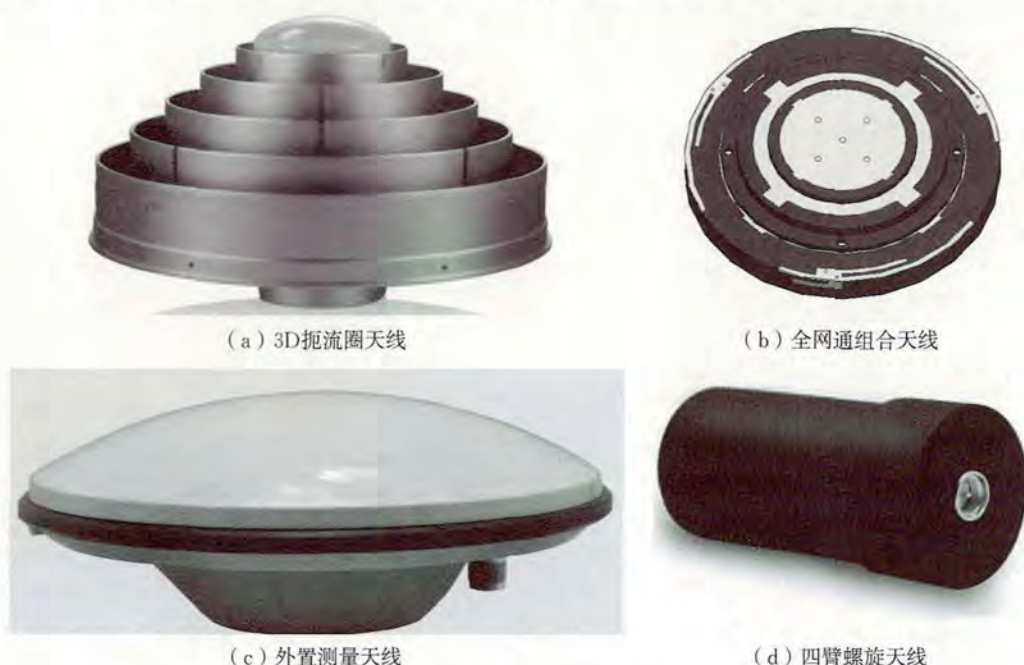


图 2 国内高精度天线产品

4 GNSS 天线市场现状与前景

2018 年我国卫星导航与位置服务产业总产值达到 3 016 亿元人民币,较 2017 年增长了 18.3%,预计 2020 年将达到 4 000 亿元人民币;2019 年全球卫星导航市场总产值 1 500 亿欧元,GNSS 终端用户数量达到 64 亿台。在全球经济形势低迷的背景下,GNSS 产业是少数逆势上涨的产业之一。欧洲全球导航卫星系统局预测,未来十年全球卫星导航市场总产值将超过 3 000 亿欧元,GNSS 终端数量将增加至 95 亿台。

全球卫星导航市场中,应用于道路交通、无人机监测等领域的终端设备是未来十年增速最快的细分市场。智能化、无人驾驶车辆是未来道路车辆的主要发展方向,具备自动驾驶能力的汽车必须配备 GNSS 高精度天线,因此自动驾驶市场对 GNSS 天线需求量巨大。随着我国农业现代化进程的不断推进,植保无人机等配备高精度定位天线的无人机用量必将持续增长。

5 GNSS 高精度天线发展趋势

GNSS 高精度天线经过多年发展,各项技术已经比较成熟,但在许多方向上仍有待突破。

(1)小型化。电子设备小型化是永恒的发展趋势,特别是在无人机、手持机等应用中,对小尺寸天线的需求更迫切;但是天线小型化后性能会降低,如何在保证综合性能的前提下减小天线尺寸是高精度天线的

重要研究方向。

(2)抗多径技术。GNSS 天线抗多径技术主要有扼流圈技术、人工电磁材料技术等,但是都有尺寸大、带宽窄、成本高等缺点,无法实现通用设计,因此需要研究具有小型化、宽带化特点的抗多径技术,满足各种应用需求。

(3)多功能化。现在各种设备上除了 GNSS 天线,还集成了不止一种通信天线,不同通信系统对 GNSS 天线可能产生各种信号干扰,影响正常收星。因此通过多功能集成将 GNSS 天线与通信天线实现集成设计,在设计时就要考虑天线间的干扰影响,可以在提高集成度的同时改善电磁兼容特性,提高整机性能。

参考文献:(略)

作者简介:王晓辉,男,1988 年生,硕士,产品经理,主要从事高精度 GNSS 天线研究与设计工作。

北斗系统在自动驾驶动态高精地图领域的技术与行业应用

黄以琳,杨德刚,杨 帅,车国兴

(北京地平线机器人技术研发有限公司,北京 100080)

摘要:卫星导航是自动驾驶系统必不可少的组成部分,北斗系统将全面赋能智能网联汽车应用,促进自动驾驶蓬勃发展。在自动驾驶领域,驾驶过程环境监控主体从驾驶员逐步转移到车辆系统,因此对地图元素的丰富性、准确性、实时性有较高的要求。为了更好地解决动态高精地图大规模快速更新问题,将高精地图绘制工作下发给社会普通车辆的“众包模式”应运而生。本文从自动驾驶功能出发,介绍了北斗系统在动态高精地图领域的技术应用,包括车辆高精度融合定位、车端高精度实时建图、众包数据云端聚合,并总结了高精度定位对自动驾驶系统的功能提升,以及基于北斗系统的高精地图众包绘制与更新应用方案。

关键词:北斗系统;自动驾驶;高精度定位;高精地图;众包模式

1 引言

随着人们对交通安全、智能出行需求的不断增加,汽车产业正在积极推动自动驾驶研发与部署。自动驾驶技术要解决的两个核心问题是:①车辆在哪(车辆定位);②车辆周围有什么(环境感知)。高精度的定位结合高精地图,可以帮助自动驾驶汽车预先感知道路的复杂信息,并提供实时的高精度车辆定位,融合车身传感器信息进行车辆周围环境建模,实现智能路径规划,让汽车做出正确决策。因此,高精地图已成为自动驾驶的基础设施。

精准定位是智能驾驶功能的基础也是核心,随着汽车智能化程度不断提高,对定位系统性能提出了越来越高的要求。因此,为了满足自动驾驶车辆全天候、高精度、稳定可靠的定位需求,通常采用多种技术融合来实现高精度定位,如卫星定位、惯性导航系统定位、无线电定位、高精地图定位等。目前,基于全球导航卫星系统(GNSS)、惯性测量单元(IMU)、车载摄像头与高精地图的多源融合定位方案在自动驾驶领域应用广泛。

为了实现精准的车辆定位,支持上层自动驾驶功能,高精地图需要精准地反映不断变化的道路场景。地图行业传统的基于地图采集车的“集中制图”模式显然无法满足高精地图实时更新的需求,因此,将地图绘制任务下放到道路普通车辆的“众包地图”模式应运而生。众包数据是确保高精地图高频更新的核心,如何实现高精地图众包绘制及更新,一直是业界不断探索的热点问题。

2 北斗系统在动态高精地图领域的技术应用

高精地图是自动驾驶汽车的“超距传感器”,可以为车辆提供超出传感器探测范围的环境信息,并且不受光照、天气、遮挡等特殊条件的限制。伴随着汽车智能驾驶功能和应用的拓展,高精地图产业迎来了飞速发展。

在自动驾驶领域,随着驾驶过程环境监控主体责任从驾驶员逐步转移到车辆系统,自动驾驶落地场景已经从封闭的场景转移到更开放的场景,需要地图提供要素更丰富、更新频率更高的地图信息。动态高精地图是指将静态地图信息(基本道路结构及附属物等)与动态地图信息(道路拥堵、施工管制、交通事故、地图元素更新、周边车辆行人及交通灯等)叠加融合,用以支持自动驾驶控制决策。北斗系统在动态高精地

图领域的技术应用主要体现在三个方面:车辆高精度融合定位、车端高精度实时建图、众包数据云端聚合。

2.1 车辆高精度多源融合定位技术

自动驾驶的发展推动高精度定位技术在汽车领域的应用,高级别自动驾驶功能需要更高精度的车辆定位能力来支撑,高精度定位对于自动驾驶功能提升至关重要,Level 3级自动驾驶需要达到亚米级定位精度,Level 4以上则需要达到厘米级精度。自动驾驶系统通常采用多传感器多源融合定位方案实现高精度定位。首先将实时环境感知结果中的定位特征与高精地图进行匹配,相似性最高的匹配结果即为当前车辆的匹配定位结果;然后将匹配定位结果与GNSS、IMU、车辆底盘信息相融合,获得稳定精准的多源融合定位结果。

在车辆高精度融合定位算法架构中,车体自定位主要依赖于GNSS+底盘轮速计+其他传感器(摄像头、激光雷达等)的方式实现。随着深度学习在汽车智能化领域的应用不断深入,以视觉感知为核心的语义定位技术得到了广泛的应用。典型的北斗定位与语义定位技术相结合的车辆高精度融合定位算法架构如图1所示。首先,基于北斗系统定位结果获取车辆初始位姿,确定自动驾驶车辆当前处在哪条道路上(该偏差一般为5~10 m);随后,根据环境感知结果中的语义信息,将车道线(虚、实线)及道路边缘(路沿或护栏)的检测结果与高精地图提供的车道线及道路边缘进行比对,进一步修正车辆的横向定位;最后,将环境感知结果中路面标志、交通标志牌、红绿灯等信息,与高精地图要素匹配,实现车辆纵向定位的修正,确定车辆当前的位置信息。

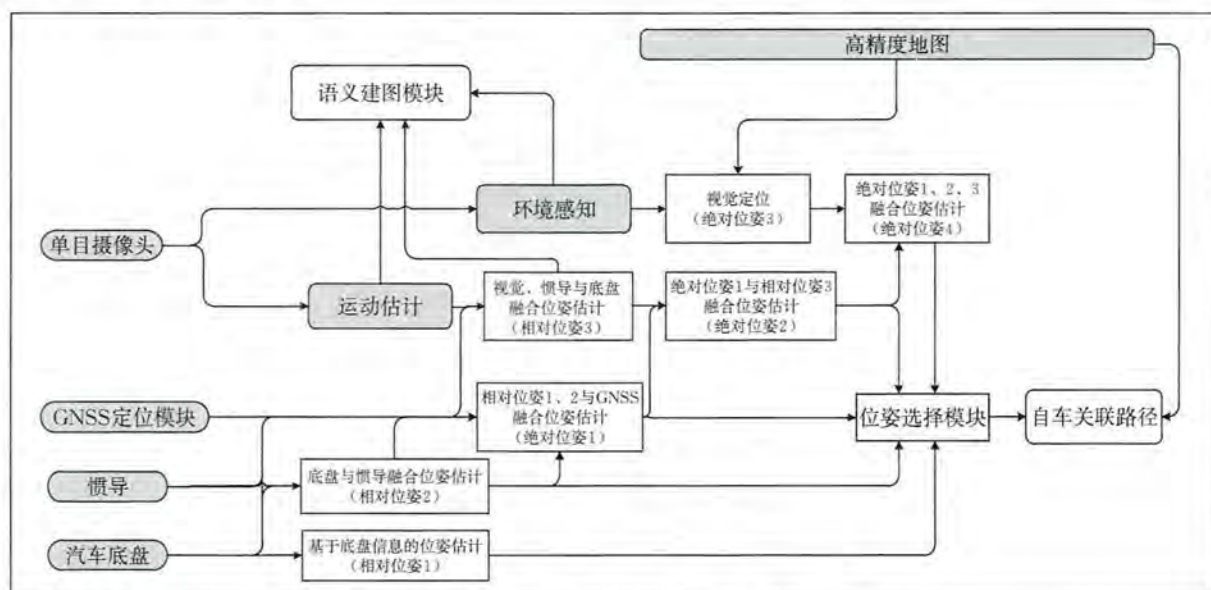


图1 车辆高精度定位技术算法架构

车辆高精度融合定位方案基于北斗导航卫星系统,融合车辆语义定位技术,辅助车辆实现更加准确、精度更高的定位,定位精度可达亚米级。语义定位技术主要依靠摄像头采集当前路况信息,运用深度学习对接收到的图像信息进行特征提取并与高精地图做匹配,根据匹配结果确定当前局部信息是否与全局信息相吻合,从而确定当前的位置信息,实现车辆的高精度定位。语义定位与北斗定位相辅相成,根据北斗定位减少语义定位的初始匹配范围,节约计算时间。当遇到北斗信号丢失的情况,可以通过语义定位补充获得定位结果,这类融合定位技术在隧道、地下停车场等特殊场景中有着广泛的应用。

2.2 车端高精度实时建图技术

高精地图的准确性对于自动驾驶来说至关重要,有数据显示,我国每年高速公路路网更新比例为30%左右,高精地图发布后的维护和更新将是一个长期持续不断的过程。传统的高精地图生产采用“集中制图”方式,这种方式依赖昂贵的外业测绘设备作业与烦琐的内业人工标注,使得高精地图的生产与更新

的成本居高不下,消耗大量的人力物力,严重限制了高精地图的市场应用与产业发展。在此背景下,基于大量社会运营车辆进行数据采集的“地图众包”方案成为高精地图更新与维护的最优途径,是实现高精地图大规模快速更新的最佳解决方案。

车端建图是指自动驾驶车辆基于行驶过程中所产生的传感器数据,实时构建车周环境的高精地图。建图系统的输入主要包括传感器信息(来自摄像头、毫米波雷达、激光雷达等)、GNSS 信息、IMU 信息及汽车底盘信息等。其中,GNSS 信息用于将局部建图结果转化为全局地图数据,是车端建图方案重要的组成模块。单目摄像头是前装量产车型中装载率最高的传感器,且摄像头价格低廉、视觉数据丰富,是众包高精地图方案中最核心的传感器,本文重点介绍基于单目视觉的车端建图技术方案。

随着近些年以深度学习为代表的的人工智能技术兴起,计算机视觉领域产生了众多颠覆性的成果。将深度学习引入地图绘制过程,能够自动检测识别地图要素,将显著提升地图生产作业效率。同时,深度学习可以与基于视觉的即时定位与地图构建(VSLAM)技术相结合,运用深度学习方法替换传统 VSLAM 中的一个或多个模块(如特征点提取、位姿估计、重定位等),在传统 VSLAM 方案中加入语义信息(如图像语义分割,道路要素的检测、分类及识别)实现车端高精地图实时构建,自动生成带有语义的局部地图片段,典型的建图算法架构如图 2 所示。

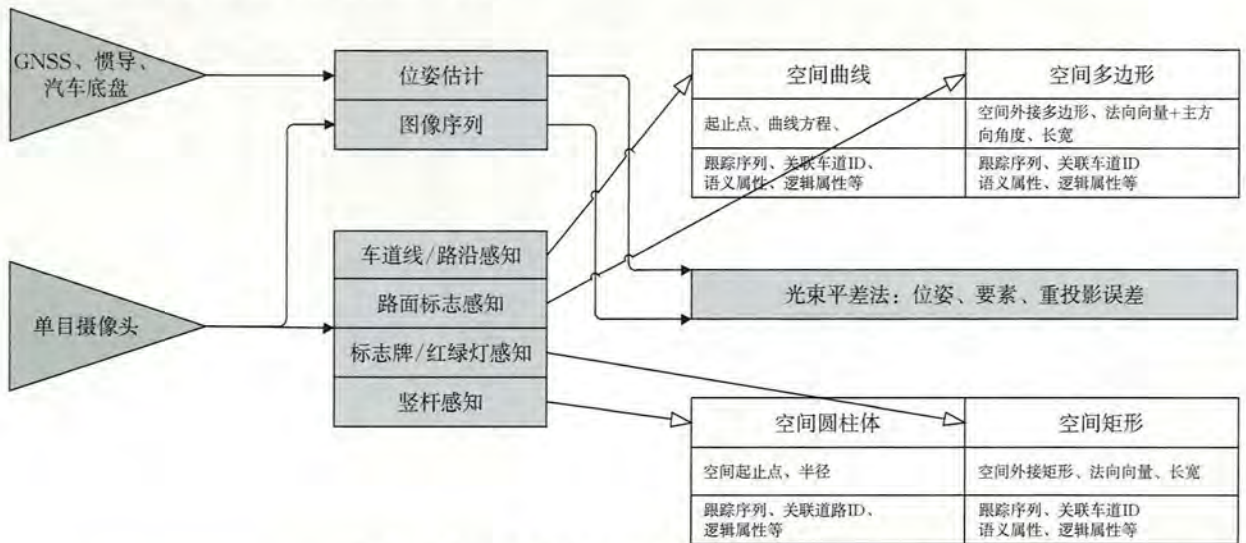


图 2 基于单目视觉感知的车端高精度建图算法架构

本建图方案选择从连续帧图像空间的感知结果中直接恢复场景要素的 3D 矢量参数。首先基于深度学习,完成车道线、路沿、路面标志、标志牌、红绿灯、竖杆等道路要素的检测与识别;同时,基于 IMU 与车辆底盘信息(偏航率、速度、挡位等)解算车辆相对位姿,并结合北斗卫星定位信息构建 3D 里程计获取车辆绝对位姿(位置、速度、姿态),最终采用 VSLAM 将道路要素的地理空间坐标恢复重建出来。本方案将深度学习在视觉数据分析与处理方面的优势与 VSLAM 技术相结合,降低了计算复杂度,可以运行于车载嵌入式计算平台中,实现高精地图实时构建,自动生成带有语义的局部地图片段,显著提升了后续高精地图生产流程的自动化程度。

2.3 众包高精地图云端生产流程

2.3.1 基于北斗系统的云端聚合框架

在众包高精地图生产过程中,受到 GNSS 信号质量及光照、遮挡等条件的限制,单次车端建图所产生的局部地图数据往往存在全局偏差及元素遗漏等问题,需要经过云端聚合优化才能生成完整可用的高精度全局地图。高精地图众包生产模式的本质就是通过多次观测数据的聚合优化提升数据质量,从而实现低成本、高质量的高精地图绘制。

高精地图众包生产链路如图 3 所示,基于多次车端地图构建服务生成的同一区域的局部地图片段,通

过云端聚合框架优化其几何属性信息,自动生成全局地图,输出给全局地图数据库。众包地图数据云端聚合技术主要包括地图对齐、地图融合、地图推理等几个模块,云端聚合所生成的全局地图可以用于与已有高精地图底图匹配实现变化检测,从而支持上层高精地图更新匹配、场景划分等应用服务,实现车端感知数据赋能智能交通应用场景。

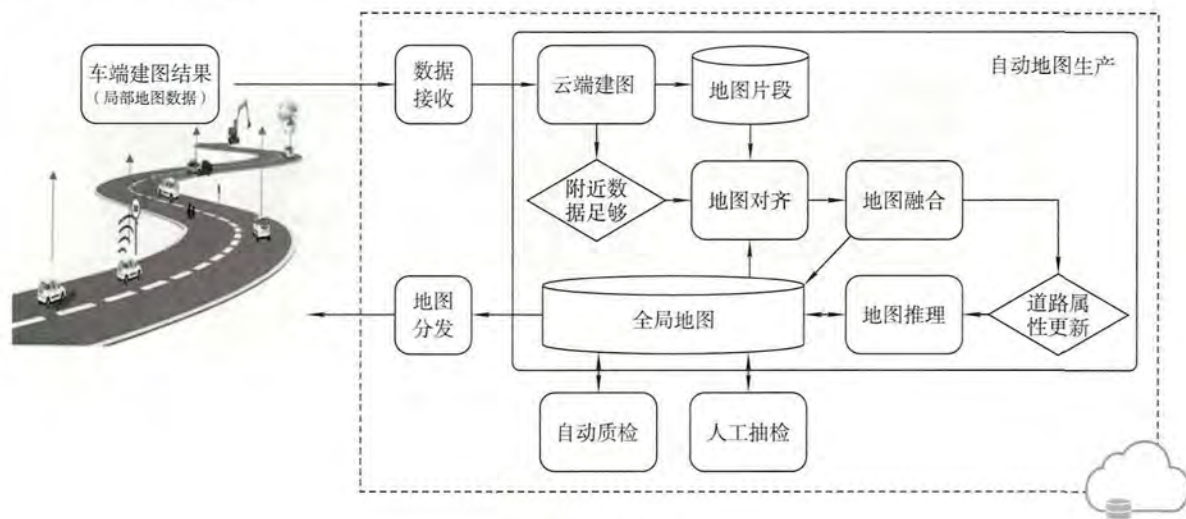


图3 高精地图众包生产链路

2.3.2 基于北斗系统的云端聚合技术方案

在车端建图技术介绍中,基于北斗定位系统解算车辆实时三维位姿(位置、速度、姿态),以实现图像空间中的道路特征在三维地理空间中的恢复重建,生成局部地图片段。众包地图数据云端聚合技术主要包括基于局部地图片段的地图对齐、地图融合、地图推理,最终生成高精度全局地图。

1. 地图片段对齐与关联融合

实现多批次传输的局部地图片段融合是高精地图众包更新方案的难点,需要在云端地图平台上持续做地图数据关联优化。整体算法处理流程如图4所示,首先基于地图片段中的北斗定位信息完成同一区域内局部地图片段叠加,然后通过元素匹配对齐对地图片段的绝对位姿进行修正,最终进行几何语义属性融合,将多次观测获取的多个地图片段融合为一张全局地图。

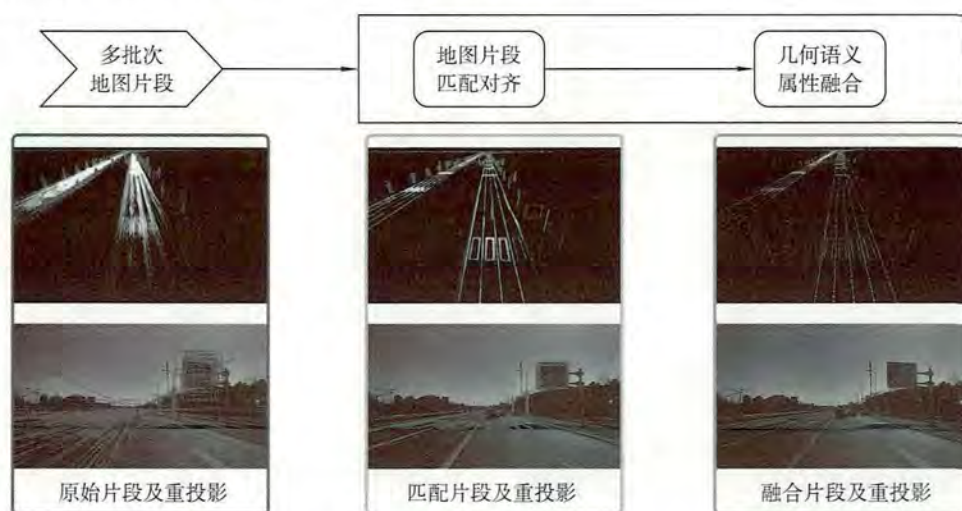


图4 地图片段对齐与融合

2. 地图推理

局部地图片段经过云端融合生成全局地图后,还需要通过地图推理流程来获得逻辑层信息(车道属性、车道连接关系、车道中心线等)。典型的地图推理流程如图5所示,首先对车道线进行关联融合,然后

推理不同 Section 连接关系,最后进行车道属性推理,获取车道行驶方向、限速范围、车道中心线等逻辑信息。

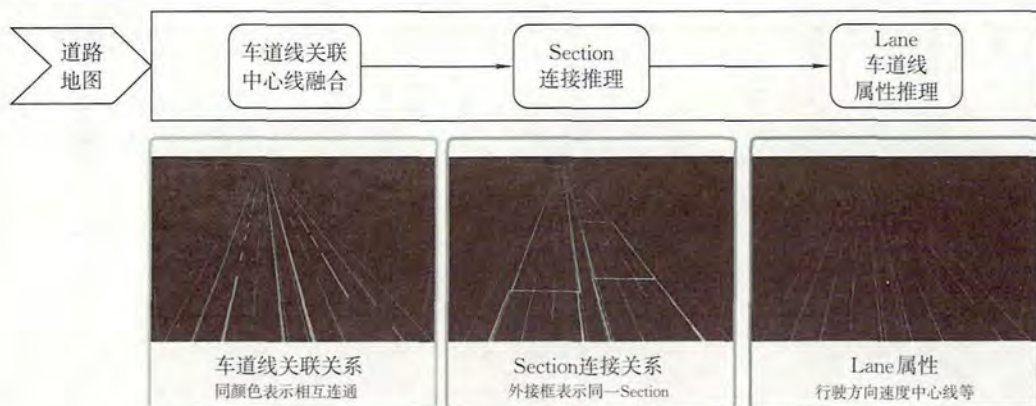


图5 地图推理流程

3 基于北斗系统的动态高精地图行业应用

3.1 高精度定位对自动驾驶的功能提升

自动驾驶汽车通过高精度定位引入地图信息来构建车周环境模型,为车辆提供超出传感器探测范围的感知能力,以此拓展多种复杂功能场景,辅助驾驶系统向自动驾驶系统演变。

与单纯单车感知方案相比,高精度定位通过引入地图信息形成先验感知,显著提升车辆环境感知的稳定性与准确性。在自动驾驶领域,基于摄像头的视觉感知是最普遍的应用方案,车道线检测是视觉感知最重要的任务之一,是支持车辆偏离预警(LDW)、车道保持(LKA)等驾驶功能的基础。视觉感知容易受到光照、遮挡等干扰影响导致失效,如图 6(a)所示,车辆驶离隧道出口的瞬间出现强光照情况,导致视觉感知短暂失效,车辆有偏离车道的风险,这时可以通过定位获取地图信息来补齐车道线,确保车辆在自车车道正常行驶,降低事故风险。真实的道路环境复杂多变,在自动驾驶环境感知任务中,交通灯、交通标志等要素的准确识别一直是视觉感知的难点。如图 6(b)所示,高精度定位可以通过地图信息为自动驾驶车辆提供道路要素的先验感知,并且提供交通灯、交通标志、路面标志等的感知补充,显著提高了交通要素识别的准确性。



图6 通过高精度定位引入地图信息增强视觉感知性能

在自动驾驶环境感知任务中,另一个难点是识别车道与交通要素(交通标志、交通灯、路面箭头)的对应关系及复杂路况的先验感知(路口、匝道进出口提前变道),这对于十字路口、复杂环岛、自动上下匝道等驾驶功能至关重要,通过在自动驾驶系统中引入高精度定位,可以很好地解决这个问题。如图 7(a)所示,

高精度定位可以为车辆提供车道与交通标志牌、路面标志之间准确的对应关系。如图 7(b)所示,高精度定位获取前方十字路口信息,提前做出预测规划。

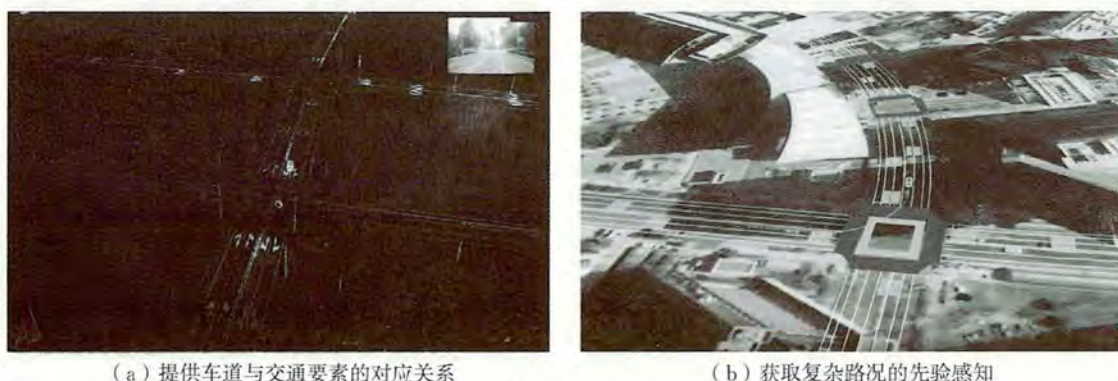


图 7 高精度定位结合高精地图提供匹配关联信息

3.2 高精地图众包绘制与更新方案

在高精地图众包生产模式中,基于北斗导航卫星系统,构建出众包高精地图自动地图生产流程,如图 8 所示。在车端基于北斗定位实现局部地图片段实时构建,并通过云端聚合框架,将大量车辆采集的局部地图片段数据进行关联匹配、融合优化、逻辑推理,生成全局高精地图,从而提供更新、更精准的地图信息,即可快速地发布到车端供车辆定位导航使用。

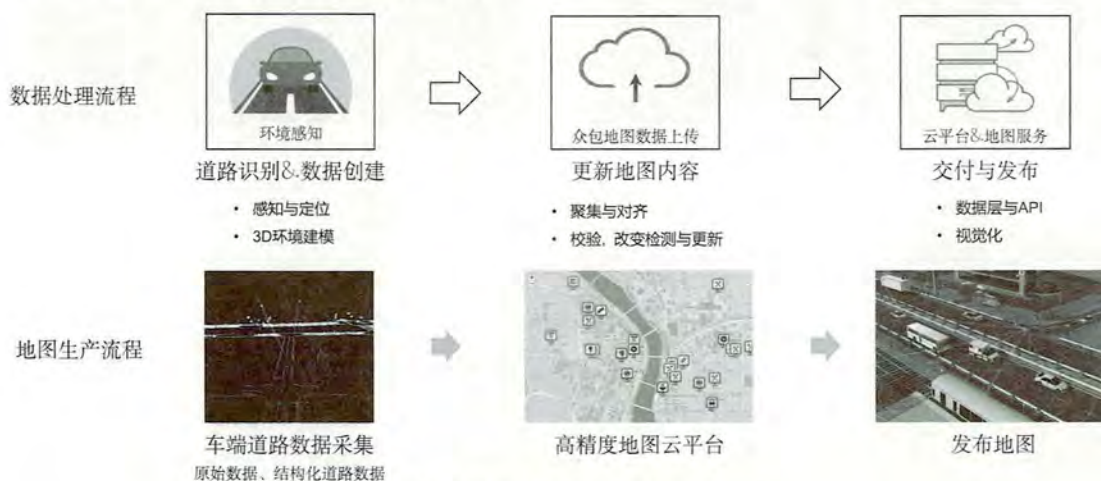


图 8 众包高精地图数据处理与生产流程

其中,云端地图生产可以定时全量执行,也可以根据地图更新的结果,经过事件触发进行高效融合之后,提供更新、更精准的地图信息,自动生成高精地图。通过众包方式实现的高精地图自动生产流程,可将高精地图更新频率压缩到分钟级,使得高精地图可以更精准地反映不断变化的道路场景,以支持高精度车道级定位导航及丰富的高级别自动驾驶功能应用,主要服务于以下四种功能场景:

(1) 高精地图元素更新。通过要素关联与变化检测,发现地图元素的变化并及时更新(图 9),确保高精地图“鲜度”。

(2) 高精地图范围拓展。基于车端建图与云端融合,在无地图覆盖区域实现从 0 到 1 创建路网高精地图,提升高精地图的“广度”。例如,在高速公路主路高精地图的基础上,拓展生成匝道高精地图(图 10)。

(3) 自建“记忆地图”。自建局部记忆地图(图 11),支持记忆泊车、园区记忆式自动驾驶,提升自动驾驶体验。

(4) 动态信息采集与上报。动态信息指道路环境变化信息,如道路施工、交通拥堵、交通事故的采集与上传(图 12),用于构建高精地图“动态信息层”。

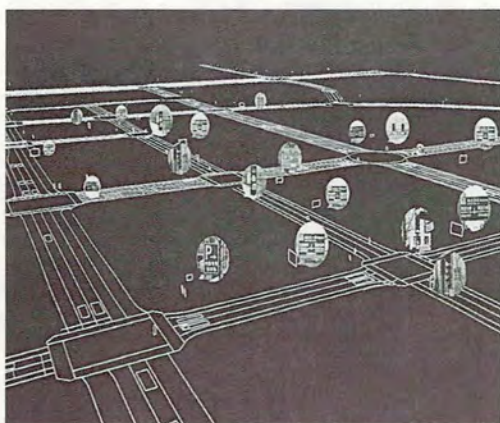


图9 高精地图元素更新

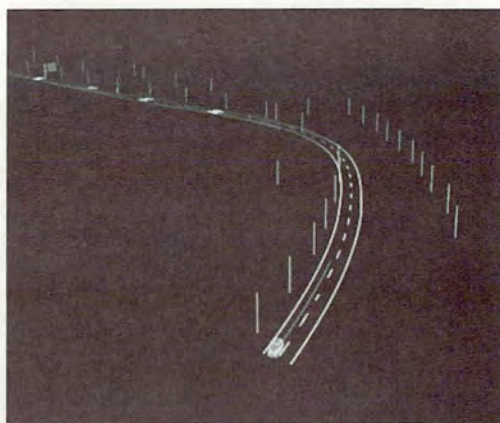


图10 高精地图范围拓展

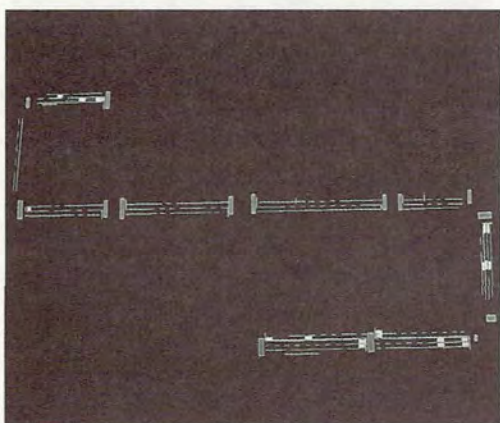


图11 自建“记忆地图”

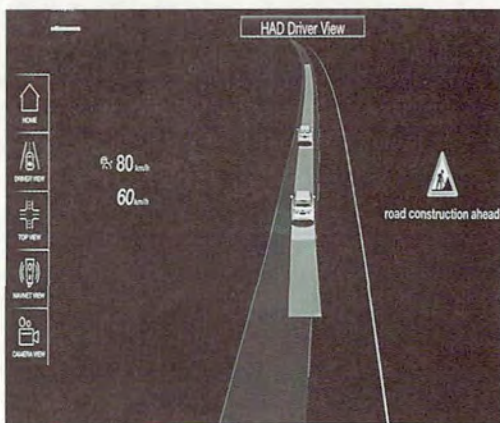


图12 动态信息采集与上报

4 总结与展望

北斗系统全球组网,意味着北斗系统正式开启大规模商用,将在这个万物互联时代成为指引智数经济的“北斗星”。全球以自动驾驶技术为代表的人工智能浪潮方兴未艾,互联网巨头和传统汽车行业投入大量的人力与物力来参与自动驾驶相关技术的研发和落地,自动驾驶成为代表人工智能领域最高荣誉与挑战的“珠穆朗玛峰”。卫星导航是自动驾驶系统必不可少的组成部分,北斗系统将全面赋能智能网联汽车产业应用,促进自动驾驶技术蓬勃发展。

参考文献:(略)

作者简介:黄以琳,女,1994年生,硕士,主要从事高精地图众包模式产品开发工作。

车道级导航中交通诱导方式与数据组织

于迅文¹,李宏利²,殷志东²,杜坤¹,申亚倩²

(1. 北京百度网讯科技有限公司,北京 100096; 2. 北京长地万方科技有限公司,北京 100096)

摘要:本文从导航系统中车道级交通诱导原理出发,给出车载导航系统中应用的车道交通网络数据组织方法与车道级交通诱导方法。

关键词:导航;车道;交通诱导;数据组织

1 引言

传统的以路幅中心线作为导航路网进行规划和引导的电子地图,经过近三十年发展,已成为一个非常成熟的大众化产品,为人们的生活带来极大的方便。但这种地图位置精度普遍在5~10 m,且只有道路级的交通网网络,无法实现车道级的位置定位、路线规划和行进引导,主要的用户痛点有:

(1)主辅路不分、高架路上下不分。例如规划路径走主路,由于突发情况改走辅路,而导航引导仍旧播报走在主路上的引导提示。

(2)无法表达车道级的交通属性和限制。例如潮汐车道、借道转向、限时公交车道、车道内限速等,从而不能实现遵守交通规则的车道级引导和违章占道提醒。

(3)不能定位在车道上。导致无法在路口转向时,提前遵守交通规则并(换)道行驶,稍不注意就会交通违章。

这种传统标准地图缺少亚米级精度的车道交通网络,无法满足人们车道级驾车导航、先进汽车辅助驾驶系统及无人驾驶控制系统的需要,亟须改进。

2020年6月23日9时43分,北斗三号最后一颗全球组网卫星发射成功,以北斗为主的多卫星导航系统融合高精度定位开始了一个崭新的阶段。如图1所示,北京某处定位精度高达2 m,融合计算中北斗为16颗星、GPS为10颗星、GLONASS为7颗星,Galileo仅1颗星。

在使用连续运行参考站实施地基差分计算时,融合定位精度可达分米级,为车道级导航的普及创造了必要的技术条件。

根据业界公认的自动驾驶等级划分方法,L1和L2级分别为驾驶辅助和部分自动化。车道级驾驶辅助地图是在位置精度提升后的标准地图的基础上,通过添加特定的专题信息和与标准地图的关联关系而形成的,既可供普通导航使用,又可供具备先进的汽车驾驶辅助功能和车道级引导功能的新式智能网联汽车及高精度定位的手机使用。它具有向前的兼容性和向后的延续性。车道交通网络是其最重要的新增内容,精度必须是亚米级的,引导必须是车道级的,更新必须是及时的。



图1 卫星高精度定位信息

2 车道级交通诱导原理及表现形式

车道级交通诱导的基本原理是在准确的车道级定位和拟前行的道路级路径规划的基础上,根据车辆在车道级交通网络中的位置及时计算短距离的车道级规划路径,根据车道级规划路径给出及时并道和转向的提示,根据车辆自身和所在车道的性质,对于违章占道的情况,及时给出规避的警示。在车道级诱导

过程中,实时监测是否在规划的车道级路径上,若发生车道级偏航,则重新计算。

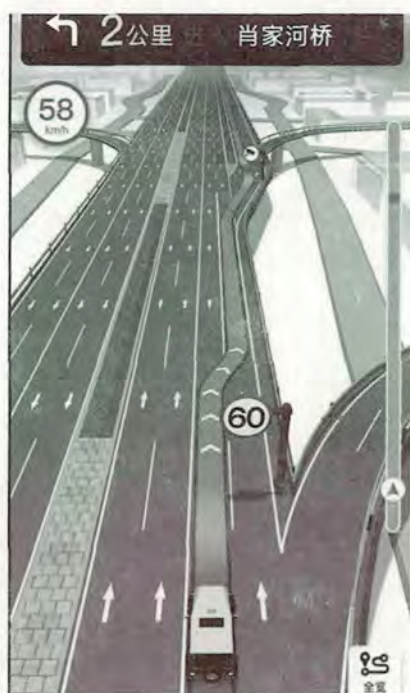


图2 车道级导航放大图示例

车道级交通诱导是在道路级诱导的基础上,补充更详细的车道级诱导提示,表现形式主要是将较强的听觉、视觉信号作用于司机的耳朵和眼睛,引起大脑神经中枢的警觉,做出汽车减速、变道或转向的行车机动,按预先规划的车道级路径正确行驶。常见的表现形式有如下三种:

(1)语音提示。例如“前方500米路口,请及时并入内侧车道左转!”“您已违章进入应急车道,请速离开”。

(2)图形化路口放大图和车道转向图标。主要是路口车道放大图、导向车道转向箭头及路口转向箭头,提醒司机注意。

(3)局部路段交通标线放大图,在分歧口地面长实线出现的地方,提示并入正确的导向车道。

这三种方式一般是组合使用的,如弹出提示图片或文字的同时,伴有语音提示,如图2所示。

3 车道交通网络数据组织

车道级导航依靠亚米级定位精度的车道级交通网络,包括车道中心线、车道中心线节点、车道级限制条件、车道组与车道关系、车道组与道路网络的交叉参照关系。车道组为交通流方向一致的一组平行车道线段,成组主要是为了快速计算并道策略。车道线段打断的基本原则是车道性质发生变化的地方就要打断,包括车道数变化、车道分隔线变化、车道内限制条件变化等。车道级诱导,就是要在这些变化前给出准确的行车策略。车道交通网络的基本内容和关系如图3所示。道路路段、车道组和车道线段的关系如图4所示。

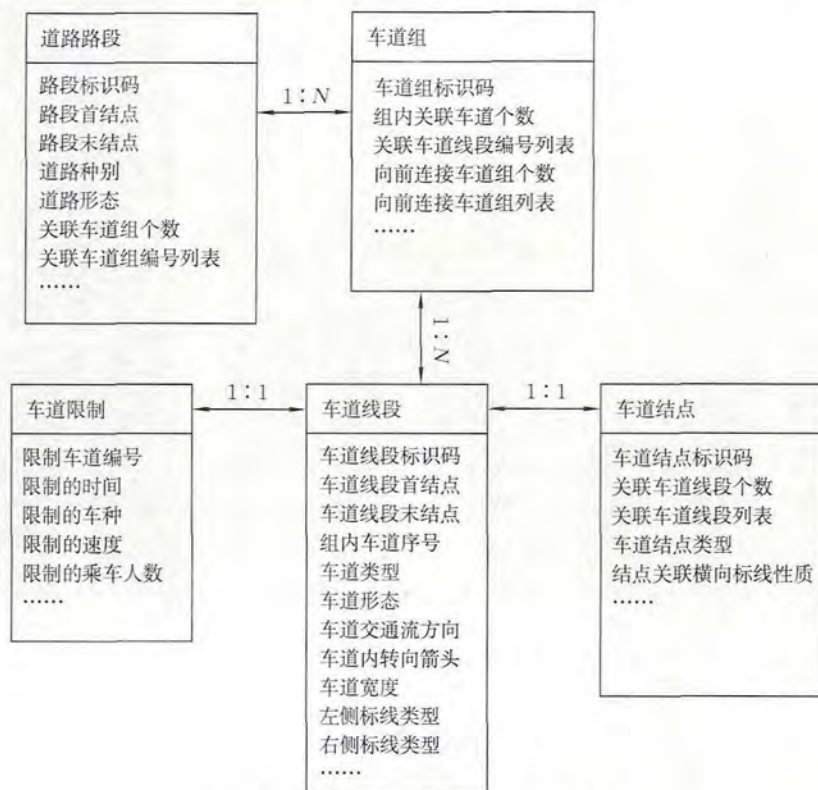


图3 车道交通网络的基本内容和关系

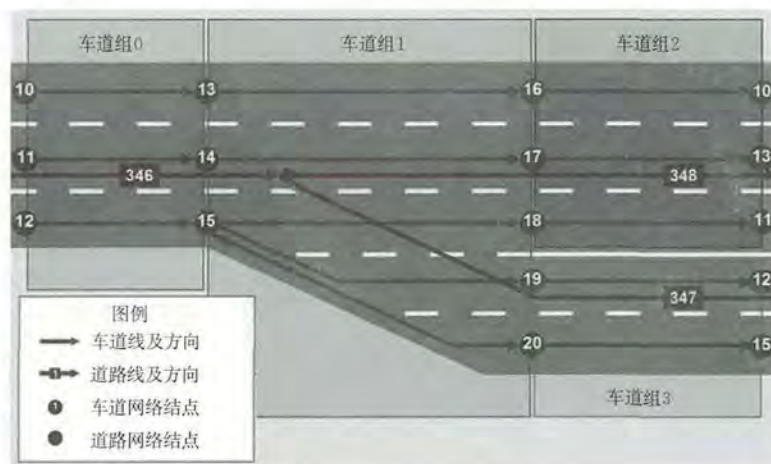


图4 道路与车道网络拓扑连接

更详细的叙述见测绘出版社出版的中国卫星导航定位协会 2018 年文集《卫星导航定位与北斗系统应用》中《车道级驾驶辅助地图数据结构》一文。

4 车道级交通诱导场景与语音、图像提示

4.1 车道级定位与违章占道警示

车道级诱导首先需要解决的问题就是车道级定位,只有准确知道自身车辆位于哪个车道上,才能根据所在车道性质,给出驾驶策略,避免交通违章。

完成车道级定位首先要完成道路级定位,根据匹配得到的路段 ID 号,找到关联的车道组,在车道组表里顺次找出组内的各个车道线段 ID 号,得到各个车道的形状数据和交通流走向,再次进行车道级的地图匹配,直到匹配到垂距最近的车道线段,该车道线段就是车辆所在的车道。地图匹配的基本算法是在车辆前行方向与车道交通流方向一致的情况下,以垂距最短的线段为最优选择。

准确进行车道定位后,可以根据车道性质,立即对所占车道是否违章做出判断。各类违章场景及判定依据如表 1 所示。

表 1 各类违章场景及判定依据

场景	判据	交通处罚	语音提示
非法占用应急车道	依据车道线段图层中所在车道的类型属性,判断是否为“应急车道”,是则占用应急车道	扣 6 分,罚 200 元	请立即离开应急车道
非法占用公交车专用道	依据车道线段图层中所在车道的类型属性,判断是否为“快速公交车道”或“专用公交车道”,是则占用公交车专用道	扣 3 分,罚 200 元	请立即离开公交车道
在特定时段非法占用限时公交车道	依据车道线断图层中所在车道的类型属性,判断是否为“限时公交车道”,是则读取当前时间,继续查询车道限制表的时间限制属性和车种限制属性,若属于乘用车且当前时间落在限制时间段内,则为违章占用公交车道	扣 3 分,罚 200 元	本时段不可占用公交车道,请速离开
车速超出所在车道的限速	计算自车车速,根据所在车道,读取车速限制属性,判断是否超速,是则语音提示;更详细的判断还要结合输入的车种检查,一般多发生在全封闭的高速路上	扣 3~12 分,罚 100~2000 元。视不同道路、不同车种、不同超速等级而定	本车道限速 ×× 公里,请减速(加速)行驶
占用共乘(HOV)车道,检查乘车人数	依据车道线段图层中所在车道的类型属性,判断是否为“多乘员限制车道”,是则继续查询车道限制表“最低乘员数量”属性,给出人数限制的语音提示		您所在车道,限制乘员 × 人,不符请离开

4.2 路口前并道和路口转向诱导提示

道路级导航的不足在引言中已有论述,特别是路口前转向并道不及时导致的交通违章时有发生。交通上将这类违章称为“未按规定车道行驶”,处罚措施是扣3分,罚款100元。主要表现为并道不及时,在路口前的直行导向车道上左转或右转,在转向车道上直行。为彻底解决这类交通违章,做出及时可靠的诱导提示,需要在精准的车道级定位基础上,根据自车的行驶状态和车道交通网络的特性给出可行的驾驶策略。

4.2.1 提示距离起算位置的选择

无论哪种提示都涉及被提请注意的地点、距该地点多远开始提示、以什么方式提示、提示信息滞留的时间、重复几次等问题。考虑这些问题时还要综合顾及汽车在此场景下正常的行驶速度和提示所花的时间。一般而言,语音提示播报时间3~5s,人脑做出机动反应时间1~2s,总计花时约6~7s。按照百公里的车速实际行驶近200m,此即高速公路分歧口的最短提示距离。

然而按照该距离提示,常常因分歧口前减速退出车道的地面长实线,导致不能及时并道,错失转向时机,或强行并道,违反交通规则,严重的还会引发交通事故。因此对于车道级导航而言,计算最短提示距离的起算位置不是转向发生的地点,而是去往转向地点的画有长实线车道的起始位置,对普通道路则是路口前的导向车道白实线起始位置。如图5所示,A点为长实线起点,B点为五环路通往中关村北大街的分歧口,去往中关村北大街的车道级诱导语音提示的最短距离,要从A点起算,而不是从B点起算,两者相差近100m。

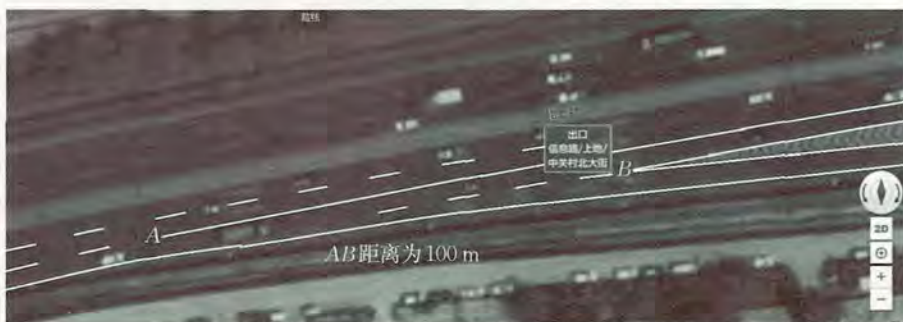


图5 分歧口车道级诱导场景示例

4.2.2 诱导提示的时机和次数

并道、转向提示的时机一般用提醒注意的地点和距该地点的距离表示。根据经验一般采用两次重复的方式完成,首次是纯语音提示,末次是语音加图像的方式。不同类型道路的允许行车速度,建议的起算位置和距离如表2所示。

表2 不同类型道路的诱导提示

道路类型	提示距离起算位置	平均旅行速度 (km/h)	首次提示距离 (m)	末次提示距离 (m)
高速、快速路	分歧口前白实线出现位置	100	1 000	200
国道、省道、县道、 主干道、次干道	进入路口前导向车道起始位置	50	500	100
其他低等级道路	进入路口前导向车道起始位置	30	300	60

路径诱导提示距离的选择,不仅考虑距起算位置的距离,还要考虑中间是否还有其他出口。当末次距离内有其他出口,则要在过其他出口后的开始位置播报提示。

4.2.3 语音诱导提示模板

车道级路径诱导中语音提示文字的基本组织方法是根据不同的场景和应用方式建立语音模版,然后在具体的位置对特定模版的内容进行填充,最后将组织好的文字通过语音合成技术适时播出。科学的语

音模版应符合人们的习惯性思维方式,清晰传递路径诱导语音提示信息,配合其他图片信息让驾驶员及时做出相应的反应,以达到车道级导航的目的。转向提示信息的基本语音模版分为路口前提醒和路口处提醒两种。

1. 路口前提醒

基本语音模版结构为:“前方(顺行)”+剩余距离+驾驶操作+“去往”+前方道路名称+(附加并道提示)。其中:①剩余距离是指车辆从当前位置到转向处的距离;②驾驶操作是到转向处时驾驶员需要做的操作,可分为左转、右转、掉头、靠左前行、靠右前行等;③前方道路名称是指通过路口转向后,车辆进入的道路名称;④附加并道提示是根据当前车辆所在车道与前行转向车道是否顺接给出提示,顺接时不附加提示,不顺接时给出向左或向右并道的提示。例如,“前方 500 米请右转,去往西五环路,请向右并线到外侧车道”中,附加提示属于提前重复提示,一般为首次提示。

2. 路口处提醒

基本语音模版结构为:“前方”+路口类型或连接路类型+“请进入”+车道转向类型+“前往”+前方道路名称。其中:①路口类型表示路口种类,可分为分歧口、出入口、环岛、十字路口、丁字路口、Y 形岔路口等,让驾驶员更清晰地确定前方的路口是否是需要做机动操作的路口;②连接路类型指后继道路形态,如匝道、高架路、桥、隧道等;③车道转向类型指左转车道、右转车道等。

例如,“前方岔路,请进入左转车道,前往上地西路”。

4.2.4 路口前图像提示

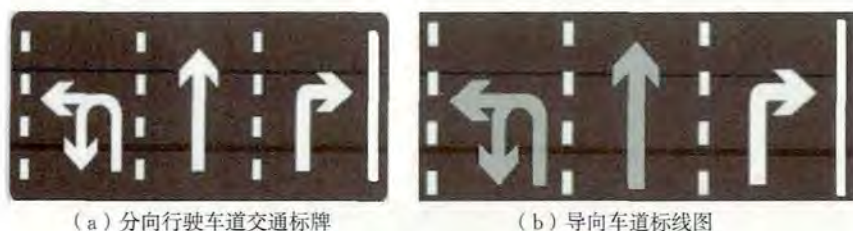
路口前车道级交通诱导图像提示是伴随末次语音提示发生的,显示在导航地图画面中。常用的方式是车道级路口放大图和路口导向车道标线图。

车道级路口放大图有的是预先做好带有车道地面标线的底图,现场根据行驶方向填画地面车道级引导箭头,如图 6 所示;有的则是现场渲染路面车道标线,如图 2 所示。



图 6 车道级路口放大图

导向车道标线图与路口前悬挂的“分向行驶车道”交通指示标志牌类似,高亮显示拟走车道的方向箭头,如图 7 所示,(a)为实际标牌,(b)为导航系统展示的实际需右转的车道标线图示例。



(a) 分向行驶车道交通标牌

(b) 导向车道标线图

图 7 导向车道标线图示例

还有车载导航仪直接利用摄像头做 AR 导航(增强现实的实景导航),路口前叠加地面车道转向箭头,

如图 8 所示,使车道级诱导效果更加醒目准确。



图 8 AR 导航中的车道级诱导

4.3 路口前导向车道内提示

车辆在路口前的导向车道内有两种场景,一是已进入正确的导向车道,二是误入与去往方向不一致的导向车道内,例如路径规划是左转方向,而车辆实际占据的是直行车道。

对已进入正确的导向车道的车辆,不再提示,执行路口处提示即可。

对车辆所在车道转向性质与去往方向不一致的场景,应及时做出如下提示:“所在车道与去往方向不一致,请谨慎驾驶,避免违章。”

5 结 语

车载导航系统中的车道级交通诱导模型和数据组织,是一个比较复杂的问题,人性化的及时、可靠、正确的车道级诱导是导航地图和导航软件追求的目标。相信随着中国北斗系统的全面应用,大批性价比优秀的高精度定位芯片将很快普及,配套的车道级驾驶辅助地图也会很快普及,车道级导航、驾驶辅助、自动驾驶的时代正向我们走来。

参考文献:(略)

作者简介:于迅文,北京百度网讯科技有限公司高精地图数据部高级项目经理,工程师,一直从事卫星导航电子地图研发、自动驾驶高精地图研发和应用研究。

浅谈基于深度学习的自动化视觉道路要素提取技术在自动驾驶中的应用

刘秋平

(易图通科技(北京)有限公司,北京 100070)

摘要:本文从高精度地图生产解决方案入手,主要阐述基于深度学习的自动化视觉道路要素提取技术在高精度地图更新中的重要作用和技术路线,最后针对基于深度学习的自动化视觉道路要素提取技术的发展方向及高精度地图的应用进行了展望。

关键词:高精度地图;自动驾驶;深度学习

1 引言

当今时代前所未有的自动化技术不断涌现。在交通运输领域,10个严重的道路交通事故中9起是由于人类行为引起的,自动驾驶技术可以减少交通事故发生,同时减少交通堵塞,提高交通运行效率。随着人工智能(AI)的高速发展与应用,计算机技术已经进入以人工智能为代表的新信息技术时代——智能技术时代。近年来,人工智能已经被提升到关乎我国国家发展战略的高度,第三次人工智能研究热潮在中国愈演愈烈。

自动驾驶是汽车产业与人工智能、物联网、高性能计算等新一代信息技术深度融合的产物,是当前全球汽车与交通出行领域智能化和网联化发展的主要方向,已成为各国争抢的战略制高点。高精度地图作为自动驾驶技术的数据核心,为自动驾驶的发展提供了重要支撑,是自动驾驶的核心技术和重要传感器之一。如何保证高精度地图的鲜度与质量,高精度地图数据更新无疑成为高精度地图生产工艺流程的重要组成部分,成为制约高精度地图快速更新和降低生产成本的难点和痛点。

2 高精度地图解决方案

自动驾驶技术对于车道、车距、路障等信息的依赖程度更高,需要更加精确的位置信息,以上是自动驾驶车辆对环境理解的基础。随着自动驾驶技术不断进化升级,为了实现决策的安全性,需要达到厘米级的精确程度。如果说传感器向自动驾驶车辆提供了直观的环境印象,那么高精度地图则可以通过车辆准确定位,将车辆准确还原在动态变化的立体交通环境中。

目前,实现高精度地图数据生产的解决方案主要有两种:重传感器路线和轻传感器路线。

2.1 重传感器路线解决方案

重传感器路线解决方案利用 Lidar、Camera、IMU、RTK GPS 等高精度多传感器采集制作高精度地图数据。重传感器路线的技术方案成熟,应用相对简单,容易集成到现有的自动驾驶方案中,通过一次采集即可制作完成高精度地图数据。但该解决方案实现成本高,需要解决人工标注问题以提高生产效率,同时无法通过同样的方式解决高精度地图数据的快速更新问题。

2.2 轻传感器路线解决方案

轻传感器路线解决方案利用 Camera、IMU 等低成本设备采集制作地图,通过众包的方式解决覆盖和精度的问题。轻传感器路线的技术方案成本较低,通过众包方式比较容易解决数据更新问题。但该解决

方案的地图生产需要强 AI 支持,应用到自动驾驶中相对困难,解决地图覆盖和精度问题需要大量的数据支撑。

3 基于深度学习的自动化视觉道路要素提取技术

通过上文分析可知,轻传感器路线更适用于解决高精度地图数据的更新问题,引入基于深度学习的自动化视觉道路要素提取技术有利于搭建具有更高效率的高精度地图数据生产编辑平台。

3.1 大规模样本数据构建平台

充分利用公司多年来积累的已标注的外业采集样本数据进行基于深度学习的视觉道路要素提取技术的模型训练及调优,依赖于大量人工标注的道路模型,通过建立和地理位置相关的大数据库,不断提高深度学习模型的识别率和正确性,如图 1 所示。

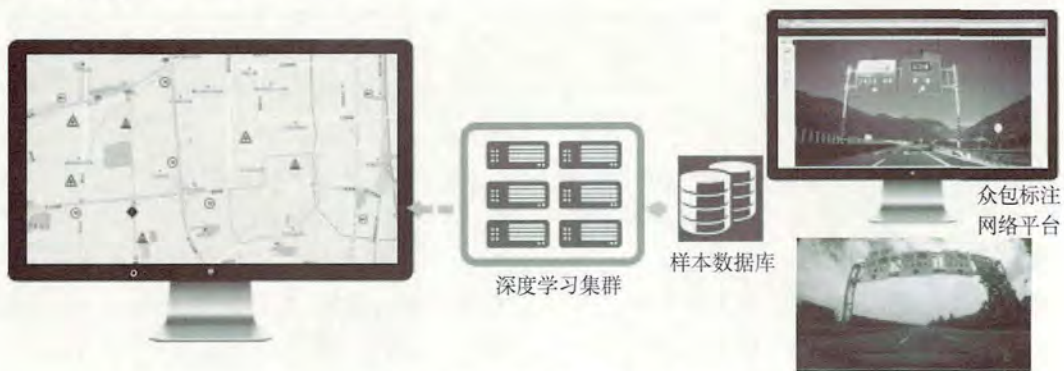


图 1 大规模样本数据构建平台

3.2 覆盖完整道路要素提取技术

本技术突破高精度地图中大部分道路交通标志要素的提取技术,涵盖限速牌、电子眼、危险警告牌、红绿灯、方向看板、车道信息、禁止信息、高速出口编号、高速里程桩、货车相关标志牌等多类视觉道路要素,如图 2 所示。



图 2 道路要素示例

3.3 基于深度学习的车道线检测技术

基于深度学习的车道线检测技术,通过车道线标注样本数据模型快速提取和定位道路场景的感兴趣区域,利用聚类算法提取车道线轮廓,最终拟合生成车道线的中心线,从而有效解决由于弯道、脏线等真实

道路场景环境复杂多变而造成的鲁棒性不强的问题,如图 3 所示。



图 3 车道线检测示例

3.4 多维度图像数据增强算法

不同类别道路要素的样本数量存在不均衡的情况,个别样本数量很少,需要通过透视变换、旋转变换、缩放变换、平移变换、随机噪声与主成分分析等多维度的图像数据增强算法,提高样本数量,进而提高视觉道路要素的提取正确性和识别率,如图 4 所示。

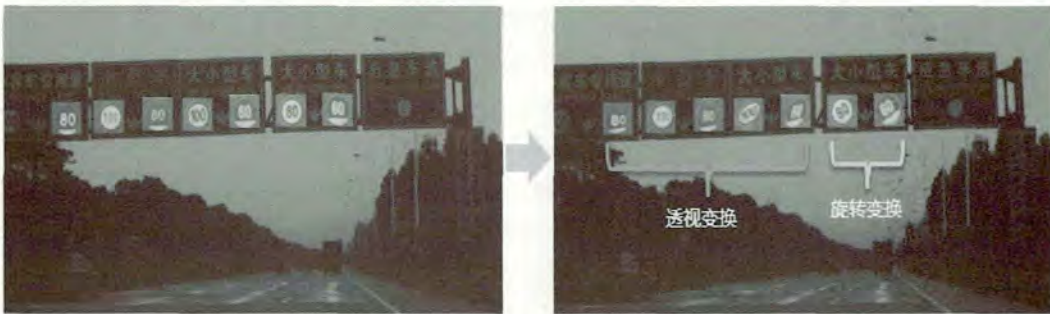


图 4 图像数据增强示例

4 发展方向及展望

我国自动驾驶已经进入产业化前期,随着“智能汽车创新发展战略”的实施及新基建在人工智能领域的发展,将会有越来越多的附属设施适应并辅助自动驾驶,未来的自动驾驶技术将更加智能化。一方面,实时交通信息监测系统、多网融合通信系统、云控平台、伴随式信息服务系统、车道级交通控制系统、桥隧安全提升系统、服务区智能化系统、自由流收费系统、基础配套系统、准全天候通信、货车编队行驶、全寿命周期智能养护和自动驾驶支持等服务于自动驾驶的智能交通基础设施会更加完善;另一方面,基于深度学习的视觉道路要素提取技术随着自主可控的开源深度学习平台的推进及适应自动驾驶附属设施的建设完备,对驾驶环境识别会更加全面,识别率及正确性也会更高。高精度地图将为自动驾驶系统的优化提供更重要和稳定的数据支持,更好地发挥地图传感器的作用。

参考文献:(略)

作者简介:刘秋平,女,1983年生,产品经理,主要从事高级驾驶辅助系统(ADAS)、高精度地图产品的设计工作。

自主泊车系统中停车位遍历路径算法研究

胡存蔚

(易图通科技(北京)有限公司,北京 100160)

摘要:如何高效地找到空闲的停车位,是自主泊车系统中的一项关键技术。本文研究并设计了一种遍历全局停车位的路径规划算法。该算法采用高精度定位数据、高精度地图,基于停车位遍历优先的 Dijkstra 算法,以车辆所在位置为起点,多次执行该算法,最终规划一条全局最优的停车位遍历路径,并在车辆偏航时可自动进行路径重新规划。该算法不依赖停车场端额外的软硬件系统,可降低自主泊车系统的部署成本。

关键词:停车位遍历;车道级路径规划;自主泊车

1 引言

自主泊车的场景是相对封闭环境,且属于低速行驶,是自动驾驶比较容易落地的应用之一。国内汽车保有量连年增长,找车位已经成为人们出行的一大痛点。很多驾驶员在找车位时,容易陷入多次走重复路线的困境。如何高效地找到空闲的停车位,是自主泊车系统需要解决的一项关键技术。一个可行的解决方案是停车场端提供车位使用状态查询功能,自主泊车根据自身位置,查询空闲停车位,并计算出与当前位置规划路径最优的停车位,作为目的停车位。采用这种方案规划的路径是最短的,但依赖于停车场端的软硬件设施,成本投入比较大。

本文研究并设计了一种停车位遍历路径算法,通过该算法,可计算得到一条全局最优的停车位遍历车道级路径。自动驾驶车辆可沿着这条路径,通过车身传感器探测沿途停车位状态是否空闲可用。算法使用了高精度定位数据及高精度地图。高精度地图提供了静态的地图要素,如车道、车道级拓扑连接关系、停车位、停车位与车道的关联关系等。借助高精度定位数据,自动驾驶车辆完成自身初始位置的定位,并通过高精度地图,完成地图匹配。算法以该初始位置匹配后的数据为起始位置信息,基于停车位优先的迪杰斯特拉(Dijkstra)算法,并对数据模型和权值模型进行设计,最终得到一条遍历全局停车位的路线。在实时定位导航时,根据高精度定位数据判断当前车辆是否偏离导航路线,如果偏航,则会触发路线重新规划。采用本方案规划的路线寻找空闲停车位,不依赖于停车场端的软硬件设施,且遍历路径是最短的,可以一定程度上避免多次走重复路线的问题。

2 问题建模

2.1 数据模型

图的数据结构中,包含若干顶点(V)和边(E)。在本文中,边采用车道描述,顶点采用车道的尾节点描述。

1. 车道(lane)模型

一条车道可用由多个形点组成的折线表示。车道一般包含的属性如表 1 所示。

表 1 车道模型属性

序号	字段名称	字段类型	字段说明	备注
1	HLaneId	int	车道编号	
2	HShape	polyline	车道形状点	
3	HNode	node *	关联的尾节点	
4	HLaneLength	double	车道长度	

2. 节点(node)模型

车道之间是通过节点连接的,节点定义了车道之间的拓扑连接关系。节点一般包含的属性如表 2 所示。

表 2 节点模型属性

序号	字段名称	字段类型	字段说明	备注
1	HNodeId	int	节点编号	
2	HPoint	point	节点坐标	
3	HLane	lane *	关联的车道	
4	HNode	node *	前驱节点	NULL 表示没有前驱节点

3. 停车位模型

停车位一般用封闭的四边形表达。停车位一般包含的属性如表 3 所示。

表 3 停车位模型属性

序号	字段名称	字段类型	字段说明	备注
1	HParkingSid	int	停车位编号	
2	HPolygon	polygon	车位多边形	
3	RefLaneIds	char	关联的车道编号	多个车道之间以英文符号“-”连接

2.2 车道权值模型

本文基本思想是采用 Dijkstra 算法解决有向图中起点到任意节点的路径代价最优问题。在本文中,路径的代价可由路径中每条车道的权值构成。车道的权值由车道关联的停车位数和车道长度两个属性组成。

2.3 路径规划建模

从以上数据模型可知,停车位是与车道有关联的,因此停车位遍历算法的目的是寻找一条包含停车位尽量多且长度最短的车道级路径。基于停车位遍历优先的 Dijkstra 算法,可计算起点到其他每个节点的包含最多停车位的最短路径。单次算法完成后,选择包含最多停车位的路径作为本次算法的结果。

单次 Dijkstra 计算可能不能遍历所有的停车位,需要执行多次计算。每次计算完成后,需要将当前路径结果所包含车道关联的停车位数目清零,即将这些车道的权值降低。在执行下一次计算时,以上次路径结果的最后一个节点为起点,执行 Dijkstra 计算。多次计算完成后,将每次计算得到的局部规划路径进行拼接,得到最终的全局路径规划结果。

3 路径规划算法

Dijkstra 算法是单源最短路径算法,主要特点是以起始点为中心向外层层扩展,直到扩展到终点为止。根据以上分析,停车位遍历算法只有起点信息没有终点信息,本文的研究目的并不是单纯的寻找最短路径,而是寻找包含最多停车位的最短路径,因此需要对 Dijkstra 算法进行改进。

3.1 经典 Dijkstra 算法

给定图 G 和源点 v_0 ,求从 v_0 到图 G 中其余各顶点的最短路径。Dijkstra 算法是一个求解单源最短路径的经典算法,把图中所有的顶点分成两个集合 S 和 T,将以 v_0 为源点、已经确定了最短路径的终点并入

集合 S 中, 顶点集合 T 则是尚未确定最短路径的顶点集合。按各顶点与 v_0 间最短路径长度递增的次序, 逐个把集合 T 中的顶点加入到集合 S 中, 使得从 v_0 到集合 S 中各顶点的路径长度始终不大于从 v_0 到集合 T 中各顶点的路径长度。该算法是以一种贪心的方式将集合 T 中的顶点加入集合 S 的, 而且该贪心方法可以求得问题的最优解。主要步骤如下:

- (1) 开始时, 将起始顶点 v_0 加入 S , 权值 $W(v_0) = 0$, 集合 T 开始时为空。
- (2) 从 S 中取出权值最小的顶点 v , 如果 v 为空或者 v 为终点, 则退出循环, 否则执行下一步骤。
- (3) 从地图中得到 v 的接续顶点集合 C 。将顶点 v 从 S 转移到 T 中。
- (4) 计算集合 C 中每个顶点 C_i 的权值, 即 $W(C_i) = W(v) + L(C_i)$, 式中, $W(v)$ 为顶点 v 的权值, $L(C_i)$ 为顶点 v 与顶点 C_i 之间的边的长度。
- (5) 判断集合 C 中的每个顶点 C_i 是否已存在于 T 中, 若存在于 T 中且新权值比已有的权值要小, 则更新 C_i 的权值, 并调整 C_i 的前驱节点为 v ; 否则设置 C_i 的前驱节点为 v , 并加入到 S 中。
- (6) 重复步骤(2)。

3.2 基于 Dijkstra 的车道级路径规划

车道级路径规划的最小单元是车道。车道之间除了前后直连关系以外, 还有左右相邻关系。如果一条车道可以变道到相邻车道, 则需要将相邻车道也加入集合 T 。车道级路径规划除了寻找最短路径之外, 还需要尽量减少变道次数。如果存在变道, 则需要将变道的权值加入变道后的车道权值。这里可以将变道的权值折算为一定的长度。因此, 在变道情况下, 变道后的车道 C_i 的权值为 $W(C_i) = W(v) + L(C_i) + F$ 。式中, $W(v)$ 为变道前的车道 v 的权值, $L(C_i)$ 为车道 C_i 的长度, F 为变道权值因子。

3.3 停车位遍历路径规划

停车位遍历路径规划是在基于 Dijkstra 算法的车道级路径规划的基础上, 对车道的权值计算策略进行修改。根据 2.2 节权值模型, 车道的权值由与车道关联的停车位和车道的长度决定, 这里将车道 C_i 的权值分为主权值 W_{main} 和子权值 W_{sub} 。 W_{main} 由与车道关联的未访问停车位个数的相反数决定, W_{sub} 由车道的长度决定, 即

$$W_{\text{main}} \propto -N(C_i), \quad W_{\text{sub}} \propto L(C_i)$$

路径选择策略为: 优先选择 W_{main} 较小的车道, 如果两个车道的 W_{main} 相同, 则选择 W_{sub} 较小的。

执行一次 Dijkstra 计算之后, 可能不能遍历所有的停车位, 必要时执行多次 Dijkstra 计算, 将多次计算的路径进行拼接后, 得到最终的停车位遍历路径。停车位遍历路径规划算法流程如图 1 所示。

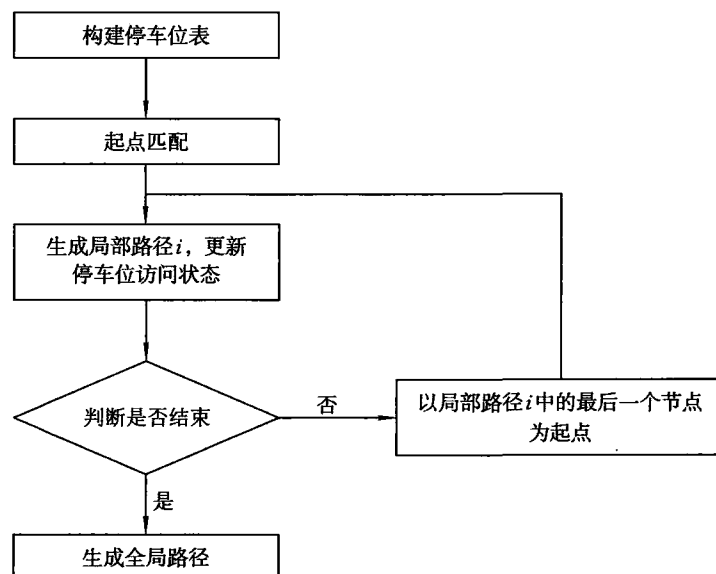


图 1 停车位遍历路径规划流程

1. 构建停车位表

从地图中加载整个停车场的停车位,按照停车位模型构建停车位表 P 。初始化每个停车位访问状态为 $false$,表示未遍历。

2. 起点匹配

根据高精度定位初始位置,进行地图匹配,计算初始的车道信息。按照节点模型,构建初始顶点 v_0 。

3. 基于停车位遍历优先的 Dijkstra 算法

基于停车位遍历优先的 Dijkstra 算法的计算步骤如下:

(1)将起始顶点 V_0 加入集合 S ,代价为 $W_{\text{main}}(V_0) = -N(V_0)$ 、 $W_{\text{sub}}(V_0) = 0$,集合 T 开始时为空。

(2)从 S 中取出 W_{main} 权值最小的顶点 $V = \min\{W_{\text{main}}(V_i)\}$,若 V 中存在多个顶点,则从 V 中再选择 W_{sub} 权值最小的, $V = \min\{W_{\text{sub}}(V_i)\}$ 。如果 V 为空,则退出循环,否则执行下一步骤。

(3)从地图中获取顶点 V 的接续节点,即 V 所关联的车道的后继车道集合 J ,以及集合 J 中每个车道的相邻车道集合 K 。将 V 从集合 S 移到集合 T 。

(4)计算集合 J 中每个车道的代价,即 $W_{\text{main}}(J_i) = W_{\text{main}}(V) - N(J_i)$ 、 $W_{\text{sub}}(J_i) = W_{\text{sub}}(V) + L(J_i)$ 。

式中, $N(J_i)$ 为车道 J_i 所关联的未访问停车位个数, $L(J_i)$ 为车道 J_i 的长度。

(5)计算集合 K 中的每个车道的代价,即 $W_{\text{main}}(K_i) = W_{\text{main}}(V) - N(K_i)$ 、 $W_{\text{sub}}(K_i) = W_{\text{sub}}(V) + L(K_i) + F$ 。式中, $N(K_i)$ 为车道 K_i 所关联的未访问停车位个数, $L(K_i)$ 为车道 K_i 的长度, F 为变道权值因子。

(6)判断集合 J 和 K 中的每个车道 C_i 是否存在于 T 中,若存在于 T 中,先判断 W_{main} 权值是否比已存的 W_{main} 权值要小,若是,则更新该车道的 W_{main} 权值,并调整 C_i 的前驱节点为 V ;若 W_{main} 权值相等,则再判断 W_{sub} 权值是否比已存的 W_{sub} 权值要小,若是,则更新该车道的 W_{sub} 权值,调整 C_i 的前驱节点为 V 。若车道 C_i 不存在于 T 中,则构建相应的新节点 V_i ,设置 V_i 的前驱节点为 V ,并加入集合 S 。

(7)重复步骤(2)。

4. 生成局部路径,更新停车位访问状态

从集合 T 中,选择 W_{main} 最小的节点,作为当前局部路径的终点。若多个节点的 W_{main} 相等,则选择 W_{sub} 最小的。从终点开始,依次获取每个节点的前驱节点,就可生成局部路径。将局部路径经过的停车位的访问状态设置为“已遍历”,更新停车位表 P 。

5. 判断是否结束

满足以下条件之一,则认为算法可以结束。

(1)停车场内的所有停车位的访问状态为“已遍历”。

(2)上一次 Dijkstra 计算生成的路径中,包含未遍历的停车位个数为 0。

6. 生成全局路径

将以上若干个局部路径拼接成全局路径。

3.4 路径重新规划

自动驾驶车辆在实时导航过程中,通过输入的高精度定位数据,判断当前车辆是否偏离导航路线,如果偏离了路线,则通过以下步骤进行路径自动重新规划。

(1)将已经过的与车道关联的停车位从集合中移除。

(2)以当前车辆位置为起点,按照 3.3 节所述步骤,重新进行停车位遍历路线规划。

4 测试结果

本文采用的测试数据是某地下停车场的高精度地图数据,如图 2 所示。图中白色小长方形区域表示停车位,车辆起点如图中标识所示。

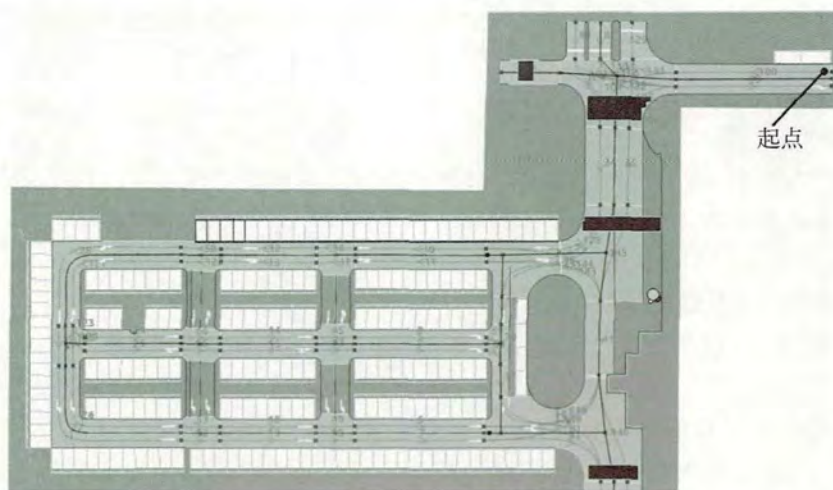


图2 某地下停车场高精度地图

(1) 执行第一次 Dijkstra 计算后, 得到的遍历路径如图 3 所示。

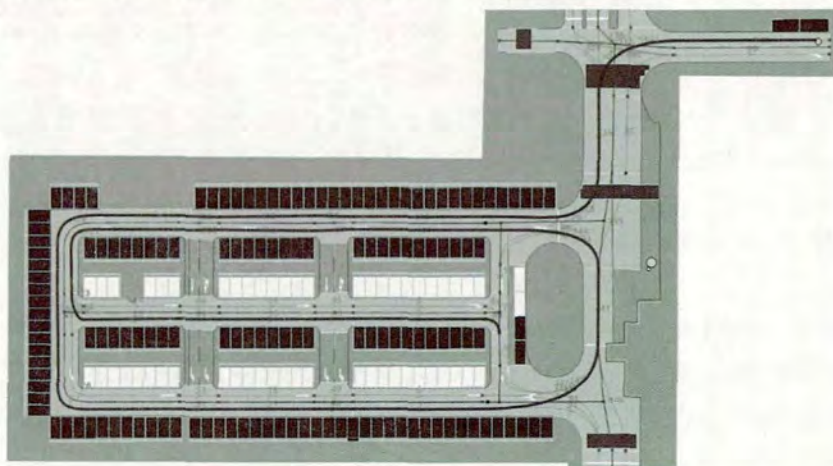


图3 第一次计算得到的遍历路径

图 3 中, 白色长方形区域表示未遍历的停车位, 黑色长方形区域表示已遍历的停车位。

(2) 执行第二次 Dijkstra 计算后, 得到的遍历路径如图 4 所示。

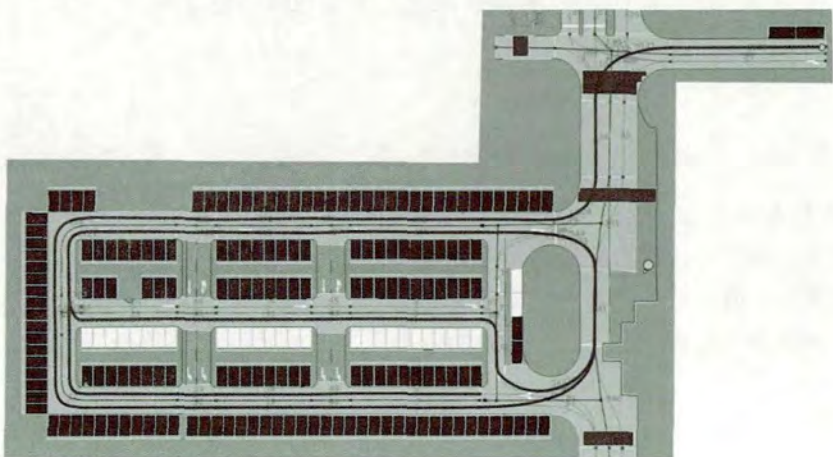


图4 第二次计算得到的遍历路径

图 4 中, 白色长方形区域表示未遍历的停车位, 黑色长方形区域表示已遍历的停车位。

(3) 执行第三次 Dijkstra 计算后, 得到的遍历路径如图 5 所示。

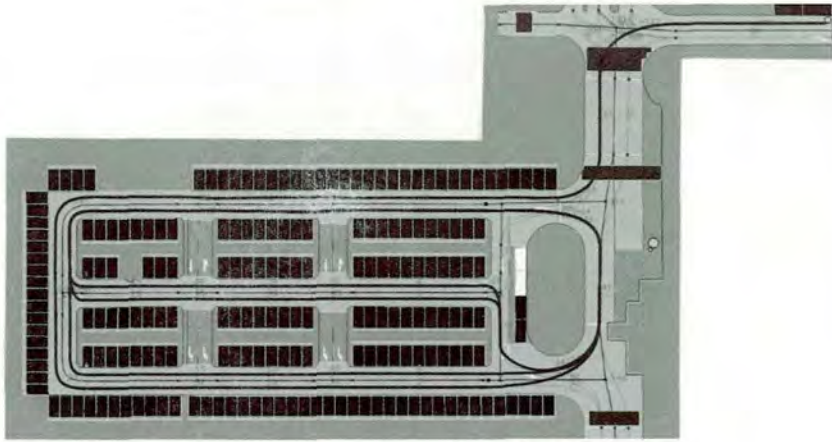


图5 第三次计算得到的遍历路径

图5中,白色长方形区域表示未遍历的停车位,黑色长方形区域表示已遍历的停车位。
(4)执行第四次 Dijkstra 计算后,得到的遍历路径如图6所示。

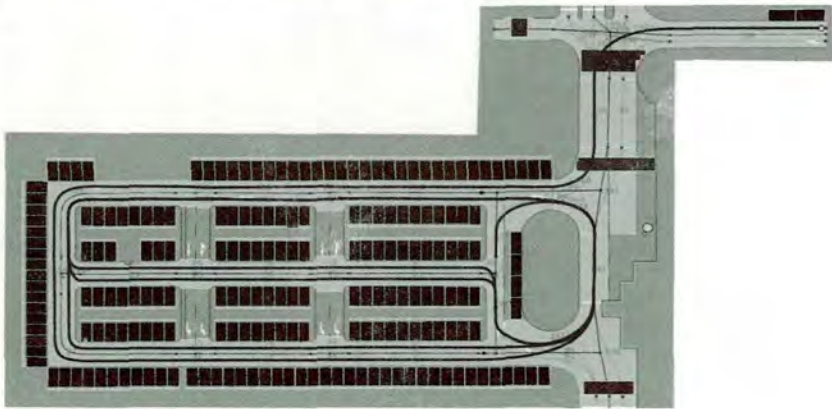


图6 第四次计算得到的遍历路径

此时,停车位已经全部遍历完成。

5 结论与展望

本文提出的停车位遍历路径规划算法,以经典的 Dijkstra 算法为基础,顾及停车位遍历优先,可得到最优的全局停车位遍历路径。在停车场端未提供停车位使用状态的情况下,本方案可为自主泊车系统提供最优的停车位搜寻路线。

从本文研究来看,还可以对指定区域的停车位进行遍历。以该区域的中心点为终点,执行经典的 Dijkstra 计算,在算法执行过程中,当探索到属于该区域的车道时,认为到达该区域,然后采用本文类似的停车位遍历路径方案,执行该区域的停车位遍历。为适应该算法,数据模型中需增加停车位与区域的关联关系,以及车道与区域的关联关系。

参考文献:(略)

作者简介:胡存蔚,男,1983年生,硕士,研发工程师,主要从事高精度定位与地图引擎算法方面的研究。

基于地图场景和速度方向信息辅助的道路匹配方法

刘庆军, 罗 军, 张绍瑞, 聂 斌

(北京奇虎科技有限公司, 北京 100015)

摘 要:针对隐马尔可夫模型在道路匹配时发射概率仅由观测点到候选路段的距离决定导致的道路匹配问题,利用观测点的速度方向信息进行改进,构建观测点速度方向与候选路段夹角的惩罚函数,对算法的发射概率进行惩罚以降低单一使用距离信息的道路匹配错误。针对当导航起点位于商场、火车站等区域附近,道路密集、信号遮挡严重导航定位精度较低,道路匹配易出错的问题,采用地图场景信息进行辅助,提升该场景下的道路匹配准确度。实验表明改进算法能有效地提升道路匹配准确率,并当导航起点位于商场、火车站等区域都有较好的匹配准确度。

关键词:隐马尔可夫模型;道路匹配;速度方向;地图场景信息

1 引 言

道路匹配是将导航地理坐标轨迹点(如北斗、GPS定位点)采用一定算法与已有的地图道路进行匹配,以消除定位数据相对地图数据产生的偏移。现有的道路匹配算法比较成熟,主要有几何算法、拓扑算法、概率统计算法。几何算法基于地图道路网的几何信息进行匹配,拓扑算法利用道路网的拓扑信息进行匹配。概率统计算法则根据轨迹点和临近路网拓扑结构建立概率分布,通过概率统计算法进行道路匹配,这类方法有信任函数、扩展卡尔曼滤波、隐马尔可夫模型(HMM)等。基于HMM的道路匹配算法具有较高的抗噪性能,且其匹配准确度随着轨迹点变稀疏而降低。

基于HMM的道路匹配方法得到了广泛的研究,Lou等在状态转移概率矩阵中综合了速率信息、观测点和隐藏实际点的信息,并使用高斯分布来模拟观测概率转移矩阵。Newson等使用前后两个观测点距离与前后两个候选点距离的差的绝对值来表示这两段距离的接近程度,越接近则概率越大,并用指数函数拟合获得状态转移概率矩阵,观测概率转移矩阵同样采用高斯分布进行模拟。Goh等在计算状态转移矩阵时用机器学习的方法支持向量机(SVM),并在计算观测概率矩阵时考虑了路段的宽度信息。上述算法均通过改变HMM的状态转移矩阵、观测概率矩阵实现不同的道路匹配效果。

在实际导航过程中,当导航点位于复杂道路环境时,仅根据单一的观测点与道路的距离信息匹配易出现错误。此外,当导航起点位于商场、火车站等信号遮挡较严重且道路密集的场景时,导航观测点误差较大,道路匹配易发生错误,匹配的导航轨迹起点不合理地落在城市主干路、快速路等高等级道路上。本文基于HMM,利用观测点的速度方向信息,使用观测点速度方向与道路方向夹角的余弦值对观测概率进行惩罚;对导航起点进行场景识别,获取场景辅助信息,提出基于地图场景和速度方向辅助信息的道路匹配方法,并利用采集的导航轨迹数据验证算法的有效性。

2 道路匹配算法改进原理

2.1 基于速度方向信息的道路匹配算法改进原理

2.1.1 基于HMM的道路匹配算法流程

在基于HMM的道路匹配算法中GPS设备获得的定位信息为HMM中的观测量,实际的道路段为HMM的隐藏状态量。 t 时刻道路匹配中的观测量和隐藏状态量分别用 o_t 和 r_t 表示,其中, $t=1, \dots, M$ 。

假设 HMM 中的状态变量数和观测变量数分别为 N 、 M 。状态转移矩阵为

$$A = [a_{i,j}]_N \tag{1}$$

式中, $i \geq 1, j \leq N, a_{i,j} = P(r_i | r_j)$ 为状态量 r_j 转换到状态量 r_i 的概率。

观测概率矩阵为

$$B = [b_j(k)]_{N \times M} \tag{2}$$

式中, $1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq M, b_j(k) = P(o_k | r_j)$ 为状态量 r_j 到观测量的概率。

HMM 道路匹配示意如图 1 所示。在 $t=1$ 时刻, GPS 的定位观测量为 o_1 , 对应 r_1, r_2, r_3 3 个隐藏状态量, 且状态量 r_1, r_2, r_3 观测为 o_1 的概率分别为 $b_1(1), b_1(2), b_1(3)$ 。在 $t=2$ 时刻, GPS 的定位观测量为 o_2 , 对应 r_1, r_2 2 个隐藏状态量, 且状态量 r_1, r_2 观测为 o_2 的概率分别为 $b_2(1), b_2(2)$ 。 $t=1$ 时刻的状态量转换到 $t=2$ 时刻的状态转移概率分别为 $a_{1,1}, a_{1,2}, a_{2,1}, a_{2,2}, a_{3,1}, a_{3,2}$ 。基于 HMM 的道路匹配算法就是根据观测量序列和给定的状态转移矩阵 A 和给定的观测概率矩阵 B 寻找到一条概率最大的状态转移路径, 获得的状态转移路径则为导航轨迹点匹配的道路。基于 HMM 的道路匹配算法中通常采用维特比(Viterbi)算法寻找最可能的能产生导航轨迹序列的道路序列。

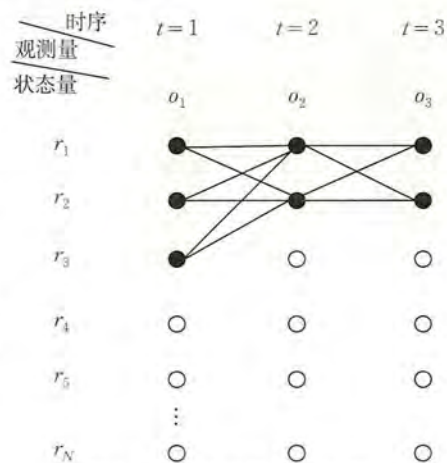


图 1 HMM 道路匹配示意

2.1.2 转移概率

转移概率是一个隐藏状态转换到另一个隐藏状态的概率。

前后两个真实位置点的距离越近时, 道路匹配算法的状态转移的概率越大。地图数据中道路段间的距离服从指数分布, t 时刻状态 r_i 转换到 $t+1$ 时刻状态 r_j 的转移概率为

$$a_{ij} = P(r_{t+1} = r_j | r_t = r_i) = e^{-\beta d_t} \tag{3}$$

式中, d_t 为 r_i 到 r_j 的距离, e 为自然指数, β 为模型参数, 可根据实际场景调节, 且有

$$d_t = \|r_i - r_j\| \tag{4}$$

2.1.3 基于速度方向信息的观测概率改进

观测概率为隐藏状态量观测为输出观测量的概率。 t 时刻状态 r_j 到观测量 o_t 的观测概率为

$$P(o_t | r_t = r_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\|o_t - r_j\|^2}{2\sigma^2}} \tag{5}$$

式中, σ 为 GPS 设备的定位标准差。

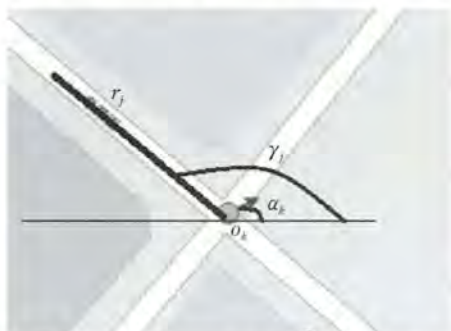


图 2 观测点速度方向角与道路方向角

改进的 HMM 道路算法创新地在观测概率模型中加入观测点速度方向信息。利用观测点速度方向与隐藏状态量对应道路段的方向夹角的余弦值对观测概率进行惩罚。

观测点速度方向角 α_k 与道路方向角 γ_j 如图 2 所示, 两者的夹角为

$$\theta_{j,k} = |\alpha_k - \gamma_j| \tag{6}$$

式中, α_k 为 O_k 观测量下的速度方向角, γ_j 为 r_j 的方向角。当 α_k 与 γ_j 夹角较大时, 该候选道路与真实运动轨迹匹配上的概率将降低, 因此定义观测点的速度方向角与道路方向角夹角的惩罚函数为

$$S(j, k) = \cos\theta_{j,k} \tag{7}$$

结合式(5)和式(7), 改进算法 t 时刻状态 r_j 到观测量 o_t 的观测概率变为

$$b_j(k) = S(j, k)P(o_t | \gamma_t = r_j) \tag{8}$$

2.2 地图场景信息辅助道路匹配算法改进原理

2.2.1 地图场景信息辅助道路匹配流程

地图场景信息辅助道路匹配中根据导航轨迹的起点通过场景识别模块获取起点是否在大型商场、火车站、小区等区域内。在获取场景识别结果后,根据识别结果初始化初始状态概率。初始状态概率则用于改进道路匹配算法进行道路匹配。地图场景信息辅助道路匹配流程如图 3 所示。

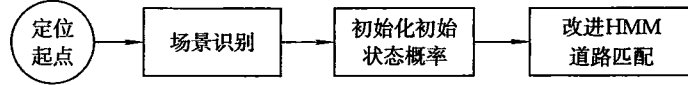


图 3 地图场景信息辅助道路匹配流程

2.2.2 初始状态概率

初始状态概率根据场景识别结果进行确定,假设初始状态为 r_i ,且 r_i 对应的道路等级为 l_i ,其中, $1 \leq i \leq N$, N 为初始状态数,则 r_i 的起始状态概率可表示为

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\|o_1 - r_i\|^2}{2\sigma^2}} l_i, & \text{区域内} \\ \varphi_i &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\|o_1 - r_i\|^2}{2\sigma^2}}, & \text{区域外} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

初始状态概率分布的确定基于路线导航中起点位于区域内时,导航线路将先从低等级道路过渡到高等级道路。由式(9)可知,导航起点位于区域内时,道路等级越高,其初始概率越小。

3 数据

3.1 数据来源

实验使用的轨迹数据采自自行车记录仪轨迹服务平台,由自行车记录仪的 GPS 设备获取定位数据,上传至服务平台,定位数据采样频率为 5 秒一次。实验测试使用的轨迹数据有 1 802 条,总轨迹长达 10 091.2 km。

3.2 参数估计

改进算法中使用的定位数据标准差 σ ,需要根据轨迹数据进行估计。已知轨迹数据的真实道路点为 $R_{i,t}$,对应的观测量为 o_t ,采用平均离差法估测定位噪声的标准差为

$$\Delta_\sigma = 1.4826 \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |o_t - R_{i,t}| \quad (10)$$

用于改进算法的轨迹数据标准差为 $\Delta_\sigma = 5.253$ m。统计获得的标准差 Δ_σ 作为定位设备的标准差 σ 参与观测概率运算。

4 结果与讨论

实验基于开源地图软件 Leaflet 及 OpenStreetMap(OSM)底图搭建可视化测试环境,使用免费开源的 OSM 矢量数据通过对识别场景下基于 HMM 的匹配算法和改进算法匹配效果的比较,验证改进算法的匹配准确度。与地图生产商的商用数据相比较,其数据的准确性和现势性存在着不足,更能显示出算法的鲁棒性及容错性。

4.1 基于速度方向信息的算法改进实验

基于速度方向信息的改进主要针对观测点附近有多条相邻道路时匹配出错问题而提出,因此选取机

场航站楼区域复杂道路场景进行实验。

复杂场景下基于 HMM 的算法和基于速度方向信息改进算法的匹配结果如图 4 所示,其中黑色细线是轨迹线,粗点黑线是道路匹配结果。基于 HMM 的算法匹配结果出错,匹配的道路轨迹在岔路口中驶入错误的岔路,如图 4(a)所示。改进算法则匹配出正确的路线结果,由于有速度方向信息的辅助,在岔路口,改进算法给予速度方向夹角较小的路段以更高的观测概率,使得算法能选择正确的道路,如图 4(b)所示,基于速度方向信息的改进算法的匹配结果更符合实际导航轨迹。



图 4 复杂道路匹配对比

4.2 地图场景信息辅助道路匹配算法改进实验

基于地图场景信息辅助道路匹配的改进主要针对当轨迹起点位于火车站、商场附近时,道路匹配的起点不合理地落在城市主干路、快速路等高等级道路上的道路匹配问题。因此,选取火车站附近道路场景下进行实验。

火车站场景下基于 HMM 的算法和基于地图场景信息辅助改进算法的匹配结果如图 5 所示,其中黑色细线是轨迹线,粗点灰线是匹配结果线。基于 HMM 的算法将起点匹配到主路,如图 5(a)所示,导航起点路段匹配到莲花池西路的主路上。改进算法则正确匹配到辅路,由于有特定场景识别信息的辅助,当轨迹起点在主路后续点在辅路时,改进算法给予辅路更高的初始状态概率,使得匹配的导航起点路段优先选择道路等级较低的路段,如图 5(b)所示,导航起点路段匹配到莲花池西路的辅路上。基于地图场景信息辅助改进算法的匹配结果,导航起点落在辅路上,更符合实际导航轨迹。

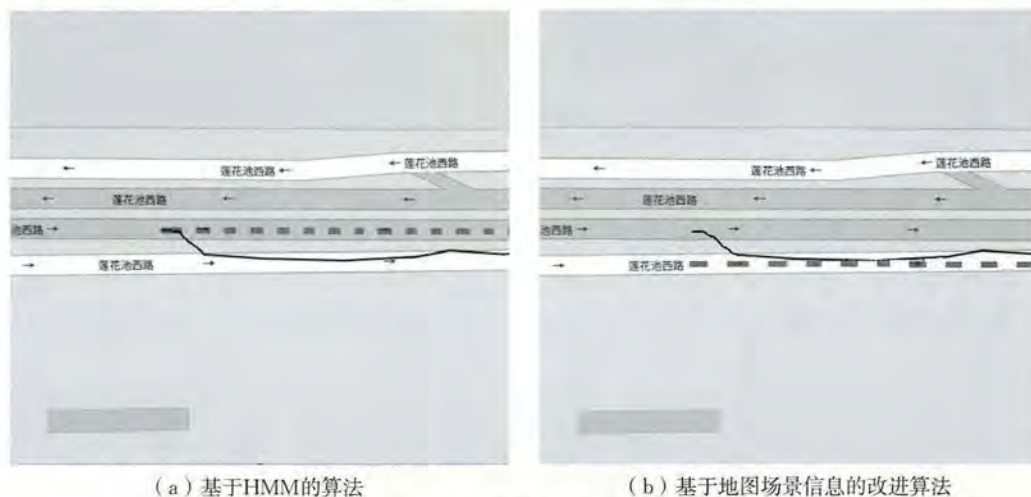


图 5 基于场景辅助信息道路匹配对比

4.3 改进算法的匹配准确率统计实验

实验所得改进算法的匹配准确率统计结果如表 1 所示,利用速度方向信息和基于地图场景信息改进的道路匹配算法,有效地提高了匹配正确率;而使用改进算法的匹配正确率比单独使用 HMM 高约 5%,进一步提升了基于 HMM 的道路匹配算法的匹配准确度。

表 1 匹配准确率

算法类型	匹配准确度
HMM 算法	88.05%
改进算法	93.23%

5 结 语

本文充分利用导航轨迹数据的速度方向信息和地图场景信息,提出基于地图场景信息辅助的道路匹配算法。该方法在观测概率模型中加入惩罚函数,对道路方向与观测点速度方向夹角较大的候选状态的观测概率进行抑制,以进一步提升道路匹配的准确度;采用地图场景信息确定初始状态概率,以提升导航起点位于商场、火车站、小区等区域内时的道路匹配准确度。实验结果表明,改进算法有效的提升道路匹配的准确率,并当导航起点位于商场、火车站附近场景都具有较好的道路匹配准确度。

参考文献:(略)

作者简介:刘庆军,男,1976 年生,地图、导航领域资深专家,就职于北京奇虎科技有限公司,主要从事地图、导航、大数据等相关的研究。

浅谈时空大数据与数据可视化在疫情地图中的应用

赵娟

(易图通科技(北京)有限公司,北京 100060)

摘要:2020年春节前夕,一场由新型冠状病毒肺炎(COVID-19)引发的疫情(简称新冠疫情)在全国蔓延开来。在疫情突发的情况下,研发一款能够帮助公众快速、全面掌握疫情信息,减少舆论恐慌,帮助公众合理抗疫的疫情地图成为当务之急。本文对疫情地图中时空大数据的选用维度及如何可视化进行简要论述。

关键词:疫情地图;时空大数据;大数据可视化;公共卫生

1 引言

随着信息技术、时空大数据和移动互联网技术迅猛发展,地图学和地理信息技术正向信息化、全球化快速发展,地理信息服务已经深入到千家万户和社会的方方面面,例如2020年春节期間突发新冠疫情后,众多互联网医疗健康企业和新闻媒体都上线了疫情地图。疫情地图是专题地图,以疫情为主题、以地图为地理基础,在地理底图突出并完善地表示与疫情主题相关的一种或几种要素,使地图内容专题化。不同的时空大数据选取维度和不同的可视化表达形式,使得目前各家疫情地图既似曾相识,又千人千面。本文对新冠疫情时空大数据选取的维度和可视化表现方式两个方面进行研究。

2 疫情地图的数据选择

本次疫情没有统一的实时播报平台,各家疫情地图数据基本来自国家卫生健康委员会渠道。国家卫生健康委员会数据包含全国各个地区最新的确诊、疑似、重症、死亡和治愈病例数,每天更新。另一个重要渠道为各大媒体报道的最新疫情相关的新闻,这是终端用户最容易接收的疫情一线信息。面对统一的数据来源和海量的实时新闻,各家如何短时间结合自身业务优势,打造一款差异化、有影响力的疫情地图,内容选取是关键因素之一。

2.1 选择能直观表达概况和现状的数据

疫情当前,用户最想看什么呢?用户首先想知道疫情的严重程度和发展态势,疫情地图内容上就要包含全国最新确诊感染的人数、累计确诊总数;随着全国确诊人数越来越多,疫情是否得到控制又是一个用户需求点,因此数据要包含治愈人数、死亡人数;随着时间推移,用户会担忧自身所在区域情况如何,其所关心的人所在区域如何,等等,这就需要详细到街道甚至小区的数据。

2.2 选择最有吸引力的内容

疫情的持续发酵,任何关于疫情的话题都会被用户格外关注,个例牵动千万用户的情绪。疫情地图产品也应考虑大部分共性用户的情绪点,将各大主流媒体的新闻和可点燃用户情绪点的资讯整理选入。

2.3 选择契合自身业务优势和企业价值导向的内容

随着时间推移,会有新维度的数据进入大众视野。健康知识最权威,资讯内容博眼球。例如丁香园依托健康知识上线话题度很高的辟谣模块,又如有的门户网站推出海外名人确诊版块,这些都高度契合自身

业务优势。除此之外,旅行限制信息、同行查询、集中隔离点查询等内容可从不同方面满足公众需求。但这些内容要不要选取,主要还看自身业务需求和正向引导的理念。有些维度的数据甚至有舆论风险和政策风险,要慎重选取。

综上,疫情地图选取内容过少,无法和竞品比拼抢夺用户关注;过于复杂,则无法突出主题和业务优势。笔者恰好参与易图通科技(北京)有限公司疫情地图设计工作,从地图供应商和地理信息服务提供商的业务角度出发,第一版的疫情地图首界面内容选取了疫情信息、周边疫情、动态新闻版块(图1),其中疫情信息中展示更新时间、全国确诊人数、疑似病例数、治愈人数和死亡人数。通过内容分类,每个版块内容丰富,视觉上又做到了简约直观。随着疫情在全球发展,第二版推出海外疫情版块,并提供海外旅行限制信息查询功能。该功能以矢量地图为底图,支持查询全球任何一个已公布相关限制信息的国家和地区具体限制内容,提供从中国入境该目的地国家或地区的入境详细政策,涵盖是否允许入境、原有签证是否有效及新签证办理方式、可入境航班及口岸开放信息、入境后检疫和隔离政策,方便快捷,非常实用。



图1 动态新闻版块

3 疫情时空大数据可视化表达方法

数据可视化是一种以直观图形描绘密集和复杂信息的表现形式,旨在让用户更容易看懂和理解数据,使传达的信息更明确。

3.1 矢量地图叠加区域填充色块表达疫情分布

地图适用于和地理位置相关的数据分析例如不同城市的人口统计、病例分布信息。用地图统计各省份确诊人数的数量,通过地图上色块深浅人们可以直观地感受到当前各省份确诊人数的密集程度。当鼠标指向或悬浮时会展示各地确诊、死亡、治愈人数等详细信息。笔者参与的疫情地图以真瓦片矢量地图作为底图,除能实现浏览功能外,还支持查询、缩放等地图功能。

使用区域专题图时慎用图案或剖面线强调某个区域,制图轮廓不要太复杂,尽量标准、简洁。地图的线框是区域信息的一种表达方式,能清晰表明当前区域即达到目的;图例用色块表示数值区间时,注意色块颜色一般根据数值大小由深到浅渐变,或由浅到深渐变,不能出现明暗交替渐变。

3.2 矢量地图叠加热力图表达疫情分布

用样本单位密度作为热度值叠加至底图显示即疫情分布热力图。热力图代表一定范围内样本的聚集数量,用来表示疫情的分布非常合适。

3.3 南丁格尔玫瑰图表达疫情严重的国家

南丁格尔玫瑰图是一种极坐标统计图,其命名来源于一位名叫南丁格尔的护士,出于枯燥的表格统计结果不会受到重视的考虑,她用这种图的形式,表达军医院季节性的死亡率,成功打动当时高层,使得医事改良得到支持。对于不太理解传统统计报表的人,南丁格尔玫瑰图能够让人印象深刻,表达疫情态势严重的国家非常合适。

3.4 折线图表示疫情持续发展的趋势

折线图可以显示随时间变化的连续数据,非常适用于显示在相等时间间隔下数据的变化趋势。疫情地图中用折线图描述全国或某地区疫情新增趋势(图2)。折线图还支持点击图表上的点显示,当前横坐标对应的纵坐标数值,帮助更详细地查看信息。

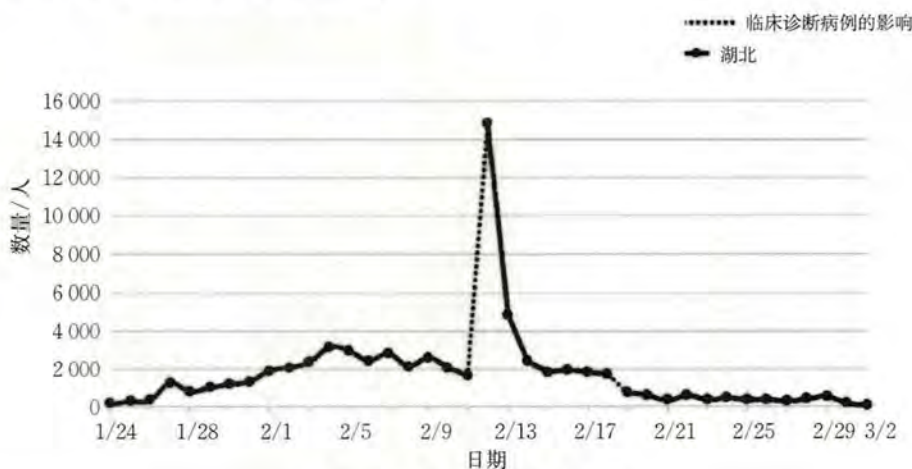


图2 湖北新增确诊病例趋势

用折线图表现数据增长或降低的趋势时,也要注意以下事项:折线图不易太高或太低,一般折线区域占整个图表的三分之二比较合适;折线不宜太粗,太粗影响折线变化细节的表达。

4 总 结

同一数据,选取不同维度的数据,将传达出不同的信息;同样的信息使用不同的表达方式,也将产生不同的接收和消化效应。我们要先根据业务需求明确页面内容想传达给用户的信息,并在了解不同表达方式的使用场景、特点、限制条件的基础上,选取合适的方式展示信息。界面展示上应抓住重点、去除不必要的装饰,轻量化展示重要信息,确保传达内容准确、有效、清晰。

参考文献:(略)

作者简介:赵娟,女,1987年生,产品经理,主要从事网站设计及大数据可视化研究工作。

深度轨迹网络在移动终端定位中的应用

王东清,陈绍建,秦 博,孙 翔,段 航
(北京三快在线科技有限公司,北京 100102)

摘 要:在大数据应用场景中的移动终端定位,分为粗定位和精定位两个阶段。传统的基于规则的粗定位模型,存在用户真实位置召回率低的现象。为解决该类问题,本文提出将基于规则的粗定位算法框架升级为深度轨迹网络模型,借鉴注意力机制的构建思想,计算候选位置网格与用户历史定位轨迹的匹配度,匹配度越高的数据对定位结果的影响越大,据此对轨迹特征向量进行加权,并融合人工规则特征,经过神经网络打分,筛选排序靠前的 top-k 位置网格作为粗定位结果。在精定位阶段,将 top-k 个候选位置网格特征输入至 RankNet 排序模型,选取打分最高的位置网格坐标返回至用户。实验结果表明,所提算法在定位精度累计分布值评测指标上提升显著。

关键词:移动终端定位;用户轨迹;神经网络

1 引 言

身处移动互联网时代,智能移动终端几乎成为每个人的标配,各种服务功能的手机应用程序(APP)应运而生。以美团 APP 为代表,作为中国最大的生活服务电子平台,覆盖餐饮、外卖、酒店旅游、共享单车、打车等多种业务。在这些业务中,定位服务(LBS)扮演着不可或缺的角色。以美团外卖业务为例,定位服务贯穿了用户下单、骑手到店取餐、送达用户整个过程。可见,定位服务已渗透人们日常生活的各个方面,实现精准的定位已成为高品质服务的基础,这对于聚焦“到店、到家、旅行、出行”四大 LBS 场景的美团平台尤为重要。

鉴于美团业务场景的多样化,相应的定位服务也融合了全球导航卫星系统定位、网络定位和惯性导航定位等多种方式。本文介绍的内容主要涉及网络定位方式。网络定位的整个流程分为离线训练和在线定位两个阶段:①在离线训练阶段,以移动终端扫描到的周围接入点(Wi-Fi、基站)为基本单位,对每个接入点在一段时间内采集数据所覆盖的空间区域,按照网格进行划分,提取其中的位置指纹特征,包括信号强度统计特征、采集样本数等;②在线定位阶段,根据终端用户发起定位请求中的接入点信息,获取接入点的历史训练位置指纹,并按照网格进行倒排索引,计算实时请求信息与每个候选位置网格的匹配程度,返回相关性最高的匹配结果。具体的位置指纹匹配算法可分为确定型和概率型,典型的代表为 K-近邻(KNN)算法和高斯混合模型算法。

深度学习作为一种端到端自适应学习数据内在模式的方法,减少了人工设计特征造成的不完备性,在图像、自然语言处理方面得到广泛应用,也被广泛应用于定位领域。基于 RankNet 的深度学习方法在美团定位场景中的应用,使网络定位指标显著提升。在此基础上,本文将基于规则的粗排方法升级为深度轨迹网络模型,借助注意力模型思想,通过神经网络结构对用户的历史定位轨迹与每个候选位置网格间匹配并计算权重,匹配度越高的历史数据对定位结果的影响越大,据此对轨迹特征向量进行加权,并融合人工规则特征,经过神经网络打分,提升用户真实位置的召回率,实现高精度定位功能。

2 基于深度轨迹网络的移动终端定位算法

基于深度轨迹网络的移动终端定位算法框架分为粗定位和精定位两个阶段。

(1)粗定位阶段以用户历史轨迹、基站及 Wi-Fi 历史指纹库信息作为输入,借鉴了深度兴趣网络中的

注意力机制,通过神经网络结构学习候选位置网格与历史定位轨迹信息的匹配度。由于并非用户所有的历史位置都对当前定位有效,仅只有一部分是强相关的,按照匹配度对历史定位轨迹的特征向量进行池化,可以更细粒度地利用用户定位特征,并与人工规则的特征进行融合,经过神经网络打分,返回排序 top-k 位置网格。

(2)在粗定位基础之上,通过 RankNet 模型对候选位置进行打分,选择排序第一的位置坐标返回至用户。

2.1 深度轨迹网络

深度轨迹网络主要由两部分组成:①将稀疏的 id 输入转为嵌入向量特征的嵌入层(embedding layer);②用以输出候选位置网格打分的全连接层。

2.1.1 嵌入层

在该方法中,首先将用户历史轨迹点及候选位置网格的经纬度按某种机制转换为字符串(如 40.020 782 05, 116.466 016 17,基于 geohash 的 8 位编码为 wx4gdjxc),采用 one-hot 编码数值化其中的每个字符,以 wx4gdjxc 中的字符 4 为例,其 one-hot 编码为{0,0,0,1,0,0,0,0,0,0}。嵌入层将不同字符的 one-hot 编码串连成高维的稀疏特征并投影至低维的稠密空间,即嵌入向量。

2.1.2 池化层和融合层

注意到不同用户的历史轨迹点数量是不同的,从而嵌入层输入特征总数也是不同的,导致相应的嵌入向量列表的长度可变。由于后面的全连接网络只能处理定长的输入特征,通常的做法是经由池化层转换嵌入向量的列表以获得定长特征。本文采用该做法,并引入局部激活单元,以加权的形式表示池化层的输出,计算方法如下

$$\mathbf{V}_u(A) = f(\mathbf{V}_A, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_P) = \sum_{j=1}^P a(\mathbf{e}_j, \mathbf{V}_A) \mathbf{e}_j = \sum_{j=1}^P \omega_j \mathbf{e}_j$$

式中, $\mathbf{V}_u(A)$ 表示用户在候选位置网格 A 的特征表示, $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_P\}$ 表示用户历史轨迹点的嵌入向量, \mathbf{V}_A 表示候选位置网格的嵌入向量, ω_j 为 \mathbf{e}_j 对应的权值。通过函数 a 计算每个历史轨迹点 \mathbf{e}_j 与候选位置网格 A 特征向量的相似度,并对轨迹点特征向量 \mathbf{e}_j 计算加权,最终获取池化层的输出 f 函数。

在获取到池化层的特征之后,将其与传统的人工规则特征进行融合,主要包括 Wi-Fi 和基站的信号强度统计特征、采集样本数、欧氏距离、排序特征等。将所有向量串连接在一起获取候选位置网格的特征表示。

2.1.3 多层感知器

给定候选位置网格的最终特征向量,全连接网络将自适应地学习组合特征,输出用户在该位置网格的打分。具体来说,网络结构包括 2 个单元个数分别为 20 和 10 的隐藏层,激活函数为 PReLU,输出层的激活函数采用 ReLU。

2.1.4 损失函数

深度轨迹网络使用的损失函数如下

$$L = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in S} [y \log p(x) + (1-y) \log(1-p(x))]$$

式中, S 为训练的数据集; N 表示训练数据的大小; x 为全连接网络的输入; $y \in \{0,1\}$ 表示标签; $p(x)$ 为网络的输出,表示用户在该位置网格的概率。

2.2 基于 RankNet 的精定位

在粗定位阶段,深度轨迹网络会根据用户历史轨迹点进行筛选,获取排序靠前的 top-k 位置网格参与精排。在精定位阶段的特征设计上,使用了传统的人工规则特征,并涉及 Wang 等所述 Wi-Fi 信号统计特征。在模型方面,采用了全连接网络,模型的结构与 Wang 等所述保持一致。

3 实验方案

3.1 实验数据

在用户权限许可的情况下,采集用户发起定位请求时周围的 Wi-Fi 列表、基站及对应的 GPS 数据。为了保证训练数据的可靠性,根据 GPS 的参数(精度、速度、卫星数)进行数据过滤。同时,将用户的历史 GPS 点按时间维度进行拼接,作为模型的输入数据。在完成数据的清洗及构建之后,使用 50 天的采集数据训练 Wi-Fi 及基站的位置指纹特征库,并筛选 50 天之外的两天数据(各 40 万条),作为验证集和测试集。

3.2 评测指标

评测指标包括:

(1)定位精度累计分布值(cumulative distribution function, CDF)。在所有的测试样本中,计算算法定位点坐标与 GPS 点坐标的误差距离小于阈值的占比。以 CDF 20 为例,表示距离误差在 20 m 以内的样本量占比。

(2)线上服务响应时间(TP)。统计一段周期内,算法每次调用所占用的时间,并将这些时间按从小到大进行排序,取满足百分比的那个值作为 TP 指标的值。如 TP 50 为算法调用占用时间至少有 50% 的量要小于该阈值,否则系统将会报警。

(3)定位成功率。在所有的测试样本中,算法返回位置坐标定位的样本量占比。

3.3 定位算法评估方案

为验证所提算法的有效性,评估以下两种算法在定位指标中的表现。

(1)Wi-Fi 指纹粗定位+RankNet 精定位。采用 Wi-Fi 粗筛排序靠前的 top-k 的位置网格,并用 RankNet 模型对粗定位结果进行精排,选取排序第一的位置网格作为定位结果。

(2)深度轨迹网络粗定位(DTN)+RankNet 精定位。采用深度轨迹网络粗选排序靠前的 top-k 的位置网格,并用 RankNet 模型对粗定位结果进行精排,选取排序第一的位置网格作为定位结果。

4 实验结果

两种算法的定位精度如表 1 所示,可以看出,DTN 的定位精度全线超越 RankNet,最高提升 2.76%。

两种算法的定位成功率和线上服务响应时间评测指标如表 2 所示,DTN 的定位成功率略高于 RankNet,在 TP90 和 TP99 指标方面,DTN 的响应时间高于 RankNet,归因于在粗排阶段引入计算复杂度较高的神经网络模型,相比精度的提升,耗时增加仍然在可接受的范围内。

表 1 两种算法的定位精度

算法	CDF 10	CDF 20	CDF 30	CDF 40	CDF 50	CDF 60	CDF 70	CDF 80	CDF 90	CDF 100
RankNet	20.95%	45.52%	62.28%	73.09%	80.17%	84.96%	88.29%	90.58%	92.29%	93.51%
DTN	23.71%	47.43%	63.75%	74.04%	80.98%	85.83%	89.06%	91.22%	92.89%	94.07%

表 2 两种算法的 TP 指标和定位成功率

TP 指标和定位成功率	RankNet	DTN
TP 90/ms	10	18
TP 99/ms	19	27
定位成功率	99.993%	99.994%

5 结 语

本文在 Wang 等的研究基础之上,针对基于规则的粗定位模型,存在用户真实位置召回率低的现象,将基于规则的粗定位算法框架升级为深度轨迹网络模型,借鉴注意力机制的构建思想,计算候选位置网格与用户的历史定位轨迹的匹配度,匹配度越高的数据对定位结果影响越大,据此对轨迹特征向量进行加权,融合人工规则特征,经过神经网络打分,筛选排序靠前的 top-k 位置网格作为粗定位结果。在精定位阶段,将 top-k 候选位置网格特征输入至 RankNet 排序模型,选取打分最高的位置网格坐标返回至用户。实验结果表明,所提算法在定位精度累计分布值评测指标上提升显著。

参考文献:(略)

作者简介:王东清,男,1989年生,算法工程师,研究方向为机器学习、深度学习在定位领域中的应用。

铱星系统加入全球海上遇险与安全系统分析及北斗短报文国际海事应用借鉴及思考

窦路¹, 孙倩¹, 胡彩波²

(1. 交通运输部水运科学研究所, 北京 100082; 2. 北京卫星导航中心, 北京 100094)

摘要:2018年5月, 国际海事组织(IMO)第99次海上安全委员会批准美国铱星系统为全球海上遇险与安全系统(GMDSS)移动卫星服务提供商。为有效推动北斗“走出去”, 提升北斗的国际竞争力, 我国于2019年IMO第101次会议上提出北斗短报文服务系统加入GMDSS的立项申请并获批准。本文结合铱星系统的认可过程, 针对IMO的GMDSS移动卫星业务的认可程序与标准、核心技术、国际协调、关键问题等进行研究, 为北斗短报文业务加入GMDSS工作提供参考依据。

关键词:铱星; 国际海事组织; GMDSS; 标准化

1 引言

2018年5月, 国际海事组织(IMO)海上安全委员会(MSC)第99次会议在英国伦敦召开, 会议认可了美国铱星系统的安全语音服务、短脉冲数据服务、增强群呼服务符合全球海上遇险与安全系统(GMDSS)对移动卫星通信服务的标准要求, 同意发布决议MSC.451(99)《认可铱星卫星公司为海事移动卫星服务的声明》。至此, 美国铱星卫星公司(简称铱星公司)正式成为国际海事组织GMDSS移动卫星服务提供商(简称服务提供商)。随后, 国际移动卫星组织(IMSO)与铱星公司签订公开服务协议(PSA)。依据其计划, 铱星公司将于2020年正式为船舶提供真正的GMDSS语音和数据通信服务。

同时, 随着我国北斗导航卫星系统(简称北斗)的建设与发展, 北斗三号系统除区域短报文通信服务容量与性能提升外, 还具备全球短报文的通信服务能力, 对于海事领域常规及遇险搜救通信有积极的意义。

2 GMDSS及铱星系统

2.1 GMDSS

GMDSS是IMO建立的一套综合的全球性的通信搜救网络。该系统主要由卫星通信系统、地面通信系统及海上安全信息播发系统组成。其中, 卫星通信系统主要指国际海事卫星(INMARSAT)及低极轨道卫星搜救系统(COSPAS-SARSAT)系统。INMARSAT系统可提供A1~A3海区的双向通信及L频段的单向(船对岸)紧急无线电示位标(EPIRB)遇险报警。COSPAS-SARSAT系统主要由极轨道卫星提供406 MHz的EPIRB遇险报警, 不提供双向通信。地面通信系统用于遇险报警、搜救协调通信、搜救现场通信及日常公众通信, 主要由中波、短波、超短波(MF、HF、VHF)等通信系统组成。海上安全信息播发系统用于向船舶发送航行警告、气象警告及其他海上紧急安全信息, 由岸基航行警告系统(NAVTEX)系统及INMARSAT系统中的增强群呼系统(EGC)或短波窄带直接印字(HF NBDP)方式播发。

GMDSS中包含的子系统较多, 船舶在不同的区域航行时, 要求配备的GMDSS设备也有所区别。海区主要划分为A1、A2、A3及A4。A1海区主要是VHF岸台覆盖的有效区域, 距离岸20~30 n mile, 配备VHF CH70数字选择性呼叫(DSC)或者VHF EPIRB进行船对船、船对岸的报警。A2海区主要是MF岸台覆盖的海域, 距岸100 n mile, 船舶应使用VHF、MF DSC或卫星EPIRB进行船对船、船对岸报警。A3海区指INMARSAT系统同步卫星覆盖范围内除A1、A2海区之外的区域, 由具有连续报警能力的船载地面站所支持的经认可的移动卫星通信业务所覆盖的区域, 采用移动卫星进行船对岸报警。A4海区

主要指除 A1、A2、A3 海区之外的海域,主要为两极地区,采用 COSPAS-SARSAT 系统进行船对岸报警。

GMDSS 的主要功能包括:遇险报警、搜救协调通信、救助现场通信、定位、海上安全信息的播发、常规的公众业务通信、驾驶室对驾驶室的通信。IMO 对船舶配备 GMDSS 通信设备有强制性要求,要求航行在海上的每艘船舶具备的通信功能主要如下。

(1)执行 GMDSS 的功能,包括:由至少两台分开的和独立的装置发送船对岸遇险报警,且每台装置应使用不同的无线电通信业务;接收岸对船遇险报警转播;发送和接收船对船遇险报警;发送和接收搜救协调信息;发送和接收现场通信;发送和接收定位信号;接收海上安全信息;发送和接收一般无线通信(除遇险以外的业务通信);发送和接收驾驶室对驾驶室的通信。

(2)发送和接收满足国际船舶和港口设施保安规则要求的保安相关通信(船舶在进入港口前与保安级别更新、保安时间及保安相关信息等相关通信)。

(3)发送和接收与岸基系统或网络之间的其他通信(除遇险、紧急、安全、一般或保安相关通信以外的任何通信)。

2.2 铱星系统及业务分析

铱星是由铱星公司运营的低地球轨道移动通信卫星,由分布在 6 个轨道面上的 66 颗卫星组成,轨道高度 780 km,轨道倾斜角 86.4° 。2007 年,铱星公司提出了“铱星下一代”(Iridium NEXT)发展计划,与原有星座保持一致,并从 2017 年开始发射下一代卫星,共计划发射 72 颗新的卫星(66 颗在轨工作+6 颗在轨备份卫星)。铱星安全语音呼叫支持船到岸、岸到船及船到船的呼叫,并提供 GMDSS 所要求的 4 个呼叫优先级;短脉冲数据服务支持船到岸的报警及岸到船的警告信息传输,支持下行 270 个字符和上行 340 个字符的数据传输;增强群呼业务用于海上安全信息(MSI)播发。

从 IMO 国际海上人命安全公约(SOLAS)公约对船舶设备配备的强制性要求可以看出,铱星系统加入 GMDSS 获得国际海事合法应用地位,对其扩大民用范围、开拓市场并长远运营是非常有利的。

3 GMDSS 对移动卫星系统的认可程序及要求

3.1 国际组织工作机制研究

移动卫星系统加入 GMDSS 的认可工作主要由 IMO 进行审议,政策与行政方面的认可由 MSC 进行,具体的技术审计由 MSC 下设的航行、通信及搜救分委会(NCSR)完成。IMO 的组织机构如图 1 所示。

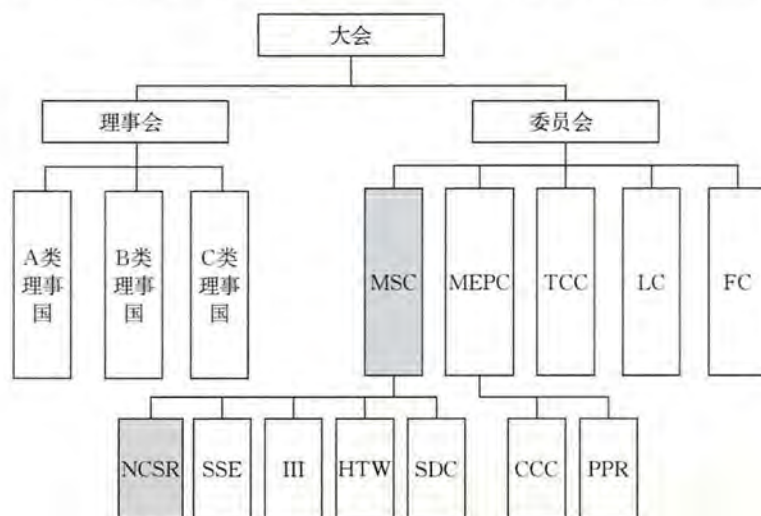


图 1 IMO 组织机构

在技术评估的具体操作层面,往往由 IMSO 进行现场评估与测试,以及对 GMDSS 的督查工作。

IMSO 作为政府间组织,在 IMO 支持下于 1979 年成立。中国是 IMSO 成员国,并且是 INMARSAT 系统船上地面收发站在领海和港口使用的缔约国。IMSO 职责主要包括两方面,一是由 IMO 委托负责监督 GMDSS 移动卫星服务提供商的履约与实施,二是船舶远程识别与跟踪系统(LRIT)协调员,由 IMO 任命审计和审查 LRIT 系统的性能,以确保其全球运营系统。IMSO 经费来源于 GMDSS 服务提供商及 LRIT 数据中心赞助。值得一提的是,IMSO 对铱星系统的评估工作经费,是由铱星公司提供的。

3.2 准入程序

3.2.1 提出申请

卫星系统提供商想加入 GMDSS,需由 IMO 的成员国提出,通过在 GMDSS 中提供海上遇险与安全卫星通信服务来认可其成为 GMDSS 的无线电系统。此类申请需由卫星系统所在成员国单个政府或几个合作政府向 IMO 提出。申请将由 MSC 委员会依据 GMDSS 卫星服务扩展政策进行审议。若 MSC 对此申请没有原则性的反对意见,则将此申请下放到 NCSR 分委会进行技术评估。NCSR 分委会将对卫星系统在 GMDSS 中的运营开展技术评估与认可。

3.2.2 提交评估材料

提出申请的政府组织需要为 IMO 评估提供有效信息,所需的卫星系统信息要求包括:

- (1)移动卫星系统功能符合 IMO 相应技术标准。
- (2)符合 IMO A. 707(17)决议所列卫星服务的收费政策与条款。
- (3)服务提供商应具备并提供充分的能力保持未来服务的运行,保证提供符合 IMO 组织和海上用户所需的服务的连续性、持久性及可靠性。
- (4)服务提供商应提交与 IMSO 签订的公开服务协议(PSA)。

3.2.3 验证与评估

(1)NCSR 分委会应根据决议 A. 1001(25)所列技术要求,根据服务提供商提交所需验证与评估信息。IMSO 往往负责具体的评估细节。此外,分委会会充分考虑 1974 SOLAS 公约第 4 章中的相关规则要求。

(2)对卫星导航系统的最终认可将由 MSC 委员会先发布决议,阐明 IMO 认可的该服务提供商的信息,并向 IMSO 提供一份认可说明。

(3)若经过评估,IMO 最终无法认可该服务提供商加入 GMDSS,IMO 应与该服务提供商进行沟通,列出不认可的理由及该服务提供商将来认可需要开展的事项。

3.2.4 公开服务协议

(1)系统认可后应根据服务提供商与 IMSO 签订的公开服务协议 PSA 条款,服从 IMSO 的监督。任何移动卫星系统在未得到 IMO 纳入 GMDSS 的认可,以及未完成上述流程与 IMSO 签订 PSA 之前,都不得用于 GMDSS。

(2)IMSO 将持续对已认可的服务提供商进行监督。

(3)PSA 中条款应体现:确保遵循协议附件所列标准的 GMDSS 服务职责;相关强制性国际文件;与 GMDSS 服务相关的 IMO 和国际电信联盟(ITU)的建议、决议和程序。

3.2.5 报告

IMSO 应至少每年向 IMO 报告每个认可的 GMDSS 服务的可用性、性能及其他相关信息。

3.3 认可要求

IMO 对移动卫星加入 GMDSS 的认可标准主要有三个,如表 1 所示。

表 1 GMDSS 对移动卫星的认可标准

序号	标准号	备注
1	决议 A. 1001(25)	移动卫星系统加入 GMDSS 的认可标准
2	通函 MSC. 1/Circ. 1414	预期成为 GMDSS 服务提供商的卫星业务导则
3	决议 A. 707(17)	GMDSS 卫星业务遇险、应急和安全信息收费标准

其中,决议 A. 1001(25)是最重要的,涵盖了卫星业务需满足的所有业务与功能的技术要求。通函

MSC. 1/Circ. 1414 是关于申请认可问题与过程的相关问题解读,决议 A. 707(17)是对卫星业务收费政策的规定。此外,卫星业务的应用设备,还应满足应用于 GMDSS 的船载终端性能标准 MSC. 434(98)等标准。

4 铱星系统及其加入 GMDSS 的进程

铱星系统于 2013 年在 MSC 92 次会议上提出加入 GMDSS 的申请与立项,并在 2018 年完成认可,其在 IMO 认可的会议议题进程如表 2 所示。

表 2 铱星系统加入 GMDSS 的 IMO 会议评估进程

序号	时间	会议名称	审议的主要内容
1	2013 年 6 月	MSC 92	铱星系统加入 GMDSS 立项
2	2014 年 6 月	NCSR 1	铱星系统用于 GMDSS 情况及认可工作相关信息,IMSO 自身对评估工作的协调与安排
3	2014 年 11 月	MSC 94	决定成立独立评估专家组,正式委托 IMSO 进行评估
4	2015 年 3 月	NCSR 2	对铱星系统兼容性、铱星终端设备等问题的质疑与审议
5	2015 年 6 月	MSC 95	议题再次列入计划外输出(一个议题的审议周期为 2 年)
6	2016 年 2 月	NCSR 3	IMSO 对铱星系统操作与评估的相关信息;会议起草完成了铱星系统需满足的 A. 1001(25)技术要求的清单
7	2016 年 5 月	MSC 96	铱星系统满足 NCSR 3 所列清单后再加入 GMDSS
8	2017 年 3 月	NCSR 4	IMSO 对铱星系统评估相关信息;铱星系统就对相关计划及问题的回应,包括商业网关、“铱星下一代”、海事移动终端、与其他网络与岸上设备的互操作、网络可用性
9	2018 年 3 月	NCSR 5	IMSO 评估认为铱星系统满足 NCSR 3 所列技术要求清单所有要求
10	2018 年 5 月	MSC 99	认可铱星系统提供的安全语音、短脉冲数据和增强群呼作为 GMDSS 海上移动卫星业务;铱星系统完成其认可工作。

从铱星系统加入 GMDSS 的评估过程来看,IMO 成立评估专家组,委托 IMSO 对铱星系统对照 A. 1001(25)开展了两次现场评估,分别于 NCSR 3 次会议和 NCSR 5 次会议出具了 2 份评估报告。铱星系统最终满足了 A. 1001(25)中对技术性能的要求,从国际文件及程序层面,完成了认可所需工作。但铱星系统在网络可用性、岸基播发 MSI 信息、GMDSS 遇险通信实现方式、频率协调、铱星船载终端与搜救中心设备的兼容性等方面存在很多需要解决的技术问题与质疑,国际协调层面的工作促进了铱星系统完成 GMDSS 的认可。

在 IMO 相关议题下,铱星公司也为纳入 GMDSS 做了其他相应的辅助工作。例如为匹配铱星船载终端的应用,美国在“船载 GMDSS 设备性能标准,以容纳新的 GMDSS 卫星服务供应商”议题下,完成了 GMDSS 中使用的船载终端的性能标准的更新。

铱星系统认可成功后,IMO 在原 GMDSS 通信卫星系统仅有 INMARSAT 系统的框架下,为避免歧义,对一系列标准决议进行了修订,如“回顾 SOLAS 第 4 章及其附录,以容纳新的移动卫星系统”议题中,将 SOLAS 公约第 4 章中“INMARSAT”全部修订为“认可的移动卫星”业务。随后,铱星公司与 IMSO 签订公开服务协议,并在 IMO 开展制定《铱星临时安全服务手册》,配合多个国际组织,开展对 MSI 播发建议书及相关业务的标准修正,积极筹备为海事用户提供正式服务。铱星系统的加入,可弥补 INMARSAT 系统在全球覆盖区域的不足,为两极地区的 GMDSS 船舶通信提供便利。

5 北斗加入 GMDSS 面临的挑战及机遇

2018 年,我国在 IMO MSC 99 次会议上提交了认可北斗短报文服务作为 GMDSS 服务提供方的申

请。2019年1月,在NCSR 6次会议上提交了北斗短报文服务系统将开展的工作计划。2020年1月,在NCSR 7次会议上提交了《认可北斗短报文服务系统作为GMDSS服务提供方》的自评估报告,得到大部分国家代表的有力支持,将由IMSO开展技术与运营评估。借鉴铱星系统的评估过程与国际形势变化,本文认为,北斗加入GMDSS面临的挑战与机遇主要包括三个方面。

5.1 面向国际海事履约服务的技术评估挑战

GMDSS卫星通信业务涵盖了国际海事领域船舶、船舶所有方、岸上主管与搜救机构、气象及医疗机构等综合主体要素,包括遇险报警、搜救协调通信、常规通信等综合通信服务。在IMO的框架下,提供服务的政府国需保障其系统运行满足国际标准要求的功能与性能,并承担向国际社会履约的职责。北斗短报文服务系统将面临IMSO的现场技术评估,这对其是一项重要挑战。

5.2 国际认可标准修订对认可时间的约束挑战

铱星系统虽已加入GMDSS,但其认可过程存在诸多技术争议,例如很多成员国代表认为决议A.1001(25)存在一定的缺陷,并在MSC 101次会议上支持对决议A.1001(25)和通函MSC.1/Circ.1414进行修订。为不延误北斗认可工作,经我国与IMO协调,在A.1001(25)新标准修订完成之前,仍采用现有标准对北斗短报文服务的认可进行评估。北斗需加快系统认可步伐,以避免该项工作的延迟产生不确定因素。

5.3 北斗海事搜救终端可带动北斗发展的机遇

用于GMDSS服务的北斗海事搜救终端可有效集成北斗三号的多项服务,在满足海上导航定位、日常通信信息交互、遇险告警等功能的基础上,充分利用北斗导航、定位、授时、短报文通信、位置报告与搜救一体化的独特优势,形成更加经济、高效、便捷、易用的北斗海事用户终端。适用北斗的GMDSS终端,可有效带动北斗的全面发展,服务北斗走出去。

6 结 语

综合来看,在铱星系统加入GMDSS过程中开展的技术评估工作和国际协调,是IMO对新的卫星服务提供商的认可过程的探索,北斗短报文服务随铱星系统后申请加入GMDSS,与北斗全球系统全面建设节点相适应,可参考借鉴铱星系统认可过程及面临的相关问题,对北斗短报文的国际海事应用推进具有一定的指导意义。

参考文献:(略)

作者简介:窦路,女,1988年生,助理研究员,研究领域为通信与导航专业,就职于交通运输部水运科学研究所。

基于电子海图和船舶自动识别系统的 海上交通场景三维可视化研究*

夏启兵,吴功栋,李 巍
(北海航海保障中心,天津 300455)

摘要:三维地理信息和数字地球技术在陆地已经得到较为广泛的应用,在海上以 ECDIS 为主要导航工具的海图应用还停留在二维技术层面。此外,海上导航定位手段仍以 GPS 为主,北斗应用较为局限。本文研究并实践了以 osgEarth 为核心,综合 S-57 电子海图、AIS、北斗等数据进行集成应用的方法。随着北斗系统走向全球,基于我国自主的北斗定位技术和三维可视化技术将在海洋管理、海事监管、航海保障、船舶导航等领域具有广泛应用前景。

关键词:北斗;电子海图;AIS;三维;数字地球

1 引言

电子海图显示信息系统(ECDIS)指符合有关国际标准的船用电子海图系统,是继雷达之后在船舶导航方面又一项伟大的技术革命,已发展成为目前海上使用最广泛的船舶导航系统。它以计算机为核心,以电子海图为基础,以定位仪、测深仪、雷达、罗经等传感器及船舶自动识别系统(AIS)为输入,为驾驶员提供各种信息查询,综合反映船舶航行状态。虽然以 S-57 标准为基础的 ECDIS 二维电子海图在航海领域已得到了广泛的应用,但由于其固有的局限性,本质上只是基于抽象符号的系统,不能直观地还原自然界的真实面貌。目前正兴起的各种基于电子海图的三维应用可以提供更加真实、直观的海洋自然地理环境可视化效果,具有广泛的应用前景。

北斗导航卫星系统(简称北斗系统)是我国自主研发的卫星导航系统,也是国家重大空间和信息化基础设施。北斗系统自 2012 年正式对外提供区域服务以来,已在关系国计民生、国家安全的多个重点领域和行业得到规模化应用。虽然北斗在沿海、内河船舶得到一定的应用,但在大型远洋商船上的应用还较为空白。由于车载定位设备的配备必须通过国际海事组织认可,长久以来这一市场一直被美国 GPS 独占。2014 年 11 月 17 日至 21 日国际海事组织海上安全委员会第 94 次会议审议通过了对北斗系统认可的航行安全通函,这标志着北斗系统正式成为全球无线电导航系统的组成部分,取得面向海事应用的国际合法地位,将为全面推动北斗系统海事国际应用和建成北斗系统海事国际标准化体系奠定良好的基础,使北斗系统在 ECDIS 中的应用具备了国际法规基础条件。

本文以开放的三维数字地球引擎库 osgEarth 为平台,以北斗系统、S-57 电子海图、AIS 数据等为基础,研究海上交通场景三维可视化集成应用方法。

2 海上交通场景三维可视化基础框架设计

2.1 三维数字地球引擎库 osgEarth 介绍

谷歌地球作为一款成熟的商业数字地球软件,虽然能够实现高精度地理信息数据的三维综合显示,但

* 基金项目:国家重点研发计划(课题编号:2018YFB1601504)

是存在数据源单一、开发模式固定、成本过高等不足之处。osgEarth 是开放源代码的三维数字地球引擎库,集成了 Qt 绘图引擎、GDAL/OGR 数据驱动库、Proj4 地图投影库、Curl 文件传输库、Geos 拓扑操作库、SQLite 数据库等开源库,具有实时地形渲染,坐标投影转换,矢量、影像、网络地图等多源数据加载等功能,为创建跨平台的数字地球提供了开发框架。

osgEarth 基于 OpenSceneGraph(OSG)构建。OSG 是一个基于工业标准 OpenGL 跨平台的三维开源场景图形系统应用程序接口(API)。作为一个高性能的图形开发引擎,OSG 在三维程序开发中扮演着重要角色。海上交通场景三维可视化基础框架以 osgEarth 平台为基础,通过跨平台集成开发环境(IDE) Qt Creator 进行编译和集成,采用面向对象的 C++ 语言进行开发。

2.2 海上交通场景三维影像基础层

osgEarth 利用二维 GIS 经常用到的瓦片地图服务技术,将原始的卫片纹理和高程数据分别进行瓦片化处理,然后再将源数据导入场景中结合多细节层次(LOD)节点控制进行分层实时渲染绘制。这种方案中地形模型和其他矢量特征节点都是在场景管理过程中实时生成的,可以很方便地利用渲染引擎控制相互之间的投影关系和渲染顺序等属性,也可以高效地调整地形模型本身的显示层次、拉伸系数、位置偏移等特征。同时,由于提前进行了瓦片化处理,将耗费资源的原始数据分层处理与三维渲染分开进行,系统在运行过程中可以根据场景相机的位置和距离等信息进行分层渲染绘制,只处理可见范围内的地形模型生成,大大降低了原始地理数据增大对场景绘制的影响,提升了大场景三维系统的运行效率。

目前,互联网上提供二维地图瓦片切图的地图服务较多,例如谷歌地图、百度地图、高德地图、雅虎地图、腾讯地图等。这些地图大多是为满足陆地用图需求而产生,图片要素以陆地为主,海上要素非常简略,不能满足海上应用的需要,有必要基于海图制作相应的海图瓦片数据集。

由于 S-57 海图标准和技术发展多年,基于 S-57 标准的二维电子海图显示控件平台可以满足二维电子海图切片制作需求。通过提供 API,可支持指定经纬度范围、指定投影方式生成 PNG 格式的海图切片。电子海图陆地部分要素较为简略,生成切片时,对海图要素分层中的陆地部分要素予以屏蔽,生成的图片陆地部分可以透明的方式叠加到数字地球中,实现海、陆图的相互弥补和无缝融合,提供一个更加完整的三维场景。采用轻量级 HTTP 服务器 JQHttpServer 提供基于海图显示控件平台的实时化 S-57 海图切片和服务功能。JQHttpServer 是基于 Qt 开发的轻量级 HTTP/HTTPS 服务器,目前支持 GET 和 POST 两种协议,底层有 QTcpSocket、QSSocket 和 QLocalSocket 三个版本。三维系统以标准 Web 地图瓦片服务(WMTS)数据标准发起请求,海图切片服务系统首先查找本地缓存是否有对应的海图切片文件,若无则调用切片接口生成 PNG 切片文件,并通过 JQHttpServer 反馈给三维系统。

2.3 海上交通场景三维高程数据

三维场景中的高程数据由两部分组成,陆地部分以互联网开放的 ReadyMap 高程为基础,通过简单配置,三维场景中就可以使用全球 ReadyMap 高程。海上部分高程数据基于 S-57 电子海图和多波速测量原始数据采用插值方法构建。通过二维电子海图控件平台提取所有水深点信息(每个点包含有经纬度、水深信息),并采用基于德洛奈(Delaunay)三角网的 DEM 内插算法,从而较好地模拟海底平面地形特征,反映海道的真实起伏形态。

2.4 海上三维模型数据

三维地物建模是三维可视化的重要组成部分。由于模型数量众多,在可视化方面必须兼顾模型逼真的视觉效果与模型的加载速度,对于复杂模型结合 LOD 技术,减小模型数据量并加快调度速度,进而保证交互式可视化应用的实时性,尤其是应用于大规模航道场景的绘制,建模应在满足一定逼真程度的情况下尽可能地简化结构。osgEarth 支持 fbx、3ds、ive、obj、osg 等多种三维模型数据格式,对于典型实体建模,如跨江建筑物、码头、船舶等,通常采用一定的建模工具,例如通过 AutoCAD、3ds Max 等建模软件来实现,并转换为 osgEarth 支持的格式进行加载。

由于大范围三维场景的构建费时费力,本文采用基于电子海图数据提取的自动化配布方法,经过最少量的人工交互即可生成对应的三维场景,并直接加载到数字地球三维场景中。采用电子海图平台自动遍历海图中所有要素的方法,自动提取其包含的空间和属性信息,按照预设的三维模型自动生成三维目标元素。采用 osgEarth 提供的 simple model 驱动进行三维模型加载,设置模型座落位置点 (x, y, z) , 绕 x 、 y 、 z 轴模型的旋转角度及在 x 、 y 、 z 方向模型缩放比例。

3 海上交通场景三维应用功能设计

3.1 北斗系统定位

根据《北斗卫星导航系统发展报告(4.0版)》,北斗系统的定位精度为水平 10 m、高程 10 m(95%),测速精度为 0.2 m/s(95%),授时精度为 20 ns(95%);服务可用性优于 95%,其中,亚太地区定位精度为水平 5 m、高程 5 m(95%)。实测结果表明,北斗系统服务能力全面达到并优于上述指标,可满足海上定位导航实际应用需要。

船载北斗系统数据通过标准的 RS232 串口进行传输,定位模块有单次定位和连续定位两种模式。单次定位需要用户主动地发送定位申请才可以得到定位数据,而连续定位是用户只发送一次定位申请,定位申请中包含有连续定位间隔时间的指令,设置该指令就可以以指定的间隔时间持续不断地接收到定位数据。定位协议采用《北斗一号用户机数据接口要求(4.0版)》,定位申请数据格式为: \$DWSQ, <1>, <2>, <3>, <4>, <5>, <6>, <7>。其中, <1> 为整条数据的长度,位宽固定 16 位; <2> 为用户唯一卡号,位宽固定 24 位; <3> 为信息类别,包含是否紧急定位、是否保密、测高方式、高程指标等内容,位宽固定 8 位; <4> 为天线高和高程数据,位宽固定 32 位; <5> 为气压数据,位宽固定 32 位; <6> 为定位频度,位宽固定 16 位,设为每秒 1 次自动定位; <7> 为对整条语句进行校验,位宽固定 8 位。

3.2 AIS 动态数据接入

AIS 是一种新型的集网络技术、现代通信技术、计算机技术、电子信息显示技术为一体的数字助航系统和设备,它配合 GPS 将船位、船速、改变航向率及航向等船舶动态,结合船名、呼号、吃水及危险货物等船舶静态资料,由甚高频(VHF)向附近水域船舶及岸台广播,使邻近船舶及岸台能及时掌握附近海面所有船舶的动静态资讯,得以立刻互相通话协调,或采取必要避让行动,有效保障船舶航行安全。

由于海上船舶数量庞大,每艘船舶外形都不相同,为每艘船舶建立相应的三维模型既无必要也不现实。在 AIS 中,船舶类型归纳划分为军舰、帆船、游艇、搜救船、拖船、执法船、油轮、客船等种类,只需要为每一类船舶建立相应的三维模型,采用串口接收 AIS 数据,获取船舶经纬度位置、船舶尺寸、船舶类型等相关参数,软件即可自动加载 AIS 船舶三维模型到三维场景中进行显示。

3.3 查询和量算

osgEarthUtil 是 osgEarth 核心算法库之一,它提供了一系列交互响应事件类,可通过鼠标与三维地形场景的交互操作获取坐标点信息,量测地形两点间距离等。osgEarth 将坐标查询封装在 osgEarth::Util::MouseCoordsTool 类中,主要利用继承自 osgGA::GUIEventHandler 的类实现鼠标事件监听与响应。

3.4 环境效果

在三维应用开发的过程中,为了实现逼真的三维场景可视化效果,需要实现风、雪、雨、云、雾等环境特效。系统利用 osg::Fog 类实现雾效,可以通过接口函数设置雾的浓度、颜色、渐变模式等。采用 osgParticle::PrecipitationEffect 粒子系统实现雨雪效果,可以通过接口函数设置雨雪的颜色、密度、风力、风向等,雨雪的差别只是粒子参数设置的不同,加载方式完全一样。

由于 osgOcean 是平面海洋,不支持 osgEarth 球面,系统集成 Sundog 公司的 Triton 海洋,以支持 GPU 模拟海洋效果,具有较高的性能。海洋特效实现了三维海洋海面的实时逼真绘制,海平面可以实时反射太阳光照,实现海面上运动或者静止的物体倒影,同时根据风力大小及风向控制洋流和海面浪花效果。

系统集成 Sundog 公司的 SilverLining 模块实现动态天空渲染。SilverLining 模块基于实时物理模拟与太阳相对位置,模拟散射光线穿过地球大气层而产生的渐变效果,提供对包括浓积云、淡积云、积雨云、层云、卷云、卷积云等形态的多种云层的模拟。

4 结论和展望

将陆地应用较为成熟的三维数字地球用于海上交通场景三维可视化集成应用,可较为快速地构建海上三维应用技术体系。osgEarth 可作为海上交通场景三维应用的基础平台。基于 osgEarth 构建海上三维应用仅采用目前各类互联网陆地地图尚不能满足实际需求,还需要集成以 S-57 海图数据为代表的海上测绘地理信息数据。本文实践了以 osgEarth 为核心,综合 S-57 电子海图、AIS、北斗系统等数据进行集成应用的方法,取得了较好的效果。随着北斗系统应用走向全球,基于我国自主北斗系统定位技术和三维可视化技术将在海洋管理、海事监管、航海保障、船舶导航等领域具有广泛的应用前景。

参考文献:(略)

作者简介:夏启兵,男,1977年生,北海航海保障中心通信信息处副处长,高级工程师,主要从事北斗、海图等方面研究。

宏图“风·景”:北斗遥感双引擎,助力农业新发展

高志军,柳杨华,梁楠,徐士儒

(航天宏图信息技术股份有限公司,北京 100195)

摘要:农业作为我国第一产业,具有非常重要的地位,在国家战略地位尤为重要。国家历来重视农业发展。智慧农业作为从数字农业、精准农业逐渐发展而来的现代农业的高级阶段,旨在充分利用现有的信息技术,包括更透彻的感知技术、更广泛的互联互通技术和更深入的智能化技术,使农业系统的运转更加有效、更加智慧,这是我国农村经济社会发展的必由之路。通过发展智慧农业有望改变现有农业生产方式,改善农业“看天吃饭”现状,提高农业生产效率,提升农产品质量,驱动我国农业变革。

关键词:北斗;遥感;智慧农业;物联网;信息感知;监测评估

1 引言

航天宏图信息技术股份有限公司(简称航天宏图)紧跟时代步伐,响应国家号召,结合智慧农业应用发展新需求,依托自主研发的遥感影像处理平台(PIE)和北斗地图导航平台(PIE-MAP)两大核心产品,充分融合遥感影像信息提取、精准天气预报、北斗高精度定位、物联网数据采集、移动无线网络传输、大数据挖掘和人工智能分析等先进技术,构建“风·景”智慧农业综合应用服务平台(PIE-Landscape,简称“风·景”平台),面向农业生产全链条每一个环节,提供农业资源服务、农业生产服务、农业气象服务和农业经营管理服务,赋能政府、企业、合作社和农户等用户做出准确判断与智慧部署,提升农业智慧化水平。

2 “风·景”平台名称意义

智慧农业综合应用服务平台产品取名“风·景”二字,分别代表早期靠天吃饭时代农业生产过程中最为关注的天气状况和作物长势两大要素。

“风”是气象因子之一,表征精准农业气象。“风·景”平台将单纯的气象预报进化为充分切合农业种植需求的专业化农业气象诊断决策产品,令农业领域的“风”有信,充分发挥精准农业气象趋利避害的服务能力。

“景”是遥感影像单位,表征农业遥感监测。“风·景”平台让静态沉默的遥感影像图片结合算法分析、农业知识库,变身为包含作物长势、植物营养成分、农田墒情等农情信息的农业生产决策与规划产品,令“景”可言,充分发挥农业遥感全面客观的服务能力。

“风·景”智慧农业综合应用服务平台希望智慧农业服务让农业处处新,让每一块田地成为更美的风景,推动智慧农业,助力乡村振兴。

3 “风·景”平台能力

“风·景”智慧农业综合应用服务平台面向农业相关用户提供农业资源服务、农业生产服务、农业气象服务和农业经营管理服务(图1)。

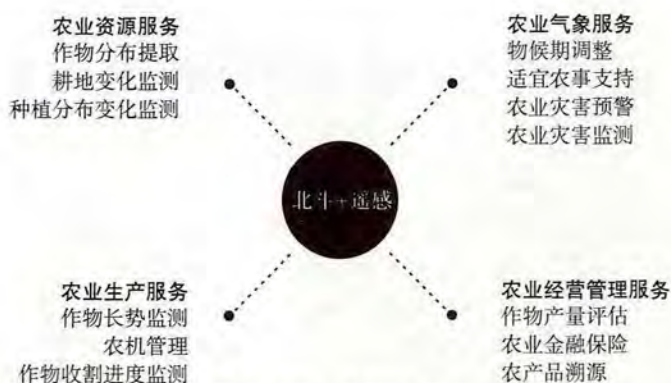


图1 “风·景”平台能力

3.1 农业资源服务

农业资源服务板块主要为用户提供相对静态的数据管理与服务。该板块通过遥感影像快速、准确、客观地获取作物种植类型信息、作物种植面积信息、空间分布状况,融合农田物联网监测设备获取的土样信息(涵盖养分状况、结构性状、地理因素、缓冲性能),综合分析形成田块种植环境因子分析图,给田块建立档案信息库,为后续农事计划科学制定提供辅助决策数据。

3.2 农业生产服务

农业生产服务板块利用多期遥感影像为用户提供作物长势监测和收割进度监测应用,为政府管理部门提供决策依据;利用北斗卫星导航技术实现农机耕作和无人机植保的全过程监控,让业主及相关管理人员可以随时了解设备运行状态和作业数据,确保作业质量,实现对各类农业装备基础数据全面、规范的管理,为农机耕种、无人机植保补贴提供数据依据和决策支持。

3.3 农业气象服务

农业气象服务板块为用户提供地块级7天短期天气预报、5 km 网格精度,逐小时的72 h 精准天气预报及要素网格化展示;定位不同作物类型,提供定制化农业气象预报及灾害预警服务;依据气象条件,进行适宜农事黄历提醒及未来48 h 农事精准时间窗口查询服务;基于农业气象历史数据的态势分析和种植决策支持,预防水灾、旱灾、冰雹和冰冻等常见的自然灾害,提高粮食产量。

3.4 农业经营管理服务

农业经营管理服务板块主要利用遥感影像光谱信息反演的生长信息(如叶面积指数、生物量),建立农作物的产量关联模型,进行作物产量评估;利用“遥感+北斗”技术实现农作物从农田生长、加工出场、物流运输到商家销售等环节的全流程监控,实现农作物的彻底溯源,确保农产品安全,打造高端农产品服务。

4 “风·景”平台产品特点

“风·景”智慧农业综合应用服务平台具有以下特点。

- (1)天空地一体化智慧农业平台,实现信息感知、动态监控、精准分析、智慧决策。
- (2)面向农业全生命周期的大数据支撑,融合多源遥感数据、基础农学数据、精准气象数据、地理信息数据等,打造平台数据构架。
- (3)面向农业全产业链大数据挖掘分析,建立物候模型、作物长势模型、土壤质量评估模型、气象模型等,为农业全生命周期管理提供决策支持。
- (4)面向农业生产全过程精准化管理,实现农事管理档案化、生产过程信息化、分析结果可视化。
- (5)个性化服务定制,贴心式交互设计,清新派视觉风格。

5 “风·景”平台应用案例

5.1 “风·景”助力北京郊区千亩梨园大丰收

2018年北京大兴梨园、通州梨园在“风·景”平台的帮助下,顺利攻克生产过程中道道难关,收获高产高品质果实。

5.1.1 精细监测土壤

2018年3月初,梨树仍处于休眠期时,平台的田管家服务板块就已经开始向客户提供土壤监测服务。梨园专属的土壤质量分析报告建议客户适量补充有机肥,为2018年的丰收打好基础。

5.1.2 “神机妙算”冻害

2018年4月4日,一场大范围的降温、降雪令早春作物遭受了不同程度的冻害。此次寒潮来临前,北方地区气温持续偏高,不少作物生育期提前,抗寒能力随之减弱,导致此次冻害严重,梨、苹果等经济作物产量预计会大幅降低。但大兴梨园与通州梨园却丝毫未受冻害影响,这得益于平台为大兴梨园与通州梨园提供的精准气象预报服务。

3月中旬,平台就预报了4月初将会有较强烈寒潮,并建议用户在3月下旬对梨园进行灌水,以推迟梨树开花时间,使寒潮降临时梨花仍处于抗寒能力较强的花蕾期。

精准气象服务不仅能提供中期(4~15天)预报,同时提供未来48h内逐小时的精准天气预报,综合不同时间尺度的精准气象预报,向用户提供更精准的农事建议。预报显示,2018年4月5日0时后北京及周边地区气温将会将至 0°C 以下,最低气温将出现在凌晨5时前后。梨花花蕾在 0°C 以下便有冻伤的风险,平台建议用户提前预备放烟材料,以应对即将到来的降温,并提供用户放烟最佳时间窗口。梨园用户根据平台的建议,于2018年4月5日5时开始在梨园放烟,避免梨园遭受冻害的同时,也节约了人力、物力成本。早春冻害是梨树种植过程中杀伤力最大的因素,平台的精准气象服务,成功助力大兴梨园和通州梨园淡定过关。

5.1.3 智慧监测“长势”

监控服务板块在梨树生长期定时提供长势监测服务,每月向用户提供一幅梨园地块的NDVI遥感影像及长势异常点分析,用户亦可通过监控板块反馈长势异常点具体情况及可能原因。在梨树旺盛生长期(4月),大兴梨园的NDVI影像出现4个异常点(图2)。异常点实地验证发现,生长量异常弱(即NDVI值异常低)的区域,是叶面肥喷施时,调配的化肥氨基酸浓度过大,导致生长量减小甚至停止生长;生长量异常大(即NDVI值异常高)的区域,是梨树生长旺盛,枝叶过于茂密导致。根据实地考察结果,“风·景”平台建议用户在NDVI异常高值区域进行修枝和疏果,NDVI异常低值区域在施肥时适当降低化肥浓度。有长势监测服务的助力,梨园施肥得当,修枝疏果及时,每一颗果实都营养充分,安全通过“长势”这一关。



图2 遥感卫星影像长势监测

5.1.4 精准气象“护果”

2018年7月中旬,正处于收获季的梨子又一次遇到挑战。平台提前两天预报“7·16”暴雨,并在暴雨来临前12h发布暴雨预警,提醒用户提前做好排水准备。暴雨结束后,北京进入连日阴雨天气,平台中期预报显示,此次阴雨天气将持续7天以上,且阴雨天气结束后将迎来连续高温天气。向用户发出提醒,阴雨天过后的高温天气极易引发梨树轮纹、黑星病等病虫害,应注意预防,提前做好病虫害防治工作。

平台在北京郊区梨园的推广应用,大大减少了人工巡检工作量,减少了施肥浪费,提高了施药效率,降低了气象病虫害灾害损失,为农户增产创收。

5.2 “风·景”平台打造广西全省农机管理“一张图”

“风·景”平台依托农业生产服务板块,聚焦广西壮族自治区甘蔗生产各环节,为机械化深松整地、蔗地粉垄整地、甘蔗机械化种植、甘蔗机械化统防统治、甘蔗机械化收获等作业环节提供定位监控、信息共享、面积计算、质量审核、补助管理等精细化服务,打造全省农机监控管理“一张图”、农机补贴核算“一张表”,提升广西农机管理智慧化水平。

5.2.1 作业供需服务

通过平台及时发布农机作业供需信息,实现农场(种植户)与农机服务组织之间的准确、高效对接。农机服务组织根据作业需求,提前制订计划,避免农机资源闲置浪费。在实际生产中,农场(种植户)通过平台获取农机供应信息,将订单下发给农机服务组织,农机服务组织接到订单后,指派农机前往作业,并通过平台进行作业监控。

5.2.2 作业监控管理

通过北斗农机终端上报的信息,实时获取农机准确位置,实现农机实时定位跟踪。通过串联农机位置信息点形成历史轨迹,真实反映农机行驶和作业路线,准确掌握农机作业过程。选定农机的作业数据,可查看农机终端在线状态、作业深度、作业速度、作业里程和实时面积等信息。

5.2.3 作业补助核准

通过农机作业轨迹、作业深度和拍摄上传的现场照片,审核作业质量。对合格的作业按照标准计算补助金额。质量审核提供地块级别的面积核查方式。系统自动识别出地块区域并在高清影像图上标记作业面积,核查人员可以非常方便地对农机作业地块进行逐一核查。核查人员可以调取对应地块上的农机作业现场影像图库,通过对影像图片和作业深度进行查看分析。

“风·景”平台在广西壮族自治区农机管理方面的推广应用,不仅最大限度地为农机作业补助资金的兑付提供真实有效的依据,还极大地提升了农机管理工作的信息化、精细化水平,提高工作效率,降低管理成本,促进了农机管理模式改革创新。

6 结 语

航天宏图长期致力于“通导遥”空天一体化技术在各行各业的推广及应用,“风·景”智慧农业综合应用服务平台只是航天宏图在农业应用领域迈出的小小一步,未来航天宏图将一如既往持续发力,打造高品质的“PIE”系列核心产品,加大行业应用服务力度。

参考文献:(略)

作者简介:高志军,男,1981年生,航天宏图信息技术股份有限公司副总经理,主要从事北斗、遥感和地理信息系统相关项目论证设计、研发建设,以项目总师负责参与北斗三号卫星工程地面运控相关系统设计及建设。

“北斗+”技术在智慧交通系统中的应用

谢士琴^{1,2}, 汪泽民¹, 牛鹏飞¹, 崔文俊¹, 邓鑫¹

(1. 国智恒北斗科技集团股份有限公司, 北京 100192; 2. 北京理工大学, 北京 100081)

摘要:当今城市交通面临着道路拥堵、停车收费混乱、执法监督困难等严峻挑战,基于“北斗+”的智慧交通概念在这一背景下应运而生。本文介绍了交通建设的现状特点及其发展前景,在北斗导航定位技术的基础上,结合大数据、高分遥感、5G及区块链技术在智慧交通建设中的融合应用进行了探索,并对今后“北斗+”技术在智慧交通中的大规模推广应用进行了展望,为实现北斗导航定位技术与智慧城市建设的深度融合及城市可持续发展提供参考。

关键词:智慧交通;北斗导航技术;交通管理系统;智慧城市

1 引言

当前,国际卫星导航领域已形成了较为完备的产业体系,GPS在各个领域中占据了主导地位。与此同时,我国的北斗导航卫星系统(简称北斗)也在快速发展,并在多个领域得到了广泛的应用。随着2020年6月23日北斗三号最后一颗全球组网卫星的成功发射,北斗系统星座部署比原计划提前半年全面完成基本系统建设,并开始提供全球服务,北斗迎来了跨越式的发展机遇期,正在实现与GPS比肩甚至超越。随着我国北斗导航技术的不断提高和卫星定位系统日益完善,卫星导航定位技术已进入我国众多行业和领域,在智慧交通方面的应用也更加全面。结合北斗技术,融合其他高新技术共同助力构建畅通、安全、智能化的现代交通运输体系,具有广泛应用前景。研究以北斗技术为核心,结合大数据、遥感、区块链及机器学习等技术融合应用,对智慧交通建设进行探讨,为推进现阶段交通智能化进程提供新的技术参考。

2 交通建设现状分析

近年来,随着科学技术的快速发展,我国的城市建设进入飞速发展阶段,并朝向现代化、科技化、智能化发展。交通建设作为我国城市建设的重要组成部分之一,一直是国民经济、社会发展和人民生活的命脉。但是随着城市规模的扩大与人口数量的急剧增长,许多道路交通规划建设和管理严重滞后。城市交通拥堵、非法套牌、违章停车、交通执法监督困难等问题频发,在一定程度上为百姓的生活造成了困扰,也制约了城市的发展。

智慧交通是人们对未来交通建设的一种美好设想,人们可以通过科技的力量解决目前交通建设过程中存在的诸多问题。近年来,我国政府部门和相关企业也在努力推进智慧交通的建设和发展,将导航、GIS、云计算等技术综合应用到车辆安全、电子收费、交通管理等场景中。国内很多城市也开始了对智慧交通的研究和建设,重点将数据分析、导航定位、数据挖掘等技术融入交通管理、公共交通服务方向。目前,很多国家已经开始智慧交通系统的建设,而我国的智慧交通的关键技术体系研发仍然处于发展起步阶段。

由于我国的北斗系统建设较GPS起步较晚,其发展更多依赖于行业示范应用的带动。近年来,随着国内北斗相关产品及增强系统的逐渐成熟,北斗系统在道路运输安全监管、海上船舶监控、交通安全应急等多个典型交通领域都得到了应用。但国内智能交通领域主要还是以GPS为主,北斗系统的实际应用与推广还有待进一步加强。

3 北斗智慧交通综合管理系统初步设计

为了提高交通系统管理效率,满足智能交通领域的应用需求,在北斗卫星导航定位技术的基础上,结合大数据、遥感、区块链、机器学习等高新技术进行融合应用,初步设计北斗智慧交通综合管理系统,为北斗智能交通应用终端的研制和北斗交通产业化应用提供参考,以提升未来交通智能信息化管理水平。

3.1 系统总体架构

北斗智慧交通综合管理系统总体设计思想是以大数据为中心,按照系统内在关系进行划分,系统的总体结构由终端层、网络层、服务层和应用层构成,如图1所示。系统在实现过程中考虑到用户操作层面的便捷性,应提供良好的用户界面和在线帮助功能,降低系统操作的复杂性。同时,系统应具备良好的可维护性,系统维护、数据维护、网络维护要做到既安全又便捷。

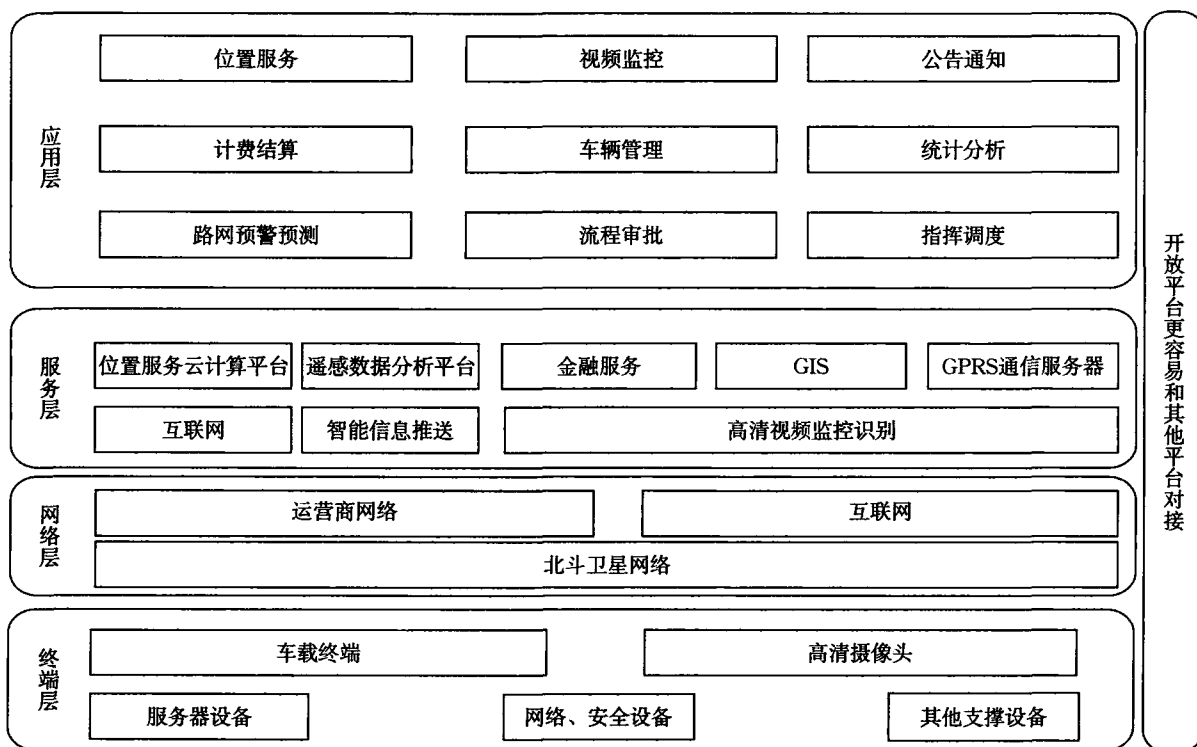


图1 系统总体架构

3.2 系统主要功能

北斗智慧交通综合管理系统整合了车辆定位服务、视频监控、路况预判、电子计费结算、交通指挥调度、事故报警、智慧停车、交通诱导等功能。系统功能可以分为基本功能和增值功能两大部分。

3.2.1 基本功能

北斗智慧交通综合管理系统的基本功能包括交通位置服务、视频监控、电子计费结算、统计分析、指挥调度、事故报警等。

(1) 交通位置服务。提供城市车辆位置、电子轨迹、路网结构、交通管理设施、警力配备、大型交通流集散场地分布等信息查询。

(2) 视频监控。负责提供城市交通流的时空分布信息和交通状况的直观图像信息,并支持交通信息检测、电子警察等功能。

(3) 电子计费结算。电子计费结算可以根据交通动态数据库的资料,实现系统后台自动计费结算,实

现收费的无纸化和快速化。

(4)统计分析。根据各种交通数据实现交通流信息的基础统计和道路状态判别,并汇总生成对应的统计图表。

(5)交通指挥调度。通过计算机和网络技术将各种信息源的各类动、静态交通信息有机地集合为一体,形成具有统一标准、覆盖范围广泛、调度指挥决策快捷的交通指挥信息模块。

(6)交通事故报警。负责提供辖区内突发性交通事故和其他紧急事件信息。当发生道路交通事故时,事故当事人、知情人可以在第一时间报警。

3.2.2 增值功能

为了更好地提升交通管理效率,提供交通智能化服务,系统设计还可以提供交通拥堵情况分析、交通常年拥堵曲线图、交通诱导、智慧停车、事故处理、交通指挥、电子执法查车等增值服务。

(1)智能决策。交通智能决策是根据计算机收集的交通数据资料,智能地规划交通策略,配置交通信号,并形成不同交通策略的数据指导,帮助交通管理人员科学地、有策略地实现交通智能管理。

(2)智慧停车。智慧停车能够有效地对城市道路停车进行智能化管理,减少人工管理成本,提高管理效率,帮助停车者快速找到车位停车。系统可以实现停车收费的费率管理、车位管理、收费结算、人员管理、电子管理;此外应用智能终端、车位检测器等整合停车收费数据,提供停车监管、数据分析、费用结算等功能,实现停车管理的一体化、数字化、智能化。

(3)交通事故处理。交通事故处理可以为道路交通事故处理的各个环节提供信息化的业务办公平台,实现各业务环节的信息管理和流程化信息处理,为各级领导决策提供强有力的参考。

(4)交通诱导。交通诱导管理通过可变电子信息板、出行服务信息系统、北斗导航系统、泊车引导系统等各种传播途径,为出行者发送实时的交通信息和出行建议,以疏散堵塞,帮助人们快速、安全地抵达目的地。

(5)紧急车辆援助。紧急车辆援助是为警车、消防车、救护车、工程救险车等在执行公务时提供绿波带信号,帮助其快速抵达目的地,便于更好地调配警力、减少出警时间、选择最优出警和警卫线路。

4 “北斗+”智慧交通综合管理关键技术

卫星导航作为一种基础技术,是智能交通系统重要的信息感知手段,可以感知时间、位置、速度等重要信息。北斗系统是我自主建设、独立运行,与世界其他卫星导航系统兼容共用的全球卫星导航系统,可在全球范围,全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠的定位、导航、授时服务。如今北斗导航卫星系统已经组网完成并向全球提供导航定位服务。作为在智慧交通应用的重要技术手段,北斗三代导航卫星系统其卫星可见数、定位精度等性能指标与GPS所提供的性能指标基本相当,在中国区域内北斗较GPS部分性能更加优越。在充分利用北斗导航技术的基础上,结合大数据、遥感、区块链及机器学习等高新技术融合应用,是未来智慧交通发展的必然趋势。积极探索智慧交通发展模式,建设基于北斗的智慧交通综合管理平台,在促进城市交通快速发展的同时,也可以促进北斗卫星产业的快速发展。

智慧交通综合管理平台的设计需要以云计算、大数据分析、深度学习等技术为支撑,对北斗、遥感、地面高清传感设备等获取的交通大数据进行分析、处理、计算、反演,并利用区块链技术进行数据存储、传输、加密等,以保证数据的安全性、唯一性、可靠性,实现多源海量交通数据的联网接入、分析处理、云端存储、智能研判及可视化展示等功能,为交通、通信、刑侦、指挥调度等提供有力的技术支撑。

(1)北斗导航定位技术。北斗导航卫星系统可为用户提供高精度、高可靠的定位、导航、授时和短报文通信服务。利用北斗导航定位技术,可以实时记录车辆的精确位置和电子轨迹,制定电子围栏,监控和调度相关车辆。此外,北斗的短报文通信服务不仅可以在无线通信网络覆盖区内使用,在陆基无线通信网络不能覆盖的偏远地区同样也可以使用。尤其当车辆在偏远地区出现安全事故时,能够通信使其及时得到救助,实现特殊情况下的应急处理和紧急援助,这是GPS技术无法实现的,也是北斗技术的显著优势之一。

(2)高分卫星遥感技术。随着卫星空间分辨率的不断提高,遥感技术为交通地理信息库的快速更新带来了技术便利。利用高分辨率遥感影像提取交通路网信息,可以准确实时地获得城市整体交通路网状况信息。通过与历史交通数据进行比对,可以分析交通变化趋势,为路网改造、交通规划提供依据。此外,在发生地质灾害和突发交通状况时,可以利用遥感技术快速获取道路交通状况,进行路网灾害损毁评估,为交通事故应急救援提供参考。

(3)区块链技术。区块链是分布式数据存储、点对点传输、共识机制、加密算法等计算机技术的新型应用模式。其最大特点是去中心化、平等公开,一旦链接成功,数据难以篡改且所有节点的数据保持一致。相比传统车联网的网络安全防护,利用区块链技术对交通数据进行存储、传输和加密,可以实现车辆网更为可靠安全的认证存储,可以为交通用户提供可持续性的服务。而且交通数据难以被人为篡改,可以提升车联网的信息安全,实现交通电子即时支付。此外,区块链技术还可以有效解决交通数据共享最基础的信任问题和兼容问题,在实现交通数据资源共享的同时,保证交通数据的一致性和安全性。

(4)机器学习技术。随着机器的出现,人工智能在交通领域的广泛应用成为可能。面对车联网的海量车辆通行记录信息,利用机器学习技术,可实时分析城市交通流量、调整红绿灯间隔、缩短车辆等待时间。此外,还可以快速分析和处理城市道路上目标通行车辆的所有轨迹信息,以及停车场内的所有车辆信息和目标小区内的停车信息,提前预测交通流量变化和停车位数量变化,实现交通车辆相关费用的自动计算和处理,合理调配资源、疏导交通,实现包括汽车站、火车站、机场及商圈在内的城市大规模交通的联合调度,从而更好地提升城市的整体交通运行效率。

5 系统建设意义

北斗智慧交通综合管理系统能够在很大程度上提高交通管理效率、缓解城市交通拥堵,提高道路的通行能力,为道路使用者节省更多出行时间,避免人们将有限的时间和精力耗费在拥堵的交通上,从而为社会创造更多价值。同时系统的应用也能促进人们对交通运输行业的各种消费需求,带动相关产业经济的快速发展。

5.1 经济效益

系统的建设实施可以提高整体道路的通行能力,减少能源损耗,降低交通管理成本,推动传统交通管理向现代化、智能化管理转变,为交通领域提供更多经济效益,特别是系统综合运用北斗、遥感、区块链、机器学习等现代技术,最大化地发挥出相关产业链之间的联动效应,也实现社会公共资源的经济再生发展。

5.2 管理效益

系统的建设实施对管理效益所产生的最重要影响是城市管理效率的提升,直接关系到城市交通收费效率、交通拥堵状态的缓解和城市抗风险能力的增强。系统的建设实施可以解决电动车计费管理困难问题,增强交警的事故预警能力,提高交通管理效率,进而降低城市交通管理成本、拥堵成本、减排成本和环保成本。

5.3 社会效益

系统的建设实施可以提升城市交通服务和信息服务水平,实现交通收费自动化和智能化,方便市民出行和停车交费,缓解交通拥堵,促进社会经济协调发展。系统的建设实施可以为驾驶人提供足够的道路交通信息,减少道路环境中可能诱发事故的危险因素,在紧急情况中实现自动紧急避险,在事故发生后加快救援速度和减少时间延误,为整个社会出行提供安全保证。

6 结 语

基于“北斗+”技术的智慧交通综合管理系统在智慧交通建设中的应用意义重大。本文在分析现有交

通现状的基础上,对“北斗+”关键技术 in 交通领域的应用进行了介绍,最后对北斗智慧交通综合管理系统建设进行了初步设想,设计了系统总体架构和主要功能,并对系统建设效益进行了论述。随着北斗导航卫星系统民用市场的推广和广泛应用,作为国家战略性空间基础设施,北斗系统将会在今后的智能交通领域的应用中发挥不可替代的作用。在北斗技术的基础上,结合行业发展最前沿的高新技术,建设智能交通综合管理系统,在很大程度上可以提高交通管理效率、缓解城市交通拥堵,为道路使用者节省更多出行时间,从而为社会创造更多价值,在推动智慧交通建设和北斗产业发展的同时,也为智慧城市的可持续发展提供技术参考。

参考文献:(略)

作者简介:谢士琴,女,1992年生,博士,主要研究方向为“北斗+遥感”技术综合应用。

北京朝阳区大山子路口即刻分流导航技术研究

张启明

(中国管理科学研究院学术委员会,北京 101100)

摘要:在 2018 未来交通峰会上,高德地图公布了网友票选的“中国十大堵点”,其中北京大山子路口成为“最堵点”。在交通工程理论上,有个传统做法,就是减少冲突范围。当交通供需矛盾突出时,应在时间上、空间上将矛盾分散,按照各自特点分别解决,而不能拘泥于一种传统做法。目前北京大山子路口堵车矛盾还未彻底分散,经互联网路况信息及多次实地研究发现,大山子路口及周边路网具备典型的路网分流条件,适合采用即刻分流方式,以分流路牌引导单双号车分散行驶,将交通矛盾转移到相邻道路分解。该分流方式首选路口单节点单向分流,单向路口流率将减半,避免由于节点交通压力过于集中形成拥堵。可以预测,大山子路口东西向拥堵状况会在节点分流后得到缓解,车流趋于稳定通畅。即刻分流优点在于不需路网改造,只是在路口安装 LED 分流路牌,不同时段开启,节省治堵投入。即刻分流可以与卫星导航同步使用,方便驾驶员选择行驶路线,缩短出行时间。

关键词:大山子路口;即刻分流;矛盾分散;卫星导航分流

1 引言

北京市朝阳区大山子路口是五岔路口,分别连接京密路、酒仙桥路、酒仙桥北路、首都机场辅路、机场高速出口匝道等道路。大山子路口附近写字楼林立,密集的车流给大山子路口交通造成了巨大压力,以致成为 2018 未来交通峰会上公布的网友票选的中国十大堵点的“最堵点”。高德地图发布的《2019 年 Q1 中国主要城市交通分析报告》显示,奇虎 360 紧邻北京常发拥堵点大山子,周边道路全天路网行程延时指数高达 1.94,也就是说,奇虎 360 周边道路的通行耗时接近畅通情况下的 2 倍。

互联网地图实时路况变化经常显示大山子路口拥堵处于路网早高峰前期交通拥堵时段,呈现路网交通不平衡现象,比较适用即刻分流及卫星导航同步解决,即以单双号车路网分流来抑制高峰前期交通拥堵,为高峰大流量车流的到来做好分流准备,以缩短高峰时段,减小高峰峰值。

2 大山子路口交通拥堵特点

2.1 大山子路口构成缺陷

如图 1 所示,大山子五岔路口与西向京密路口之间的距离仅为 150 m,属于 CJJ 152—2010《城市道路交叉口设计规程》规定的限值,且京密路口东口连接大山子路口西口处为主干路连接,造成大山子路口西口 3+5 车道与大山子路口东口 3+2 车道不匹配。两个路口特殊结构衔接,增加了两个路口信号配时难度。

2.2 周边大型公司过于密集

大山子路口附近大型公司过于密集,驻扎在大山子路口附近的奇虎 360 等互联网公司的密集车流,以及北京 798 艺术中心、电子城 IT 产业园等的过往车流,共同呈现了大山子路口的“堵车特点”。

2.3 酒仙桥北路至望京街交通拥堵最严重

酒仙桥北路向北 1 750 m,该路段行车条件较差,其中临近大山子路口 650 m 为内双向 3+2 车道,向

东 1 100 m 路段为双向 2 车道。酒仙桥北路向东通过环铁北桥仅为双向 2 车道(图 1(b)),而且五岔路中只有酒仙桥北路口及酒仙桥路口允许车辆驶入大山桥路口(图 1(a)),以致在高峰时大山子路口东西向通行能力不高,实际高峰车流量每小时不足 1 500 辆。



图 1 大山子路口交通概况

2.4 最堵的酒仙桥北路路况条件较差且不能尽快改造

笔者认为,酒仙桥北路虽然交通拥堵,路况条件差,但并未见到扩改措施,这是因为扩宽改造后道路会对机动车产生更大吸引力,以致大山子路口东进口车流量还会增加,结果因大山子路口与京密路口的距离过近,造成车流更加混乱,这是大山子路口拥堵矛盾所在。

2.5 交通不平衡成为常态

2020 年初,笔者根据互联网信息及多次实地研究发现,大山子路口拥堵有一个特点,即大山子路口存在典型的相邻两路交通不平衡现象。从互联网地图实时路况可以看出,酒仙桥北路与南邻 830 m 的高家园路口东的万红路交通不平衡成为常态。如图 1(b)所示,酒仙桥北路呈现拥堵状态,而万红路却呈现畅通状态。上述两条道路交通不平衡现象与笔者实地随机拍摄的照片(图 2)相符,酒仙桥北路车辆拥堵排队为常态,而万红路交通轻闲,道路两侧成为附近公司的停车场地。面对酒仙桥北路巨大的交通压力,万红路应充分发挥双向 4 车道的空间利用,减缓大山子路口交通压力。



(a) 酒仙桥北路公司下班车要加入堵车队伍 (b) 同向两路间隔830 m路况: 一条拥堵, 一条闲置

图 2 大山子路口拥堵实地拍摄照片

3 城市街道畅通性理论研究

大山子路口东西向最拥堵,而东西向酒仙桥北路对大山子路口的交通通畅至关重要。为探其原因,笔者发现,至关重要的酒仙桥北路段 1.75 km 属于《道路通行能力手册》(简称“手册”)关于街道畅通路段研究范畴。手册介绍的方法着重于畅通性:论述城市街道的畅通性,其长度至少 3 km(在市中心区为

1.5 km)。对较短的街道也可以进行分析,通过对路上单个交叉口的分析,可以在某种程度上评价出入口。这种研究城市街道的方法没有直接说明以下 9 种发生在 2 个交叉口(但不排除 2 个交叉口之间相关联)之间的情况。

- (1)是否存在路边停车。
- (2)出入口的密度或出入口的控制。
- (3)交叉口进口车道的增加或交叉口出口车道的减少。
- (4)出入口之间坡度的影响。
- (5)交叉口之间任何通行能力的限制(如一座窄桥)。
- (6)路段的中央分隔带和双向行驶的左转车道。
- (7)转向车辆超过街道总交通量的 20%。
- (8)交叉口处的排队增长到上游交叉口并妨碍其正常运行。
- (9)横向交叉街道拥挤阻碍直行车流。

上述任何一种情况都会对直行交通流的速度产生很大影响,所以分析人员应最大限度地结合这些影响因素,对方法进行修正。结合上述城市街道畅通评价理论,大山子路口东口连接的酒仙桥北路与上述情况相符的高达 7 种,除情况(4)和情况(7)以外,其他均关联大山子路口东西向主要直行交通流的速度问题,说明目前大山子路口存在的交通矛盾颇多,不易破解。

4 大山子路口交通不平衡研究

互联网地图实时路况显示,连接大山子路口的酒仙桥北路与连接高家园路口的万红路交通不平衡是经常发生的。从区域的角度来看,造成交通拥堵的原因主要有两个:一是区域交通供需总量不平衡,二是区域路网负荷不均衡。路网负荷不均衡会造成局部路段或交叉口交通供需失衡,从而进一步加重拥堵。对于本文的研究区域来说,由路网负荷不均衡引起的交通拥堵更明显。路网负荷不均衡是由交通流分配不合理造成的,主要表现为较大的交通流通过等级较低和驾驶条件较差的道路,导致该道路上若干个连续的交叉口交通状况不良,并波及相关路段和附近交叉口,引起区域交通堵塞。大山子路口的酒仙桥北路情况与上述主要表现完全相符,同时也验证了《道路通行能力手册》所阐述的在通行能力分析中考虑高峰流率至关重要这一观点。也就是说,若所研究路段在 15 分钟高峰期间,流量超过了其通行能力(尽管整个小时内交通量并未超过通行能力),则由疏导通行能力不足引起的交通堵塞可能会延续几个小时。

4.1 酒仙桥北路的一条道路短期车流量和小时流量之间的关系

为进一步剖析大山子路口的交通现象,根据《道路通行能力手册》(图 3),对高峰时段一条道路短期车流量和小时流量之间的关系进行研究。如图 3 所示,基于 5 分钟高峰流量的最大流率为每小时 2 232 辆,而基于 15 分钟高峰流量的最大流率为每小时 1 980 辆,整个小时的交通量仅为 1 622 辆。以高峰 5 分钟流率设计通行道路会导致高峰时段的其余时间里道路剩余通行能力过大;以高峰小时交通量设计通行道路则会导致高峰小时内大部分时间道路处于过饱和状态。考虑这些高峰流率是很重要的,因为仅几分钟的通行力不足所造成的堵塞,需要花费很多时间来疏散。

尽管用于长期规划研究的预测交通量常以年平均日交通量(辆/天)表示,后来变为小时交通量,可是服务水平分析仍是以高峰小时内的高峰流率为基础的。手册中大部分分析都是以 15 分钟的高峰流率为基础的,如图 4 所示。另一方面,在高峰时间大山子路口东进口渠化双向不足 3+2 车道,高峰绿灯放行呈现大流量通行状态,不会呈现阶梯形车流量变化及比率悬殊;与大山子路口南绿信比 0.16 相比,大山子路口直行绿信比高达 0.54。该口 7:30—8:30 期间的 15 分钟最大流率为每小时 1 756 辆,整个小时交通流量仅为 1 488 辆。说明大山子路口东西向最堵,通行效率极低。

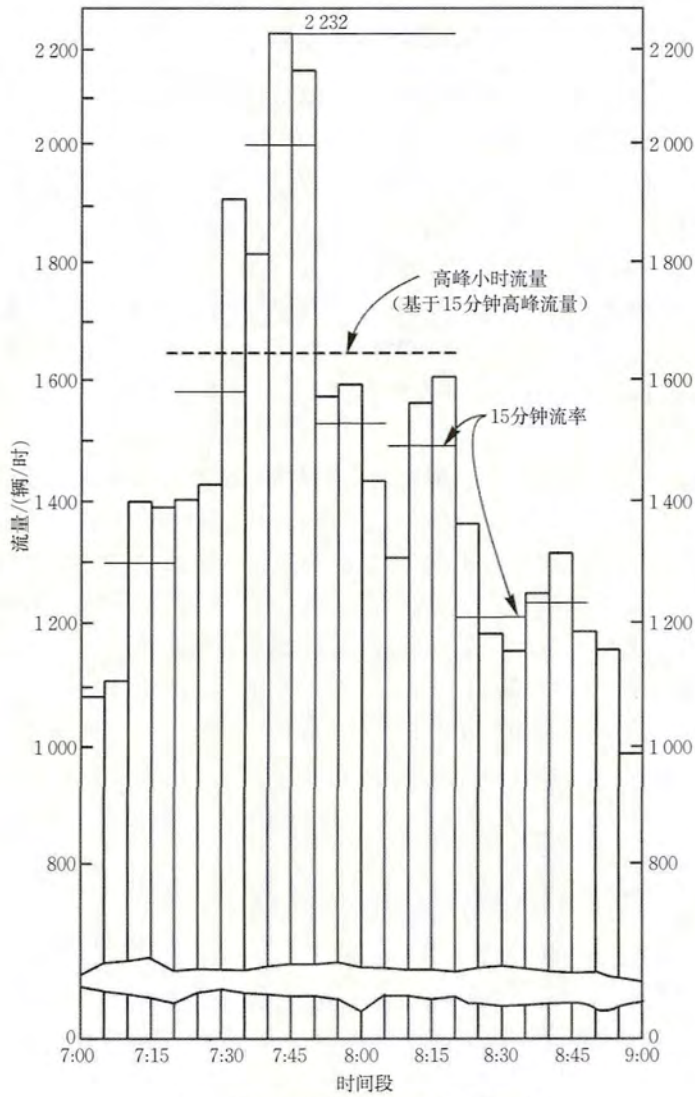


图3 短期流量和小时流量之间关系

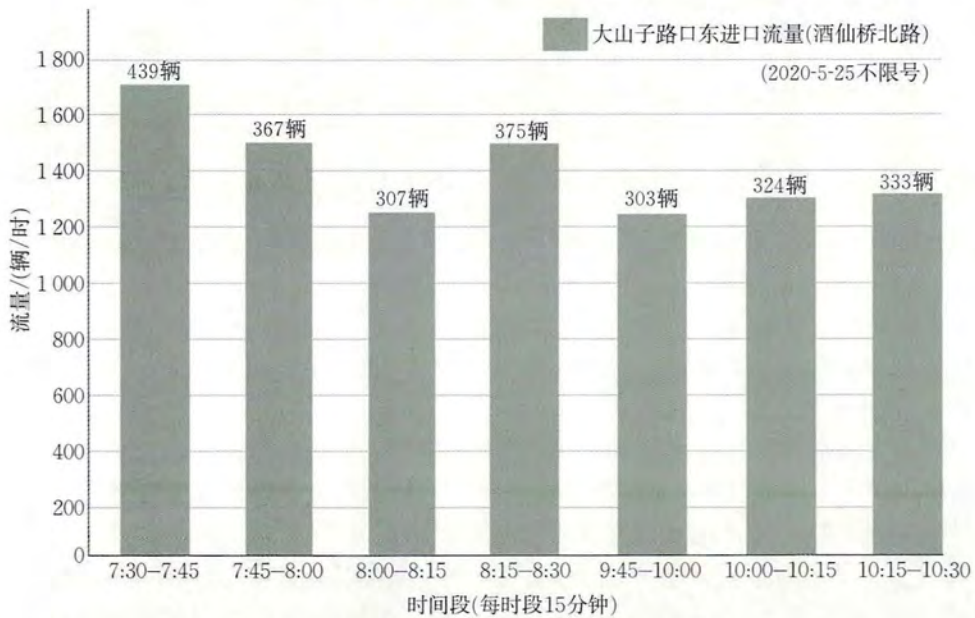


图4 大山子路口短期流量和小时流量之间关系

4.2 酒仙桥北路与万红路两条道路前期交通不平衡关系

城市交通受潮汐交通影响很大。据悉,城区交通高峰时段大部分道路都处于车辆缓慢行驶状态,城区中心拥堵最为严重,车速大多在 15 km/h 以下,多数路段拥堵时间延长超过 3 h。其实研究拥堵时间长短已不重要,研究交通拥堵前期时段出现的问题,才可控制交通恶化的趋势。潮汐交通典型现象是在交通高峰前期阶段,会发生区域性路网交通不平衡现象,随着高峰时段的到来,交通不平衡现象将蔓延到更大区域,产生坏循环。那时车辆均堵在一起,道路空间已不具备路网分流转移条件。

受红绿灯管控影响,城市交通拥堵常发生在交叉口,明显的是高峰交通拥堵前期时段,因人们居住或行车习惯所致,有的路口车多,有的路口车少,两路极易出现交通不平衡现象,如图 1(b)所示,酒仙桥北路显示为拥堵,而万红路呈畅通状态。随着交通高峰的到来,交通不平衡拥堵逐渐蔓延,各路呈现交通饱和和拥堵现象。

酒仙桥北路与万红路两条道路交通不平衡现象如图 5 所示,很明显早高峰前期 5:00—6:00 酒仙桥北路车流量是万红路的 6.4 倍,6:00—8:00 酒仙桥北路车流量逐渐接近万红路车流量的 2.6 倍,最终酒仙桥北路率先发生交通拥堵。区域路网负荷不均衡,如部分道路因等级较高、驾驶条件较好吸引了过大的流量,将导致拥堵。可以看出,并不是道路等级越高,交通越通畅,就越有利于交通,如果交通流分配不均衡,反而会出现道路等级越高交通越拥堵的现象。因此,对区域交通流进行合理分配是最终解决区域交通拥堵的根本途径。综上分析可知,交通拥堵始于交通不平衡。如图 5 所示,酒仙桥北路与万红路两条道路前期交通流量不平衡在 5:00—6:00 较明显,随着早高峰的到来,部分车辆将被迫绕行至相邻畅通道路行驶,7:00—8:00,两条道路交通不平衡趋缓,如图 6 所示,至 8:30,两条道路的车流量比已缩小为 2.1。

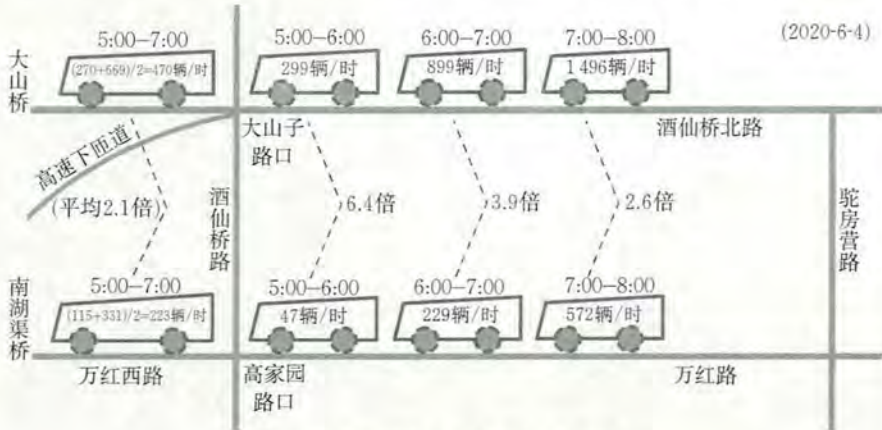


图 5 两条同向道路交通不平衡现象

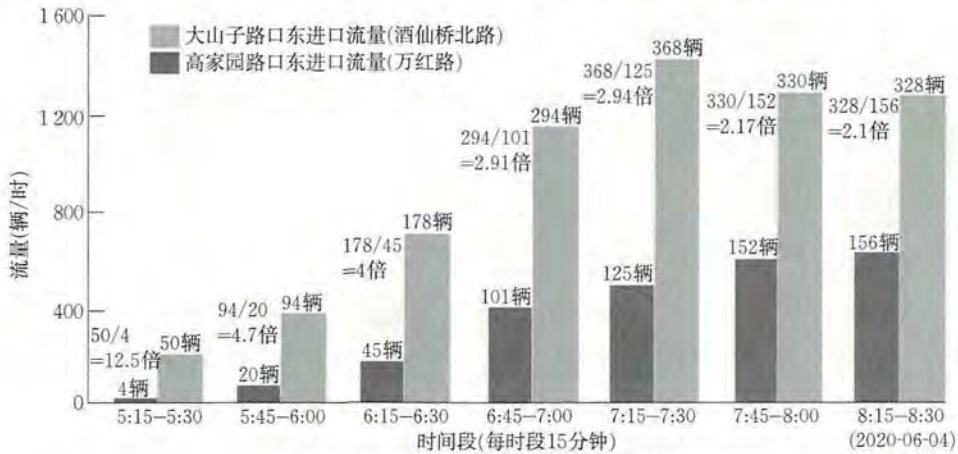
4.3 酒仙桥北路与万红路两条道路短期车流量和小时流量之间关系

在交通工程理论上,有个传统做法,就是减少冲突范围。当交通供需矛盾突出时,应在时间上、空间上将矛盾分散,按照各自特点分别解决,而不能拘泥于一种传统做法,避免由于某节点交通压力过于集中形成拥堵。现实中如何将矛盾合理分散是本文将要研究的内容,连接大山子路口的酒仙桥北路高峰时段的瞬间交通大聚集是一个非常严重的问题,再加上主要酒仙桥北路交通疏导通行能力不足,引起的交通堵塞可能会延续几个小时,所以该路段会出现经常性拥堵。

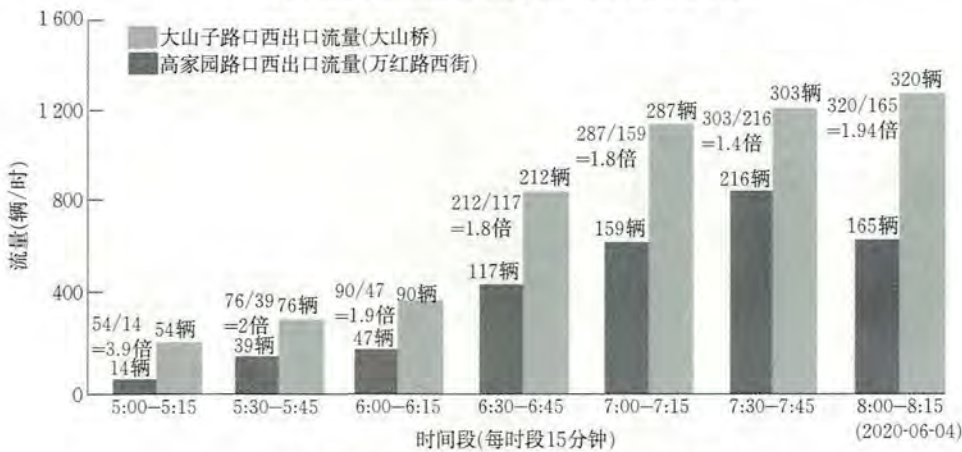
高峰 5 分钟最大流率设计会导致高峰时段的其余时间里剩余通行能力过大,而以高峰小时交通量设计则会导致高峰小时内大部分时间处于过饱和状态,两者矛盾,本节通过对单条道路进行分流或调配,可大幅度降低高峰 5 分钟最大流率,使两条道路空间均衡利用。

2020 年 6 月 4 日采集的路况交通不平衡数据与年初采集的流量数据(减去不限号比例值)大致相同。如图 6(a)所示,对大山子路口东进口与高家园路口东进口车流量进行比较,高峰前期时段 5:15—5:30 酒仙桥北路路口 15 分钟流率是万红路的 12.5 倍;5:45—6:00 酒仙桥北路路口 15 分钟流率是万红路的

4.7 倍。对比两路口东西向进口 7 个时段(每时段 15 分钟)至高峰流率,发现酒仙桥北路 15 分钟流率平均是万红路的 4.8 倍,酒仙桥北路交通压力大于万红路交通压力。因此,将压力大的酒仙桥北路的车流量调配到压力小的万红路,是目前解决大山子路口堵车措施之一。同样,如图 6(b)所示,比较大山子路口西出口与高家园路口西出口 7 个时段的 15 分钟流率,大山子路口西出口 15 分钟流率平均是高家园路口西出口的 2.1 倍,说明将东西向酒仙桥北路车流量调配到东西向万红路的方案是可行的。



(a) 大山子路口东进口与高家园路口东进口车流量比较



(b) 大山子路口西出口与高家园路口西出口车流量比较

图 6 两路口多时段东西向进出口车流量比较

5 路网即刻分流理论基础

路网即刻分流只是设置路牌引导单双号车分散行驶,将拥堵路段的车辆转移到相邻道路。路网即刻分流的优点在于能够转移拥堵车辆,不需路网改造,节省治堵成本,实施简单。因此在交通拥堵前期时段,采取有效的分离措施,以单双号车平衡路网交通则显得十分容易,改变了目前只专注治理一个堵点的倾向。

5.1 路网即刻分流依据

由于城市车牌发放是以单双数尾号排列递增的,所以 10 个单双数尾号基本是一个均衡的交通负荷(1 个车牌尾号约占 10% 车流量的交通负荷),车牌尾号量代表了车流量,车流量可超前分配。根据这一分配原理,城市交通路网即可重新规划,分配路权,改变路网非平衡状态。为了进一步掌握目前路网机动车单双数尾号车牌流动配比,保障路网负荷均衡,笔者早期曾选择多个城市主干路观测车牌单双数尾号车辆行驶分布状况,如表 1 所示。通过这些城市单双数尾号车牌流量抽测发现,将单双数尾号车牌作为负荷并疏导到路网是可行的,不存在单双数尾号车牌比例严重失衡现象,符合机动车分流系统负荷均衡条件。当某一城市单双号车比例失衡较大时,可考虑城市新车上牌照尾号比例调整,保持单双号车总数比例平衡。近期,笔者等在高

峰时段再次查看酒仙桥北路东向西车辆单双数号车比例,共监测到 450 辆机动车,其中,单号车 238 辆,双号车 212 辆。

表 1 机动车车牌单双数尾号流量分布

城市	观测总数/辆	双数尾号/辆	单数尾号/辆	相差比率/%	抽测主干路 15 分钟
杭州	304	146	158	3.9	文辉路 湖墅路单向流量
天津	236	123	113	4.2	解放路单向流量
北京	200	94	106	6	复兴路西向东流量
北京	200	88	112	12	复兴路东向西流量
唐山	240	122	118	1.7	建设路北向南流量
唐山	240	123	117	2.1	建设路南向北流量
合计	1 420	696	724	1.97	公休日或平峰时段抽测

5.2 路网即刻分流条件

(1) 优先选择群众反映强烈的、交通拥堵程度高的、热点度高而又持久的道路。

(2) 分流路牌设置地点要选在相邻的两条主干路上,道路同向平行、等级相同、长度相同,需设置分流路牌的两条主干路的交叉口车道渠化数量力求接近。

(3) 路网分流选用相邻的两条道路等级不同时,需重新匹配单双尾号比例,以等级高的道路多承担尾号车行驶的原则进行匹配。

(4) 综合国内外不同观点,合理干路网间距的跨越幅度为 250~1 200 m。根据拥挤程度及获得的节省时间比率,特殊选定两条对称快速路或两座跨江大桥,其间隔距离为 2~5 km 即可。只要高峰时段不堵车,人们还是以节省时间为首要选项。

5.3 路网即刻分流路牌与导航标志应用

分流导航路牌(图 7)适用于路口、路侧路牌、地图及手机导航引行。室外路口、路侧路牌显示以 LED 发光器装置而成,可供夜间时段开启使用。路网分流标志(图 7(a))主要设置于各个不同等级路口,对各口分流尾号的限制更清晰。改进型分流设置(图 7(b))适用于引导各种方向的车辆行驶,可用于手机地图导航等。各种路网分流方式,如图 8 所示。如大山子路口首先采用单节点单向分流方式,笔者早期研究的路网分流则采用双节点对称分流方式。这两种方式都不如本文分流方式灵活。



图 7 各种分流导航路牌应用

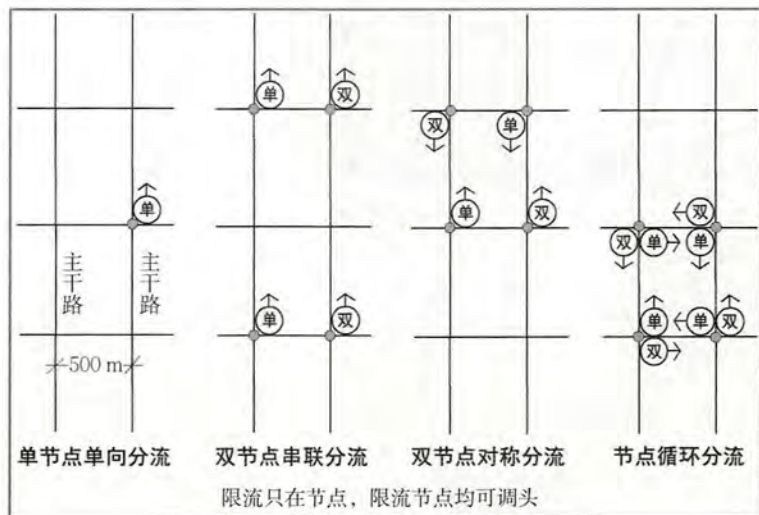


图8 各节点分流设置方式

6 大山子路口即刻分流条件

城市交通拥堵规律性极强。当交通供需矛盾突出时,应在时间上、空间上将矛盾分散,如将通行车流量分散到相邻的道路中,疏导道路车流量高峰最大流率聚集。采取大山子路口即刻节点分流后,多时段车流量均将减半,化解了大山子路口东酒仙桥北路交通聚集矛盾,将酒仙桥北路交通压力转移到相邻、同向的万红路,体现了路网交通宜疏不易堵的原则。

6.1 大山子路口即刻分流方案一

前面分析的大山子路口堵车五大特点,以及大山子路口涉及的七种关联东西向交通流的速度问题,说明目前大山子路口存在的交通矛盾颇多,因此大山子路口即刻分流方案值得进一步探讨。大山子路口单节点单向分流导向路牌设置(图9)依据上述综合分析及大山子路口连在路网早高峰前期路网交通不平衡变化(图5),非常具备路网即刻分流条件,即以单双号车路网分流来抑制高峰前期交通拥堵,为高峰大流量车流到来做好分流准备,以缩短高峰时段,减小高峰峰值,让大山子车流有所控制。



图9 大山子路口单节点单向分流路牌设置(实时路况截图)

大山子路口单节点即刻分流路牌设置要求:

- (1)为达到控制大山子路口东西向车流的目的,在大山子路口西出口设置分流路牌(图10、图11),只允许单号车驶进西出口通过大山桥,双号车则选择行驶驼房营路(图12)至万红路往西的南湖渠桥。

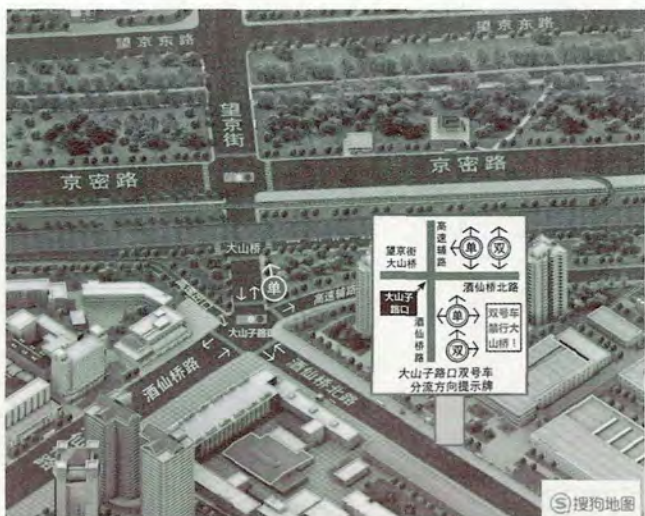


图 10 大山子路口单节点单向分流路牌设置(三维视图截图)

(2)大山子路口分流需在酒仙桥北路选择多个节点设置导流路牌(图 9)。为快速转移酒仙桥北路东端 1 100 m 路段双向 2 车道交通压力,可根据实地情况将产业园中路和孙家村路利用起来。

(3)与酒仙桥北路分流不同,酒仙桥路导流路牌如图 9 所示,即大山子路口南口左行单号车可进入西出口大山桥,双号车则禁止左行,可选择高家园路口至南湖渠桥等。

(4)按照大山子路口单节点进行分流导向后,酒仙桥北路以南区域的诸多公司可在该区域内选择支小路微循环出入万红路或酒仙桥北路(图 13)。

(5)为体现公平,对大山子路口西出口设置单号分流路牌,可采取分流时间周期对单双

号车轮换通行。特种车辆和出租车可不受分流限制。

(6)可参见图 8 所示的各种节点分流设置方式在大山子路口西出口设置单节点单向分流路牌,也可根据车流量设置单向双节点或双向单节点分流(图 9)。



图 11 大山子路口单节点单向分流路牌近距离设置



图 12 酒仙桥北路与万红路连接道路驼房营路

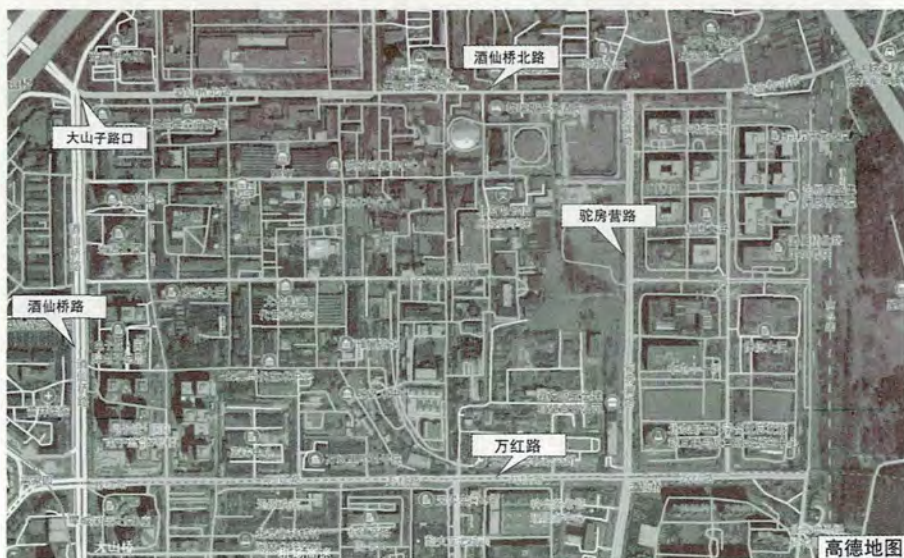


图 13 酒仙桥北路以南区域支小路网

大山子路口西出口单节点单向分流后,与高家园路口西出口车流估量进行对比,如图 14 所示。从图 14 可以发现,原万红路车流总量增加了来自大山子路口西出口的单节点分流,承担了北邻酒仙桥北路交通压力。毕竟酒仙桥北路路段以双向 3 车道、双向 2 车道居多,而万红路双向 4 车道充分利用了道路资源。此时万红路高峰时段 15 min 最高车流率为每小时 980 辆,与信号灯管理下的平面交叉口通行能力规定大有余量。因此可以预见,大山子路口东向西拥堵状况会在该口限流后,向西通过大山桥及京密路口的车流量趋于稳定通畅。

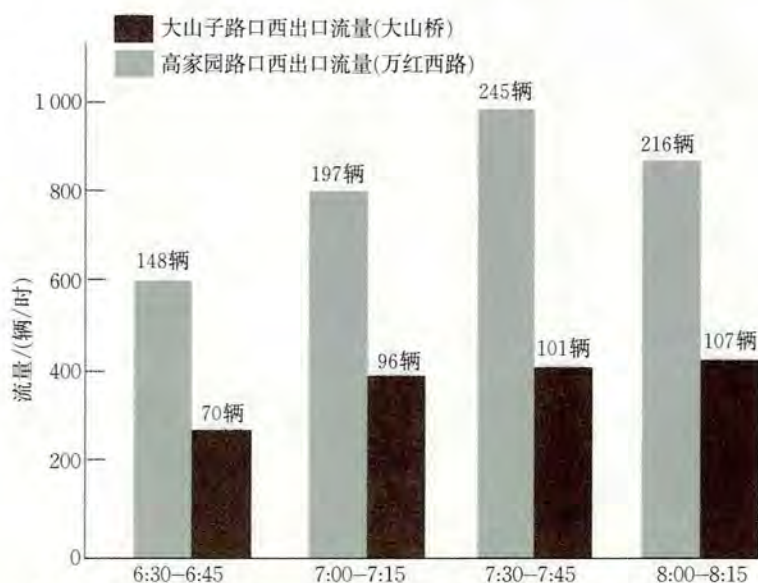


图 14 大山子路口西出口分流后,与高家园路口西出口车流估量对比

6.2 大山子路口即刻分流方案二

2019 年度《中国主要城市道路网密度监测报告》显示,2019 年全国 36 个主要城市平均道路密度为 5.96 km/km^2 ,其中北京市道路密度为 5.64 km/km^2 ,在 36 个主要城市中排第 20 位,说明北京市道路网密度并不乐观。按报告显示,当城市道路网密度为 4 km/km^2 时,街区宽度要求为 500 m,万红路东段明显存在断头路,万红东路 ab 段为 630 m(图 15(b)),点 b 连接了五环辅路 1.5 km 路段,则提高了路网密度,配合大山子路口即刻分流方案之一,使环铁北桥东端双号车辆驶入五环辅路,向南经 b 、 a 两点至万红路,向西驶入高家园路口至南湖渠桥,躲避了酒仙桥北路至大山子路口车流。

从早晚交通拥堵状况看出,如图 15 所示,虚线所圈为拥堵路段,同向的酒仙桥北路及将台路交通压力经常大于万红路。尤其大山子路口至 1.75 km 处的酒仙桥北路东端环铁北桥仅设置双向 2 车道,高峰瓶颈常在,同时双向 4 车道的万红路不能发挥应有通行能力。因此,按正常规划改造万红东路的断头路点 a ,如图 15(b)所示,通过点 a 向东 630 m 处连接了五环高架桥下点 b ,同时可连通五环路出入口点 d ,以及环铁北桥点 c ,从而使酒仙桥北路及将台路的交通压力趋向均衡。路段 ab 与 cd 等级需进行统一改造。

打通断头路 ab 后,以首都机场高速路为起始,形成 gab 至五环出入口点 d (3.5 km),比起去望京北方点 e 向东至五环出入口点 d (4 km),少行 0.5 km,路网负荷均衡了。

考虑畸形路口设置,各路口可安装行驶导向提示路牌、路面施划导向导流线等,供司机快速选择、安全行驶。五岔路口方向性可考虑重新归位。为简化交通,目前大山子五岔路口已有两个路口为单向行驶,笔者发现该五岔口中机场高速下匝道车辆不允许直行和西行,只可右行至酒仙桥路南行,致使高家园路口调头车辆大增,需进一步探讨路口行驶方向归位问题,这源于大山子路口单节点分流将改变路口车流重新分布,根据车辆行驶状况,还可针对其他节点分流及单双数比例进行匹配,达到最高分流效率。



(a) 虚线所圈为拥堵路段



(b) 连接ab减少虚线所圈拥堵路段

图 15 万红东路断头路致使相邻两路交通压力大增

7 结 语

我国对城市路网的研究与认识正在不断加深,但很多实际问题依然很难缓解或解决。不少学者提出了路网结构体系的改善建议及确定合理密度的方法,并在城市规划、城市建设中进行了大量尝试,但许多观点理论上的分析多于技术层面的分析,缺乏必要的技术支撑。目前,智慧交通需升级解决实地困难,卫星导航可以为城市交通治堵提供服务。即刻分流配合北斗卫星导航系统 APP 可为行车者提供畅通的行驶路径。

参考文献:(略)

作者简介:张启明,男,1949年生,电气工程师,研究员,主要研究交通分流导航。

基于关键帧的非线性优化惯性视觉 紧耦合定位方法研究*

莫 钊, 郭 杭, 熊 剑
(南昌大学, 江西 南昌 330031)

摘 要:由于单传感器的信息运用不充分、不完整,因此本文提出一种将视觉测量与惯性测量单元(IMU)的数据耦合在SLAM中的方法。本文将IMU误差与地标再投影的误差集成,并优化了联合非线性函数问题的定位解算。基于关键帧概念,将旧状态部分边缘化以维持优化窗口的有界大小,从而确保实时性。与只有视觉惯性、惯性单元或松散耦合的视觉惯性算法相比,紧耦合后的定位精度和鲁棒性比单传感器有所提高。

关键词:SLAM; 双目视觉惯性系统; 关键帧; 非线性优化

1 引 言

结合视觉和惯性测量长期以来一直是解决常见机器人技术任务的方法,是运动估计、视觉测距和SLAM(simultaneous localization and mapping)中的常用方法。图像中捕获的丰富信息及存在于典型惯性测量单元(IMU)中的陀螺仪和加速度计的精确短期估计已经被认为彼此互补,尤其是在空中和汽车导航领域。惯性视觉结合发展迅速,但现在还存在数据结合不完全,不能满足实时性要求的问题。惯性视觉估计存在的问题是偏航和位置的全局不可观察性,以及相对于初始参考姿态的不确定性的增长,这对通常依赖于单一形式的线性化滤波方法提出了难题。

和过滤方法相比,纯视觉SLAM基于优化方法提供了更好的准确性及相同的计算工作量,实现相对稀疏的关键帧及其相关帧的地标图经历非线性优化。紧耦合优化方法通过融合多种传感器信息来提高初始定位或运动定位精度的,但庞大的计算会增加计算机运行负担,导致运行效率降低。

为了稳健和准确地使用视觉惯性SLAM,使紧密的数据耦合,应最大限度地利用观测数据和非线性估计,以减少由于线性化造成的次优性问题。

2 视觉和IMU模型

2.1 双目相机模型

双目相机一般由两个水平放置的相机组成(图1),可以将其看作针孔相机模型。两者的距离称为双目相机的基线。

假设空间点 P 在左右相机成像分别为 P_L 、 P_R ,理想情况下两者图像只在 x 轴上有差异,记左侧坐标为 u_L ,右侧坐标为 u_R ,根据三角形相似关系,有

$$\frac{z-f}{z} = \frac{b-u_L+u_R}{b} \quad (1)$$

可得

* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0502002);国家自然科学基金项目(41764002)

$$\left. \begin{aligned} z &= \frac{fb}{d} \\ d &= u_L - u_R \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, d 为左右两图的横坐标之差,称为视差。由于视差最小为一个像元,双目深度存在一个理论上的最大值,由 fb 决定。

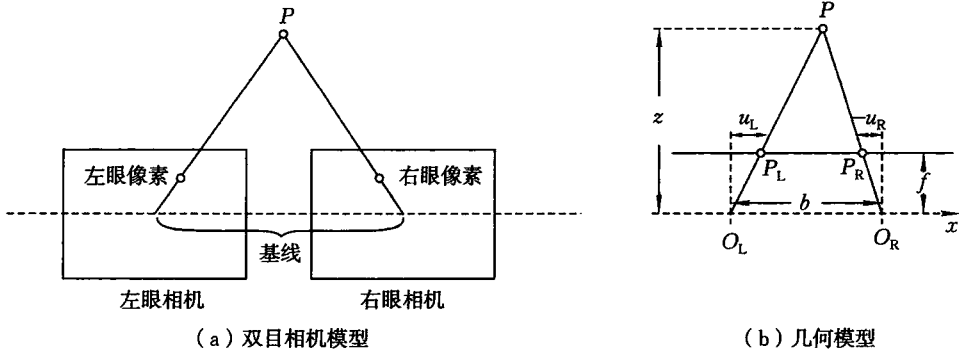


图 1 双目相机模型

状态估计问题的求解,与两个方程的具体形式及噪声服从的分布有关。按照运动和观测方程是否为线性,噪声是否服从高斯分布进行分类,分为线性、非线性和高斯、非高斯系统。其中,线性高斯系统(LG系统)最为简单,其无偏最优估计可以由卡尔曼滤波(Kalman filter)给出。而在复杂的非线性非高斯系统(NLNG系统)中,将使用扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter)和非线性优化两类方法求解。目前,主流视觉 SLAM 使用以图优化(graph optimization)为代表的优化技术进行状态估计。优化技术已经明显优于滤波器技术,只要计算资源允许,通常使用优化方法。

2.2 惯性测量单元数学模型

惯性测量单元的主要元件有陀螺仪、加速度计和磁力计。其中,使用陀螺仪可以得到各个轴的加速度,使用加速度计能得到 x 、 y 、 z 方向的加速度,而使用磁力计能获得周围磁场的信息。因此,IMU 数学模型的主要工作是将三个传感器的数据融合,得到较为准确的姿态信息。

惯性测量单元主要用来检测和测量加速度、倾斜、冲击、振动、旋转和多自由度运动,通常是指使用加速度计和陀螺仪来测量物体单轴、双轴或三轴姿态角(或角速率)及加速度的装置。

根据 IMU 的数学模型,以 ECI 为参考坐标系(ECI 为惯性系,不需要考虑地球自转),忽略刻度的影响,只考虑白噪声和偏差随机游走:

IMU 的真实值: w^b, a^b 。

IMU 的测量值: \tilde{w}, \tilde{a}^b 。

IMU 机体系即 b 系, w 表示世界坐标系。

$$\tilde{w} = w^b + b^g + n^g \quad (3)$$

$$\tilde{a}^b = a^b + b^a + n^a = q_{b_w}(a^w + g^w) + b^a + n^a \quad (4)$$

考虑高斯白噪声项,有

$$\tilde{w} = \tilde{w} - b^g - n^g \quad (5)$$

$$a^w = q_{w_b}(\tilde{a}^b - b^a - n^a) - g^w \quad (6)$$

不考虑高斯白噪声项,有

$$w^b = \tilde{w} - b^g \quad (7)$$

$$a^w = q_{w_b}(\tilde{a}^b - b^a) - g^w \quad (8)$$

本文实验采用 XsensMTi-10 系列传感器,第四代 MTis 可提供基于 MEMS 的可靠 AHRS、VRU、IMU 产品,并且为这些产品设立了业界标准。MTi-10 系列产品可提供三种不同的集成度选择(IMU、VRU 或 AHRS),如图 2 所示。MTi-10 系列和高性能 MTi 100 系列具有多种共同的机械、电气和通信/

API 接口,可广泛应用于三维运动跟踪,从而轻松进行集成。

产品型号		偏置稳定性	翻滚/俯仰		偏航角	尺寸	重量
			静态	动态			
MTi 10 系列	Mti-10 IMU	18(°)/h				57 mm×42 mm×23 mm	52 g
	MTi-20 VRU	18(°)/h	0.2°	0.5°	未引用		
	MTi-30AHRS	18(°)/h	0.2°	0.5°	1.0°		
MTi 100 系列	MTi-100 IMU	10(°)/h				57 mm×42 mm×23 mm	52 g
	MTi-200 VRU	10(°)/h	0.2°	0.3°	未引用		
	MTi-300 AHRS	10(°)/h	0.2°	0.3°	1.0°		
	MTi-G-700 GPS/INS	10(°)/h	0.2°	0.3°	1.0°		

MTi 100 系列		200-VRU 一般/最大值	300-AHRS 一般/最大值	700-GPS/INS 一般/最大值
翻滚和俯仰	静态	0.2°/0.25°	0.2°/0.25°	0.2°/0.25°
	动态	0.3°/1.0°	0.3°/1.0°	0.3°/1.0°
偏航	均匀磁场分布	未引用 10(°)/h	1.0°	

系统性能			
输入电压	4.5~34 V 或 3 V	输出频率	可升至 2 kHz
电流消耗	675~950 mW	延时	<2 ms
启动时间	2.5 s	接口	RS232/422/UART/USB
封装	IP67	接口协议	XBus 或 NMEA
工作温度	-40℃~85℃	包装材料	阳极氧化铝 6060
振动冲击	TBD	采样频率	每频道 10 kHz

MTi 100 系列传感特性				
	陀螺仪	加速度计	磁通计	气压计
标准全范围	450°/s	50 m/s		
运行偏置稳定性	10(°)/h	40 μg		
带宽	450 Hz	375 Hz		
噪音密度	$0.01(°)/s^{-1} Hz^{-\frac{1}{2}}$	$80 \mu g Hz^{-\frac{1}{2}}$	$200 \mu g Hz^{-\frac{1}{2}}$	$0.01 hPa Hz^{-\frac{1}{2}}$
非线性误差	0.01%FS	0.03%FS	0.01%FS	

图 2 MTi 技术指标

3 紧耦合的视觉与 IMU 融合

通过算法融合多种传感器所获得的数据,可以解算并获得较为理想的机器人位姿,通过反馈对机器人自身的姿态进行校正。理论上,单依靠视觉和 IMU 的数据推算出机器人的位姿,得到的数据包含噪声,且初始位置定位精准度不高。因此本文提出一种将视觉信息与 IMU 测量数据紧密结合的方法(图 3),将 IMU 测量值对当前状态做预测,根据预测情况进行特征提取和特征匹配,三维点特征和二维图像特征构成优化的重投影误差,同时预测的 IMU 的状态量与优化参数构成 IMU 测量误差,并将这两项误差放在一起进行优化。

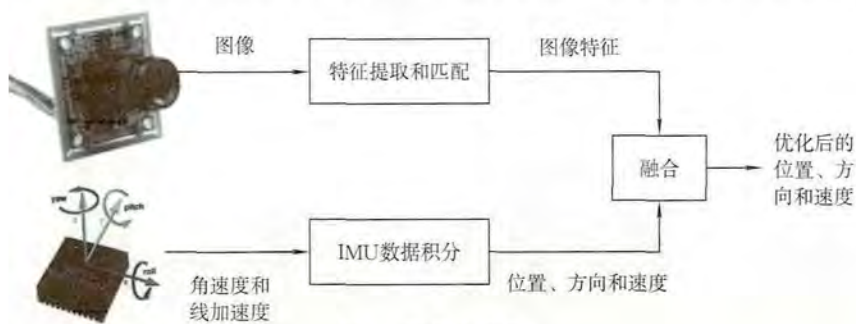


图 3 紧耦合示意

3.1 关键点匹配和关键帧选择

视觉惯性系统匹配程度的好坏在很大程度上取决于关键点的匹配。由于关键点在较小距离处被检测为较强的角,因此看检测器通过逐渐抑制具有较弱分数的角,来强制关键点在图像中均匀分布。沿重力方向(投影到图像中)提取描述符,并用紧密的 IMU 融合后的数据来观察描述符的分布。

一开始,关键点被立体三角化,并插入到局部映射中。对所有地图地标执行强制匹配。通过对 IMU 预积分获得姿态预测,并在图像坐标中应用卡方检验,简单地对异常值报错,从而不执行 RANSAC 步骤。后续优化中保持相机帧的有界集合,即具有在该时刻拍摄的相关图像的姿态。在这些图像中,可见的所有地标都保存在本地地图中。对于关键帧选择,使用一个简单的启发式:若匹配点跨越的图像区域与所有检测到的点跨越的区域之间的比率低于 50% 或 60%,则该帧被标记为关键帧。

3.2 关键帧边缘化

当边缘化应用于关键帧时,最初边缘化误差项由前 $N + 1$ 帧构成。 N 个第一帧将全部被注释为关键帧。边缘化步骤包括消除相应的速度和偏置状态。当将新帧插入到优化窗口时,应用边缘化操作。当在时间窗口中最旧的帧不是关键帧时,将丢弃所有的界标测量。边缘化的时候先把最旧帧中所有的特征点的观测值在优化中全部删除掉(每个观测都构成一项重投影误差),然后把最旧帧的位姿、速度和偏置状态边缘化掉。丢掉关键帧会损失所有关键帧的观测值,即所有具有共同路标观测值的两个最老的关键帧之间的位置、姿态信息会丢失,使信息丢失更明显。因此,要剔除那些在非关键帧可见,但在大多数最近的关键帧中不可见的路标,再次使用了这个问题的稀疏性。

4 实验及其结果分析

本次实验基于 ubuntu 18.04 系统下的 ROS 进行,运用移动机器人开发平台 Husky 进行运载,搭载的 IMU 为 Xsens 公司 MTi 10 系列产品,频率在 5~20 Hz,所使用的工业相机为 CM3-U3-13Y3M(图 4)。实验通过动作捕捉系统来获得机器人运动真实轨迹。



图 4 CM3-U3-13Y3M 相机

实验过程如下,控制 Husky 小车按照设定好的路径运动,打开小车的传感器驱动节点,记录各传感器数据并保存。图 5 显示了真实机器人路径轨迹与算法估计轨迹。

本次实验数据包括 IMU 的测量值及动作捕捉软件捕捉到的位姿的真值。对 IMU 以及摄像头的测量值进行预处理后,可以进行算法验证,对比真实轨迹图和定位算法路线图,从而评估算法的优劣。

由图 5 看出,真实机器人路径轨迹与算法估计轨迹偏差较小,定位算法能够有效消除闭环累计误差,使估计轨迹接近真实机器人的路径轨迹。图 6 为真实机器人路径轨迹与算法估计轨迹之间的绝对位姿误

差,平均误差在 0.28 m 左右,基本达到预期效果。在 10 s 至 20 s 时候有跳变,可能原因是机器人走出了动作捕捉系统的检测范围,或者一瞬间机器人撞到了坚硬物体上,使关键帧丢失。

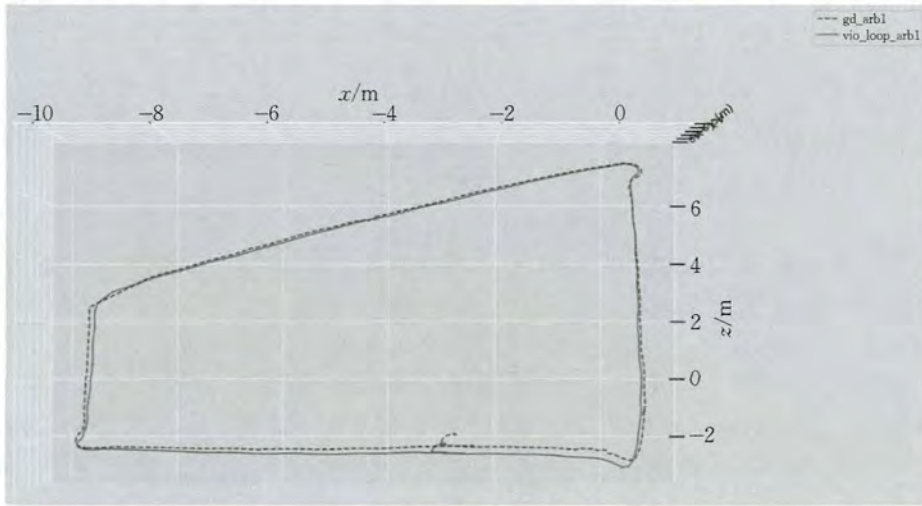


图 5 真实机器人路径轨迹与算法估计轨迹

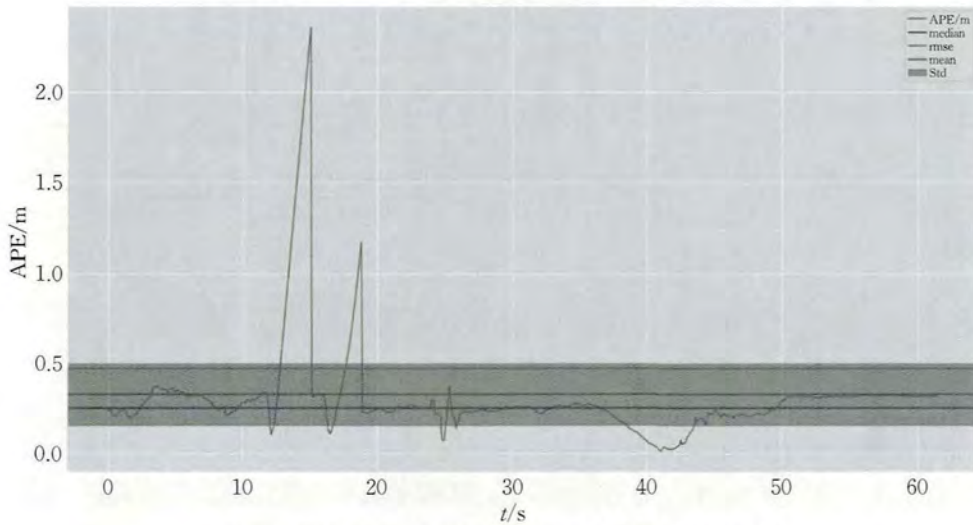


图 6 真实机器人路径轨迹与算法估计轨迹绝对位姿误差

5 结 语

本文提出一种基于关键帧的视觉 SLAM 和惯性传感器的紧耦合方法,利用 IMU 测量值对当前状态做预测,根据预测情况进行特征提取和特征匹配,预测的 IMU 的状态量和优化的参数之间构成 IMU 测量误差,并将这两项误差放在一起做优化。对关键帧进行区分、边缘化处理及非线性优化,使信息最大限度地得到保留。实验结果表明,实验的精度和鲁棒性优于单一传感器或者松耦合方法。

参考文献:(略)

作者简介:莫钊,男,1996 年生,硕士,主要从事室内机器人视觉 SLAM 方面的研究。

中国区域北斗全星座 PPP 定位性能与质量研究分析

岳彩亚^{1,2}, 党亚民^{1,3}, 许长辉¹, 谷守周¹, 戴华阳²

(1. 中国测绘科学研究院, 北京 100830; 2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083;
3. 山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要:中国北斗导航卫星系统(BDS)第三代已完成建设,利用地面连续跟踪站评估北斗全星座(BDS-2/3)可用性和定位性能已成为当前重要问题。本文利用可最大限度接收 BDS 卫星的 7 个 iGMAS 站和 3 个 MGEX 站,分别从卫星可视数、定位几何构型、精密单点定位(PPP)静态和动态解方面对中国区域进行了全面深入的对比分析。结果表明,在加入 BDS-3 卫星后,测站可视卫星数、卫星定位位置精度衰减因子(PDOP)及 PPP 精度和收敛时间得到显著改善;在中、南部地区,卫星定位几何分布在稳定性和可利用性方面已优于 GPS,绝大部分时间 PDOP 值小于 2.0。相对于单 BDS-2,北斗全星座下的动态和静态 PPP 在收敛时间和定位精度得到显著提升,其中有 80% 的坐标残差收敛到 10 cm 所需时间在 7~25 分钟,且 24 小时单天解在水平方向优于 1 cm,高程方向优于 2.5 cm,可以较好地满足变形监测等事后毫米级、导航定位亚米级的精度需求。

关键词:BDS-2/3; 可视卫星数; PDOP; 定位精度; 收敛时间

1 引言

近几年来,各国导航卫星系统建设都已进入关键阶段。到 2020 年底,将有 150 多颗导航卫星在轨飞行,届时将进入多全球导航卫星系统(GNSS)时代。为了满足多 GNSS 需求,国际 GNSS 服务(IGS)组织由最初的仅提供美国的全球定位系统(GPS)的精密轨道、钟差和地球自转参数等基础产品扩大到了提供 GPS、中国的北斗导航卫星系统(BDS)、俄罗斯的全球导航卫星系统(GLONASS)、欧盟的 Galileo 导航卫星系统四系统的基础产品。其中,中国的 BDS 着眼于国家安全和经济社会发展的需要,自主建设了独立运行的全球导航卫星系统。该系统于 2020 年 6 月 23 日完成了北斗三号(BDS-3)最后一颗组网星的发射,标志着该系统已完全具备为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务的能力。

北斗三号卫星在信号体制上,除了继续播发北斗二号(BDS-2)的 B1I、B3I 信号外,还增加了两个兼容和互操作性能更强的信号 B1C、B2a,其中 B1C 信号与 GPS 的 L1 信号及 Galileo 的 E1 信号频率相同,B2a 信号与 GPS 的 L5C 信号及 Galileo 的 E5a 信号频率相同,这种信号体制增强了各卫星系统的兼容性与互操作性。为了更好地应用北斗卫星导航系统,学者们从各方面进行了大量的研究。Zhao 等利用 20 个跟踪站分别从精密单点定位(PPP)的性能和模糊度固定效率评估了 BDS-2 卫星系统,结果表明:相对于其他两类卫星,倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星的加入可显著减少模糊度初始化时间并提高定位精度,特别是在东方向。Guo 等针对北斗卫星系统,推导了三种三频 PPP 观测模型,并拓展了相应的随机模型以适应第三频率,通过静态和动态 PPP 测试表明:三种模型在定位精度和收敛时间具有较强一致性,但当在观测条件较差时,加入第三频率可显著提高定位性能。Zhang 等和 Xu 等通过评估 BDS-3 卫星信号特征,证明第三代卫星的星端多路径基本已被消除,这种情况将有助于宽巷模糊度固定和单频单点定位的应用。李广源等利用 MGEX 提供的北斗广播星历和 GFZ 提供的事后精密星历,对 2018 年 1 月北斗卫星的广播星历误差、轨道误差和空间信号测距误差进行了短期分析评估,结果表明:所有北斗卫星在评估期内的空间信号测距误差精度为 2.11 m,满足北斗系统公开服务空间信号性能需求。Zhang 等根据国内均匀分布的北斗卫星跟踪站,分别从数据完整率、多路径误差、伪距测量精度等方面对 BDS-3 号卫星新信号体制进行

了评估,结果表明:观测数据完整率多数优于 99%,各频点多路径误差整体在 2 m 左右浮动。

尽管针对 BDS 已开展大量研究,但由于受到卫星精密轨道和钟差等产品的限制,关于北斗全星座(BDS-2/3)PPP 的定位性能与质量分析的研究较少。因此,本文基于可最大限度跟踪北斗卫星的 7 个国际 GNSS 监测评估系统(iGMAS)站和 3 个多 GNSS 实验项目(MGEX)站,从可视卫星数、卫星位置精度衰减因子(PDOP)及无电离层组合和非组合的静态、动态 PPP 的定位表现等方面对中国区域卫星可用性进行了评估和分析。

2 PPP 模型

在传播过程中,电磁波测距信号受到卫星钟和接收机钟与 GNSS 标准时不同步误差、电离层折射误差、对流层散射误差、地球自转及卫星和接收机硬件延迟偏差等的影响。在充分考虑各项误差改正的基础上,伪距和载波相位原始方程为

$$\left. \begin{aligned} P_{r,j}^{s,G} &= \rho_r^{s,G} + C(dt_r^G - dt^{s,G}) + T_r^{s,G} + I_{r,j}^{s,G} + b_{r,j}^G - b_j^{s,G} + \epsilon_{r,j}^{s,G} \\ L_{r,j}^{s,G} &= \lambda_j^G \varphi_{r,j}^{s,G} = \rho_r^{s,G} + C(dt_r^G - dt^{s,G}) + T_r^{s,G} - I_{r,j}^{s,G} + \lambda_j^G(N_{r,j}^{s,G} + B_{r,j}^G - B_j^{s,G}) + e_{r,j}^{s,G} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, G 为各卫星系统, j 为信号频率, r 代表接收机, s 代表卫星; $\rho_r^{s,G}$ 是站星间几何距离; C 为真空中的光速; dt_r^G 为接收机钟误差, $dt^{s,G}$ 为卫星钟误差; $T_r^{s,G}$ 和 $I_{r,j}^{s,G}$ 分别表示倾斜路径对流层延迟和该频率倾斜路径电离层延迟,且对于伪距和相位,电离层延迟符号相反; λ_j^G 为 j 频率的波长; $N_{r,j}^{s,G}$ 为整周模糊度; $b_{r,j}^G$ 为 j 频率接收机天线与信号相关器之间的码伪距硬件延迟, $b_j^{s,G}$ 为 j 频率卫星端信号发射器至卫星天线之间的码伪距硬件延迟,单位为 m; $B_{r,j}^G$ 和 $B_j^{s,G}$ 分别为 j 频率上接收机端和卫星端相位硬件延迟,单位为周; $\epsilon_{r,j}^{s,G}$ 和 $e_{r,j}^{s,G}$ 分别表示伪距测量误差和载波相位测量误差。此外,GNSS 观测值所受到的天线相位中心偏移和变化、相位缠绕、相对论效应、潮汐改正等影响,均可通过已有模型精确改正。

为了便于公式推导,定义以下公式,即

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{12}^G &= \frac{(f_1^{s,G})^2}{(f_1^{s,G})^2 - (f_2^{s,G})^2} \\ \beta_{12}^G &= -\frac{(f_2^{s,G})^2}{(f_1^{s,G})^2 - (f_2^{s,G})^2} \\ DCB_{P_1P_2}^{s,G} &= b_1^{s,G} - b_2^{s,G} \\ DCB_{r,P_1P_2}^{s,G} &= b_{r,1}^{s,G} - b_{r,2}^{s,G} \\ b_{IF_{12}}^{s,G} &= \alpha_{12}^G b_1^{s,G} + \beta_{12}^G b_2^{s,G} \\ b_{r,IF_{12}}^{s,G} &= \alpha_{12}^G b_{r,1}^{s,G} + \beta_{12}^G b_{r,2}^{s,G} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, α_{12}^G 和 β_{12}^G 为频率组合系数, $DCB_{P_1P_2}^{s,G}$ 和 $DCB_{r,P_1P_2}^{s,G}$ 分别为卫星端和接收机端差分码偏差, $b_{IF_{12}}^{s,G}$ 和 $b_{r,IF_{12}}^{s,G}$ 分别为卫星端和接收机端无电离层组合的码硬件延迟。

当前,各分析中心采用基于 L1 和 L2 无电离层组合的观测值解算卫星精密轨道和钟差产品。其中,钟差公式为

$$dt_{IF_{12}}^{s,G} = dt^{s,G} + \alpha_{12}^G b_1^{s,G} + \beta_{12}^G b_2^{s,G} \quad (3)$$

式中, $dt_{IF_{12}}^{s,G}$ 为各 IGS 分析中心发布的卫星钟差产品。将卫星钟差和精密轨道产品代入原始观测方程中,并进行线性化,可得

$$\left. \begin{aligned} p_{r,j}^{s,G} &= e_r^{s,G} \mathbf{d}\mathbf{v} + C \cdot dt_r^G + \mathbf{M}_r^{s,G} T_r^{s,G} + \gamma_j^G (I_{r,1}^{s,G} - C\beta_{12}^G DCB_{P_1P_2}^{s,G}) + Cb_{r,j}^{s,G} + \epsilon_{r,j}^{s,G} \\ l_{r,j}^{s,G} &= e_r^{s,G} \mathbf{d}\mathbf{v} + C \cdot dt_r^G + \mathbf{M}_r^{s,G} T_r^{s,G} - \gamma_j^G I_{r,1}^{s,G} + \lambda_j^{s,G} (N_{r,j}^{s,G} + B_{r,j}^{s,G} - B_j^{s,G}) + Cb_{IF_{12}}^{s,G} + e_{r,j}^{s,G} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $e_r^{s,G}$ 为方向适量, $\mathbf{d}\mathbf{v}$ 为三维坐标增量, $\mathbf{M}_r^{s,G}$ 为对流层映射函数, γ_j^G 为频率比例因子, $DCB_{P_1P_2}^{s,G}$ 为卫星端差分码偏差, $b_{IF_{12}}^{s,G}$ 为卫星端第一频率和第二频率无电离层组合码硬件延迟。在式(4)的基础上,无电离

层组合可表示为

$$\left. \begin{aligned} p_{r,IF}^{s,G} &= \alpha_{12}^G p_{r,1}^{s,G} + \beta_{12}^G p_{r,2}^{s,G} = e_r^{s,G} dv + C \cdot dt_r^G + M_r^{s,G} T_r^{s,G} + \epsilon_{r,IF}^{s,G} \\ l_{r,IF}^{s,G} &= \alpha_{12}^G l_{r,1}^{s,G} + \beta_{12}^G l_{r,2}^{s,G} = e_r^{s,G} dv + C \cdot dt_r^G + M_r^{s,G} T_r^{s,G} + \lambda_{IF}^G \bar{N}_{r,IF}^{s,G} + e_{r,IF}^{s,G} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{IF}^G \bar{N}_{r,IF}^{s,G} &= C \left(\frac{f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{r,WL}^{s,G} + \frac{1}{f_1 + f_2} \bar{N}_{r,NL}^{s,G} \right) \\ \epsilon_{r,IF}^{s,G} &= \alpha_{12}^G \epsilon_{r,1}^{s,G} + \beta_{12}^G \epsilon_{r,2}^{s,G} \\ e_{r,IF}^{s,G} &= \alpha_{12}^G e_{r,1}^{s,G} + \beta_{12}^G e_{r,2}^{s,G} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

待估参数向量为

$$X = [dv \ dt_r^G \ T_r^{s,G} \ \bar{N}_{r,IF}^{s,G}]$$

式(5)和式(6)中, $p_{r,IF}^{s,G}$ 和 $l_{r,IF}^{s,G}$ 分别为无电离层组合的伪距和载波相位观测值,并且进行了参数项合并; $\bar{N}_{r,IF}^{s,G}$ 为无电离层组合的模糊度。同理,基于式(4)的非组合定位模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} p_{r,j}^{s,G} &= e_r^{s,G} dv + C \cdot dt_r^G + M_r^{s,G} T_r^{s,G} + \gamma_j^G \bar{I}_{r,1}^{s,G} + \epsilon_{r,j}^{s,G} \\ l_{r,j}^{s,G} &= e_r^{s,G} dv + C \cdot dt_r^G + M_r^{s,G} T_r^{s,G} - \gamma_j^G \bar{I}_{r,1}^{s,G} + \lambda_j^{s,G} \bar{N}_{r,j}^{s,G} + e_{r,j}^{s,G} \end{aligned} \right\}$$

式中

$$dt_r^G = dt_r^G + b_{r,IF,12}^G$$

$$\bar{I}_{r,1}^{s,G} = I_{r,1}^{s,G} + \beta_{12}^G \cdot (C \cdot DCB_{r,P_1 P_2}^{s,G} - C \cdot DCB_{P_1 P_2}^{s,G})$$

$$\lambda_j^{s,G} \bar{N}_{r,j}^{s,G} = \lambda_j^{s,G} (N_{r,j}^{s,G} + B_{r,j}^{s,G} - B_j^{s,G}) + C \cdot (b_{IF,12}^{s,G} - b_{r,IF,12}^{s,G}) + \frac{C \cdot \gamma_j^G}{1 - \gamma_j^G} (DCB_{r,P_1 P_2}^{s,G} - DCB_{P_1 P_2}^{s,G})$$

待估参数向量为

$$X = [dv \ dt_r^G \ T_r^{s,G} \ \bar{I}_{r,1}^{s,G} \ \bar{N}_{r,1}^{s,G} \ \bar{N}_{r,2}^{s,G}]$$

需要特别注意的是,无电离层组合模型是通过原始观测值进行线性组合来消除电离层延迟一阶项的影响的,因此会导致观测噪声放大,影响定位精度和收敛时间的进一步提升。对于非组合,由于电离层延迟误差变性较大,若模型建立不准确,同样会严重影响 PPP 的定位精度和收敛时间。

3 结果分析

当前,在国际和国内各种导航卫星跟踪网中,iGMAS 可最大限度地接收 BDS-3 卫星的信号。因此,本文选取位于中国东北部的长春站 CHU1、中部的武汉站 WUH1 和南部的昆明站 KUN1 及西部的乌鲁木齐站 URUM 进行可视卫星数和 PDOP 的评估研究,其详细信息如表 1 所示。需要说明的是,当前阶段未能收集到 GUA1 测站的数据,因此用 MGEX 跟踪网的 URUM 测站进行替代研究,时间为 2020 年第 133~139 天,PCO/PCV 采用 IGS 发布的改正值。此外,受限于精密轨道和钟差影响,BDS-3 卫星在后续分析中并未完全使用。

表 1 4 个 MEGX 测站详细信息

测站	位置	BDS-3 卫星数	接收机类型	天线类型	接收的卫星系统
CHU1	长春	14	BD070	—	GREC
WUH1	武汉	15	CETC-54-GMR-4016	LEIAR25, R4	GREC
KUN1	昆明	13	UB4B0-13478	NOV750, R4	GRECS
URUM	乌鲁木齐	6	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	GRECIJS

3.1 可视卫星数和 PDOP 值分析

卫星精密定位和导航的精度与测站所能观测的卫星个数及衰减 PDOP 密切相关。其中,卫星可见数

的增多有助于提高定位精度和可靠性,特别是在高纬度地区,而 PDOP 值是衡量卫星导航系统定位精确程度的一个重要指标。因此,为了能分析中国区域内北斗全星座卫星系统的定位能力,本文从卫星天空轨迹图(sky plot)、可视卫星、PDOP 值进行分析。时间为 2020 年第 133 天,卫星截止高度角设置为 10° 。

图 1 为 BDS-2 卫星在 4 个跟踪站处 24 小时的跟踪情况。其中,CHU1 测站和 URUM 测站分别位于中国的东北部和西北部,但在 CHU1 测站的东方向和 URUM 测站的西方向观测的卫星相对较少,即几何构形相对较弱,这种现象与 BDS-2 卫星主要服务于亚太地区有关。相对而言,WUH1 测站和 KUN1 测站接近亚太地区腹部地带,空中卫星分布相对较均匀,且每个历元内卫星截止高度角较大的卫星数较多,则定位几何构形强度较高。此外,PPP 定位时,通常设置卫星截止高度角为 10° ,在这种情况下,4 个测站在任一历元所观测的卫星数均大于 5 颗,均可满足高精度定位的需求。

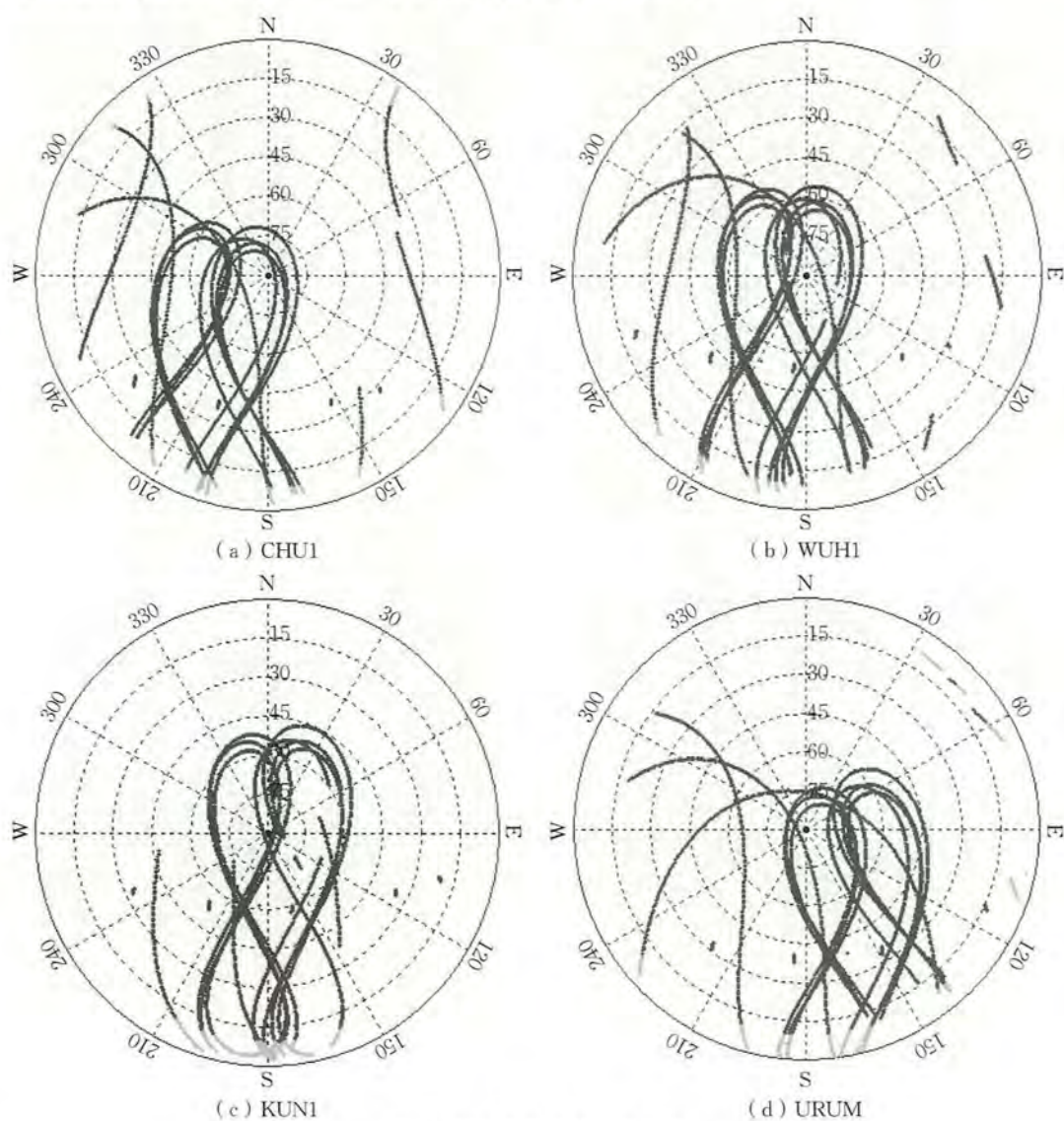


图 1 BDS-2 卫星的天空轨迹

图 2 为北斗全星座的卫星天空轨迹图,对比分析图 1 和图 2 可知,BDS-3 卫星 4 个测站的卫星定位几何强度大幅度提高,且卫星空中几何分布也得到显著改善。对于每个观测历元,全星座下的测站所跟踪的高截止高度角的卫星数增多,理论上有利于减少 PPP 模糊度初始化时间并提高三维定位精度。结合图 3 分析,在加入 BDS-3 卫星后,CHU1 测站和 URUM 测站所跟踪的卫星平均数分别由 9.5 颗提高到 14.5 颗,由 9.4 颗提高到 14.3 颗;而对于亚太腹部地区的 WUH1 测站和 KUN1 测站,可视卫星平均数分别由 11.1 颗和 10.5 颗提高到 16.2 颗和 15.6 颗。因此可知,BDS-3 卫星的加入使整个中国区域所能跟

踪的卫星数得到显著提高,并且历元之间卫星数变化较小,有利于 PPP 稳定收敛和模糊度固定成功率率的提高。对 PDOP 值进行分析,CHU1、URUM、WUH1 和 KUN1 4 个测站在仅跟踪 BDS-2 卫星时的 PDOP 值分别为 3.29、3.00、2.24 和 2.30,而在加入 BDS-3 卫星后,全星座的 PDOP 值变为 1.73、1.60、1.50 和 1.53。加入 BDS-3 后,PDOP 值的改善率分别约为 48.5%、42.4%、31.8% 和 34.8%,因此可知 BDS-3 卫星的加入对中国区域东北部和西北部用户的定位几何构形改善程度大于中部和南部地区,但是整体的定位几何构形仍然是亚太腹部地区最优的。

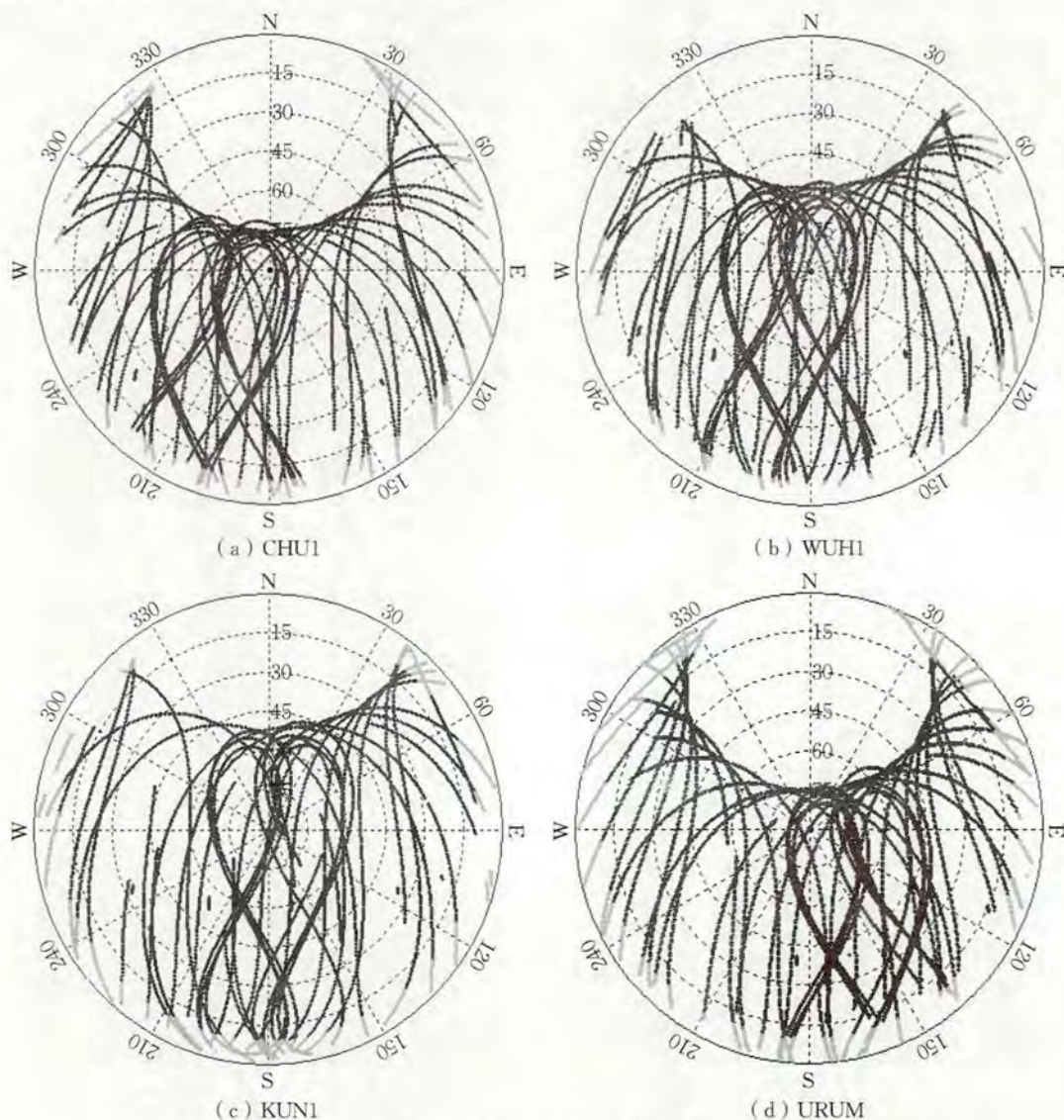


图2 BDS-2/3 卫星的天空轨迹

为了更好地分析北斗全星座 PPP 定位性能,本文同时计算了 4 个测站 GPS 星座的 PDOP 值,如图 3 所示。位于东北部的 CHU1 测站、西北部的 URUM 测站、中部的 WUH1 测站和南部的 KUN1 测站的 PDOP 值分别平均约为 1.91、2.02、1.93 和 1.97。由此可知,GPS 卫星在中国区域卫星定位几何强度基本一致,与用户所在的地理位置几乎无关。此外,4 个测站处北斗全星座 PDOP 值均小于 GPS 星座,且各历元 PDOP 值时间序列稳定性也优于 GPS,说明在中国区域 BDS-2/3 PPP 卫星几何分布已优于 GPS,用户基于 BDS-2/3 卫星系统更能实现连续高精度定位。

3.2 北斗全星座 PPP 算例分析

为了有效地验证北斗全星座下的 PPP 在中国区域的表现性能,对所选取的 10 个测站分别进行无电

离层组合和非组合的 PPP 静态、动态解算,采样间隔为 30 s。解算时采用武汉大学发布的精密轨道和钟差产品,为了避免引起频率间偏差,信号频点选择为 B1I 和 B3I,卫星截止高度角设置为 10° 。

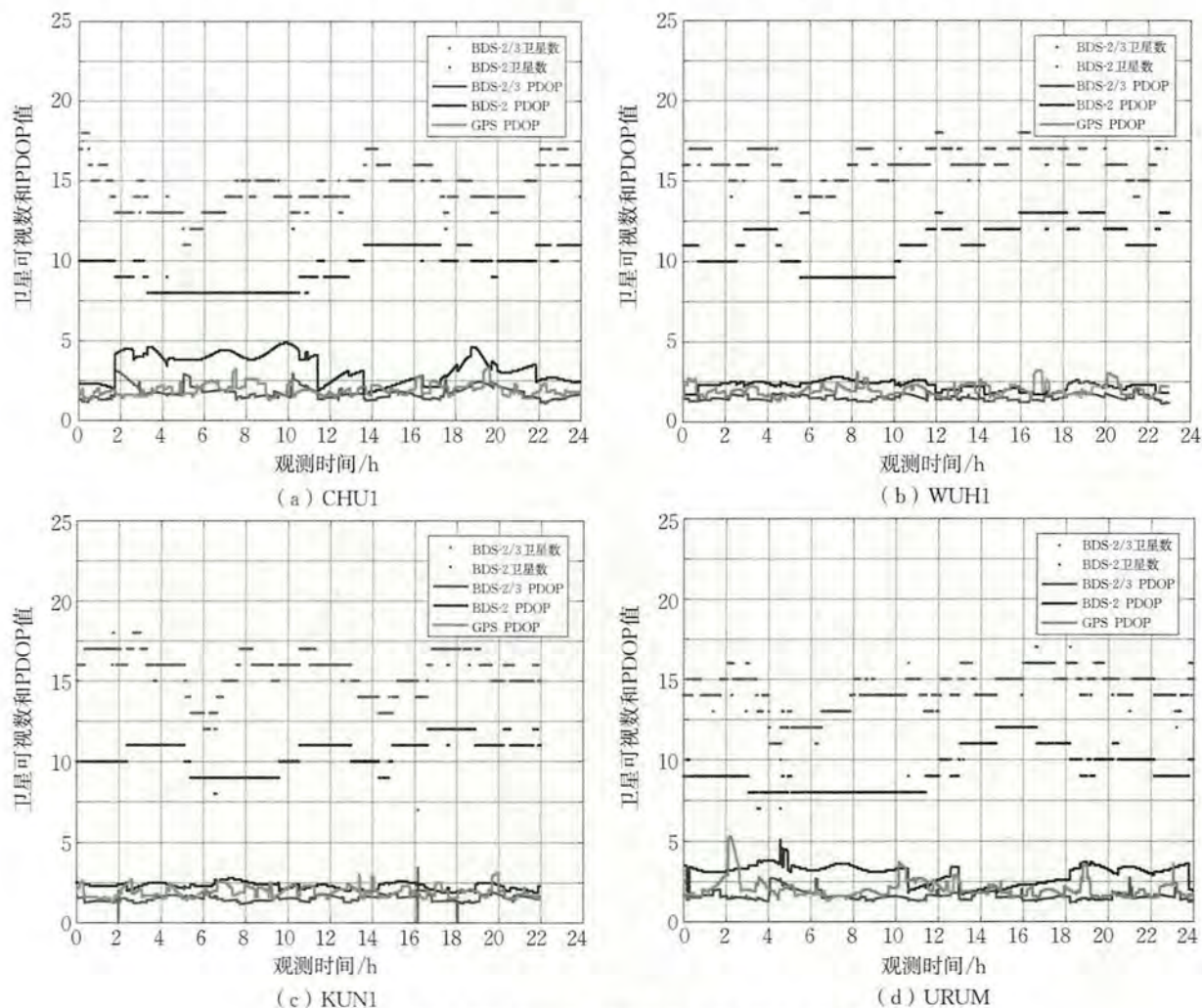


图3 BDS-2、BDS-2/3 和 GPS 卫星数和 PDOP 值统计

本文对 iGMAS 站进行 GPS/BDS 组合 24 小时的 PPP 解算,将解算结果作为相应测站的基准坐标值,同时采用 IGS 发布的 SNX 文件中周解坐标作为 MGEX 测站的基准坐标值。表 2 和表 3 统计了 10 个测站 BDS-2 和 BDS-2/3 坐标解残差,在统计时,将每个测站最后 2 小时的定位残差取平均作为单天解坐标残差。分析可知,对于所有测站,无论是无电离层组合 PPP 还是非组合 PPP,在仅有 BDS-2 卫星时可实现水平方向残差小于 3 cm,高程方向残差小于 5 cm 的定位精度,并且位于亚太腹部地区的测站定位精度优于东北部和西北部的测站。当使用北斗全星座定位时,两种组合情况下的所有测站残差均得到了较大改善,并已无明显的因区域不同而导致的定位精度差异,其中水平方向残差优于 1 cm,高程方向残差优于 2.5 cm。此外,通过对 10 个测站的统计发现,无电离层组合的 BDS-2 和 BDS-2/3 三维平均残差分别约为 1.05 cm、0.39 cm、0.93 cm 和 0.15 cm、0.04 cm、0.72 cm,而非组合的 BDS-2 和 BDS-2/3 三维平均残差分别约为 1.06 cm、0.35 cm、1.91 cm、0.14 cm、0.07 cm 和 1.17 cm。由表 2 和表 3 分析可知,无电离层组合和非组合的 PPP 定位精度几乎无差异,相对于仅使用单 BDS-2 的情况,BDS-2/3 定位解在东、北、垂向三个方向的坐标残差精度可分别提高约 85.4%、84.1% 和 57.9%。

此外,本文同时对 10 个测站分别进行了动态无电离层组合和非组合 PPP 解算,限于篇幅,仅给出了 KUN1 测站的时序,如图 4 所示。相对于仅使用 BDS-2 卫星,全星座的北斗动态 PPP 定位在三维坐标精度和定位稳定性方面得到显著提高。其中,所有测站 BDS-2 和 BDS-2/3 卫星 PPP 残差解的平均 STD 分别约为 1.58 cm、0.79 cm、4.00 cm 和 0.92 cm、0.67 cm、2.99 cm,说明 BDS-3 卫星的加入使中国

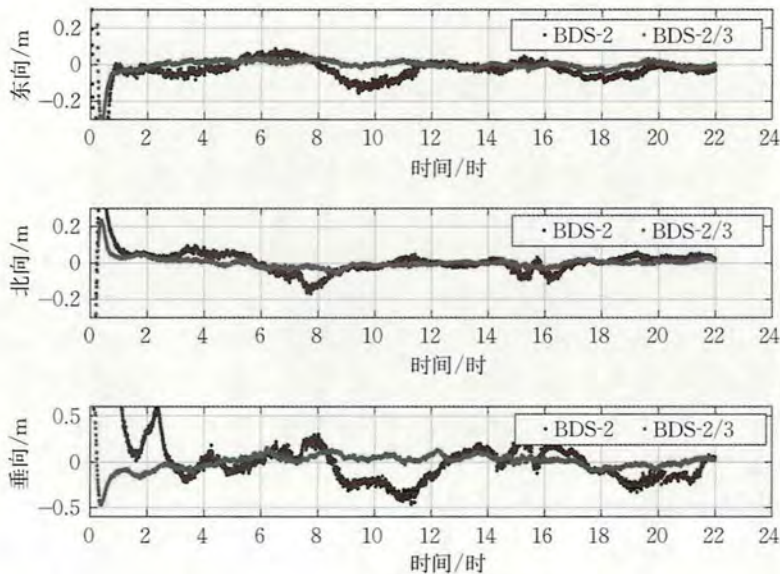
区域测站的动态 PPP 在东、高两方向的提高更为显著。需要特殊说明的是,当仅有 BDS-2 卫星时,由于受限于可视卫星数,位于东北部和西北部测站的动态 PPP 在某些时段无法得到坐标解,而北斗全星座较好地解决了这个问题,大幅度提高了定位的连续性。

表 2 无电离层组合 BDS-2 和 BDS-2/3 24 小时 PPP 残差 单位:cm

测站	BDS-2			测站	BDS-2/3		
	E	N	U		E	N	U
BJF1	2.44	1.95	-1.33	BJF1	0.24	0.31	0.43
CHU1	-2.87	-2.09	3.33	CHU1	-1.26	-0.98	-2.44
JFNG	0.63	0.24	-2.41	JFNG	0.25	0.41	-3.72
JKUN1	0.45	0.39	2.48	JKUN1	0.12	0.04	2.23
LHA1	-0.25	0.01	0.93	LHA1	0.15	0.04	0.17
SHA1	2.39	0.75	-1.96	SHA1	0.75	0.01	0.73
URUM	-0.21	0.31	-1.82	URUM	-0.93	-0.63	0.51
WUH1	0.5	-0.19	0.37	WUH1	-0.15	-0.39	1.35
WUH2	1.82	0.35	-4.29	WUH2	0.71	0.02	-2.43
XIA1	0.64	-0.29	-0.33	XIA1	0.25	-0.19	-0.34

表 3 非差分组合 BDS-2 和 BDS-2/3 24 小时 PPP 残差 单位:cm

测站	BDS-2			测站	BDS-2/3		
	E	N	U		E	N	U
BJF1	3.36	1.98	-4.5	BJF1	0.26	0.35	-2.82
CHU1	-2.15	-2.48	4.01	CHU1	-0.14	-0.67	3.01
JFNG	0.82	0.15	-2.23	JFNG	0.28	0.36	-3.18
JKUN1	0.45	0.41	0.08	JKUN1	0.24	-0.04	0.18
LHA1	-0.34	0.09	-1.18	LHA1	0.03	0.03	-2.02
SHA1	2.78	0.85	-4.96	SHA1	0.72	-0.02	-2.2
URUM	-0.03	0.43	-2.36	URUM	-0.87	-0.64	0.04
WUH1	0.5	-0.19	-0.05	WUH1	-0.14	-0.3	0.33
WUH2	1.97	0.22	-4.24	WUH2	0.79	-0.07	-1.83
XIA1	0.03	-0.71	2.25	XIA1	-0.02	-0.3	0.97



(a) 无电离层组合

图 4 KUN1 测站无电离层组合和非组合动态 PPP 残差

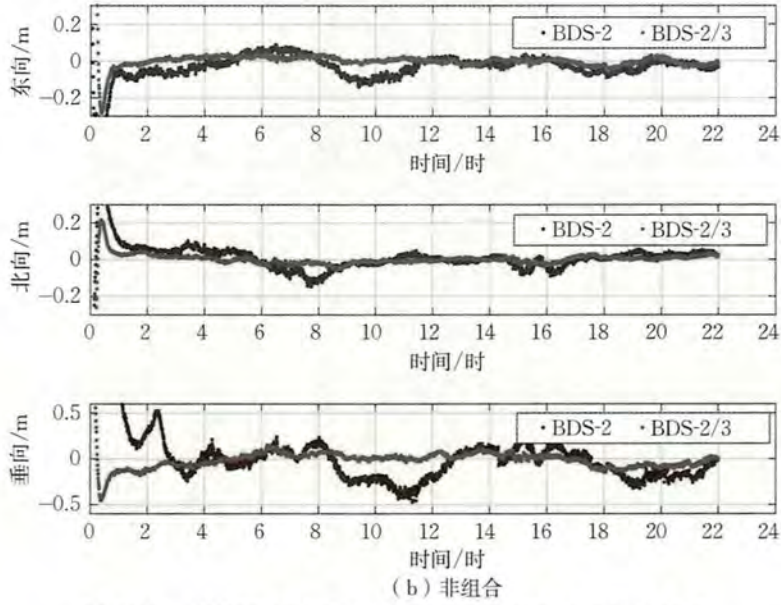


图 4(续) KUN1 测站无电离层组合和非组合动态 PPP 残差

为了研究北斗全星座下 PPP 收敛时间问题,本文解算了 3 小时各测站的无电离层组合静态 PPP 坐标残差(图 5)。由分析可知,北斗全星座下 PPP 小时解在定位精度、定位稳定性和收敛时间方面均优于单 BDS-2 卫星,即 BDS-3 卫星可弥补 BDS-2 卫星在某些历元定位几何构形较差而导致定位解精度较差的问题,使空中卫星几何构形一直处于最优状态。表 4(同一时段,上面一行为收敛到 10 cm 的时间,下面一行为收敛到 5 cm 的时间)分别统计了 BDS-2/3 PPP 坐标残差收敛到 5 cm 和 10 cm 所需要的时间。由分析可知,约 80% 的 PPP 坐标残差收敛到 5 cm 以内所需时间约在 25~45 分钟,约 80% 的坐标残差收敛到 10 cm 以内所需时间约在 5~25 分钟。这说明在中国区域内,全星座的北斗卫星导航系统 PPP 解的定位精度和收敛时间已与 GPS 相当,甚至优于 GPS。对不同位置测站分析可知,URUM 测站和 CHU1 测站在收敛到 5 cm 和 10 cm 时所需时间略大于其他测站,收敛时间分别约为 45 分钟和 23 分钟。

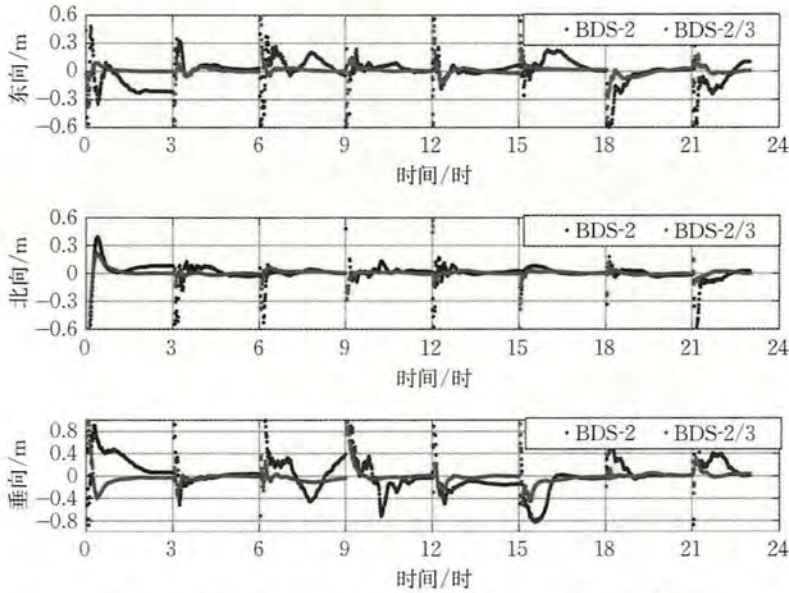


图 5 WUH1 站 3 小时 BDS-2 和 BDS-2/3 PPP 坐标残差

表4 BDS-2/3 PPP静态收敛到10 cm和5 cm的时间 单位:min

时段	LHA1	SHA1	WUH1	KUN1	URUM	CHU1
1	14.4	13.7	7.9	13.4	12.5	38.1
	43.6	61.1	34.1	32.3	21.1	63.3
2	7.9	45.4	9.5	39.6	49.6	38.5
	57.3	55.5	30.3	52.9	79.0	45.0
3	13.5	19.5	9.9	17.1	35.7	11.1
	17.2	27.3	24.0	34.3	80.4	22.4
4	5.6	36.5	15.5	3.9	17.3	24.8
	12.3	83.0	24.2	20.5	32.5	38.6
5	36.1	38.9	28.7	21.5	23.5	10.9
	45.0	87.2	31.1	48.1	89.0	26.0
6	13.7	15.4	11.5	8.9	15.9	11.5
	24.9	22.5	22.9	31.3	85.3	21.1
7	25.5	25.5	14.6	6.5	32.3	26.5
	41.2	55.2	76.3	29.6	44.6	77.0
8	26.5	20.5	16.3	0	40.7	9.5
	59.0	50.1	29.5	0	73.2	20.3

4 结 语

本文利用可最大限度跟踪 BDS 卫星的 7 个 iGMAS 测站和 3 个 MGEX 测站,根据中国区域内不同的地理位置,分别从可视卫星数、定位几何构形和 PPP 静态解及动态解等方面评估了 BDS-2/3 和单 BDS-2 下的卫星可用性和 PPP 定位表现。结果表明,当加入 BDS-3 卫星后,测站所跟踪的卫星数量、卫星定位几何构形和精密单点定位收敛时间及位置残差均得到显著改善,80%的坐标残差收敛到 5 cm 和 10 cm 时所需时间分别约为 25~45 分钟、5~25 分钟,且 24 小时解的定位精度在水平方向优于 1.0 cm,高程方向优于 2.5 cm。此外,在中、南部地区,卫星定位几何构形已优于同时刻的 GPS 卫星,且定位精度与 GPS 相当。当所有 BDS-3 卫星可用时,其定位几何构形和精度必将进一步提高,同时可实现全球范围内连续、稳定的高精度定位。

参考文献:(略)

作者简介:岳彩亚,男,1990 年生,博士生,主要从事高精度 GNSS 数据处理和多频多系统 PPP 模糊度快速初始化研究。

GNSS 反射信号多星模拟和仿真平台设计

李博闻,杨东凯,张 波

(北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100191)

摘 要:利用 GNSS-R 技术进行地表参数的遥感探测已经成为遥感领域的新趋势。随着 GNSS-R 技术的快速发展,GNSS-R 仿真模拟成了新的研究热点之一。现有 GNSS-R 仿真模拟研究均是考虑单颗星或单频点的仿真,而实际应用中接收机捕获的信号常常是多颗星的反射信号。针对这一现状,本文从多星模拟的角度出发,在分析 GNSS-R 技术遥感原理、反射信号模型和仿真原理的基础上,推导了 GNSS-R 多星模拟的模型。基于 GNSS-R 多星模拟的模型,结合 GPU 的快速并行运算能力,设计了 GNSS-R 多星仿真平台。最后,对 GNSS-R 多星仿真平台产生的直射和反射信号进行了测试验证。结果表明,直射信号的定位结果达到定位精度要求;仿真的两颗星反射信号处理得到的时延相关功率结果与理论模型具有很好的一致性,相关系数均达到 0.99 以上;产生的信号用于 GNSS-R 测高技术,其测高误差在 1.4~1.8 m,符合 C/A 码测距接收机精度;GPU 的并行运算进行多星模拟计算比传统的 CPU 计算提高了 800~900 倍。本文证明了提出的模型与设计的仿真平台是可行的、准确的。

关键词:GNSS;反射信号;多星模拟;仿真平台

1 引 言

利用全球导航卫星系统反射(GNSS-R)技术进行遥感探测具有全天候、全天时、多信号源、高时空分辨率等优势。自 20 世纪 90 年代 Martin-Neira 等学者提出 PARIS (passive reflectometry and interferometry system) 计划以来,GNSS-R 技术得到了快速发展。通过大量的理论分析及实验验证,该技术可用于海面高度、海面风速、有效波高、土壤湿度、海冰探测、海面溢油探测等遥感应用。

随着 GNSS-R 技术的快速发展,GNSS-R 仿真模拟的研究也引起了越来越多的关注。GNSS-R 仿真研究可以为 GNSS-R 遥感技术相关算法研究和性能评估提供模型与数据。Zavorotny 和 Voronovich 于 2000 年提出了 GNSS 反射信号的时延-多普勒相关功率模型,即 Z-V 模型。Z-V 模型是基于基尔霍夫光学几何近似法及雷达方程进行推导的,从数值上定义了 GNSS-R 的基础观测量 DDM (delay-Doppler map),并且成了 GNSS-R 海洋遥感的理论基础。

尽管 Z-V 模型由于其简单易用的特性成为最常用的模型之一,但是针对双基散射等场景,各国学者提出了更多、更复杂的电磁散射模型。西班牙 Starlab 在 Z-V 模型的基础上,在描述海面粗糙度时增加了有效波高的影响,同样基于基尔霍夫光学几何近似法建立了 Starlab 反射场模型。Elfouhaily 等学者在 2002 年进一步分析了 GNSS-R 相关功率波形随时间延迟和多普勒频移的变化特性,并结合试验数据讨论了 GNSS-R 随多普勒频移的相关功率波形,这是对 Z-V 模型的有益补充。2004 年,You 等学者提出了一种随机电压模型(Stochastic voltage model),电压模型可用于确定预检测集成时间的上限,并且在计算过程中使用了快速傅里叶变换。2005 年,Thompson 等学者基于表面电流积分方程的二阶迭代,提出了改进的几何光学模型(geometrical optics,GO)。2009 年,Marchan-Hernandez 等学者针对 Z-V 模型计算复杂度过大的缺点,提出了一种基于卷积的 GNSS 反射信号相关功率的有效算法。2012 年,Valencia 等学者做了全面的仿真研究,来探讨评估几何关系对 GNSS-R 观测量 DDM 的影响。同年,Clarizia 等学者提出了一个计算量较小的小面元法 (facet approach, FA) 来计算海面反射信号的散射功率。2016 年,Garrison 通过总结前人对 GNSS-R 仿真模拟所做的工作,提出了一种仿真 GNSS-R DDM 的统计学方法。

2018年,Eroglu等学者在ICEAA会议上介绍了他们最近开发的相干双基植被散射模型(coherent bistatic vegetation scattering model, SCoBi-Veg)。2019年,Guerriero等学者针对地形对星载GNSS-R探测的影响进行了分析,用数字高程模型(digital elevation model, DEM)来解释DDM的形状和峰值功率的变化。

通过分析已有研究可以发现,现有研究均是针对单颗星单频点的仿真。而在实际试验中,接收机接收到的信号是来自于多颗星甚至多系统的。同时,在遥感应用中也常常利用多组信号的反演结果进行对比和校对。因此,建立GNSS反射信号多星仿真模型并设计仿真平台产生反射信号,对GNSS-R技术的研究有着重要意义。

2 GNSS-R 基本原理与仿真

2.1 GNSS-R 技术

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是以卫星为导航台的星基无线电导航系统,由空间段、控制段和用户段三部分组成,可为全球用户提供全天候的位置、速度信息和精密授时服务,是现代空间技术、无线电通信技术及计算机技术相结合的产物。



图1 GNSS-R 技术示意

在传统GNSS应用中,经地表反射的卫星导航信号被认为是一种干扰,即多径误差。一般情况下要用各种方法进行抑制或消除。但是20世纪90年代前后,该多径信号被当作一种新型的遥感信号源加以利用,由此产生了GNSS-R遥感技术。经过30多年的发展,GNSS-R遥感技术已经成为国内外遥感探测和导航技术领域研究热点之一。如图1所示,GNSS接收机在接收导航卫星直射信号的同时,也将接收经过反射面的反射信号。该反射信号体现了反射面的各种物理特性信息,反射信号波形的变化、极化特征的变化,以及幅值、相位和频率等参量的变化都直接反映了反射面的物理特性。

因此,可以说反射信号相对直射信号的变化与反射面直接相关。因此,对于反射信号的精确估计和接收处理,可以实现对反射面物理特性的估计与反演。因此,GNSS-R技术是利用导航卫星L波段信号为发射源,在陆地、航空飞行器、低轨卫星或其他平台上安装反射信号接收装置,通过接收并处理海洋、陆地或移动目标的反射信号,实现被测媒质的特征要素提取或移动目标探测的一种技术。

2.2 GNSS 反射信号模型

GNSS反射信号模型的一般建模思路是在接收端将接收到的GNSS反射信号看作是各个散射单元散射信号的加权和。各位学者推导过程略有不同,但不影响建模效果。本文给出一个直观易懂的推导过程。入射到海面散射单元的 $U_{x,y}$ 的GNSS信号可以表示为

$$S_{i,x,y}(t) = \frac{\sqrt{P_i G_i}}{\sqrt{4\pi R_{i,x,y}}} a\left(t - \frac{R_{i,x,y}}{c}\right) \exp\left(-j\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi R_{i,x,y}}{\lambda}\right)\right) \quad (1)$$

式中, P_i 为发射机功率, G_i 为发射天线增益, λ 为信号波长, $R_{i,x,y}$ 为GNSS卫星到散射单元 $U_{x,y}$ 的距离, f_c 为载波频率, $a(t)$ 表示GNSS调制信号(伪随机码和导航电文)。散射单元 $U_{x,y}$ 形成的散射场在接收端可近似表示为

$$S_{s,x,y}(t) = \frac{\sqrt{P_t G_t} \sqrt{\sigma_{p,q,x,y}}}{\sqrt{4\pi R_{r,x,y} R_{t,x,y}}} a \left(t - \frac{R_{r,x,y} + R_{t,x,y}}{c} \right) \exp(-j2\pi f_c t) \exp \left(j \left[\frac{2\pi(R_{r,x,y} + R_{t,x,y})}{\lambda} + \varphi_{t,x,y} \right] \right) \quad (2)$$

式中, $R_{r,x,y}$ 为接收天线到散射单元 $U_{x,y}$ 的距离, $\sigma_{p,q,x,y}$ 为散射单元 $U_{x,y}$ 的散射系数, $\varphi_{t,x,y}$ 表示散射单元 $U_{x,y}$ 散射信号的随机相位。经过天线接收的 GNSS 反射信号可以表示为所有散射单元的天线增益加权和, 即

$$S_s(t) = \int \lambda \sqrt{\frac{G_{r,x,y}}{4\pi}} S_{s,x,y} dx dy \quad (3)$$

式中, $G_{r,x,y}$ 为接收天线在散射单元 $U_{x,y}$ 指向上的增益。将式(2)代入式(3)可得

$$S_s(t) = \lambda \frac{\sqrt{P_t G_t}}{(4\pi)^{\frac{3}{2}}} \exp(-j2\pi f_c t) \int \frac{\sqrt{G_{r,x,y} \sigma_{p,q,x,y}}}{R_{t,x,y} R_{r,x,y}} a \left(t - \frac{R_{r,x,y} + R_{t,x,y}}{c} \right) \exp \left(j \left[\frac{2\pi(R_{r,x,y} + R_{t,x,y})}{\lambda} + \varphi_{t,x,y} \right] \right) dx dy \quad (4)$$

利用相位与频率之间的关系可得

$$\exp \left(j \frac{2\pi(R_{r,x,y} + R_{t,x,y})}{\lambda} \right) = \exp(j2\pi f_{x,y} t) \quad (5)$$

式中, $f_{x,y}$ 为散射单元 $U_{x,y}$ 散射信号的多普勒频率, 可以表示为

$$f_{x,y} = \frac{m_{x,y} v_t - n_{x,y} v_r}{\lambda} \quad (6)$$

式中, $m_{x,y}$ 表示散射单元 $U_{x,y}$ 中卫星的向量占比, $n_{x,y}$ 表示散射单元 $U_{x,y}$ 中接收机的向量占比, v_t 表示卫星的速度矢量, v_r 表示接收机的速度矢量。最后可以得到在接收端的 GNSS 反射信号表达式, 即

$$U_s(t) = \lambda \frac{\sqrt{P_t G_t}}{(4\pi)^{\frac{3}{2}}} \exp(-j2\pi f_c t) \int \frac{\sqrt{G_{r,x,y} \sigma_{p,q,x,y}}}{R_{t,x,y} R_{r,x,y}} a \left(t - \frac{R_{t,x,y} + R_{r,x,y}}{c} \right) \exp(j2\pi f_{x,y} t) \exp(j\varphi_{t,x,y}) dx dy \quad (7)$$

2.3 GNSS-R 仿真

GNSS-R 仿真是在已知几何、散射及接收等场景环境的条件下, 仿真得到 GNSS-R 几何关系、二维时延-多普勒相关功率或 GNSS-R 射频/中频信号。分别对应着 GNSS-R 仿真的三个层次: 几何层次仿真、信息层次仿真和信号层次仿真。目前, 在 GNSS-R 技术的研究中, 用到最多的是 GNSS 反射信号的基础观测量 DDM, 即信息层次仿真。为了产生 DDM, 对 GNSS 反射信号与本地产生的多路不同时延和多普勒频率的复制信号进行相关处理, 并对连续的相关结果进行非相干累加得到二维时延-多普勒相关功率。

大量学者已经从解析和数值仿真两个不同角度, 对 GNSS 反射信号电磁散射二维时延-多普勒相关功率的计算进行了研究, 提出了基尔霍夫近似法(Kirchhoff approximation-geometric optics, KA-GO)、微扰动法(small perturbation method, SPM)、小斜率近似法(small slope approximation, SSA), 以及双尺度模型(two scale model, TSM)等解析方法。其中, KA-GO 模型由于其表述直观、适用范围广而得到大量使用。KA-GO 模型要求海表面的粗糙度曲率半径大于波长, 适合计算较大尺度粗糙度的海表面散射系数, 即

$$\sigma_{KA-GO} = \pi |\mathfrak{R}|^2 \frac{|\mathbf{q}|^4}{q_z^4} P_{pdf} \left(-\frac{q_v}{q_z} \right) \quad (8)$$

式中, \mathfrak{R} 为非涅尔反射系数, \mathbf{q} 为散射矢量, q_v 、 q_z 分别为散射矢量 \mathbf{q} 在垂直、水平方向上的分量。 P_{pdf} 为海面均方坡度 m_{ss} 的概率密度函数, 假设为零均值的高斯分布, 则对应的海面均方坡度 m_{ss} 可以通过对 Elfouhaily 海浪谱进行积分得到, 即

$$m_{SS} = \int_0^{K_c} k^2 S(k) dk \tag{9}$$

式中, k 为入射波波数, $S(k)$ 为海浪谱, 积分上限 K_c 为截止波数。

基于 KA-GO 模型, 结合式(7)的 GNSS 反射信号表达式, 可以推导出二维时延-多普勒相关功率表达式, 即

$$\langle |Y(\tau, f)|^2 \rangle = \frac{\lambda^2 P_t G_t T_{coh}^2}{(4\pi)^3} \int \frac{G_{r,x,y} \sigma_{p,q,x,y}}{R_{t,x,y}^2 R_{r,x,y}^2} WAF^2 \left(\tau - \frac{R_{r,x,y} + R_{t,x,y}}{c}, f_{x,y} - f \right) dx dy \tag{10}$$

式中, $WAF(\cdot)$ 表示模糊度函数, T_{coh} 为相干积分时间。

此外, 还可以通过 GNSS-R 信号层次的仿真结果经过相关处理得到。GNSS-R 信号仿真的具体流程如图 2 所示。

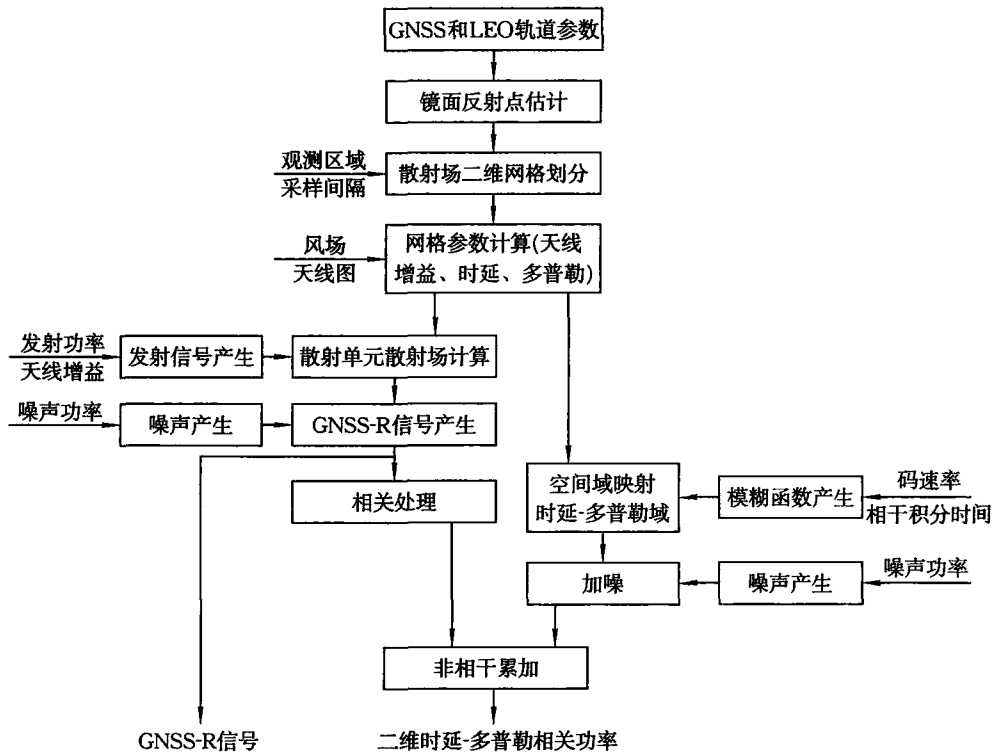


图 2 GNSS-R 仿真流程

图 3 给出了地心地固坐标系下 GNSS 和低轨卫星位置分别为 $[-11\ 178\ 791.991\ 294\ -13\ 160\ 191.204\ 988\ 20\ 341\ 528.127\ 540]$ 和 $[-4\ 069\ 896.703\ 386\ -3\ 583\ 236.963\ 735\ 4\ 527\ 639.271\ 758]$, 速度分别为 $[2\ 523.258\ 023\ -361.592\ 839\ 1\ 163.748\ 104]$ 和 $[-4\ 738.074\ 234\ -1\ 796.252\ 568\ -5\ 654.995\ 201]$, 以及海面风速分别为 5 m/s 和 15 m/s, 接收天线增益为 12 dB, 3 dB 天线波束宽度为 20° 条件下的二维时延-多普勒相关功率分布图。海面粗糙度的影响使得 GNSS 信号在海面处发生漫反射, 反射信号向更大时延和多普勒扩展, 呈现出典型的“马蹄形”分布特征。随着风速的增大, 海面镜面反射的信号越弱, 二维时延-多普勒相关功率的峰值功率越小。

3 GNSS 反射信号多星模拟

上述分析均是针对单颗星的建模和仿真, 而在实际试验中, 接收机接收到的信号是来自于多颗星甚至多系统的。同时, 在遥感应用中也常常利用多组信号的反演结果进行对比和校正。考虑 GNSS 反射信号的多星模拟, 建立 GNSS-R 多星模型十分重要。

为了对 GNSS 多星反射信号进行模拟仿真, 必须建立一般条件下的 GNSS 反射信号多星模型。根据本文 2.2 节提出的接收端 GNSS 反射信号表达式, 那么对反射信号进行接收处理后, 相关运算输出 I、Q

两路信号,可以表示为

$$\left. \begin{aligned} I_R(k) &\approx C \cdot A \cdot D(k) \cdot R(\tau) \cdot \cos\theta_k \\ Q_R(k) &\approx C \cdot A \cdot D(k) \cdot R(\tau) \cdot \sin\theta_k \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, C 为反射信号的衰减系数; A 为信号幅度; $D(k)$ 为数据位; $R(\cdot)$ 为 PRN 码自相关函数; $\theta_k = \Delta\omega_d(k-1/2)T + \Delta\Phi_k$, $\Delta\omega_d$ 为载波多普勒角频率估计误差。

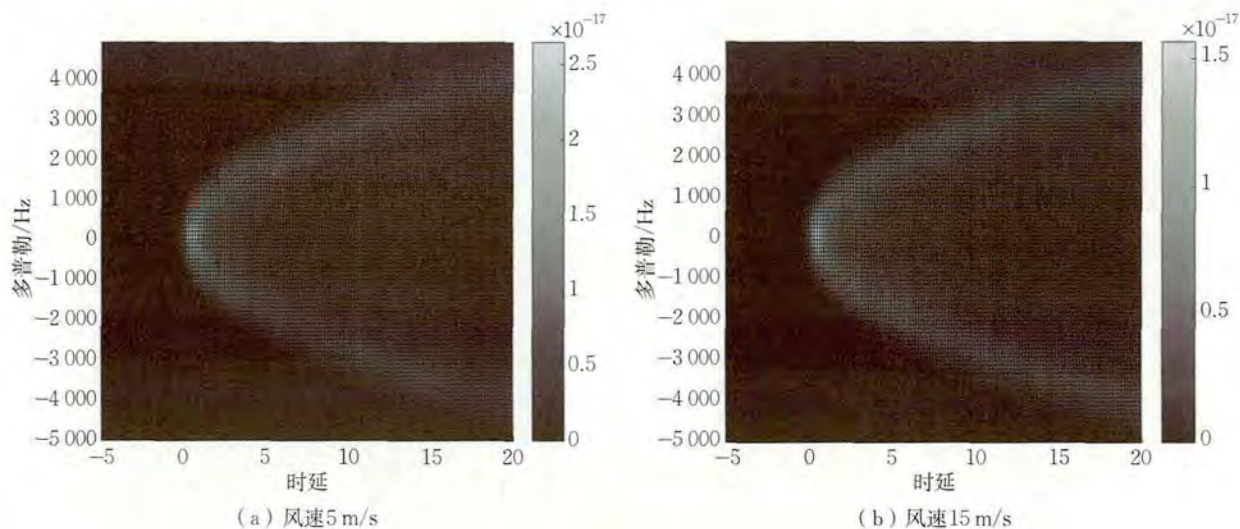


图3 风速为 5 m/s 和 15 m/s 的 DDM 仿真结果

对于多颗卫星信号来说,以双星为例,有

$$\left. \begin{aligned} I_R(k) &= C_1 \cdot A_1 \cdot D(k) \cdot R(\tau_1) \cdot \cos\theta_1 + C_2 \cdot A_2 \cdot D(k) \cdot R(\tau_2) \cdot \cos\theta_2 \\ Q_R(k) &= C_1 \cdot A_1 \cdot D(k) \cdot R(\tau_1) \cdot \sin\theta_1 + C_2 \cdot A_2 \cdot D(k) \cdot R(\tau_2) \cdot \sin\theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

因此,接收机处理得到的相关功率可以表示为

$$\begin{aligned} &I_R^2(k) + Q_R^2(k) \\ &= (C_1 \cdot A_1 \cdot D(k) \cdot R(\tau_1) \cdot \cos\theta_1 + C_2 \cdot A_2 \cdot D(k) \cdot R(\tau_2) \cdot \cos\theta_2)^2 + \\ &\quad (C_1 \cdot A_1 \cdot D(k) \cdot R(\tau_1) \cdot \sin\theta_1 + C_2 \cdot A_2 \cdot D(k) \cdot R(\tau_2) \cdot \sin\theta_2)^2 \\ &= C_1^2 A_1^2 R^2(\tau_1) + C_2^2 A_2^2 R^2(\tau_2) + \\ &\quad 2C_1 C_2 A_1 A_2 R(\tau_1) R(\tau_2) (\cos\theta_1 \cos\theta_2 + \sin\theta_1 \sin\theta_2) \\ &= C_1^2 A_1^2 R^2(\tau_1) + C_2^2 A_2^2 R^2(\tau_2) + 2C_1 C_2 A_1 A_2 R(\tau_1) R(\tau_2) \cos(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (13)$$

根据相关功率与相关值的关系,将式(13)表示为相关值的形式,即

$$\sqrt{I_R^2(k) + Q_R^2(k)} = \sqrt{C_1^2 A_1^2 R^2(\tau_1) + C_2^2 A_2^2 R^2(\tau_2) + 2C_1 C_2 A_1 A_2 R(\tau_1) R(\tau_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)} \quad (14)$$

假设载波相位误差足够小,则式(14)可以表示为

$$\begin{aligned} \sqrt{I_R^2(k) + Q_R^2(k)} &= \sqrt{C_1^2 A_1^2 R^2(\tau_1) + C_2^2 A_2^2 R^2(\tau_2) + 2C_1 C_2 A_1 A_2 R(\tau_1) R(\tau_2)} \\ &= \sqrt{(B_1 R(\tau_1) + B_2 R(\tau_2))^2} \\ &= B_1 R(\tau_1) + B_2 R(\tau_2) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, B 由 C 、 A 、 θ 共同决定。式(15)说明对于两颗卫星信号来说,其反射信号相关处理结果可以表示为两个不同相关函数的和。根据上述推导,对于多颗卫星信号来说,反射信号相关结果可以表示为

$$\begin{aligned} \sqrt{I_R^2(k) + Q_R^2(k)} &= B_1 R(\tau_1) + \dots + B_n R(\tau_n) \\ &= \sum_1^n B_n R(\tau_n) \end{aligned} \quad (16)$$

因此,通过上述推导和分析可以发现,GNSS 反射信号多星模拟的建模可以在接收端转化为多星反射信号的累加。

4 GNSS 反射信号仿真平台设计

根据推导的 GNSS 反射信号多星模拟模型,设计实现 GNSS 反射信号多星模拟的仿真平台,主要由图形化的用户输入界面、GNSS 直射信号产生、空间几何计算、散射场景模拟和输出界面等功能模块组成,如图 4 所示。

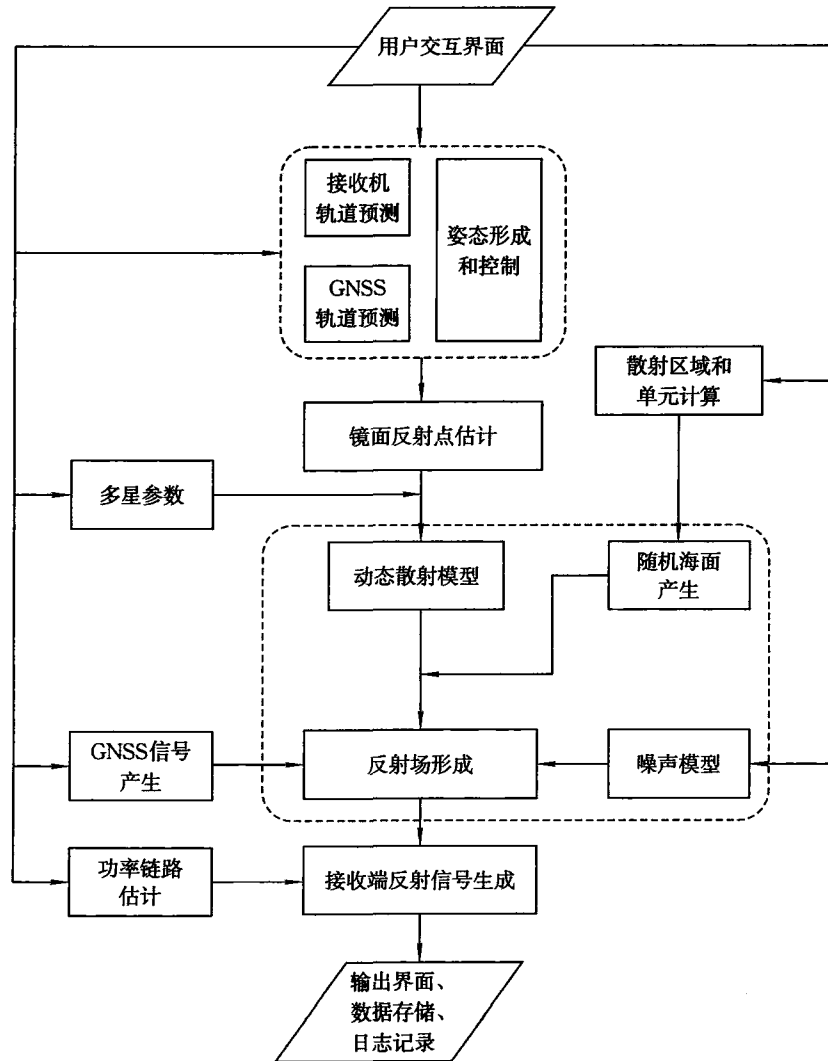


图 4 GNSS-R 多星模拟仿真平台流程

图 4 中,用户输入界面部分包括允许用户在界面中设置 GNSS 直射、反射信号生成所需的参数,如系统频点、接收机位置、仿真时刻、反射面信息等。空间几何计算部分包括卫星轨道仿真、接收机轨迹仿真及姿态模拟、镜面反射点计算和散射区大小的计算等。散射场景模拟部分包括根据海浪谱模型(如 Elfouhasly 海浪谱)生成随机海面作为海面散射区域的计算基础;根据动态的发射机—散射点—接收机几何关系,计算时延和多普勒参数;根据环境参数计算散射区内受影响因子的散射系数及信号传播过程中常见的大气延迟误差、斑点噪声等。输出界面部分包括以图形化的形式展现 GNSS 直射、反射信号的仿真结果,包含卫星星号、卫星位置、仰角、方位角、多普勒等信息。

根据图 4 所示的 GNSS-R 多星模拟仿真平台流程,基于 C/C++ 语言的 GNSS 模拟器,在程序内部构建反射信号参数计算多通道,增加镜面反射点计算、散射区与散射单元计算、散射模型计算、反射信号参数计算等模块,同步组建 GNSS 直射信号产生仿真系统和 GNSS 多星反射信号产生仿真系统。

由于考虑了多星模拟的场景,单纯利用通道增加的方法进行多星参数计算会极大的降低仿真效率。

因此,考虑基于 GPU(graphics processing units)进行多星模拟的并行运算。现代的 GPU 已经具备了高度可编程化的能力,得益于 GPU 大量的可并行执行的处理单元和极高的内存带宽,越来越多的科研及商用设备开始利用 GPU 的并行运算来处理大量数据、解决复杂问题、提高设备运算性能。

由于 GPU 的架构是为适应大量可并行处理的使用场景而专门设计的,通过大量的简单核心相互并行协作完成计算任务,从而减弱逻辑控制和分支预测的时间消耗,极大地加速了大量数据的并行计算能力,CPU 和 GPU 架构对比如图 5 所示。

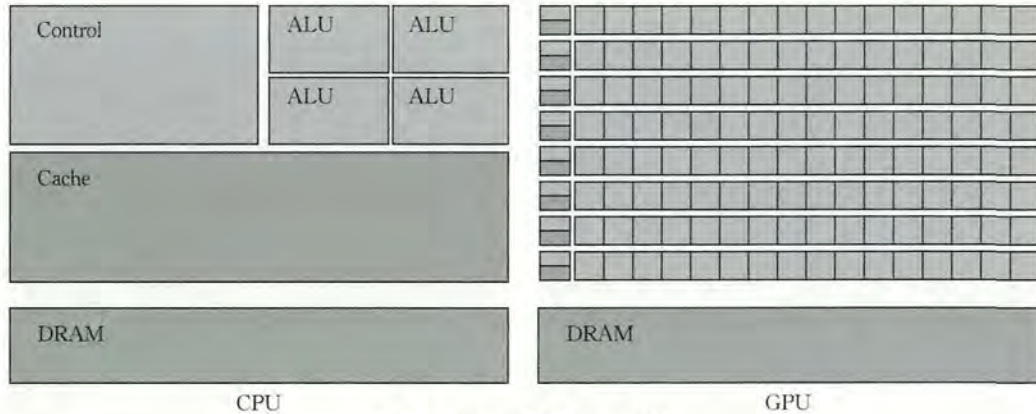


图 5 CPU 和 GPU 架构对比

GPU 更适合进行算法可并行的处理任务——大量计算核心并行地在一个数据集上完成相同的计算处理,计算相同而数据不同。只要是可并行的算法,都可以基于 GPU 的并行化计算模型实现计算性能的提高,因此越来越多的传统串行算法都被移植到 GPU 上,如图像识别、机器学习、编解码、实时信号处理等。

5 测试和验证

GNSS-R 多星仿真平台可以产生数字中频信号,并生成直射信号和反射信号两个数字中频文件,利用 MATLAB 双通道软件接收机进行接收处理,以验证生成的直射和反射信号质量。

配置仿真环境:接收机高度为 5 000 m,系统频点为 GPS L1,星号为 3 号星和 6 号星,海面风速为 5 m/s,风向为 0° ,时间为 2015 年 10 月 12 日 01 点 30 分 00 秒,接收机位置设置为东经 116.3° ,北纬 39.9° ,高度 5 000 m,接收机运动状态为机载且方向角为 180° ,速度为 120 m/s,加速度为 0 m/s^2 。信号产生模块选择产生数字中频信号,设置采样率 F_s 为 16.369 MHz,中频频率为 3.996 MHz,量化比特为 8 bit。

配置完成后开始仿真并将结果实时显示在界面中,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,GNSS-R 多星仿真平台产生了 3 号星和 6 号星的直射信号,以及各自的反射信号(信号前带有“*”符号表示反射信号)。为了对产生的信号进行测试和验证,利用接收机进行接收处理。

首先进行定位测试。载体位置设定为 39.9°N 、 116.3°E 、高 5 000 m,载体运动模型设置为速度 120 m/s 的匀速直线运动,使用软件接收机接收处理的结果如图 7 所示。平均定位结果在 39.52°N 、 116.18°E ,高 4 987.5 m 附近。可以看出,仿真产生的直射信号具有很高的定位精度。

接下来进行反射信号的测试验证。对于 3 号星的反射信号,接收机处理得到的时延相关功率(DW)结果与理论 Z-V 模型进行对比,结果如图 8 所示。可以看出,由于 DW 是由多条反射信号共同作用的结果,使得相关结果峰值后移、甩尾延长。同时,Z-V 模型仿真结果和 GNSS-R 多星仿真平台产生的反射信号处理结果相似程度很高,相关系数为 0.997 7。按照同样的方式对 6 号星的反射信号进行测试,得到的相关系数为 0.995 9。这表明仿真平台产生的反射信号与真实信号相关特性几乎一致,可以用来进行反射信号的进一步研究。

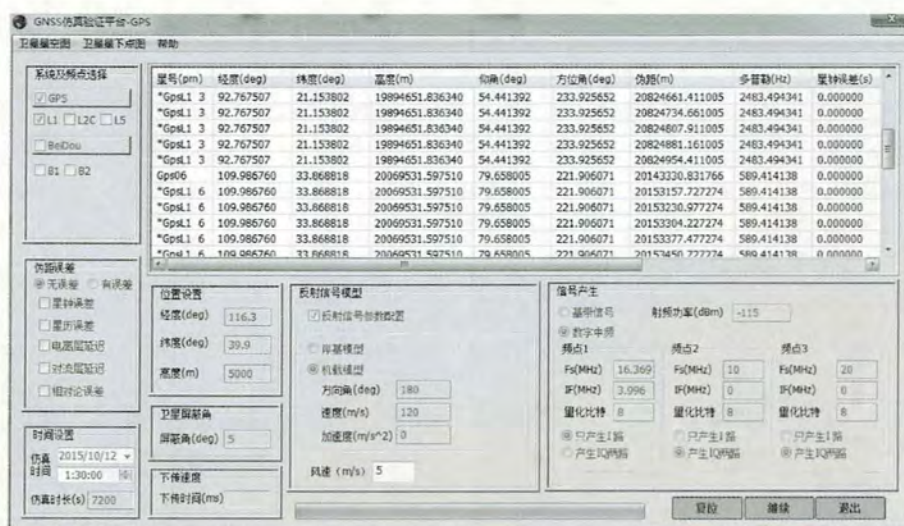
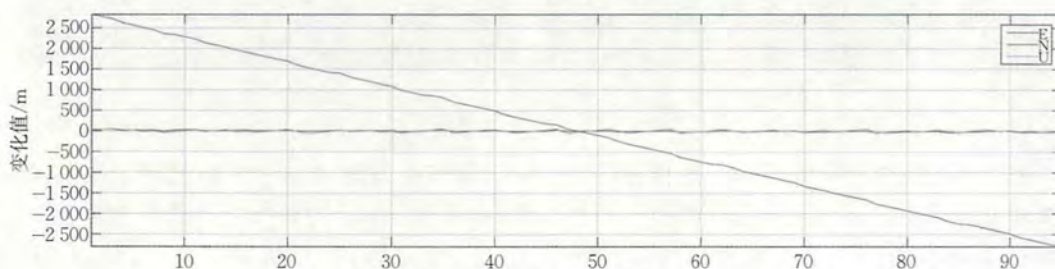


图6 GNSS多星仿真平台用户界面



(a) UTM系统下的坐标变化(测量周期为500ms)

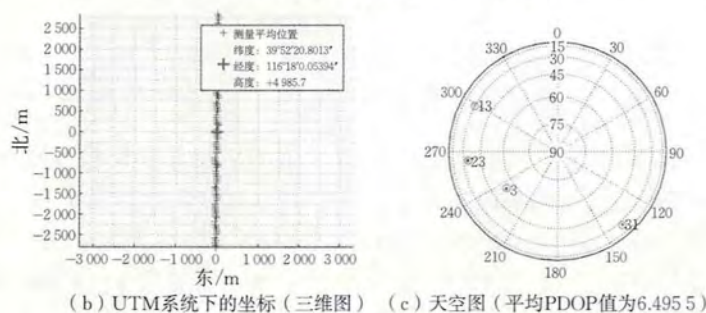


图7 定位结果

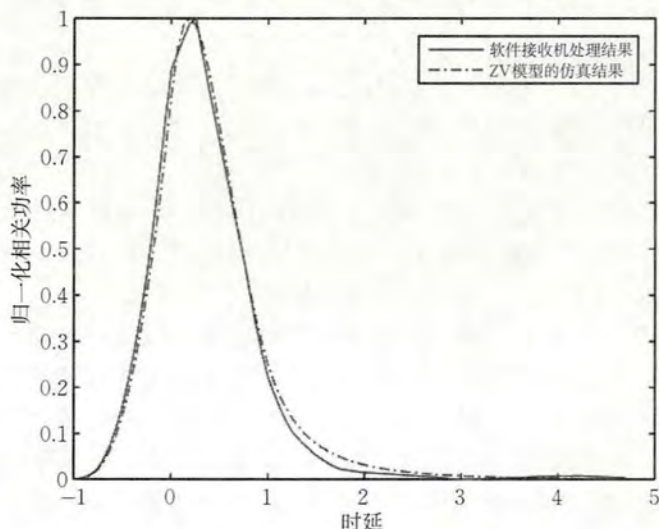


图8 3号星仿真结果与Z-V模型对比

在 GNSS-R 遥感应用中,高度测量是十分常见的一种应用场景。为了对产生的直反信号进行进一步的验证,利用差分求导计算斜率极值的方法进行一组测高测试。在考虑不同高度、仰角的情况下,对 3 号星和 6 号星进行测高测试,20 组测试(共 400 个测量结果)的测高误差均值如表 1 所示。

表 1 不同高度和仰角的测高误差均值 单位:m

高度	测高误差均值	
	高度角为 54.14° (PRN 3)	高度角为 77.76° (PRN 6)
1 000	1.765	1.456
2 000	1.625	1.809
3 000	1.677	1.628
4 000	1.635	1.557
5 000	1.542	1.815

从表 1 中可以分析得出,GNSS-R 多星仿真平台模拟仿真产生的信号用于 GNSS-R 测高技术,其测高误差在 1.4~1.8 m,符合 C/A 码测距接收机精度(0.3~3 m),从而证明了设计的 GNSS-R 多星仿真平台进行 GNSS-R 遥感应用的可行性和准确性。

最后,对 GPU 进行多星模拟的并行运算效率进行测试。在相同的仿真参数设定下,分别利用 CPU 和 GPU 计算 100 次数字中频信号的计算时间的统计平均值,由于 GPU 计算时间与 CPU 计算时间相比数值太小,为了便于显示,图中纵坐标轴标尺刻度采用对数坐标(以 10 为底)。从图 9 中可以看出,随着采样率的提升,CPU 计算所消耗的时间基本与采样率成正比,CPU 计算在 5~50 MHz 采样率条件下数字中频信号所需的时间约为 640~6 200 ms,而 GPU 计算所需时间仅为 0.75~6.67 ms。在 1 bit 量化情况下,GPU 相对于 CPU 的加速比(CPU 所耗时间/GPU 所耗时间)约为 848~926,可见 GPU 相对于 CPU 的计算效率提升还是非常明显的。

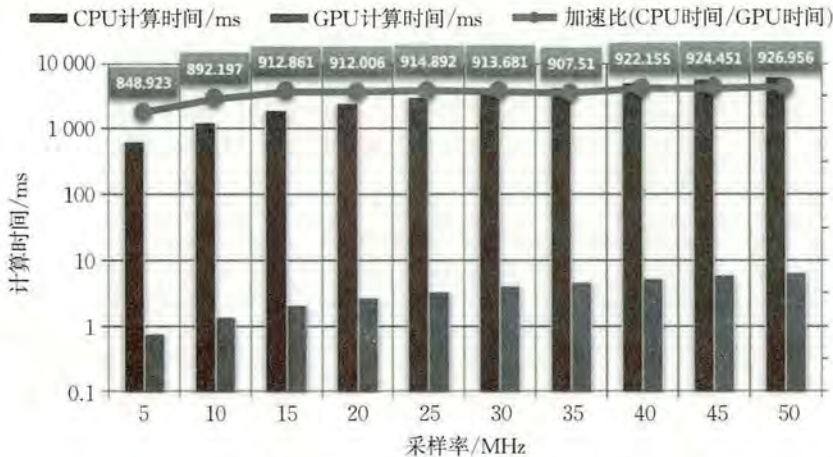


图 9 CPU 和 GPU 计算效率对比

6 结论与展望

本文在分析 GNSS-R 遥感基础、GNSS-R 模型和 GNSS-R 仿真实论的基础上,结合基尔霍夫光学几何近似法,推导了 GNSS-R 多星模拟的模型。根据所提出的模型,设计并实现了 GNSS-R 多星仿真平台。最后对仿真平台产生的信号进行了多维度测试,结果表明:

(1) 基于 GNSS 反射信号模型和基尔霍夫光学几何法的 GNSS-R 多星模拟方法,简洁、直观、明了。

(2) 基于 GNSS-R 多星模拟方法和 GPU 并行运算设计的 GNSS-R 多星仿真平台可以生成可用的直射和反射信号,直射信号可进行高精度定位,多星的反射信号可用于 GNSS-R 遥感应用。

随着 GNSS-R 技术的发展,以及大数据驱动的智能思维逐渐在方法论中占据主导,后续对于多系统、多颗星的大数据反射信号的需求很大,因此,能够进行多系统和多星快速仿真的 GNSS-R 模型和仿真平台将在 GNSS-R 技术的发展中起到重要作用。

参考文献:(略)

作者简介:李博闻,男,1990 年生,博士生,主要研究方向为 GNSS-R 理论与应用、GNSS 信号仿真研究。

北斗三号全球导航卫星系统授时性能分析评估*

蔺玉亭¹, 韩春好^{1,2}, 杨玉婷¹, 李国俊¹, 刘利¹, 蔡志武¹, 徐世依¹

(1. 北京卫星导航中心, 北京 100094; 2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘要:本文给出了北斗单星授时、多星授时和卫星共视时间传递的数学模型, 对时延修正算法、粗差处理方法及误差处理方法进行了分析, 提出了新的兼容 BDS-2 和北斗三号全球导航卫星系统(BDS-3) B1I&B3I 信号体制的双频无电离层组合数学模型和多星加权共视数据处理算法。并基于全球观测站数据分析评估了大区域、长基线条件下的 BDS-2 和 BDS-3 的授时服务性能。结果表明, 在单星授时条件下, 亚洲测站的 BDS-3 系统单星授时不确定度优于 6 ns(95%), BDS-2 单星授时不确定度优于 10 ns(95%); 同一站点的单站多星授时性能优于单星授时, 全球范围内 BDS B1I&B3I 与 B1I&B2I 授时服务不确定度均优于 9 ns(95%), 欧美测站的 BDS B1I&B3I 授时性能比 B1I&B2I 有明显提升; 洲际站间(基线长度为 7 000~10 000 km)在卫星共视条件下, BDS B1I&B3I 共视比对性能明显优于 B1I&B2I 方法, 不确定度最高达到 4 ns(95%), 性能与 GPS L1P&L2P 共视基本相当。

关键词:北斗三号全球导航卫星系统; 单星授时; 单站多星授时; 北斗共视; 可视卫星数; 载噪比

1 引言

2020年6月,北斗三号全球导航卫星系统(BDS-3)成功发射最后一颗组网卫星,提前半年完成星座部署,同时面向全球用户提供导航、定位、授时等服务。BDS-3全球星座包括:3颗 GEO 卫星分别位于东经 80°、110.5°和 140°;3颗 IGSO 卫星位于倾角为 55°的轨道;24颗 MEO 卫星平均分布在三个倾角为 55°的轨道面上,不同轨道面之间升交点赤经相差 120°,每个轨道面部署 8 颗卫星,轨道高度为 21 528 km。与北斗二号导航卫星系统(BDS-2)相比,BDS-3 卫星之间建立星间链路,采用了新的信号体制(增加了 B1C、B2a 等频点)、新的调制方式和信道编码,星载原子钟提高了一个量级,星地、星间和站间时间同步、卫星钟差 2 小时的预报等精度显著提高。

GNSS 时间传递是实现远距离高精度时间传递的主要手段之一。国际计量局(BIPM)利用 GPS 共视或 GPS 精密单点定位(PPP)技术实现全球 80 多个时间实验室的远距离时间比对,是国际原子时(TAI)和协调世界时(UTC)时间保持计算的关键环节。除此之外,为了提高时间比对链路的可靠性,BIPM 将格洛纳斯(GLONASS)时间传递作为备份链路。近年来,国内外学者开展了基于北斗导航卫星系统的时间传递等相关研究,广伟等开展了基于 GNSS 时间传递通用标准 CGGTTS V2E 的北斗共视时间比对研究。Huang、梁坤等进一步开展了基于北斗共视的国际时间比对研究,例如亚欧之间多系统 GNSS 时间比对试验,分析了北斗共视时间比对精度。王威雄等对 BDS-3 组网期间的北斗共视时间比对性能进行了初步计算评估,BDS-3 零基线共视时间比对标准差为 0.74 ns,频率稳定度达到 1×10^{-14} 天的量级。

2015年,多系统共视国际标准 CGGTTS V2E 正式发布,其中北斗共视主要针对 BDS-2 卫星,单频共视为 B1I,双频共视为 B1I&B2I,不支持 BDS-3 新信号体制。本文重点开展了 BDS-2 与 BDS-3 导航卫星系统全球授时服务、时间传递性能的研究,包括北斗单星授时、北斗单站多星授时、北斗卫星共视时间传递的模型和数据处理方法,考虑到 BDS-3 对 BDS-2 的 B1I&B3I 频点的继承性,本文提出了基于 CGGTTS V2E 标准格式的北斗 B1I&B3I 双频无电离层组合数学模型,给出了多星共视权函数的计算方法和时间

* 基金项目:国家自然科学基金(41174027)

偏差计算模型。最后,利用全球分布的国际 GNSS 服务(IGS)多系统监测站数据,对亚太地区 BDS-3 与 BDS-2 系统的单星授时服务性能进行了比较分析,在对亚洲、大洋洲、北美洲及欧洲区域的单站多星授时情况进行分析的基础上,对亚洲与大洋洲、北美洲及欧洲之间的长基线 BDS 共视比对性能进行了分析评估。

2 北斗卫星授时及其主要误差源分析

2.1 北斗单星授时

本文数据分析与处理采用以国际通用的 GNSS 时间传递标准文件 CGGTTS V2E 为基础,其观测模式为:连续跟踪导航系统卫星,采集 13 分钟的伪距测量值,采样率为 1 次/30 s,每 13 分钟共采集 26 个原始伪距观测值。首先对 26 个伪距观测值进行与频率相关的硬件时延改正,模型为

$$\bar{P}_i = P_i - c [INTDLY(f_i) + CABDLY - REFDLY] \quad (1)$$

式中, P_i 为频率 f_i 的伪距测量值(单位为 m), c 为光速, $INTDLY(f_i)$ 为频率 f_i 的接收机内部时延, $CABDLY$ 为接收机天线线缆时延, $REFDLY$ 为参考信号时延。

目前 BDS-2 卫星和 BDS-3 卫星都发播 B1I 和 B3I,本文分析 BDS-2 沿用了 CGGTTS V2E 定义的 B1I&B2I 双频组合授时模式, BDS-3 授时则采用 B1I&B3I 双频组合授时模式,其双频无电离层组合观测模型为

$$\bar{P}_{IF} = a_{ij} \bar{P}_i + (1 - a_{ij}) \bar{P}_j \quad (2)$$

式中, $a_{ij} = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2}$, BDS-2 卫星 $a_{ij} = 2.34$, BDS-3 卫星 $a_{ij} = 2.84$,本地时钟 t_{ref} 与卫星钟 t_{sat} 之间的时间偏差为

$$t_{ref} - t_{sat} = \frac{1}{c} [\bar{P}_{IF} - \|\vec{X}_{sat} - \vec{X}_{rec,IF}\| - S] + \Delta t_{rel} - \Delta t_{tropo} - GD \quad (3)$$

式中, \vec{X}_{sat} 为在国际地球参考框架(ITRF)下的卫星坐标, $\vec{X}_{rec,IF}$ 为在 ITRF 下接收机天线的相位中心坐标, S 为地球自转引入的误差, Δt_{rel} 为相对论效应改正, Δt_{tropo} 为对流层引入的误差, GD 为与广播卫星时钟相关的广播群延迟。

最后通过单星计算得到本地时钟与北斗时(BDT)的时间偏差为

$$t_{ref} - t_{BDT} = (t_{ref} - t_{sat}) + \Delta t_{sat} \quad (4)$$

式中, Δt_{sat} 为卫星与 BDT 之间的时间偏差,可由广播星历预报得到。

2.2 北斗单站多星授时

卫星高度角越高,卫星单向时间频率传递性能越好,但可视卫星数就会减少。因此在计算单站多星授时过程中,利用卫星高度角对可视卫星进行加权平均求解单站多星的授时结果,权函数计算公式为

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 EL_i}}} \quad (5)$$

式中, EL_i 为第 i 颗星的高度角。则北斗单站多星授时结果为

$$REF - BDT = \sum_{i=1}^n p_i (t_{ref} - t_{BDT})_i \quad (6)$$

式中, $(t_{ref} - t_{BDT})_i$ 为卫星 i 的单星授时结果, $p_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$, n 为可视卫星数。

2.3 北斗卫星共视

北斗卫星共视时间传递是指任意两个地面参考时钟在同一时刻观测一颗或者多颗北斗卫星,通过伪距测量,扣除卫星、空间链路、接收机引入的各项误差后,计算得到各自本地参考时钟与 BDT 之间的时间

偏差,最后两者互差得到两地参考时钟之间的时差。

设 A 地的本地时钟为 REF_A , B 地的本地时钟为 REF_B , Δt_{A-sat_i} 为 t_j 时刻 A 地参考时钟与卫星 i 时钟 t_{sat_i} 的时差, Δt_{B-sat_i} 为 t_j 时刻 B 地参考时钟与卫星 i 时钟 t_{sat_i} 的时差, 则 A、B 两地时钟的共视结果为

$$\Delta t_j^{AB} = \sum_{i=1}^n p_i [(REF_A - t_{sat_i}) - (REF_B - t_{sat_i})] = \sum_{i=1}^n p_i [t_{A-sat_i} - t_{B-sat_i}] \quad (7)$$

权函数计算公式为

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{2 + 1/\sin^2 e_A + 1/\sin^2 e_B}} \quad (8)$$

式中, Δt_j^{AB} 为 t_j 时刻 A、B 两地参考时钟共视比对结果, $p_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$, n 为可视卫星数。

2.4 误差及粗差处理

影响授时精度的误差主要来源于四个方面:与观测卫星相关的误差,如卫星轨道误差、卫星钟误差、卫星天线相位中心偏差及相对论效应等;与传播路径有关的误差,如电离层、对流层及多路径效应等;与接收机相关的误差有接收机时钟噪声、硬件时延误差及天线相位中心偏差等;地球自转和形变等其他外部环境因素产生的误差,如主要有地球定向参数误差自转和固体潮、海潮改正误差等(表 1)。

表 1 主要误差源及修正模型

误差源	修正模型
电离层误差	双频组合
对流层误差	萨斯塔莫伊宁模型
卫星轨道及钟差	精密轨道及钟差产品
相对论效应等	模型改进

目前,这些时延改进方法相对成熟,文中一方面利用经典模型对观测卫星、传播路径引入的误差进行修正,同时利用卫星共视时间比对方法,可以对与卫星相关的误差、与传播路径相关的误差做进一步消除,基线越短,链路相关性越强,误差修正效果越好。

因卫星或者观测条件的限制,北斗时间传递会存在不同程度的粗差值,因此对单站多星授时及共视时间比对结果进行 3σ 准则粗差剔除。即, σ 为计算区间内本地时钟与 BDT 差值的方差, μ 为均值,若满足

$$|(REF - BDT)_i - \mu| \geq 3\sigma \quad (9)$$

则 $(REF - BDT)_i$ 为异常值。

3 北斗授时性能分析评估

3.1 站点选取

表 2 中选取了四个 MGEX 监测站点和国内一个监测站点,其外部参考信号为氢原子钟或者守时实验室保持的 UTC(k), 频率稳定度优于 7×10^{-15} , 分别位于亚洲、欧洲、大洋洲和北美洲,接收机类型均为 Septentrio PolarRX5 TR。由于接收机硬件时延可通过事先校准得到,因此本文分析北斗导航卫星系统的授时精度将不考虑固定时延影响。

表 2 站点的基本信息

站点	外部参考	国家	接收机	系统	与 BS02 距离/km
BS02	H-MASER	中国	PolaRx5TR	BDS-2、BDS-3	—
PTBB	UTC(PTB)	德国	PolaRx5TR	BDS-2、BDS-3	7 531
USN7	H-MASER	美国	PolaRx5TR	BDS-2、BDS-3	9 702
USN8	UTC(USNO)	美国	PolaRx5TR	BDS-2、BDS-3	8 059
HOB2	H-MASER	澳大利亚	PolaRx5TR	BDS-2、BDS-3	8 059

3.2 单星授时性能分析

因 BDS-2 主要覆盖亚太地区,故选用亚洲站点 BS02 的监测数据进行分析,接收机接收到的卫星 PRN 号与类型对应关系如表 3 所示。

表 3 卫星 PRN 号与卫星类型的对应关系

卫星类型	卫星 PRN 号	
	BDS-2	BDS-3
GEO	01—05	—
IGSO	06—10、13、16	—
MEO	11、12、14	19—30、32—35

选取 2020 年 4 月 30 日至 2020 年 5 月 19 日的观测数据统计 BDS-2 与 BDS-3 系统单星高度角、载噪比及 B1&B3 组合授时性能。结果如图 1~图 4 所示。图 1~图 3 为箱线图,图中箱子中“□”表示高度角均值,箱子中间“—”为中位数,代表数据的平均水平;箱子上下限位数据表示上四分数据和下四分位数,即箱子的宽度在一定程度上反映数据的波动程度。

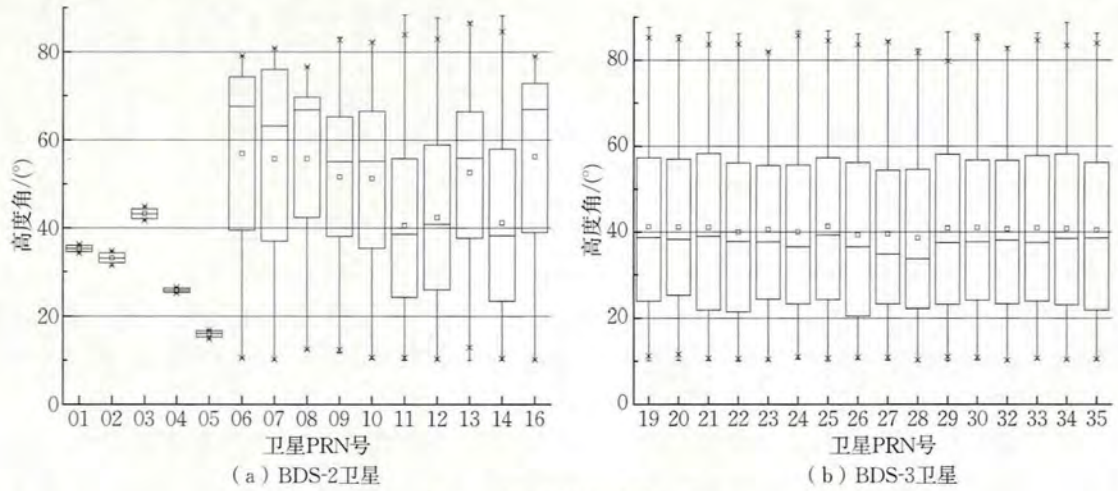


图 1 单星高度角统计结果

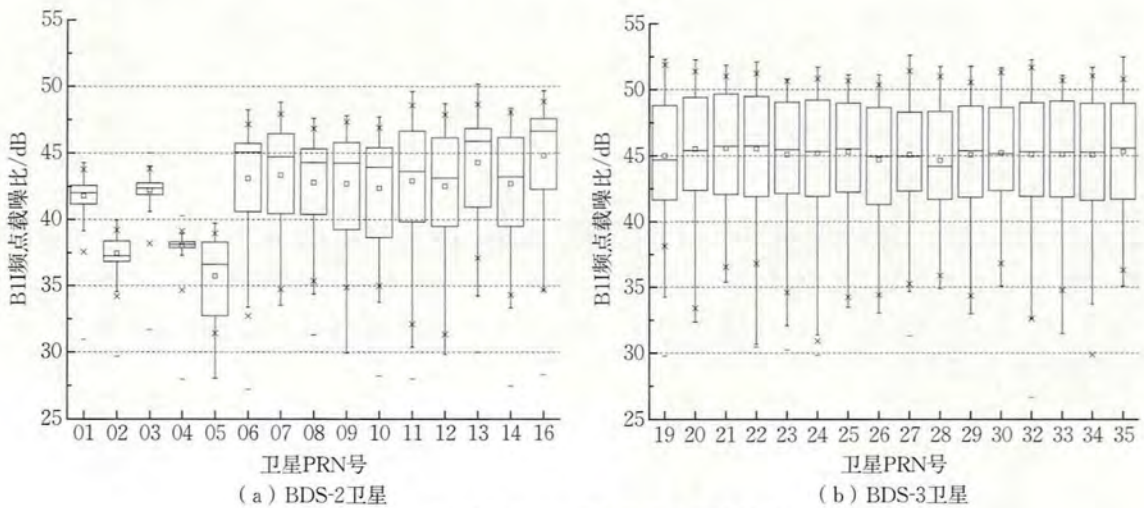


图 2 20 天单星 B1 频点载噪比统计结果

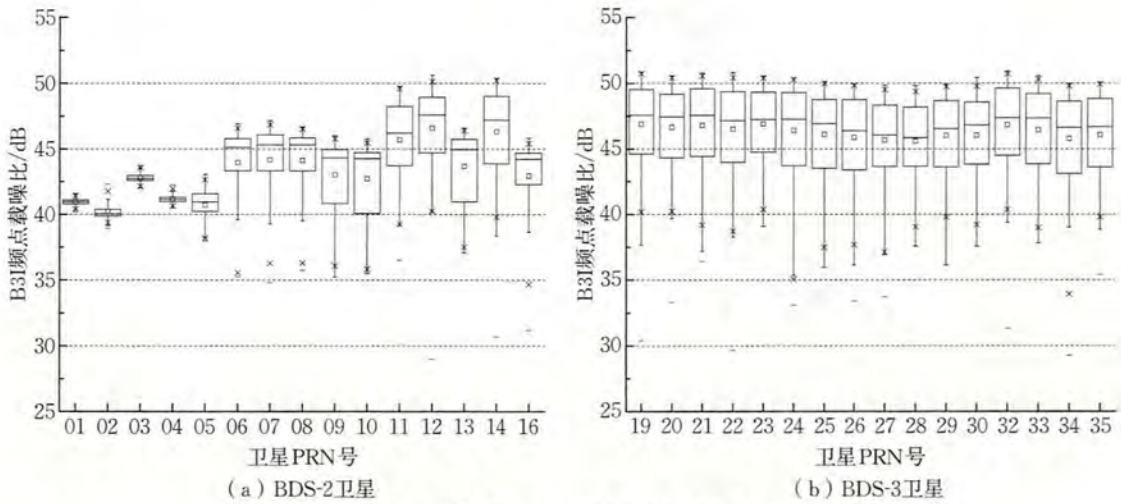


图3 20天 BDS-2 单星 B3 频点载噪比统计结果

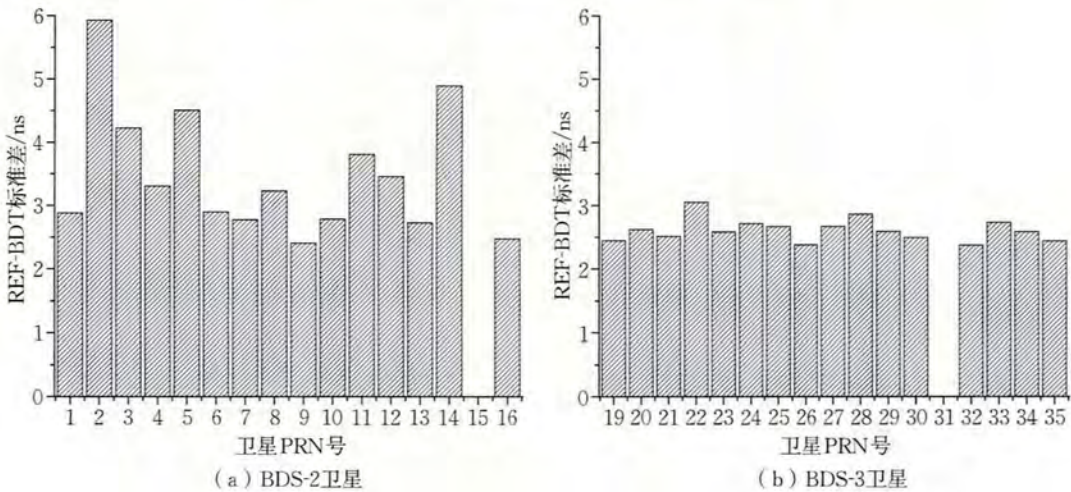


图4 20天单星授时结果统计结果

由图1~图4可知,在亚太地区:①BS02 站点可见 BDS-2、BDS-3 卫星数分别为 15 颗、16 颗,其中 BDS-3 IGSO 和 GEO 暂未对外提供服务;②卫星高度角 IGSO>MEO>GEO;③卫星 B1I 信号载噪比 IGSO 与 MEO 相当,大于 GEO;④卫星 B3I 信号载噪比 MEO>IGSO>GEO;⑤BDS-3 卫星信号载噪比大于 BDS-2;⑥BDS-3 单星授时不确定度优于 BDS-2,二者均优于 10 ns(95%)。故单星授时不确定度与卫星高度角、载噪比存在相关,即高度角越高,载噪比越大,授时不确定度越小。在下文分析单站多星授时、卫星共视比对精度时,将卫星高度角作为取权计算依据。

3.3 单站多星授时性能分析

利用 BS02、HOB2、PTBB、USN7、USN8 站点的 CGGTTS 标准共视文件统计 2020 年 4 月 20 日至 2020 年 5 月 19 日时间段内 BDS B1I&B2I、BDS B1I&B3I 及 GPS L1P&L2P 系统的可视卫星数、单站授时结果,如图 5~图 14 所示。

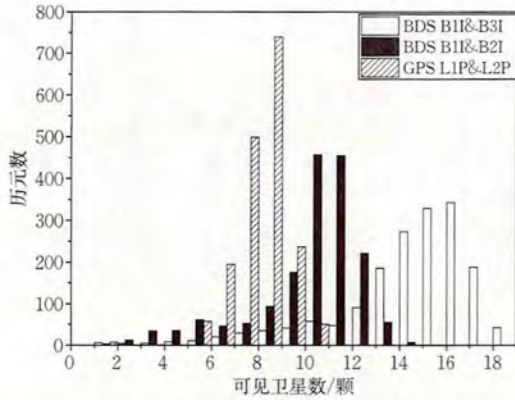


图5 BS02 站点的可视卫星数

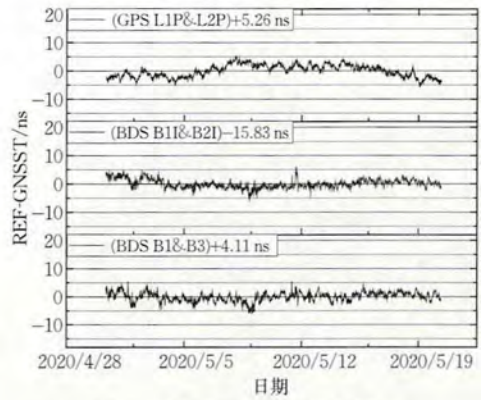


图6 BS02 站点的授时精度

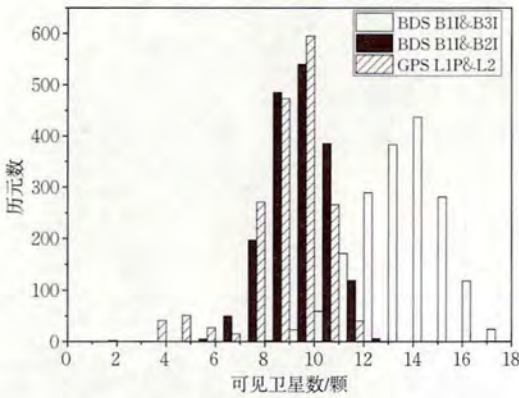


图7 HOB2 站点的可视卫星数

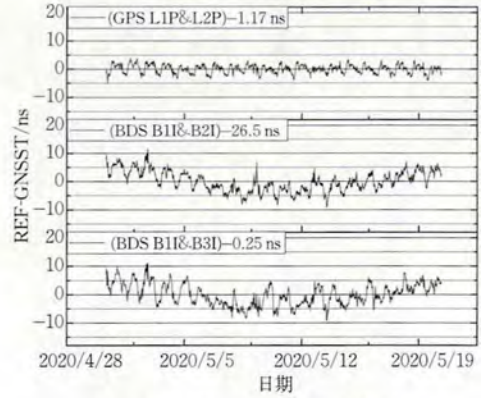


图8 HOB2 站点的授时精度

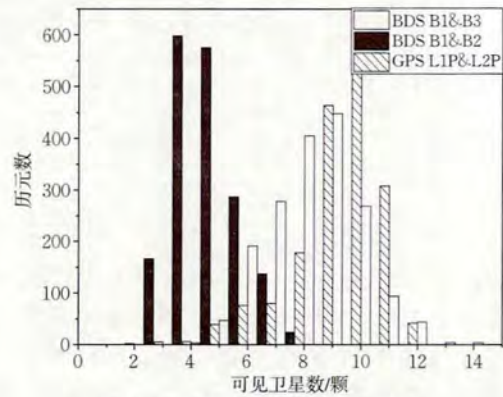


图9 PTBB 站点的可视卫星数

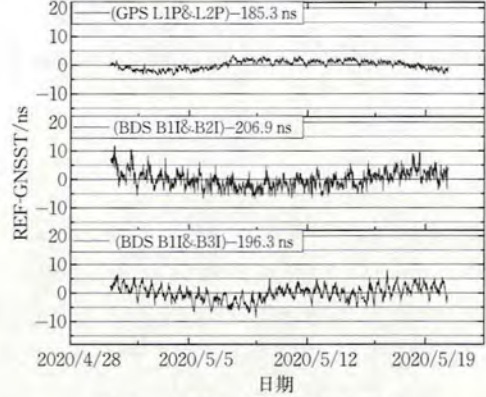


图10 PTBB 站点的授时精度

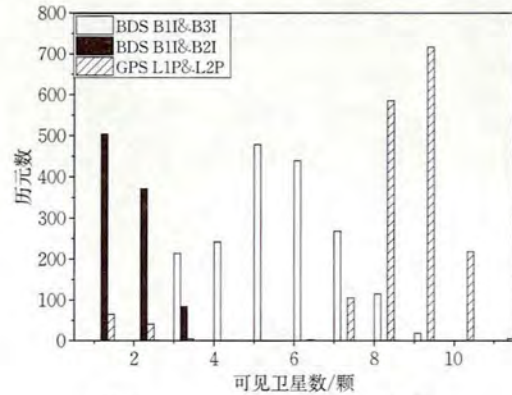


图11 USN7 站点的可视卫星数

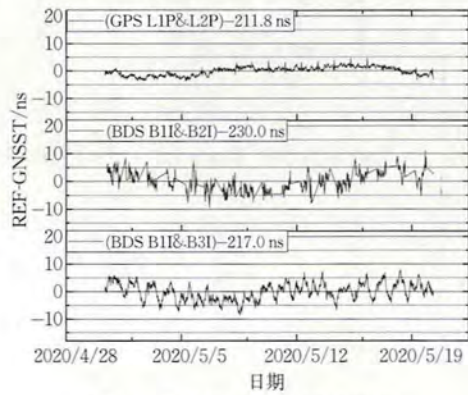


图12 USN7 站点的授时精度

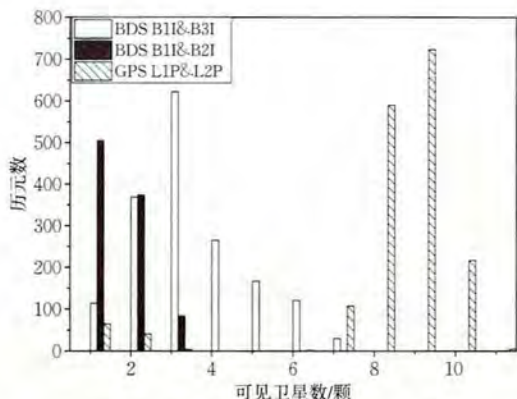


图 13 USN8 站点的可视卫星数

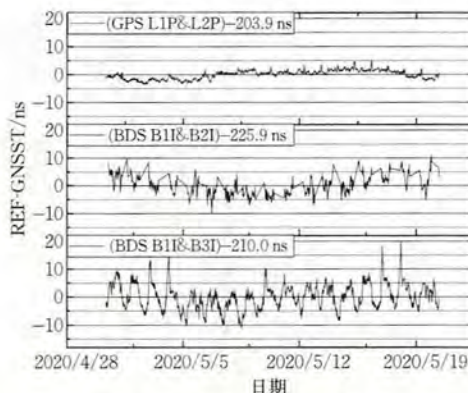


图 14 USN8 站点的授时精度

表 4 五个站点 REF 与 GNSS 之间时间偏差的标准方差(STD)及观测历元数超过 100 的可视卫星数

站点	BDS B1I&B2I		BDS B1I&B3I		GPS L1P&L2P	
	STD /ns	可视卫星数 /颗	STD /ns	可视卫星数 /颗	STD /ns	可视卫星数 /颗
BS02	1.54	9~12	1.63	13~17	2.16	7~10
HOB2	3.6	8~12	3.8	11~16	1.52	8~11
PTBB	2.95	2~6	2.57	6~10	1.51	8~11
USN7	3.36	1~2	3.051	3~8	1.5	8~10
USN8	3.47	1~2	4.41	1~6	1.53	7~10

由图 5~图 14 和表 4 可知:①BDS B1I&B2I、BDS B1I&B3I 全球范围内授时服务相当,不确定度均优于 9 ns(95%),在北京地区 BDS 优于 GPS;②BDS 在亚洲、大洋洲地区的可见卫星数比欧美地区多,最多可见卫星数达到 18 颗。

3.4 站间卫星共视比对

本文利用自主开发的 CGGTTS 处理工具软件进行 BDS 和 GPS 共视数据分析,其中北斗双频共视支持 B1I&B2I 和 B1I&B3I。利用 BS02 与其他站点长基线共视时间比对结果,比较分析 BDS B1I&B2I、BDS B1I&B3I、GPS L1P&L2P 双频时间传递性能。采用 2020 年 4 月 30 日至 2020 年 5 月 19 日的观测数据,站间比对结果如图 15~图 22 所示,并统计站间的共视卫星数及时间比对结果标准差,如表 6 所示。

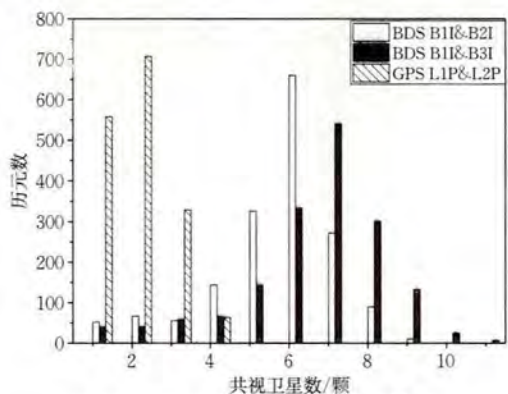


图 15 BS02 与 HOB2 共视卫星数

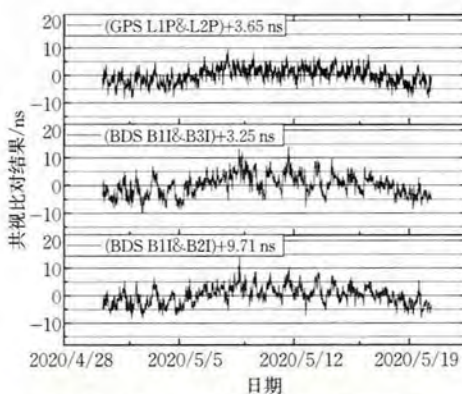


图 16 BS02 与 HOB2 共视比对结果

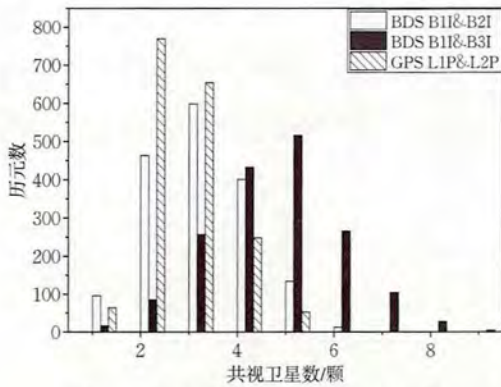


图 17 BS02 与 PTBB 的共视卫星数

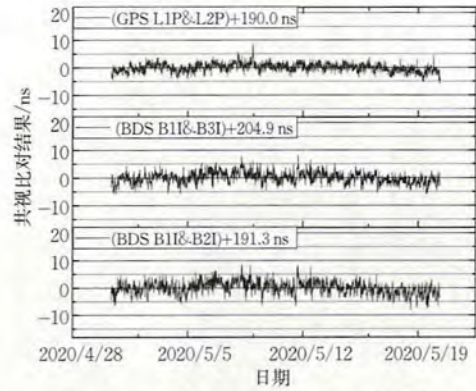


图 18 BS02 与 PTBB 共视比对结果

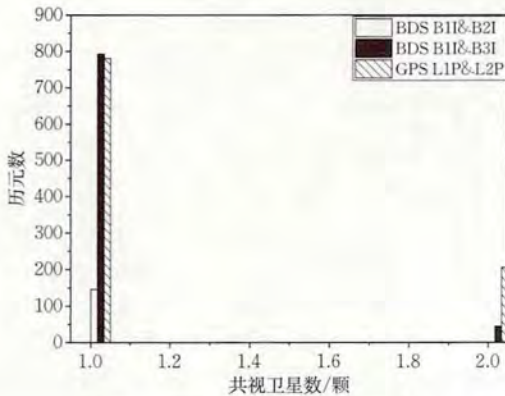


图 19 BS02 与 USN7 共视卫星数

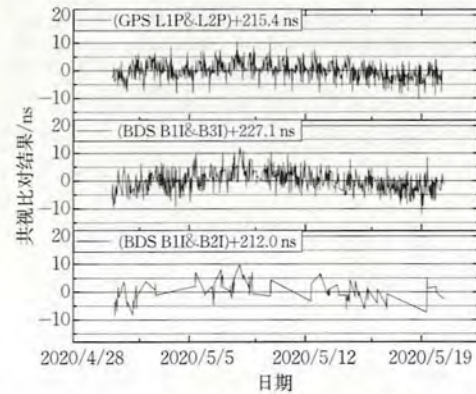


图 20 BS02 与 USN7 共视比对结果

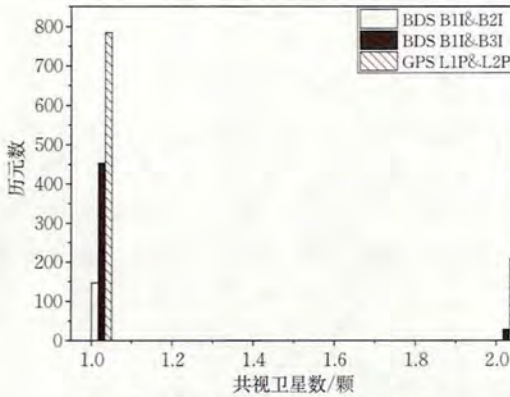


图 21 BS02 与 USN8 共视卫星数

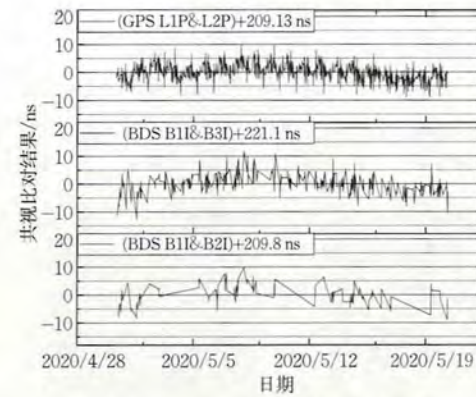


图 22 BS02 与 USN8 共视比对结果

表 5 站间共视比对结果的标准方差(STD)及共视历元数超过 100 的卫星数

时间链路	BDS B1I&B2I		BDS B1I&B3I		GPS L1P&L2P	
	STD /ns	共视卫星数 /颗	STD /ns	共视卫星数 /颗	STD /ns	共视卫星数 /颗
BS02-HOB2	3.28	4~7	3.70	5~9	2.92	1~3
BS02-PTBB	2.43	2~5	2.08	3~7	1.6	1~2
BS02-USN7	3.52	1	3.49	1	3.17	1
BS02-USN8	3.51	1	3.46	1	3.10	1

由图 15~图 22 和表 5 可知:①在亚洲与大洋洲测站间,BDS 可见卫星数多于 GPS,BDS B1I&B3I 与 BDS B1I&B2I 北斗共视时间传递不确定度约为 7 ns(95%);②在亚洲与欧洲测站之间,BDS 可见卫星数多于 GPS,BDS B1I&B3I 与 BDS B1I&B2I 系统时间传递不确定度约为 5 ns(95%);③在亚洲与美洲测站之间,BDS 可见卫星数与 GPS 相当,基于 BDS B1I&B2I、BDS B1I&B3I 北斗共视时间传递不确定度约为

7 ns(95%);④总体而言,BDS已经具备了与GPS相当的长基线卫星共视性能。

4 结 语

本文讨论了北斗导航卫星系统时间服务基本情况,系统阐述了系统单星授时、单站多星授时与共视时间比对的数学模型和误差处理方法,提出了基于BDS B1I&B3I信号体制的新的卫星共视数据处理模型。利用全球监测站数据评估了大区域、长基线条件下的BDS B1I&B3I与BDS B1I&B2I多种模式授时服务性能,并与GPS进行对比,给出了以下基本结论:

(1)在亚太地区,BDS卫星高度角IGSO>MEO>GEO;卫星B1信号载噪比IGSO与MEO相当,大于GEO;卫星B3信号载噪比MEO>IGSO>GEO;BDS-3卫星信号载噪比高于BDS-2;BDS-3单星授时不确定度优于BDS-2。

(2)在亚太地区,BDS B1I&B2I与BDS B1I&B3I单站多星授时服务性能相当,均优于10 ns,欧美测站的BDS B1I&B3I授时性能比B1I&B2I有明显提升。

(3)洲际站间(基线长度为7 000~10 000 km)在卫星共视条件下,BDS B1I&B3I的可视卫星覆盖与共视比对性能明显优于BDS B1I&B2I方法,性能与GPS L1P&L2P共视基本相当。

综上,基于新的BDS B1I&B3I卫星共视模型和算法,一方面实现了从BDS-2到BDS-3的信号体制继承,同时也可以实现更多的可见卫星覆盖,并获得更优的时间服务性能。因BDS-3系统开通,应尽快推动国际GNSS时间传递标准文件CGGTTS V2E版本更新,以B1I&B3I替代现有的B1I&B2I,为全球用户提供更高精度的时间服务。

参考文献:(略)

作者简介:蔺玉亭,男,1980年生,博士,高级工程师,研究方向为卫星授时与高精度时间频率传递技术。

VMF3 对流层延迟及其在国内 IGS 站点上的精度分析

柴军兵,胡志贵,何 虎,张新宇,易昌华

(中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司,河北 涿州 072750)

摘 要:对流层延迟误差是 GNSS 测量的主要误差之一,许多学者先后建立了多种模型对其进行校正,其中精度最高的模型是 VMF1,该模型在 2018 年被优化为 VMF3。与 VMF1 相比,VMF3 在算法和数据源两方面都进行了优化。为了了解 VMF3 模型的基本原理及其精度情况,本文详细阐述了 VMF3 对流层延迟校正的基本原理及其改进之处,介绍了 VMF3 的离散对流层延迟模型和经验对流层延迟模型,并从天顶延迟和闭合环差两个方面分析了 VMF3 在国内 10 个 IGS 站点上的精度情况。在本文中,IGS 站天顶对流层延迟的参考值采用了 IGS 的 ZPD 数据,基线处理采用了高精度 GNSS 控制网数据处理软件——GeoSNAP Base Control。从比较的结果看,VMF3 产品的天顶对流层延迟在国内 10 个 IGS 站点上的总体误差均值小于 0.06 m,其中 V3GR_g 模型精度最高,经验模型 VMF3_GPT3 次之;在高山与平原(或盆地)的连接地带,V3GR 离散模型误差较大;在其他高差较小的区域,V3GR 模型精度较高,与 V3GR_g 具有同等的精度;在低高度角下,VMF3_GPT3 优于 VMF1_GPT2 模型,随着高度角的增加,两者没有明显的差别;VMF3 模型冬季精度略高于夏季;经验模型 VMF3_GPT3 在小区域水网稠密地区的精度较差。

关键词:射线追踪;ZPD;映射函数;水平梯度

1 引 言

对流层延迟误差是 GNSS 等空间大地测量的主要误差源之一,多年来人们设计了许多方法,目的是提高对流层改正精度。通常对对流层延迟的处理方法有两种:参数估计和模型改正。一般来说,采用参数估计方法获得的对流层延迟精度较高,但也存在以下问题:首先在相对定位中,如果两测站间对流层延迟相差较小,再加上其他观测误差的存在,会导致参数估计不准或法方程病态;其次如果观测时间短,很难准确估计对流层延迟。对流层延迟模型改正则不存在上述缺陷,但需要有精确的对流层延迟模型。常用的对流层延迟模型有 Saastamoinen、Hopfield、GMF(global mapping function)、NMF(Niell mapping function)、VMF(Vienna mapping function)等,这几种对流层延迟模型中精度最高的是 VMF。Landskron 等提出了 VMF1 模型、VMF3 模型,并在 2019 年 4 月在 VMF 网站上提供了 VMF3 相关产品。VMF3 发布的产品除了经验模型 GPT3,还有离散格网模型和 IGS 站事后天顶对流层延迟,且 VMF3 在低高度角延迟等方面的精度更优于 VMF1。丁保才比较研究了 GPT3+Saastamoinen 在中国大陆天顶对流层延迟的精度,尹恒毅等比较研究了 GPT3+Saastamoinen、GPT2w+Saastamoinen 在陕西地区天顶对流层延迟的精度及适用性。对于 VMF3 产品及其在低高度角下的精度分析,可供参考的文献较少,故本文就 VMF3 产品在国内 IGS 站点上对流层延迟改正的精度进行分析。

2 VMF3 对流层延迟改正的基本原理

2.1 基本原理

Nilsson 等将对流层延迟分为干延迟和湿延迟,即

$$\Delta L(\epsilon) = \Delta L_h^z \cdot mf_h(\epsilon) + \Delta L_w^z \cdot mf_w(\epsilon) \tag{1}$$

式中, ΔL_h^z 为天顶干延迟, ΔL_w^z 为天顶湿延迟, $mf_h(\epsilon)$ 为高度角 ϵ 时的干延迟映射函数, $mf_w(\epsilon)$ 为高度角 ϵ 时的湿延迟映射函数, $\Delta L(\epsilon)$ 为高度角 ϵ 时的总延迟。 ΔL_h^z 采用 Davis 等改进过的萨斯塔莫伊宁 (Saastamoinen) 模型, 即

$$\Delta L_h^z = \frac{0.002\ 276\ 8p}{1 - 0.002\ 66\cos(2\varphi) - 0.28 \times 10^{-6} h_{\text{ell}}} \tag{2}$$

式中, p 为大气压, φ 为纬度, h_{ell} 为测站大地高。 ΔL_w^z 为

$$\Delta L_w^z = 10^{-6} \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \frac{R_d \cdot e}{g_m \cdot (\lambda + 1)} \tag{3}$$

式中, k'_2 和 k_3 为经验性的大气折射常数, $k'_2 = k_2 - k_1 \frac{18.015\ 2}{28.964\ 4}$, 其中 $k_1 = 77.604$, $k_2 = 64.79$, 且 $k_3 = 377\ 600.0$; R_d 为干燥气体常数成分, 取值为 $287.046\ 4\ \text{JK}^{-1}\ \text{kg}^{-1}$; g_m 为平均重力加速度, 取值为 $9.806\ 65\ \text{ms}^{-2}$; e 为水气压; T_m 为平均温度; λ 为水气衰减因子。 e 、 T_m 和 λ 均由 GPT3 内插得到。

干、湿映射函数 mf 由三个系数 a 、 b 、 c 和高度角正弦 $\text{sin}\epsilon$ 的连分式建立, 即

$$mf(\epsilon) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\text{sin}\epsilon + \frac{a}{\text{sin}\epsilon + \frac{b}{\text{sin}\epsilon + c}}} \tag{4}$$

2.2 公式中各系数的获取

VMF3 发布的离散对流层事后产品 V3GR 和 V3GR_g(见本文第 3 节)都提供了干延迟和湿延迟系数 a , 干湿水平梯度 G_n 和 G_e (见本文第 4 节)。格网化的 V3GR 中的系数 a 、 G_n 和 G_e 由双线性内插得到, 站点延迟 V3GR_g 则可根据时间序列线性内插得到相应历元的系数 a 、 G_n 和 G_e , 经验对流层延迟模型中系数 a 、 G_n 和 G_e 均由 GPT3 模型通过双线性内插得到。

VMF3 中, 干湿系数 b 、 c 及其振幅用球谐函数表示, 采用最小二乘法估计 91 个勒让德系数, 并将其展开为 12 阶勒让德多项式, 分别求取干湿系数 b 、 c 的 A_0 、 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 , 通过式(5)计算干湿系数 b 、 c 。无论是离散模型还是经验模型, 干湿系数 b 、 c 都是通过这种方法求得的。系数 b 为

$$b = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{d_{oy}}{365.25} 2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{d_{oy}}{365.25} 2\pi\right) + A_2 \cos\left(\frac{d_{oy}}{365.25} 4\pi\right) + B_2 \sin\left(\frac{d_{oy}}{365.25} 4\pi\right) \tag{5}$$

式中, A_0 为平均值, A_1 、 B_1 为年振幅, A_2 、 B_2 为半年振幅, d_{oy} 为年积日。

上述计算得到的干湿映射函数均基于海平面, 要获得内插点的映射函数, 需要进行高程改正, 即

$$mf_{h_0} = mf_{h_1} - \frac{h_{\text{ell}}}{1\ 000} \times \left[\frac{1}{\text{sin}\epsilon} - \frac{1 + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}}{\text{sin}\epsilon + \frac{a_{ht}}{\text{sin}\epsilon + \frac{b_{ht}}{\text{sin}\epsilon + c_{ht}}}} \right] \tag{6}$$

式中, mf_{h_0} 为海平面的映射函数, mf_{h_1} 为待求点映射函数, h_{ell} 为待求点大地高, $a_{ht} = 2.53 \times 10^{-5}$ 、 $b_{ht} = 5.49 \times 10^{-3}$ 、 $c_{ht} = 1.14 \times 10^{-3}$ 。

3 VMF3 相关的 GNSS 产品

VMF3 是维也纳科技大学建立的映射函数模型, 并发布一系列对流层延迟产品, 被认为是现在最好

的对流层延迟模型,这些产品分为离散对流层延迟模型和经验对流层延迟模型两部分,如图 1、图 2 所示。

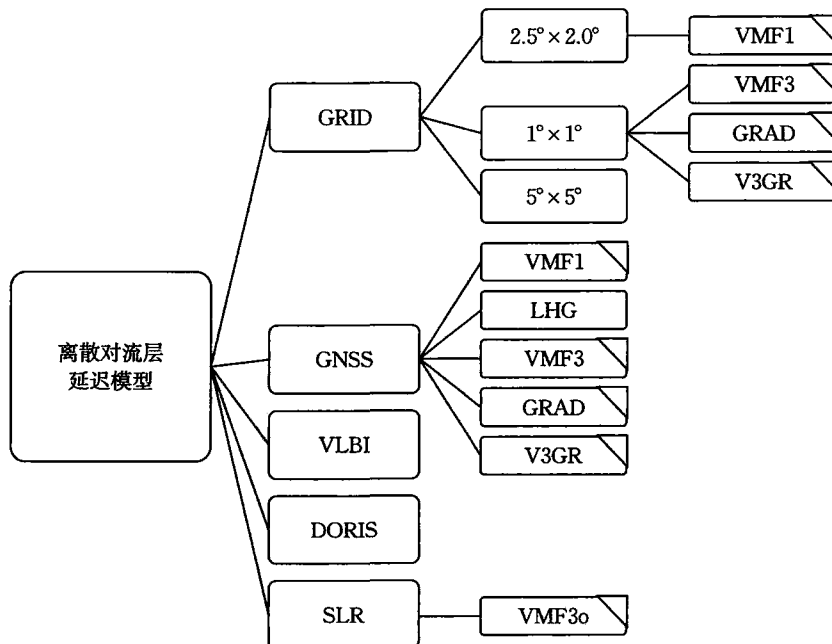


图 1 离散对流层延迟模型

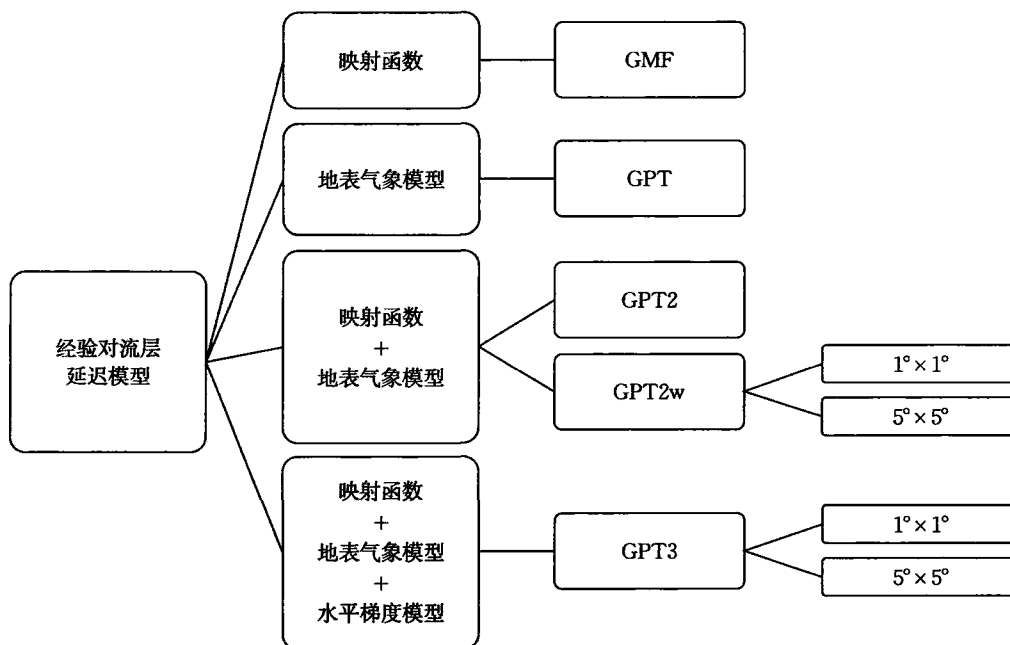


图 2 经验对流层延迟模型

图 1 和图 2 包含了 VMF 所有产品,与全球导航卫星系统(GNSS)相关的对流层延迟模型产品主要有格网模型 VMF3(不包含水平梯度)、格网模型 GRAD(仅包含水平梯度)、格网模型 V3GR(包含干湿延迟系数与水平梯度)、IGS 跟踪站对流层延迟模型 V3GR(以下简称 V3GR_g)和经验对流层延迟模型 GPT3(以下简称 VMF3_GPT3)。

3.1 VMF3 事后延迟格网模型

VMF3 提供全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 的事后对流层延迟模型和预报模型,其中事后延迟模型有 VMF3、GRAD、V3GR、V3GR 和 V3GR_g,如表 1 所示。

表 1 VMF3 事后延迟产品数据内容

产品	时间间隔 /h	干延迟系数 a_h	湿延迟系数 a_w	天顶干 延迟	天顶湿 延迟	北向干 延迟梯度	东向干 延迟梯度	北向湿 延迟梯度	东向湿 延迟梯度
VMF3	6	√	√	√	√				
GRAD	6					√	√	√	√
V3GR	6	√	√	√	√	√	√	√	√
V3GR_g	6	√	√	√	√	√	√	√	√

从表 1 可知,VMF3 数据包括格网点的干延迟系数 a_h 、湿延迟系数 a_w 、天顶干延迟和天顶湿延迟, GRAD 包括干湿延迟的北向水平梯度和东向水平梯度, V3GR 包含了 VMF3 和 GRAD 数据。另外, V3GR_g 还提供了 IGS 站的温度和水气压。所有数据时间间隔为 6 小时,且约 36 小时后可在 VMF 网站下载。

3.2 GPT3 模型

GPT3(global pressure and temperature 3)模型是 Böhm 等建立的全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 的关于气压、温度等模型,用双线性内插可以求出任意一点的气压、温度、温度垂直梯度、随水气压增加的平均温度、水气压、水气压递减因子、干延迟系数 a_h 、湿延迟系数 a_w 、高程异常、北向和东向干延迟水平梯度,北向和东向湿延迟水平梯度。GPT3 的气象数据来源于欧洲中尺度天气预报中心 1999 年到 2014 年的数据(包含 23 个气压层),用射线追踪法拟合格网点上所有数值,拟合方法为最小二乘法。与 GPT2w 相比,GPT3 增加了北向和东向干延迟水平梯度、北向和东向湿延迟水平梯度。

3.3 VMF3 的改进

与 VMF1 相比,VMF3 采用一种新方法改进了离散映射函数,特别是在低高度角情况下,VMF3 能够比 VMF1 更准确地逼近底层射线跟踪延迟。VMF3 采用更加复杂的方式计算系数 b 和 c ,从而消除 VMF1 经验系数 b 、 c 的缺陷,增加了干湿延迟的北向和东向水平梯度,使对流层延迟精度得到进一步提高。事后延迟格网产品中,VMF3 格网由原来的 $2.5^\circ \times 2.0^\circ$ 到 $1^\circ \times 1^\circ$ 。除了修正映射函数的离散形式外,VMF3 在 $5^\circ \times 5^\circ$ 和 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球网络上提出了一个新的经验模型 GPT3,使 GPT3 与 VMF3 中的系数计算方法完全一致。

4 VMF3 精度分析

本文将 VMF3 的 Matlab 源码改化为 C++ 代码,并嵌入高精度 GNSS 控制网数据处理软件 GeoSNAP Base Control(GBC)。GBC 是一款具有完全自主知识产权的 GNSS 数据处理软件,可处理 BDS、GPS、GLONASS、Galileo 系统和 QZSS 的数据,其功能主要有基线处理、网平差和 ITRF 转换等。GBC 可根据观测时间自动过滤和下载需要的 V3GR、V3GR_g 文件,内嵌 VMF3_GPT3 经验模型,使用户可以方便地选择 VMF 相关产品,如图 3 和图 4 所示。GBC 中梯度公式引用 GAMIT 的水平梯度公式,即

$$\Delta L_{\text{gradient}}(\epsilon, \alpha) = \frac{1}{\sin \epsilon \cdot \tan \epsilon + C} (G_n \cdot \cos \alpha + G_e \cdot \sin \alpha) \quad (6)$$

式中, $\Delta L_{\text{gradient}}(\epsilon, \alpha)$ 为高度角 ϵ 和方位角 α 时的水平梯度延迟; C 为常数,等于 0.003; G_n 为北向水平梯度, G_e 为东向水平梯度。

4.1 VMF3 产品精度分析方案

IGS 提供的 IGS 站事后 ZPD 精度可达毫米级,可作为本次天顶延迟分析的参照值。下载 BJFS(北京房山)、BJNM(北京昌平)、CHAN(长春)、LHAZ(拉萨)、URUM(乌鲁木齐)、WHU2(武汉)、JFNG(武汉九峰)、TWTF(台湾)、HKSL(香港 SL)、HKWS(香港 WS)共 10 个 IGS 站于 2020 年 1 月 2 日和 2020 年

5月14日的数据。测试方案如下：

(1)比较 V3GR、V3GR_g、VMF3_GPT3、VMF1_GPT2 这4种模型的天顶延迟与 IGS 测站 ZPD 的差值。

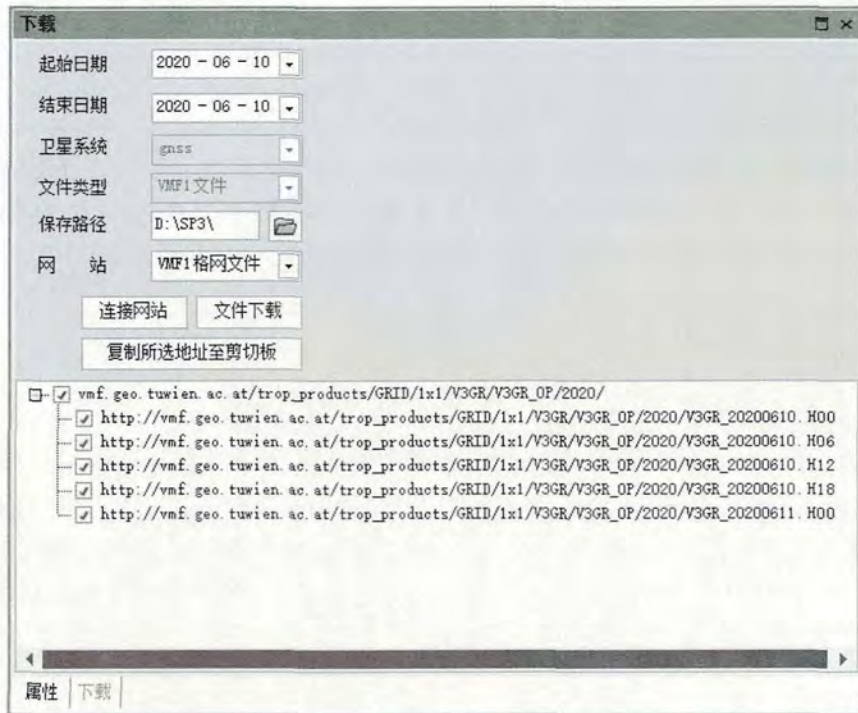


图3 GBC 下载 VMF3 模型文件



图4 GBC 内嵌 VMF3_GPT3 经验模型

(2)比较 V3GR、V3GR_g、VMF3_GPT3、VMF1_GPT2 这4种模型在 5°、10°和 15°这3个卫星截止高度角下的国内 10 个 IGS 站的闭合环情况,同时也比较 VMF3_GPT3 与 VMF1_GPT2 模型在 3 个卫星截止高度角下的精度情况。

处理软件采用自主研发的 GBC,表 2 列出了本次分析采用的数据及处理参数。

表 2 数据及 GBC 处理参数

数据	BJFS、BJNM、CHAN、LHAZ、URUM、WHU2、JFNG、TWTF、HKSL、HKWS	
参数	日期	2020 年 1 月 2 日,2020 年 5 月 14 日
	星历	IGS 精密星历
	参照对流层延迟数据	IGS 站对流层延迟产品 zpd 文件
	数据处理软件	GeoSNAP Base Control(GBC)

续表

数据	BJFS, BJNM, CHAN, LHAZ, URUM, WHU2, JFNG, TWTF, HKSL, HKWS
截止高度角	5°, 10°, 15°
对流层改正	V3GR, V3GR_g, VMF3_GPT3, VMF1_GPT2
固体潮汐改正	IERS2003
海洋潮汐改正	GOT4.8
极移潮汐改正	IGS 极移潮汐产品 erp 文件
右旋极化改正	加入右旋极化改正
卫星 PCO, PCV 改正	IGS14_2018.atx
接收机天线 PCO, PCV 改正	IGS14_2018.atx
平差方式	卡尔曼滤波
高度角定权	1/sine
抗差估计	IGG-III
周跳探测	电离层残差+MW

4.2 对流层天顶延迟比较

IGS 的 ZPD 的历元间隔为 5 分钟, 每个历元与上述 10 个 IGS 站的 V3GR、V3GR_g、VMF3_GPT3、VMF1_GPT2 分别做比较, 求取标准差, 如图 3 所示。

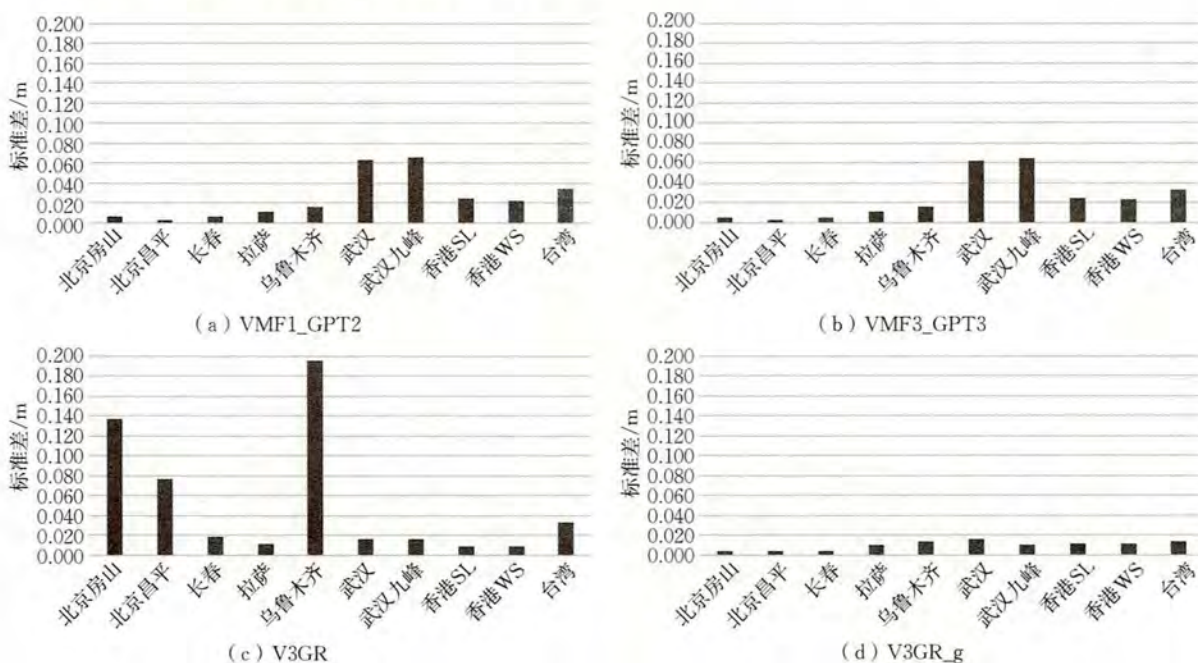


图 5 2020 年 1 月 2 日数据在 4 种模型下的天顶延迟与 IGS 的 ZPD 的标准差

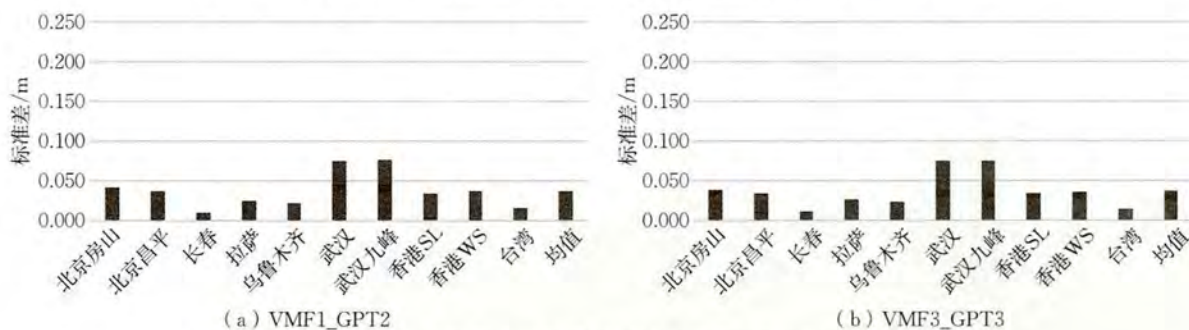


图 6 2020 年 5 月 14 日数据在四种模型下的天顶延迟与 IGS 的 ZPD 的标准差

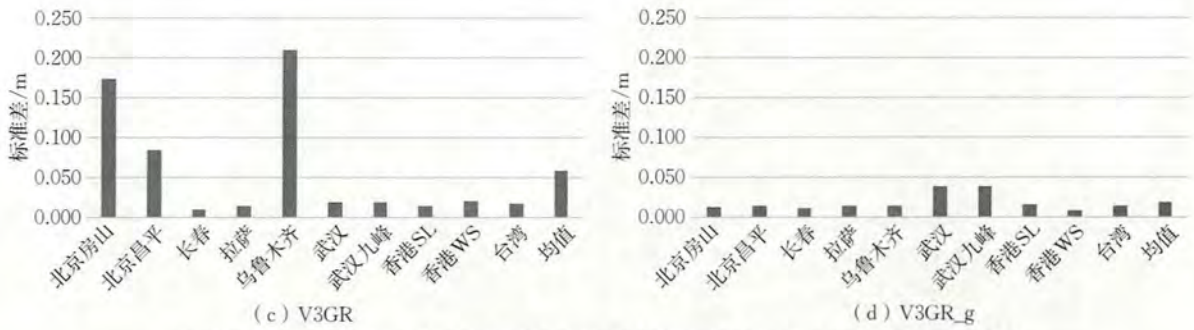


图 6(续) 2020 年 5 月 14 日数据在四种模型下的天顶延迟与 IGS 的 ZPD 的标准差

从图 5 和图 6 可以看出:

- (1) 冬季和夏季在国内 10 个 IGS 站点上的 VMF3 对流层延迟趋势一致, 夏季误差略大于冬季。
- (2) V3GR_g 精度最高, 平均标准差小于 0.02 m, VMF3_GPT3 与 VMF1_GPT2 的天顶延迟基本一致, 冬季小于 0.07 m, 夏季小于 0.08 m, V3GR 天顶延迟误差最大。

(3) VMF3_GPT3 和 VMF1_GPT2 模型中, 武汉与武汉九峰 2 个站误差较大。武汉横跨长江, 周围湖泊众多, 水汽含量较高, VMF 经验模型使用全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格网, 无法顾及小区域的水汽差别, 导致武汉 2 个站误差较大。从图 7(a) 可以看出经验模型估计的天顶延迟明显小于 IGS 的 ZPD, 且在图 7(b) 中经验模型估计的天顶延迟部分小于 IGS 的 ZPD。上述结果说明对于水汽含量较大的小区域, 经验模型的误差较大。

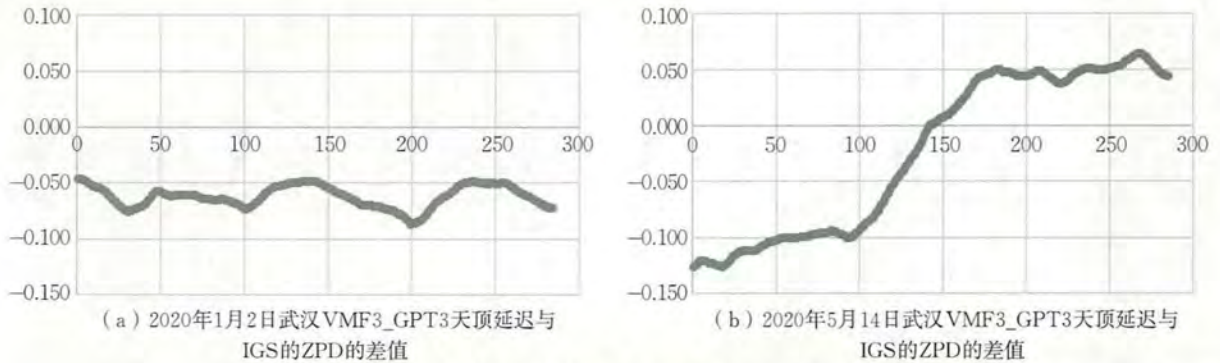


图 7 武汉 VMF3_GPT3 天顶延迟与 IGS 的 ZPD 的差值

(4) 北京房山、北京昌平及乌鲁木齐的 V3GR 误差较大。北京地处华北平原, 西北紧邻燕山山脉, 高差达 1 200 m; 乌鲁木齐在天山北麓, 向南为高耸入云的天山山脉, 向北为广阔的准噶尔盆地, 高差达 1 000 m。在上述地形中, 使用双线性内插 $1^\circ \times 1^\circ$ 格网获得的天顶延迟与实际相差较大, 因此导致这 3 个站的 V3GR 天顶延迟误差较大。

表 3 和表 4 列出了 10 个 IGS 站的 VMF 产品与 IGS 的 ZPD 的标准差, 从均值看, VMF3_GPT3 模型略优于 VMF1_GPT2 模型, 冬季 VMF 产品整体优于夏季(表中单位为 m)。

表 3 2020 年 1 月 2 日 IGS 站 VMF3 与 IGS 的 ZPD 的标准差

IGS 站	VMF1_GPT2	VMF3_GPT3	V3GR	V3GR_g
北京房山	0.006 4	0.005 8	0.136 9	0.004 8
北京昌平	0.003 6	0.003 5	0.076 9	0.004 5
长春	0.006 1	0.005 6	0.018 8	0.004 7
拉萨	0.011 3	0.011 5	0.011 2	0.009 9
乌鲁木齐	0.016 2	0.016 0	0.195 9	0.014 1
武汉	0.063 4	0.062 9	0.016 8	0.016 7
武汉九峰	0.065 9	0.065 4	0.015 9	0.010 4

续表

IGS 站	VMF1_GPT2	VMF3_GPT3	V3GR	V3GR_g
香港 SL	0.024 8	0.025 0	0.008 7	0.011 8
香港 WS	0.022 8	0.023 1	0.009 2	0.011 9
台湾	0.034 4	0.033 7	0.033 8	0.013 9
均值	0.025 5	0.025 2	0.052 4	0.010 3

表 4 2020 年 5 月 14 日 IGS 站 VMF3 与 IGS 的 ZPD 的标准差

IGS 站	VMF1_GPT2	VMF3_GPT3	V3GR	V3GR_g
北京房山	0.041 0	0.038 4	0.172 9	0.012 6
北京昌平	0.037 2	0.034 6	0.083 9	0.014 0
长春	0.010 2	0.012 0	0.009 1	0.011 5
拉萨	0.025 1	0.026 4	0.015 1	0.015 1
乌鲁木齐	0.022 3	0.023 2	0.209 7	0.014 2
武汉	0.075 4	0.074 6	0.018 7	0.038 6
武汉九峰	0.075 8	0.074 8	0.018 8	0.039 3
香港 SL	0.034 7	0.033 4	0.014 2	0.015 9
香港 WS	0.037 0	0.035 7	0.021 2	0.009 0
台湾	0.015 2	0.014 2	0.017 5	0.014 7
均值	0.037 4	0.036 7	0.058 1	0.018 5

4.3 闭合环比较

VMF3 与 VMF1 最大的改进除了提供水平梯度外,最重要的是改进了系数 a 、 b 和 c , 系数的改进最终体现为映射函数的变化。由式(4)可知,对流层天顶延迟与系数 a 、 b 、 c 无关,所以对流层天顶延迟无法确定 V3GR、V3GR_g、VMF3_GPT3、VMF1_GPT2 在不同高度角的精度,而基线闭合环可以很好地检验此项。图 8 列出了 2020 年 1 月 2 日和 2020 年 5 月 14 日 2 天 V3GR、V3GR_g、VMF3_GPT3、VMF1_GPT2 在 5° 、 10° 和 15° 的平均闭合环情况。

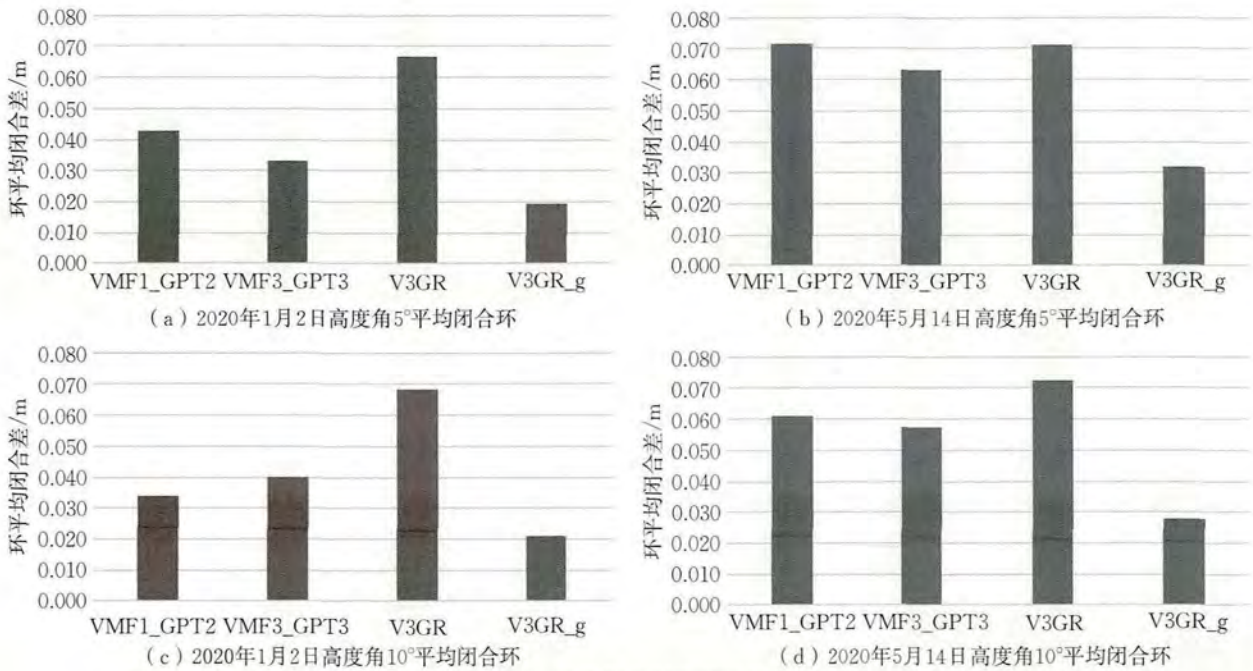


图 8 2020 年 1 月 2 日和 2020 年 5 月 14 日数据分别采用四种模型处理基线得到的环平均闭合差

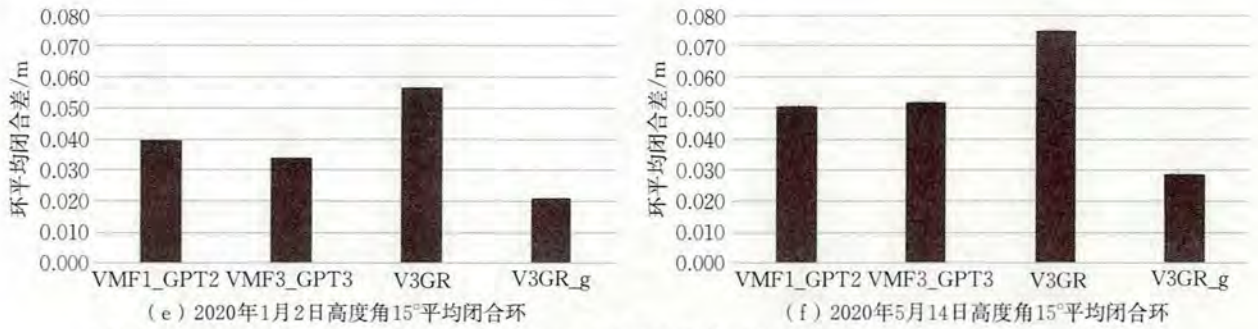


图 8(续) 2020 年 1 月 2 日和 2020 年 5 月 14 日数据分别采用四种模型处理基线得到的环平均闭合差

从图 8 可以看出:

(1)在国内 IGS 站点上, V3GR_g 闭合差最小,平均闭合环总体小于 0.03 m, VMF3_GPT3 次之, V3GR 闭合差最大。从 4.2 节可知,乌鲁木齐、北京房山、北京昌平和武汉 V3GR 的天顶延迟较大,直接导致 V3GR 基线闭合环闭合差较大。

(2)整体上 VMF3_GPT3 精度优于 VMF1_GPT2,尤其在高度角为 5°时较为明显,随着高度角的增加,VMF3_GPT3 与 VMF1_GPT2 没有明显差别。VMF3_GPT3 相比 VMF1_GPT2,提高了低高度角时对流层延迟改正精度,并增加了水平梯度改正,因此在高度角低时,VMF3_GPT3 改正精度高于 VMF1_GPT2。VMF3_GPT3 的水平梯度改正的高度角 10°以上时并不明显。

(3)冬季 VMF3 产品精度优于夏季。我国冬季干燥,对流层湿延迟影响相对较小,区域变化较小。夏季我国大部分地区湿热,对流层湿延迟较冬季大,不同地区变化剧烈,多年资料拟合产生的经验模型不能适应区域小尺度变化。因此,上述差异导致夏季 VMF 产品精度不如冬季。

5 结 语

通过对国内 10 个 IGS 站上 VMF 产品天顶延迟与 IGS 的 ZPD 的比较和在 5°、10°和 15°这 3 个高度角下闭合环差的比较,可以得出以下结论:

(1)VMF3 产品的天顶延迟在国内 10 个 IGS 站上总体误差小于均值小于 0.06 m,其中 V3GR_g 精度最高,冬季均值小于 0.02 m,夏季均值小于 0.04 m;经验模型 VMF3_GPT3 次之,冬季均值小于 0.07 m,夏季均值小于 0.08 m,除去湖北站的影响,则冬季、夏季均值都小于 0.04 m;V3GR 除去乌鲁木齐、北京房山和北京昌平 3 站后,总体小于 0.03 m。

(2)在高山与平原(或盆地)连接地带,V3GR 模型误差较大;在其他大范围高差较小的区域,V3GR 模型精度较高,与 V3GR_g 模型具有同等的精度。

(3)在低高度角情况下,VMF3_GPT3 优于 VMF1_GPT2 模型;随着高度角的增加,两者没有明显的差别。

(4)VMF3 产品冬季精度略高于夏季。

(5)经验模型 VMF3_GPT3 在小区域水网稠密的地区精度较差。

文中原理部分主要来源于 Landskron 等的文章《VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions》及其提供的源程序代码,另外本文分析的数据样本较小,不能充分说明 VMF3 产品的性能,在以后的研究中会分析更多的数据,进一步确定本文结论的正确性。

参考文献:(略)

作者简介:柴军兵,男,1973 年生,高级工程师,主要从事 GNSS 精密定位软件的研发及应用工作。

2020年两个 MGEX 测站的 BDS 动态 PPP 定位性能初步评估

杜彦君,马下平,姚顽强

(西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西 西安 710054)

摘要:2020年我国建成北斗三号全球卫星导航系统 BDS-3,并向全球用户提供服务。结合 BDS-1 和 BDS-2,北斗卫星导航系统(BDS)在卫星数目、观测类型和定位性能等方面将有较大提升。为了评估最新的 BDS 动态 PPP 定位性能,本文基于 IGS 多模 GNSS 实验(MGEX)网中香港和武汉的 HKSL 测站和 JFNG 测站 2020年3月31日至4月6日连续7天的观测数据,以及 GBM 提供的精密星历、精密钟差,进行 BDS 动态 PPP 数据处理,统计并分析卫星数目、收敛时间及定位精度,获得了 BDS 最新的动态定位性能。结果表明:BDS 动态 PPP 中可见星数约为 14.8 颗,较 GPS 和单 BDS-2 有所提升;收敛时间 Y、Z 方向优于 X 方向,X、Y、Z 方向分别为 93.6 分钟、58.6 分钟、58.9 分钟;当达到收敛时,BDS 即能提供稳定的分米级定位。对于 3 小时动态解,其 X、Y、Z 方向的均方根误差(RMSE)分别为 8.12 cm、13.80 cm、8.73 cm,且有 66.67%的定位误差为厘米级。对于 24 小时动态解,BDS 能提供稳定的厘米级定位,Y 方向误差大于 X、Z 方向,其 X 方向优于 8.0 cm,Y 方向优于 8.5 cm,Z 方向优于 4.5 cm,X、Y、Z 方向的 RMSE 分别为 3.79 cm、5.22 cm、2.58 cm,相较于 3 小时,解分别提高了 53.33%、62.17%、70.45%,坐标波动也更加稳定。

关键词:BDS;动态 PPP;收敛时间;精度;定位性能

1 引言

北斗卫星导航系统(BDS)是继美国的全球定位系统(GPS)、俄罗斯的格洛纳斯导航卫星系统(GLONASS)、欧盟的伽利略导航卫星系统(Galileo)后国际上第四个提供定位服务的全球卫星导航系统。BDS 于 2012 年建成包含 5 颗地球静止轨道(GEO)卫星、5 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和 4 颗中圆地球轨道(MEO)卫星的 BDS-2,并于 2018 年基本完成 BDS-3 组网,其在轨工作卫星共 33 颗,包含 15 颗 BDS-2 卫星与 18 颗 BDS-3 卫星,2020 年 6 月 23 日完成了 BDS 全球卫星组网,顺利完成 BDS 的三步走战略。

精密单点定位(PPP)是基于一台接收机即能实现高精度绝对定位的技术,拥有高效、便捷、不受基线长度影响等特点,是目前研究的热点。随着 BDS-3 的不断发展,为向中国及周边地区提供高精度 PPP 服务提供了可能,成了众多学者关注的热点。静态 PPP 方面,GPS 非差 PPP 经过 15 分钟初始化后 X、Y、Z 三方向均可达到优于 20 cm 的定位精度。Galileo 系统受其可见星数制约,导致滤波信息不足,对其定位精度产生影响,但其单天解定位精度仍能达到 1.26 cm。BDS-3 能提供 N、E、U 方向优于 3.7 cm、0.2 cm、16.3 cm 的定位精度。利用 IGMAS 的北斗轨道和钟差产品,BDS 24 小时静态观测数据能达到的三维点位精度优于 3 cm。BDS-3 与 BDS-2 相比,其结果在 N 方向优于 1 cm,E、U 方向约为 1~4 cm,相较 BDS-2 水平方向提升了 50.23%,高程方向提升了 60.24%,BDS-2/BDS-3 组合相较 BDS-2 水平方向提高了 86.99%、高程方向提升了 42.93%。BDS/GPS 组合系统三个方向的均方误差均在厘米级。动态 PPP 方面,GPS/GLONASS/Galileo/BDS 组合系统的均方根(RMS)在 N、E、U 方向分别优于 2.1 cm、2.2 cm、4.9 cm。单系统 GPS 动态定位精度最高,平面约为 3~5 cm、高程优于 1 dm,GLONASS 次之,BDS 最差。BDS 双频模拟动态 PPP 可达厘米级定位精度。BDS-3 基本可实现水平方向 3 cm 左右、高程方向 7 cm 左右的定位精度,相较 BDS-2 分别提高了 26.5%、38.3%。

以上文献对 PPP 进行了重点分析,得到了有意义的结论。但更多的是给出了 BDS 单天解的定位精度,或是基于 BDS-2 或 BDS-3 的定位精度。在实际工作中,为了提高作业效率、减少作业成本等,用户在特定的场合无法进行全天观测,需要在短时间内得到可靠的精度。随着 2020 年 BDS 全球组网完成,及时地分析整个 BDS 动态 PPP 的定位性能具有重要的意义和价值。为此,论文采用多模 GNSS 实验(MGEX)2020 年连续 7 天的相关 HKSL 测站和武汉 JFNG 测站的观测数据,以及 GBM 提供的精密星历、精密钟差产品,对 BDS 的卫星数目、收敛速度、收敛时、3 小时解、单天解的定位精度进行综合分析,初步获得了 BDS 动态 PPP 的定位性能。

2 动态 PPP 模型及误差处理

2.1 动态 PPP 观测方程

动态 PPP 平差时如只采用载波相位观测量,会造成方程组解的不唯一,因此在 PPP 解算中采用权不相同的载波相位和码伪距观测量。当测站 r 和卫星 s 在 t 时刻进行同步观测时,双频无电离层组合的伪距和载波相位观测方程为

$$\left. \begin{aligned} P_{r,IF}^s(t) &= \rho_{r,IF}^s + C(dt_r - dt^s) + MW_r^s \cdot ZWD_r + MH_r^s(ZWD_r - ZWD_r^s) + C \cdot ucd_r^s + \epsilon_{r,IF}^s \\ L_{r,IF}^s(t) &= \rho_{r,IF}^s + C(dt_r - dt^s) + MW_r^s \cdot ZWD_r + MH_r^s(ZWD_r - ZWD_r^s) + \lambda_{IF} N_{r,IF}^s + \lambda_{IF} \cdot upd_r^s + \zeta_{r,IF}^s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $\rho_{r,IF}^s$ 为接收机 r 至卫星 s 之间的空间几何距离, C 为光速, dt_r 和 dt^s 分别为接收机和卫星端的钟差, MW_r^s 和 MH_r^s 为与卫星截止高度角有关的湿投影和干投影函数, ZWD_r 和 ZWD_r^s 为测站 r 天顶方向总延迟和湿延迟, ucd_r^s 为接收机和卫星端的非校正伪距硬件延迟(单位为 s), upd_r^s 为与频率相关的接收机和卫星端的非校正相位硬件延迟(单位为周), λ_{IF} 为无电离层组合载波波长, $N_{r,IF}^s$ 为无电离层组合相位观测值的整周模糊度, $\epsilon_{r,IF}^s$ 、 $\zeta_{r,IF}^s$ 分别为伪距、载波相位的观测噪声和多路径效应及其他误差。

2.2 随机模型

卫星的截止高度角和信号的大气延迟具有很强的相关性,在 PPP 解算中通常基于卫星截止高度角分配相位和伪距观测值之间的权重比例,对于相位和伪距观测值方差的计算公式为

$$\sigma_L^2 = \begin{cases} \frac{\sigma_{L,0}^2}{\sin\theta}, & \theta > 30^\circ \\ \frac{\sigma_{L,0}^2}{\sin^2\theta}, & \theta \leq 30^\circ \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_p^2 = \begin{cases} \frac{\sigma_{p,0}^2}{\sin\theta}, & \theta > 30^\circ \\ \frac{\sigma_{p,0}^2}{\sin^2\theta}, & \theta \leq 30^\circ \end{cases}$$

式中, σ_L^2 、 σ_p^2 为相位和伪距的方差, θ 为卫星截止高度角, $\sigma_{p,0}^2$ 为伪距观测值的先验方差, $\sigma_{L,0}^2$ 为相位观测值的先验方差。对于伪距观测量,一般 $\sigma_{p,0}$ 为 1 m,而载波相位观测量中 $\sigma_{L,0}$ 一般为 1 cm。

2.3 其他误差

(1)电离层延迟。利用频率与电离层延迟之间的关系,采用双频组合消除电离层组合的一阶项,在一定程度上削弱电离层延迟的影响。

(2)对流层延迟。在动态 PPP 定位中对流层延迟改正一般采用 Estimate ZTD+Grad 模型,即将天顶方向的湿延迟作为未知参数求解,干湿延迟初始值可采用经验模型(Saastamoinen 模型),干湿延迟的投

影函数可以采用相应的计算模型进行改正。

(3) 天线相位中心误差。该误差包含天线相位中心偏差(PCO)和天线相位中心变化(PCV)。目前IGS中心发布了最新的改正文件igs14.atx,北斗官网也发布了最新的BDS天线改正文件BDS14.atx。

(4) 其他误差处理。PPP处理过程中还有其他需要改正的误差,如地球自转、海洋潮汐、固体潮、伪距硬件延迟等,本文处理过程中均采用相应模型或文件进行改正。

3 动态 PPP 数据处理

3.1 实验数据

本文采用MGEX的2020年3月31日至4月6日连续7天的HKSL测站和JFNG测站观测数据及GBM提供的精密星历、精密钟差产品,顾及处理策略,利用上海天文台GNSS分析中心的在线PPP解算服务Net_Diff进行BDS动态PPP解算,从卫星数目、收敛时间、定位精度进行综合分析,获得最新的BDS动态PPP性能。

3.2 处理策略

观测值采用BDS的B1/B2频段的伪距及相位观测值组成无电离层组合,采样间隔为30 s,截止高度角为 10° 。观测值定权采取截止高度角定权,卫星轨道、钟差采用GBM提供的精密星历、钟差文件改正,地球自转采用EOP文件改正,海洋潮汐、固体潮采用相应模型改正,对流层延迟采用Estimate ZTD+Grad模型,天线相位中心偏差采用igs14.atx文件改正,伪距硬件延迟采用DCB文件改正,模糊度选择实数解,解算策略见表1。

表1 PPP处理策略

项目	处理策略
观测值	BDS B1/B2 无电离层组合观测值
采样间隔	30 s
截止高度角	10°
观测值定权	高度角定权
卫星轨道	GBM提供的精密星历
卫星钟差	GBM提供的精密钟差
地球自转	EOP文件
海洋潮汐	模型改正
固体潮	模型改正
对流层延迟	EstimateZTD+Grad
天线相位偏差	igs14_2097.atx
伪距硬件延迟	DCB文件
模糊度	实数解

本文收敛时间判断方法采取均值收敛法,阈值设定为4 cm,搜索窗口设定为10个历元,如搜索窗口的三维坐标偏差均不大于10 cm,且3个方向历元间偏差小于阈值,若连续2个搜索窗口均满足该条件,则视为该方向收敛。测站观测坐标采用前后10个历元的平均值,参考坐标(真值)采用GPS+GLONASS+BDS+Galileo的静态PPP最后100个历元的平均值。

3.3 数据处理

3.3.1 卫星数目

为了解最新的BDS可见卫星数,图1列出了BDS动态PPP每小时可见卫星数的时间序列,表2给出了各天的平均可见卫星数。

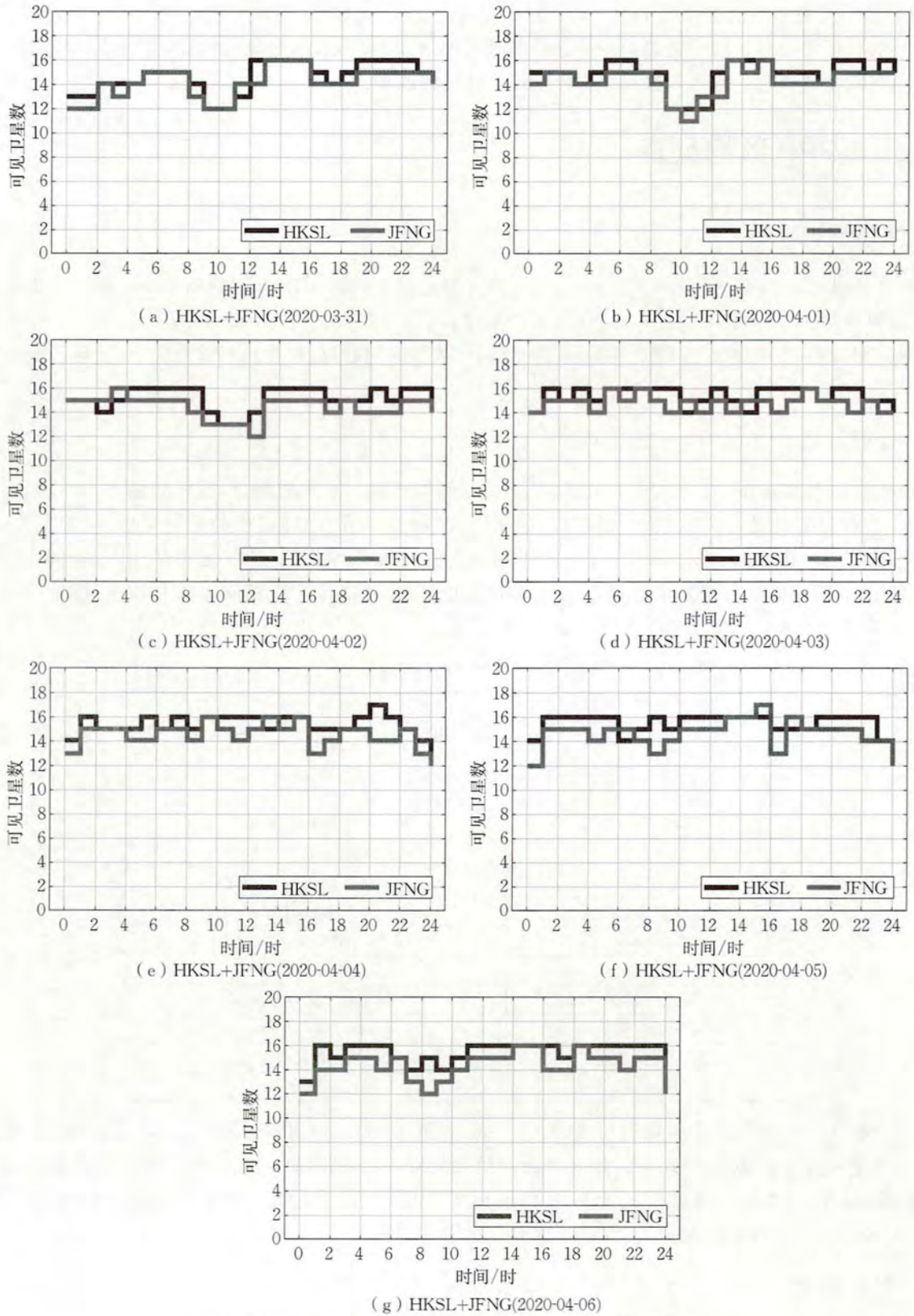


图1 HKSL测站和JFNG测站BDS可见卫星数目的时间序列

表2 各天平均可见卫星数

日期	平均可见卫星数/颗	
	HKSL 测站	JFNG 测站
2020-03-31	14.6	14.2
2020-04-01	14.9	14.3
2020-04-02	15.2	14.4
2020-04-03	15.4	14.8
2020-04-04	15.4	14.5
2020-04-05	15.4	14.6
2020-04-06	15.4	14.3
平均值	15.2	14.4

(1)由图 1 可得出各测站每个小时的可见卫星数在 11~17 颗,表 2 中看出 BDS 每小时的平均可见卫星数约为 14.8 颗。BDS-2 的平均可见卫星数约为 11 颗,GPS 的可见卫星数为 7~12 颗,BDS 较单 BDS-2 平均可见卫星数提升约 3.8 颗,较 GPS 提升 2.8~7.8 颗。

(2)随着 BDS-3 卫星的全面组网,明显增加了 BDS 的可见卫星数,增强了卫星的几何构形,对其 PPP 的定位性能将有所提升。

3.3.2 定位精度

1. 收敛时的定位精度

将 BDS 动态 PPP 收敛时的坐标与 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 处理的静态 PPP(真值)坐标做差,得到了 X、Y、Z 方向的定位误差,图 2 给出了连续 7 天的 HKSL 测站和 JFNG 测站收敛时的定位误差,表 3 统计了收敛时 HKSL 测站、JFNG 测站定位误差的最大值、最小值、均值及均方根误差。

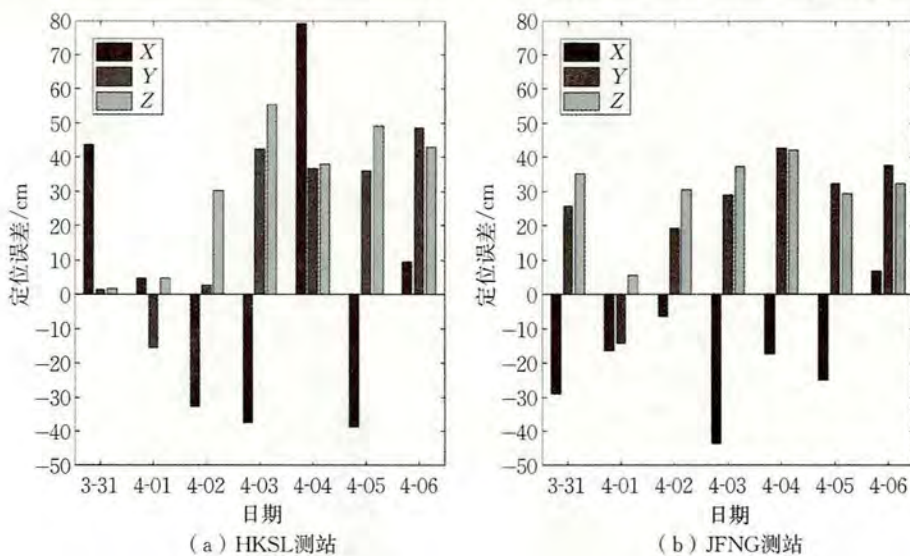


图 2 BDS 动态 PPP 收敛时的定位误差

表 3 收敛时两站的定位误差统计 单位:cm

误差	HKSL 测站			JFNG 测站		
	X	Y	Z	X	Y	Z
最大值	78.98	48.61	55.51	-43.55	42.76	42.15
最小值	4.63	1.26	1.69	-6.52	-14.35	5.63
均值	4.03	21.70	31.77	-18.69	24.66	30.36
均方根误差	41.75	31.75	37.28	23.95	30.20	32.24

(1)由图 2 可以看出,收敛时 HKSL 测站 X 方向误差波动范围为 -38.56~-78.98 cm, Y 方向为 -15.62~48.61 cm, Z 方向为 1.69~55.51 cm;JFNG 测站 X 方向误差波动范围为 -43.55~6.76 cm,

Y方向为 $-14.35\sim 42.76$ cm, Z方向为 $5.63\sim 42.15$ cm, HKSL 测站误差波动较大, JFNG 测站则相对稳定。

(2)从表3可得,刚收敛时 HKSL 测站均方根误差在 X、Y、Z 方向分别为 41.75 cm、31.75 cm、37.28 cm, JFNG 测站分别为 23.95 cm、30.20 cm、32.24 cm。因此,收敛时 BDS 动态 PPP 即能提供稳定的分米级定位。

2.3 小时定位精度

为了知道短时间内的定位精度,本文比较了3小时的定位精度。将 BDS 动态 PPP 3 小时解的坐标与4个系统处理的静态 PPP(真值)坐标做差,得到 X、Y、Z 方向定位误差。其中,图3给出了连续7天 HKSL、JFNG 测站3小时解的定位误差,表4统计了3小时解定位误差的最大值、最小值、均值及均方根误差,图4统计了连续7天3小时解定位精度所能达到的水平。

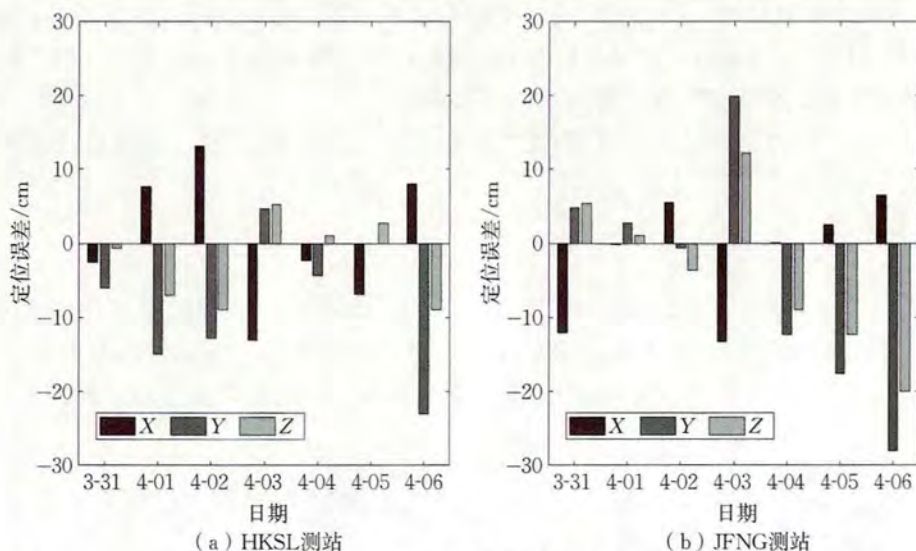


图3 BDS 动态 PPP 3 小时解定位误差

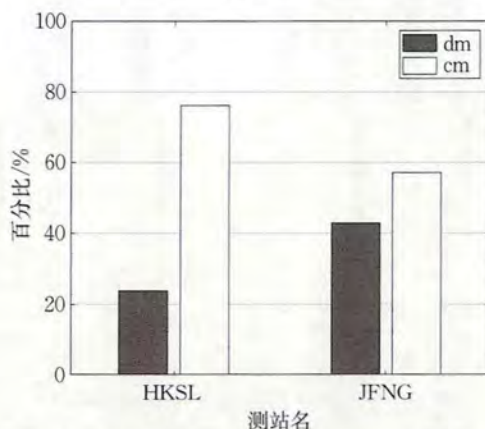


图4 两测站3小时解精度统计(2020-03-31—2020-04-06)

表4 3小时两站定位误差统计

单位:cm

误差	HKSL 测站			JFNG 测站		
	X	Y	Z	X	Y	Z
最大值	13.16	-23.03	-8.92	-13.25	-28.02	-20.00
最小值	-2.31	-0.03	-0.63	0.08	-0.64	0.99
均值	0.55	-8.08	-2.37	-1.59	-4.46	-3.76
均方根误差	8.65	11.92	5.91	7.54	15.44	10.85

(1)由图3可以看出, HKSL 测站 X 方向定位误差波动范围为 $-13.07\sim 13.16$ cm, Y 方向为 $-23.03\sim$

4.65 cm, Z 方向为-8.92~5.20 cm, JFNG 测站 X 方向定位误差波动范围为-13.25~6.37 cm, Y 方向为-28.02~19.82 cm, Z 方向为-20.00~12.21 cm。

(2)从表 4 可得,对于 3 小时动态解, HKSL 测站 X、Y、Z 方向上的均方根误差分别为 8.65 cm、11.92 cm、5.91 cm, JFNG 测站 X、Y、Z 方向上的均方根误差分别为 7.54 cm、15.44 cm、10.85 cm。

(3)BDS 动态 PPP 的 3 小时解有 66.67%的结果能达到厘米级的定位精度(图 4),其 X、Z 方向精度相当,优于 Y 方向,3 个方向的均方根误差分别为 8.12 cm、13.80 cm、8.73 cm。

3. 24 小时的定位精度

为了了解 BDS 动态 PPP 单天解的定位精度,将 BDS 动态 PPP 连续 24 小时解的坐标与 4 个系统处理的静态 PPP(真值)坐标做差,得到 X、Y、Z 方向定位误差。图 5、图 6 分别给出了 HKSL 测站、JFNG 测站连续 7 天的 24 小时坐标时间序列(JFNG 测站 2020-04-06 由于观测质量等问题,4:40~10:40 解算数据缺失),表 5 统计了 24 小时解定位误差的最大值、最小值、均值及均方根误差。

表 5 24 小时两站定位误差统计 单位:cm

误差	HKSL 测站			JFNG 测站		
	X	Y	Z	X	Y	Z
最大值	7.85	-8.28	-3.58	2.14	8.07	4.16
最小值	0.00	-1.28	-1.34	0.03	2.96	0.46
均值	4.46	-4.83	-2.63	0.55	4.72	2.07
均方根误差	5.13	5.30	2.72	1.53	5.15	2.44

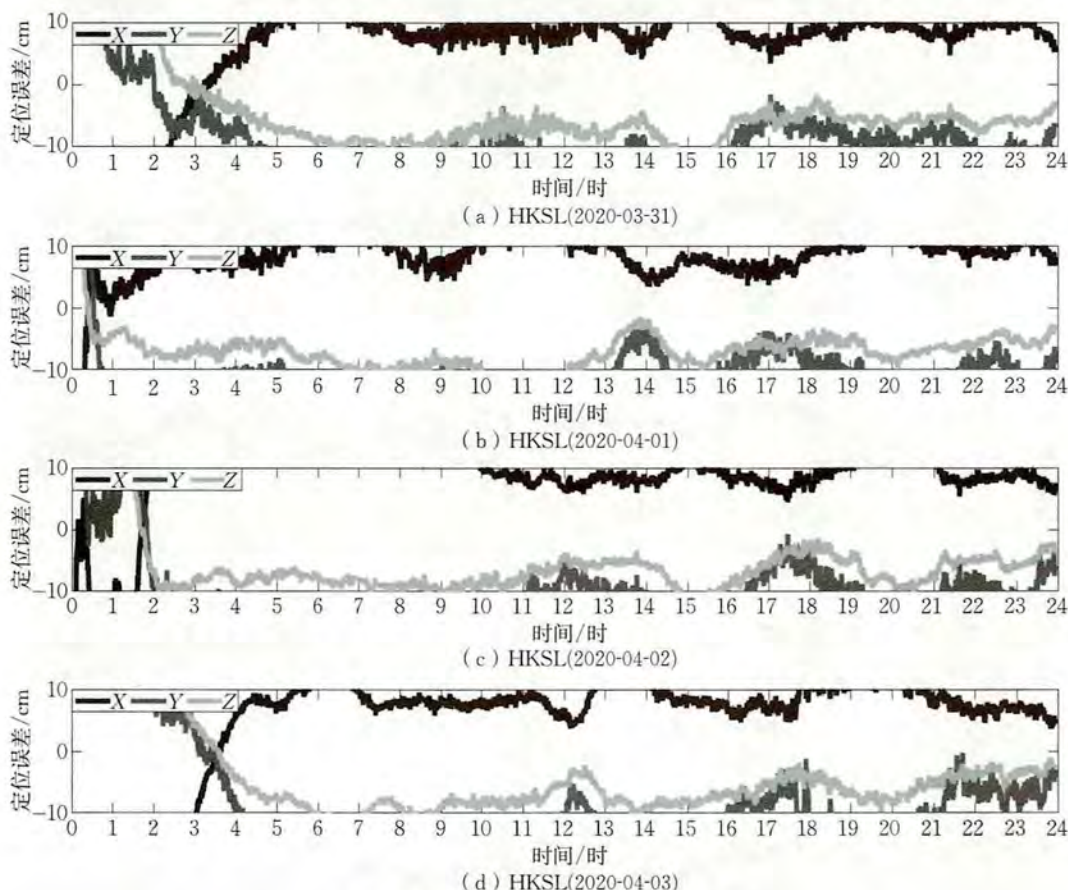


图 5 HKSL 测站 24 小时坐标时间序列

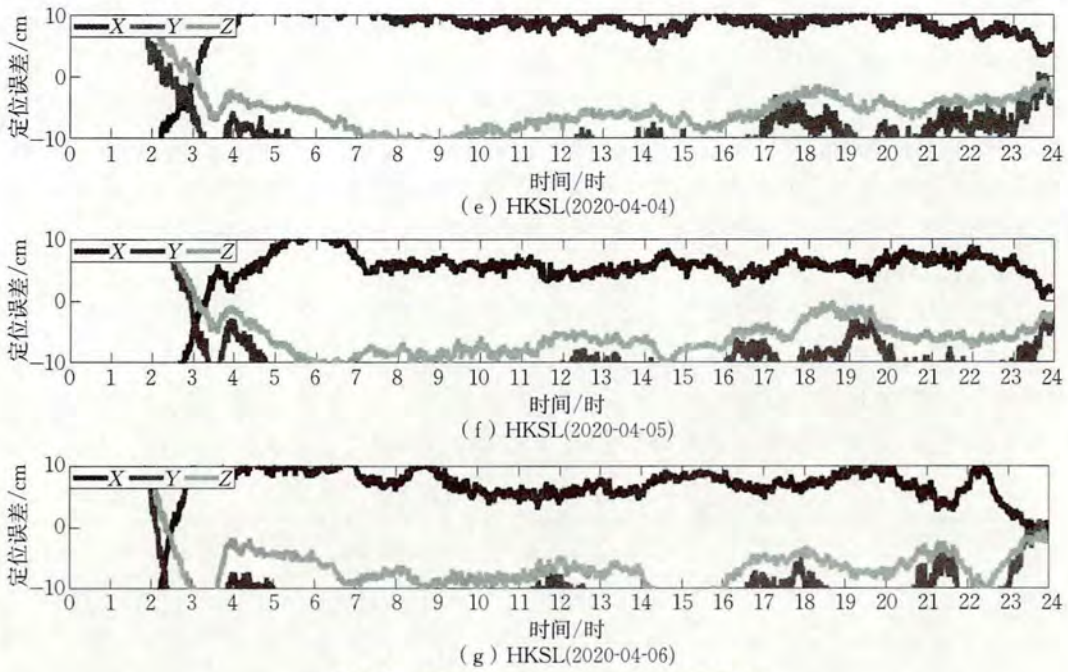


图5(续) HKSL 测站 24 小时坐标时间序列

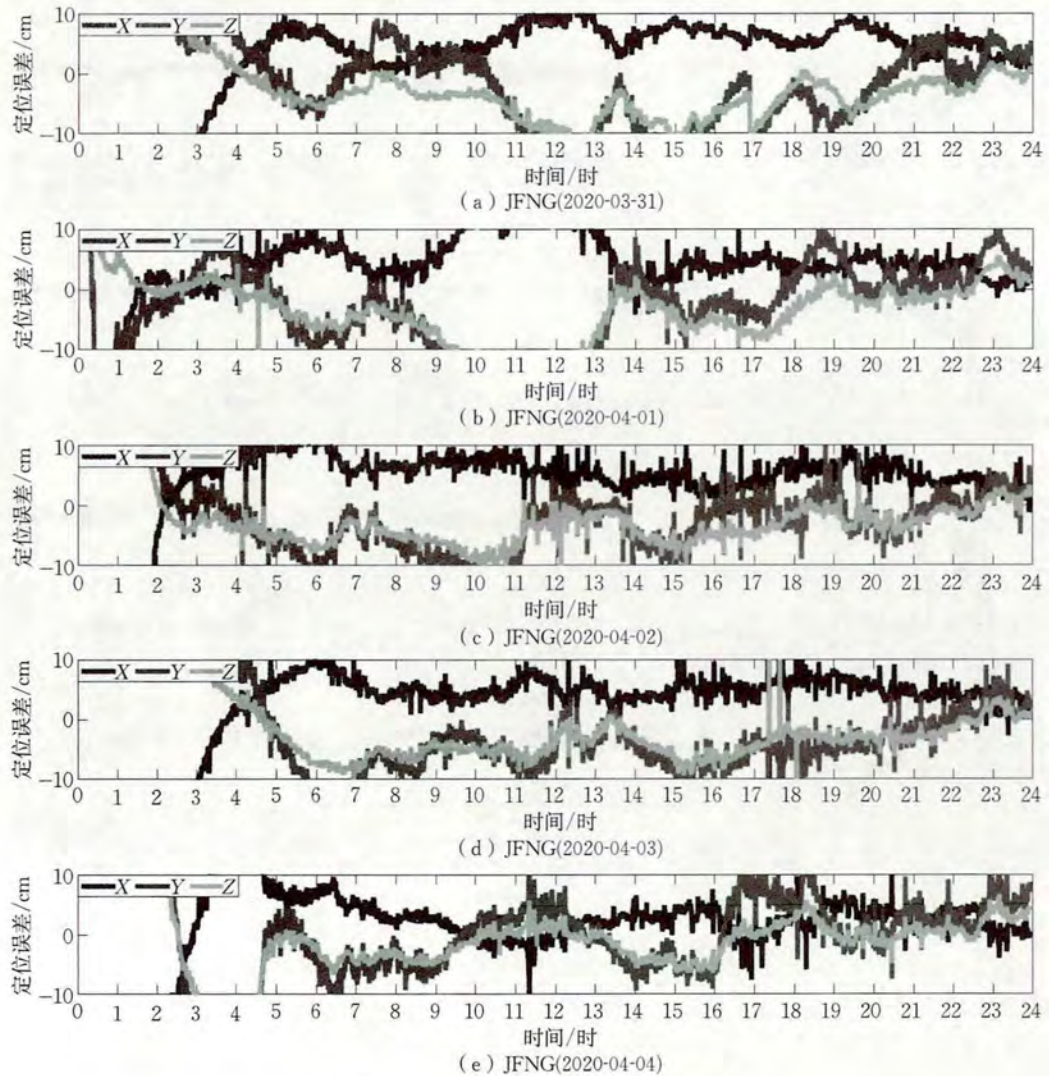


图6 JFNG 测站 24 小时坐标时间序列

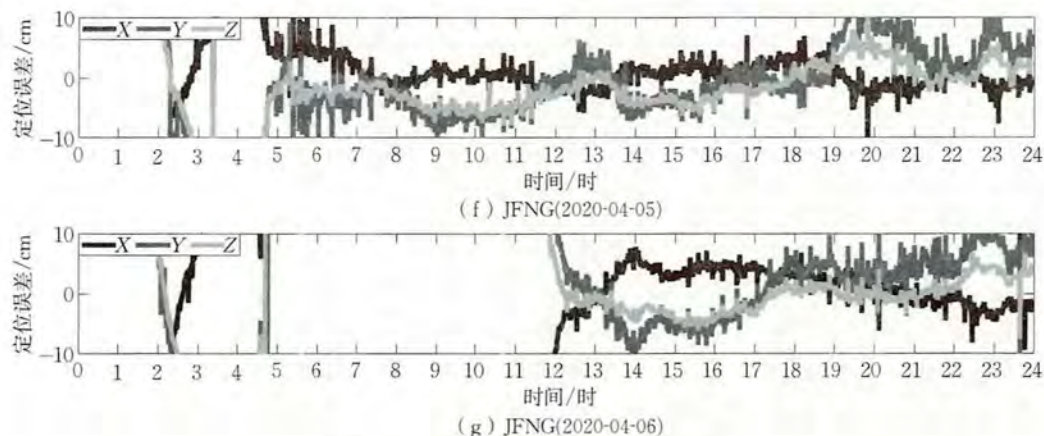


图 6(续) JFNG 测站 24 小时坐标时间序列

(1)由图 5、图 6 可以看出, HKSL 测站 X 方向定位误差波动范围为 0.00~7.85 cm, Y 方向为 -1.28~8.28 cm, Z 方向为 -3.58~-1.34 cm, JFNG 测站 X 方向定位误差波动范围为 -2.12~2.14 cm, Y 方向为 2.96~8.07 cm, Z 方向为 0.46~4.16 cm, HKSL 测站误差变化偏大, JFNG 测站则相对稳定。

(2)从表 5 可得, 对于单天解, HKSL 测站 X、Y、Z 方向上的均方根误差分别为 5.13 cm、5.30 cm、2.72 cm, JFNG 测站 X、Y、Z 方向上的均方根误差分别为 2.14 cm、8.07 cm、4.16 cm, HKSL、JFNG 两测站定位精度相当。

(3)BDS 动态 PPP 单天解能提供稳定的厘米级定位, 其 X、Z 方向优于 Y 方向。X 方向定位精度优于 8.0 cm, Y 方向定位精度优于 8.5 cm, Z 方向定位精度优于 4.5 cm, 3 个方向的均方根误差分别为 3.79 cm、5.22 cm、2.58 cm, 相较于 3 小时解分别提高了 53.33%、62.17%、70.45%, 坐标变化也更加稳定。

3.3.3 收敛时间

采取均值收敛法分析连续 7 天的动态 PPP 的收敛情况。其中, X、Y、Z 这 3 个方向的收敛时间统计如图 7 所示, 表 6 统计了各天 HKSL 测站、JFNG 测站 X、Y、Z 3 个方向的收敛时间及均值。

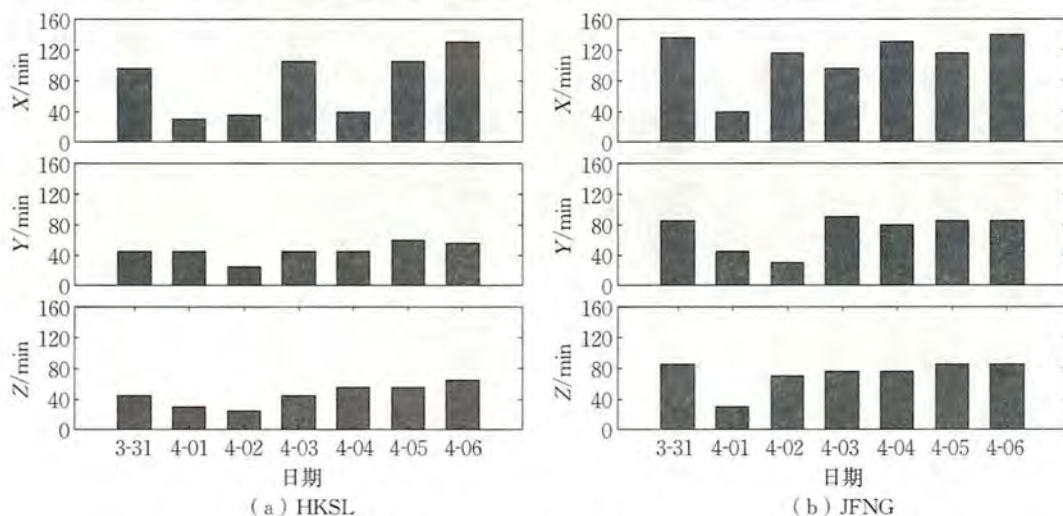


图 7 BDS 动态 PPP 收敛时间

表 6 收敛时间统计

单位: min

日期	HKSL 测站			JFNG 测站		
	X	Y	Z	X	Y	Z
3-31	95	45	45	135	85	85
4-01	30	45	30	40	45	30

续表

日期	HKSL 测站			JFNG 测站		
	X	Y	Z	X	Y	Z
4-02	35	25	25	115	30	70
4-03	105	45	45	95	90	75
4-04	40	45	55	130	80	75
4-05	105	60	55	115	85	85
4-06	130	55	65	140	85	85
均值	77.1	45.7	45.7	110.0	71.4	72.1

由表 6、图 7 可得, HKSL 测站 X 方向收敛时间为 30~130 分钟, Y 方向收敛时间为 25~60 分钟, Z 方向收敛时间为 25~65 分钟, JFNG 测站 X 方向收敛时间为 40~140 分钟, Y 方向收敛时间为 30~90 分钟, Z 方向收敛时间为 30~85 分钟, HKSL 测站收敛速度优于 JFNG 测站。可见, BDS 动态 PPP 收敛时间 Y、Z 方向优于 X 方向, X 方向上收敛时间约为 93.6 分钟, Y 方向上收敛时间约为 58.6 分钟, Z 方向上收敛时间约为 58.9 分钟。

4 结 语

本文利用 MGEX 提供的 2020 年连续 7 天 HKSL、JFNG 2 个测站的观测数据及 GBM 提供的精密星历、钟差产品,在顾及处理策略的基础上,利用 SHA 提供的在线 PPP 解算服务 Net_Diff 进行 BDS 动态 PPP 解算,对其卫星数目、收敛时间、定位精度进行统计分析,得出如下结论:

(1) 动态 PPP 每小时可见卫星数为 11~17 颗,其平均可见卫星数约为 14.8 颗,较 GPS 及单 BDS-2 有明显提升。随着 BDS-3 卫星的全球组网完成,进一步增加了 BDS 的可见卫星数及卫星的几何构形,未来 PPP 性能将大幅提升。

(2) BDS 动态 PPP 在刚收敛时即能提供稳定的分米级定位, HKSL 测站误差变化较大, JFNG 测站则相对稳定;对于 3 小时动态解,其 X、Y、Z 方向均方根误差分别为 8.12 cm、13.80 cm、8.73 cm,且 Y 方向误差大于 X、Z 方向,3 小时解有 66.67% 的结果的定位精度能达到厘米级;对于单天解, HKSL 测站与 JFNG 测站定位精度相当,但 HKSL 测站误差波动相对较大, BDS 动态 PPP 24 小时观测能提供稳定的厘米级定位,且 Y 方向的定位误差大于 X、Z 方向,其 X、Y、Z 方向分别优于 8.0 cm、8.5 cm、4.5 cm,均方根误差分别为 3.79 cm、5.22 cm、2.58 cm,相较于 3 小时解分别提高了 53.33%、62.17%、70.45%,坐标变化也更加稳定。

(3) BDS 动态 PPP 收敛时间 HKSL 测站优于 JFNG 测站, Y、Z 方向相当,优于 X 方向,其在 X 方向上约为 93.6 分钟, Y 方向上约为 58.6 分钟, Z 方向上约为 58.9 分钟。

参考文献:(略)

作者简介:杜彦君,男,1997 年生,研究生,研究方向为卫星导航与定位。

基于 CORS 一张网的对流层延迟误差拟合特性研究

田宗彪, 章磊, 周进, 杨绪峰, 吕霖冰

(国家测绘产品质量检验测试中心, 北京 100830)

摘要:目前,我国已具备建设全国 GNSS 地基增强系统一张网的基础条件,中国卫星导航系统管理办公室已经完成了相应的论证,在不久的将来即可建成运行。基于此背景,本文选取 CORS 定位重要误差来源之一的对流层延迟误差为研究对象,基于 204 个陆态网站点的对流层延迟数据,开展相应的拟合特性研究,并得出结论:基于高程的线性拟合模型基本满足 CORS 应用中网络 RTK 的改正需求,且相比较常规模型有很大的提升效果;在开展全国层面对流层延迟拟合时,应在高程层面重点倾向于选择低海拔地区的基准站,无须刻意加大高海拔地区的点位密度,对基准站网全国一张网建设应用具有一定参考意义。

关键词:CORS;对流层;一张网;高程

1 引言

为加强测绘基准的动态维持,提供高精度定位与导航服务,通过中国大陆构造环境监测网络(陆态网)、927 一期工程、现代测绘基准工程等项目的实施,已形成 410 个国家级站点和 2 300 个省级站点,完全具备建设全国北斗地基增强系统的条件。目前,中国卫星导航系统管理办公室已经完成了在全国建设北斗地基增强系统的论证,按照“数据共享、服务优先,统一方案、共同建设,分步实施、持续发展”的思路,整合国内全球导航卫星系统(GNSS)基准站点,形成北斗卫星导航地面监测资源“规划设计一张图,建设使用一张网”的局面。

本文在全国连续运行基准站(CORS)一张网推进背景下,影响网络实时动态(RTK)定位精度和可靠性的电离层误差、对流层误差等误差来源在范围上将从省市层面上升至全国层面,在平面、高程精度方面受我国地域地形客观因素影响,面临着一系列挑战。本文选择主要误差源之一的对流层延迟误差,对全国一张网时的拟合特性进行研究。

2 数据来源

陆态网由 260 个 GNSS 基准站和 2 000 个区域站组成,采用 GAMIT、Bernese 和 GIPSY 软件进行数据处理。本文从中国地震局 GNSS 数据产品服务台(<http://www.cgps.ac.cn>)获取陆态网 2018 年第 45 天的对流层延迟数据,经过筛选,最终选用其中的 204 个基准站点,构成本文研究的数据来源。

3 天顶对流层延迟拟合

3.1 天顶对流层延迟空间特性分析

处理陆态网数据时,每小时设置一个天顶对流层参数,经过高精度数据处理后得到对流层延迟值。在得到 2018 年 204 个基准站点第 45 天每小时对流层天顶延迟分布后,根据测站的天顶对流层延迟与该测站的经度、纬度、高程信息,分析计算出纬度、经度、高程与天顶对流层延迟的相关系数。每小时相关系数统计如图 1 所示。

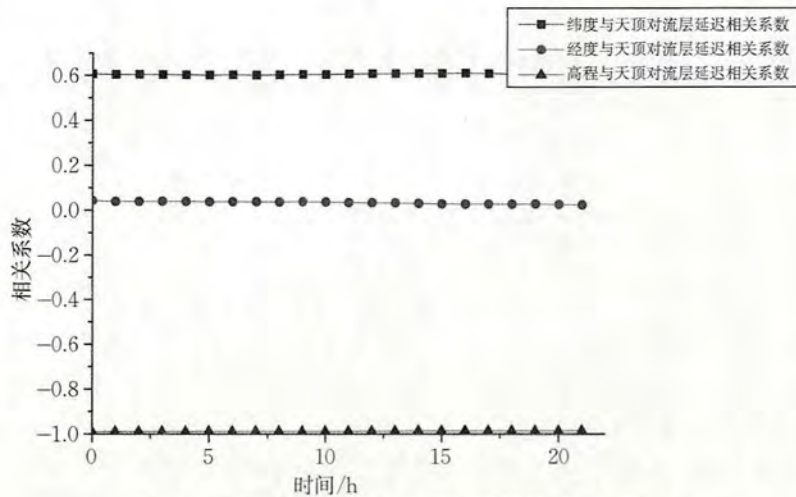


图1 纬度、经度、高程与天顶对流层延迟相关系数

通过对比各测站的天顶对流层延迟与测站经度、纬度、高程的相关系数不难发现:天顶对流层延迟与高程呈明显强负相关(均近似为-0.98),与经度无明显相关性,与纬度弱相关(均近似为0.60)。

基于该结论,本文重点开展基于高程的对流层延迟误差拟合建模相关特性分析。

3.2 基于高程的线性拟合模型

基于熊永良等提出的含高程影响因子的对流层拟合模型,提出了改进的仅基于高程的曲线拟合方法,主要计算对流层延迟部分的改正数,按照阶数一般有三种函数模型,即

$$D = a_0 + a_1 H \tag{1}$$

$$D = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 \tag{2}$$

$$D = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3 \tag{3}$$

根据已知点的高程 H 和天顶对流层延迟 D ,按照最小二乘原理求出拟合系数 a_i 即得到拟合模型,将待插点的高程信息代入,可拟合天顶对流层延迟值。

根据 204 个基准站点的高程信息和天顶对流层延迟值,得到拟合模型,一阶、二阶、三阶的拟合结果如图 2 所示。

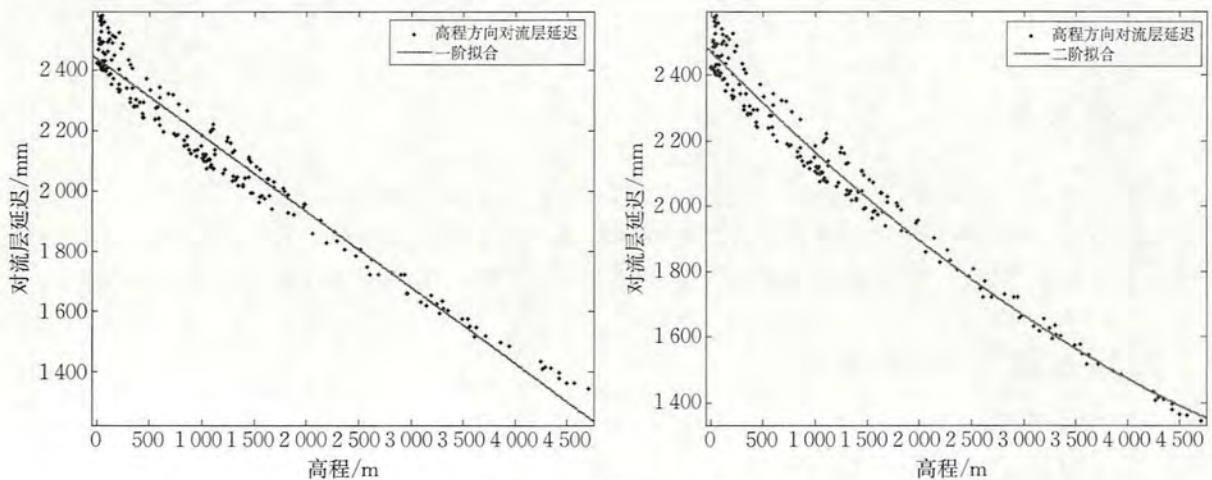


图2 各阶线性拟合结果

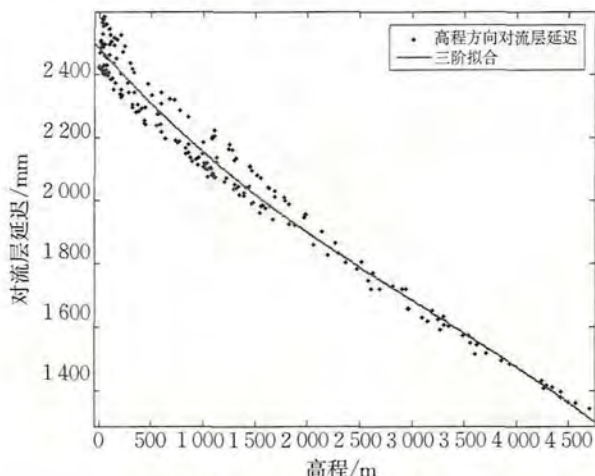


图 2(续) 各阶线性拟合结果

三种拟合结果中,一阶、二阶、三阶拟合的均方根(RMSE)分别是 60.74、52.63、51.62,决定系数(R-square)分别是 0.9628、0.9722、0.9734。根据结果可以看出,三阶和二阶拟合的 RMSE、R-square 相差不大,考虑拟合效率,一般选择二阶拟合模型即可。

4 拟合特性分析

为了分析基于高程的线性拟合模型的插值特性,本文将 204 个基准站点按照高程(不考虑平面位置信息)划分出不同区域,并以各区域站点数反映高程方向上的点位密度。各高程区段对应的站点数如图 3 所示。

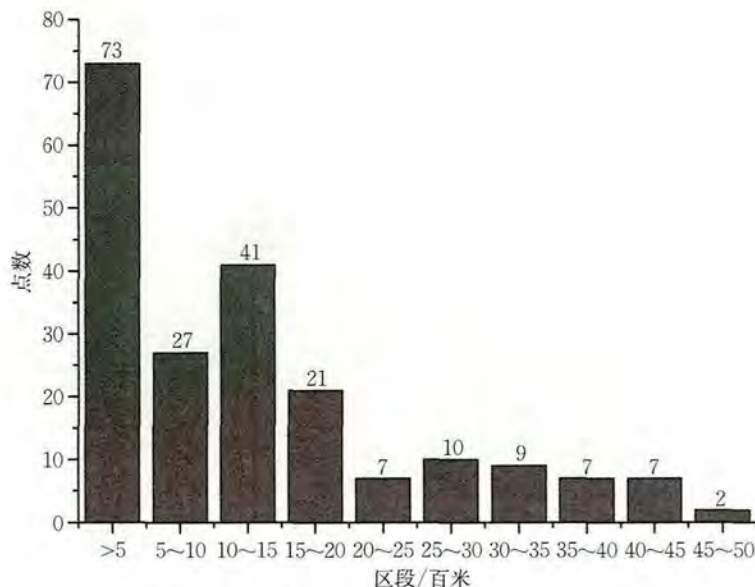


图 3 各高程区段站点密度分布

对于任意待拟合点,利用剩余的 203 个点,采取二阶高程线性拟合模型完成拟合系数计算,再将该点的高程值代入模型,计算出该点的拟合对流层延迟,结合该点已知的对流层延迟值残差评价拟合精度,按照高程递增的模式对各点拟合后的残差进行统计,如图 4 所示。

限于篇幅,本文仅展示 05:00(T5)、15:00(T15)时刻的拟合结果,根据拟合残差图,可以得出如下结论:

- (1) 对流层延迟随高程逐渐增大呈现递减趋势。
- (2) 低海拔地区,对流层延迟较大,相对高海拔地区拟合效果较差,但从全国总体层面分析,拟合精度

基本维持在 5 cm 以内,可满足一般网络 RTK 的应用需求。

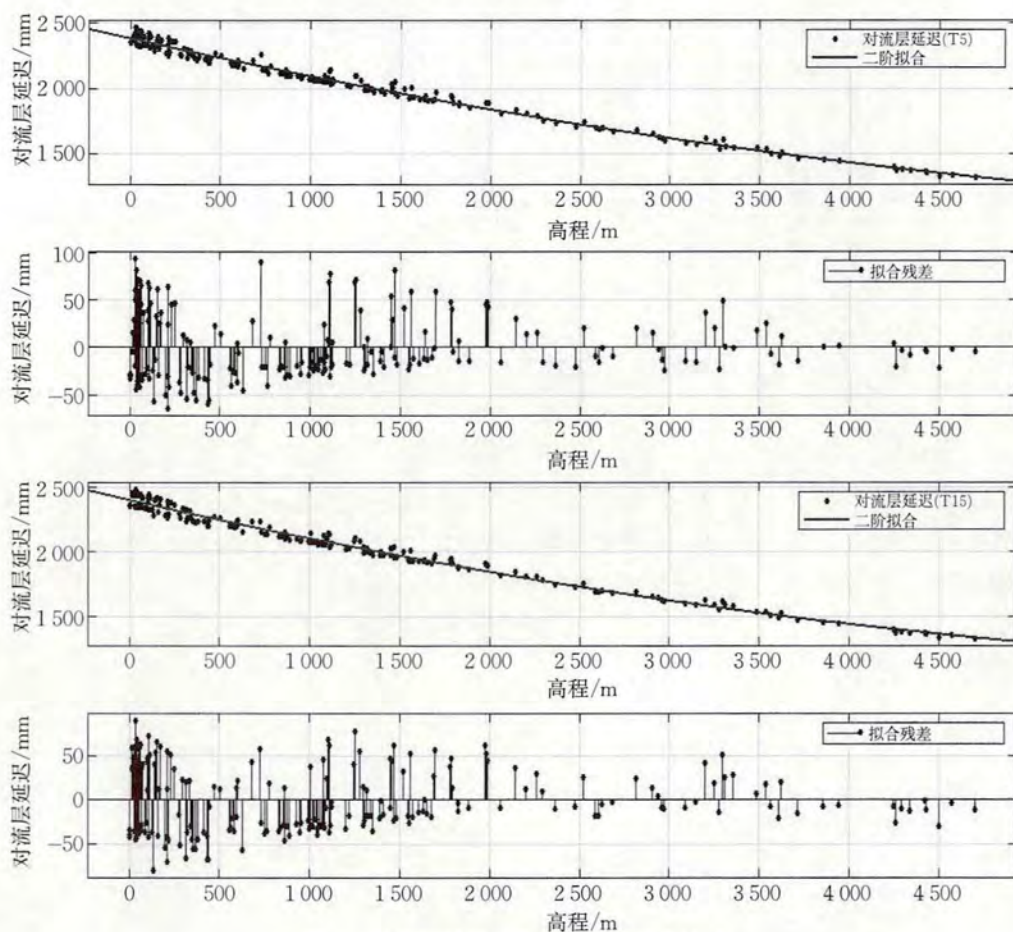


图 4 对流层延迟二阶高程线性拟合结果

随后,统计各个区段内的平均拟合精度,如图 5 所示。

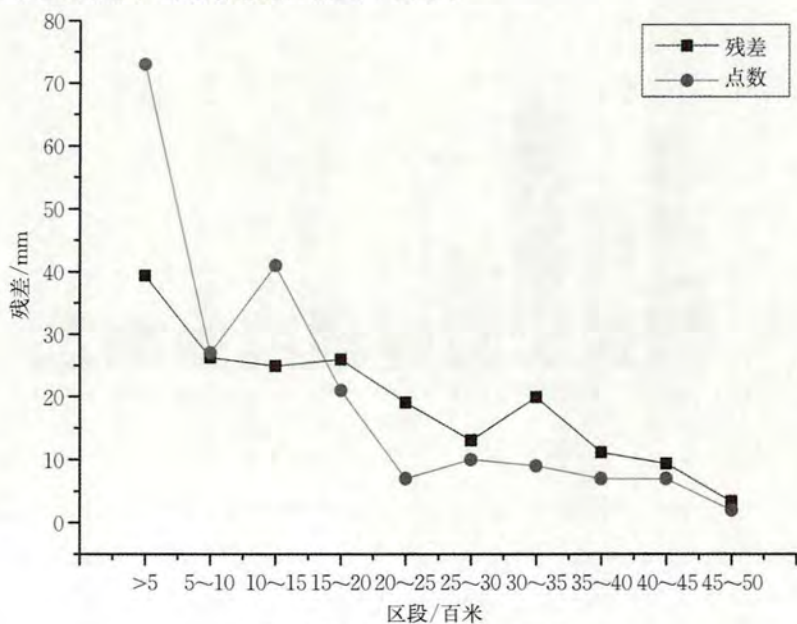


图 5 各高程区段拟合精度统计

结合各高程区段内的点位密度情况可以发现,尽管低海拔地区的点位密度较大,其在各个区段内的拟合效果也比高海拔地区的拟合效果差。

5 结 语

在 CORS 一张网背景下,全国层面的网络 RTK 误差分析与常规 70 km 左右的区域基准站网相比有很大区别,国内的地域和地形变化是一项重要因素。本文以全国范围内的对流层误差拟合特性为研究目标,主要完成了以下几方面工作:

(1)从中国地震局 GNSS 数据产品服务平台获取陆态网 2018 年第 45 天的对流层延迟数据,并汇总整理,分析出天顶对流层延迟的空间特征,即天顶对流层延迟与高程呈负相关、与经度和纬度几乎无明显相关性,为后续拟合特性研究提供基础。

(2)完成基于高程的天顶对流层延迟插值模型研究,利用线性拟合模型分别完成一、二、三阶拟合,在对结果进行分析之后选取二阶线性拟合,并将其作为最佳拟合阶数。

(3)通过陆态网中的 204 个基准站的数据,实例验证了基于高程的线性拟合模型基本满足 CORS 应用中网络 RTK 的改正需求,相比较常规模型 20 cm 左右误差有很大的提升。

(4)通过分析发现,在开展全国层面对流层延迟拟合时,为提高拟合效果,无须考虑平面点位密度,而应在高程层面重点倾向于选择低海拔地区的基准站,目前基准站建设东部密集、西部稀疏的现状刚好为此提供了有利条件。

由于数据来源受限,本文仅在全国层面选取了 204 个站点进行验证,但已取得较好效果,在利用全国基准站“一张网”时,点位数据密度会有较大提高,拟合效果将会得到较大提升。

参考文献:(略)

作者简介:田宗彪,男,1987 年生,工程师,研究方向为测绘地理信息质检理论与技术。

基于 GPS-BD2 的组合定位精度分析*

杨旭东^{1,2}, 刘博文^{1,2}, 王 森^{1,2}, 纪雷鸣^{1,2}, 黄迎春^{1,2}, 秦 飞^{1,2}, 余永欣^{1,2}

(1. 北京市测绘设计研究院, 北京 100038; 2. 城市空间信息工程北京市重点实验室, 北京 100038)

摘 要: 本文通过分析当前北斗二号(BD2)的发展状况, 通过实验对北斗和“GPS+北斗”组合的精度进行了分析。结果表明, 在静态定位中, “BD2+GPS”两种卫星测出的数据与只有 GPS 卫星测出的数据差别不大, 但是从水平精度与垂直精度方面来说, “BD2+GPS”两种卫星测出的数据精度要优于只有 GPS 一种卫星测出的数据精度。GPS-BD2 组合定位精度与可靠性优于 GPS 单系统定位结果。当前一些特殊用户对导航系统的性能和可靠性的要求越来越高, 单一的导航系统已不能满足需求, 组合系统的使用可以很好地解决这个问题, 所以进一步开展我国北斗导航卫星系统与其他系统组合定位的精度研究也将具有重要的实用价值。

关键词: 北斗二号; 全球定位系统(GPS); 精度

1 引 言

截至 2020 年 7 月, 北斗导航卫星产业总产值已突破百亿元, 基于北斗导航系统的开发应用已服务于国土、测绘、城建、水利、交通和应急救援等领域。伴随着我国北斗导航卫星系统行业的进一步发展, 预计未来几年, 北斗导航卫星系统规模将呈现出逐年增长态势。

2007—2012 年, 我国陆续发射了 16 颗北斗二号导航卫星, 最终组成了由 14 颗北斗二号(5 颗静止轨道导航卫星+5 颗倾斜地球同步轨道导航卫星+4 颗中圆地球轨道导航卫星)组成的、采用无源与有源导航卫星方式相结合的区域导航卫星系统。其服务范围为亚太地区, 定位精度为 10 m, 测速精度为 0.2 m/s, 授时精度为 50 ns, 短信字数每次为 120 个字。虽然北斗三号已经初具规模, 但北斗二号依然是不可忽视的一股力量。

本文针对 GPS-BD2 的组合定位方式的精度进行分析。

2 北斗二号定位精度分析方法

2.1 加权几何精度因子

定位的精度取决于两个方面: 一是观测量的精度; 二是所观测卫星的空间几何分布, 通常称为卫星分布的几何图形。定位精度用公式可以表示为

$$\sigma_A = \sigma_{\text{URE}} \times DOP \quad (1)$$

式中, σ_{URE} 为等效测距误差; DOP 为精度衰减因子, 它反映了由于卫星几何关系的影响造成的伪距测量与用户位置误差间的比例系数, 是对用户测距误差的放大程度。精度衰减因子包括水平精度衰减因子(HDOP)、垂直精度衰减因子(VDOP)、空间位置精度衰减因子(PDOP)、钟差精度衰减因子(TDOP)和能够全面反映以上几项的几何精度衰减因子(GDOP)。利用 GDOP 对定位精度进行分析时通常认为各观测值之间是独立等精度的, 即其权矩阵 $P = I$ 。线性化的定位解算误差方程式可表示为

* 基金项目: 北京卓越青年科学家项目(JJWZYJH01201910003010); 城市空间信息工程北京市重点实验室经费(2019101); 城市空间信息工程北京市重点实验室基金(2019203)

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\delta\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \quad (2)$$

式中, $\delta\hat{\mathbf{x}}$ 为未知点坐标改正数的估值; $\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{X}_0$, 其中 \mathbf{X}_0 为未知点坐标初始值, 未知点坐标的最小二乘估值为 $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{X}_0 + \delta\hat{\mathbf{x}}$, $\hat{\mathbf{x}}$ 的权逆矩阵为

$$\mathbf{Q}\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \quad (3)$$

从而几何精度衰减因子的计算公式为

$$GDOP = \text{tr}(\mathbf{Q}\hat{\mathbf{x}}) = \text{tr}((\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}) \quad (4)$$

采用上述方法进行精度估计的前提是基于等精度观测, 适用于 GPS、伽利略等导航卫星系统, 因为这些系统中的卫星类型相同且都分布在相同的轨道高度上, 它们具有相同的测距误差。然而我国的北斗二号导航卫星系统是由分布在不同轨道高度的异质卫星组成的混合星座导航系统, 不同轨道上的卫星具有不同的轨道误差, 所以在分析该系统定位精度时, 采用上述方法就不能真实反映实际情况。

轨道误差包括定轨误差和外推误差两个部分, 其中定轨误差是指通过一段时间地面监测站对卫星的观测, 由计算中心解算得到的卫星运行轨道的解的误差; 用户用于计算卫星位置的导航电文是依轨道解外推的拟合参数, 这种推估的附加误差即是外推误差。由于以上两项误差的不同导致了广播星历精度不等, 从而造成了不同精度的距离观测量。对于地球同步轨道(GEO)卫星来说, 它这种相对地球静止的特性使定轨时卫星的钟差难以分离, 加上 GEO 卫星受光压影响很大, 相同条件下由 GEO 卫星星历误差引入的测距误差约为中圆轨道(MEO)卫星的两倍。MEO 卫星的测距误差约为 ± 8 m, GEO 卫星的测距误差约为 ± 11 m。倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星在局部地区轨道测定精度较 GEO、MEO 来说是最好的, 但其轨道高度与 GEO 相同, 所以受光压影响也较大, 这里假设它的测距精度与 MEO 相同。

取 $\sigma_{\text{IGSO}}^2 = \sigma_{\text{MEO}}^2 = 64 \text{ m}^2$, $\sigma_{\text{GEO}}^2 = 121 \text{ m}^2$ 在观测值独立的情况下可得观测值的协方差矩阵为

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{\text{MEO}}^2 \mathbf{I}_{k_1 \times k_1} & & \\ & \sigma_{\text{GEO}}^2 \mathbf{I}_{k_2 \times k_2} & \\ & & \sigma_{\text{IGSO}}^2 \mathbf{I}_{k_3 \times k_3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

取 $\sigma_0^2 = \sigma_{\text{MEO}}^2 = 64 \text{ m}^2$, 得权矩阵为

$$\mathbf{P} = \sigma_0^2 \mathbf{\Sigma}^{-1} \quad (6)$$

由误差方程, 即

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\delta\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \quad (7)$$

得出法方程为

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}) \delta\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (8)$$

$$\mathbf{Q}\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (9)$$

从而可以得出加权 GDOP 的计算公式为

$$GDOP = \text{tr}(\mathbf{Q}\hat{\mathbf{x}}) \quad (10)$$

同式(4)相比, 式(10)是在非等精度观测的情况下, 根据不同类卫星的不同测距误差对观测值赋以相应的权值, 通过加权计算得出的几何精度因子, 可以更加客观地评定定位精度。

2.2 计算与分析

利用 STK 软件对系统的星座进行了模拟并生成了一天的卫星轨道数据, 利用全国 29 个网络工程基准站的位置数据对加权几何精度因子进行计算分析。在截止高度角分别为 10° 、 20° 、 30° 时计算了基准站 WHJF 上加权 GDOP 值一天的变化。如图 1 所示, 横轴为时间, 以 s 为单位, 纵轴表示加权几何精度因子。北斗一号的地面段由主控站、测轨站、测高站和标校站等组成, 是导航系统的控制、计算、处理和管理中心。测轨站、测高站、标校站均为无人值守的自动数据测量与收集中心, 在主控站的监测与控制下工作。

在设置不同的截止高度角的情况下, 由于可见星数随截止高度角的增大而减少, 所以加权几何精度因子的值也相应的变大。从图 1 中可以看出当截止高度角为 10° 时, 加权几何因子在 118~512 之间变化; 当把截止高度角增大到 30° 时, 几何精度因子在 218~512 之间变化。通过比较发现北斗二号导航卫星系统

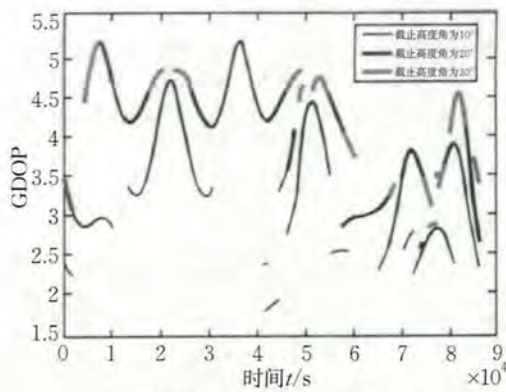


图1 不同截止高度角的 GDOP 变化

在截止高度角增大时没有像 GPS、格洛纳斯 (GLONASS) 等全球系统那样产生大的变化,说明在截止高度角变化的情况下基站观测得到的卫星几何结构仍然能够保持稳定,从而保证了稳定的定位精度。

选取了 HJAR、JIXN、XIAM 由北向南的三个基准站和 WUSH、DXIN、BJSH 由西向东的三个基准站,计算了截止高度角为 5° 时一天的 GDOP 值的变化。

如图 2、图 3 所示,随着测站位置的变化,加权几何精度因子的值也呈现出一定的区域变化特性。随着测站地理纬度由北向南逐渐减小,加权几何精度衰减因子的值也减小。但是它减小的幅度没有 GPS 那么明显,因为在任何时候北

斗二号导航卫星系统都可以保证观测到足够数目的卫星,而 GPS 在某些地区会出现观测盲区,甚至在一些时段观测到的卫星数还不到 4 颗。同样随着测站地理经度的不同,GPS 的几何精度衰减因子的变化也是很大的,而区域导航系统在大部分时段并没有发生很大的变化,这在一定程度上说明,在不同地区北斗二号导航卫星系统定位结果的稳定性要更好一些。为了验证加权分析的有效性,在加权和不加权的两种情况下,在基准站上进行外部检核。通过已知坐标计算出测站到各可见卫星的几何距离,并给计算出的几何距离加上在一定范围内变化的随机数来模拟伪距观测值,然后通过伪距的观测模型利用最小二乘原理解算出测站位置,最后用解算出的测站坐标与已知坐标对比,测站的位置计算分别采用不加权和加权两种方法,通过表征外符合精度的均方误差来评价解算结果的好坏。

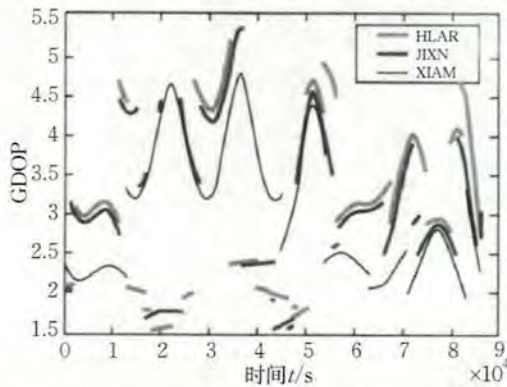


图2 由北向南不同测站的 GDOP 的变化

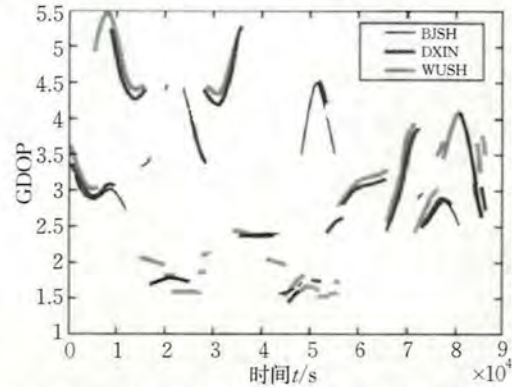


图3 由西向东不同测站的 GDOP 的变化

均方误差的计算公式为

$$MSE(\hat{x}) = E \|\hat{x} - X\|^2 = E \{(\hat{x} - X)^T (\hat{x} - X)\} \tag{11}$$

在基准站上进行外部检核的结果如图 4 所示。

图 4 中用实线连接起来的小方格是在不加权情况下,计算出的全国网络工程 29 个基准站上由模拟伪距观测解算出的测站坐标的均方误差 (MSE) 开根号之后的值;用虚线连起来的小方格是在加权情况下算出的均方误差开根号之后的值;最下面的由点线连接的小方格是加权时的 \sqrt{MSE} 减去不加权的 \sqrt{MSE} 时的结果。如图 4 所示在加权的情况下 \sqrt{MSE} 的最大值为 13.444 m, 29 个站的平均值为 9.140 m;而在不加权的情况下 \sqrt{MSE} 的最大值为 16.300 m, 29 个站的平均值为 11.018 m。很明显在加权情况下位置解算精度更高,所以加权计算更符合真实情况,利

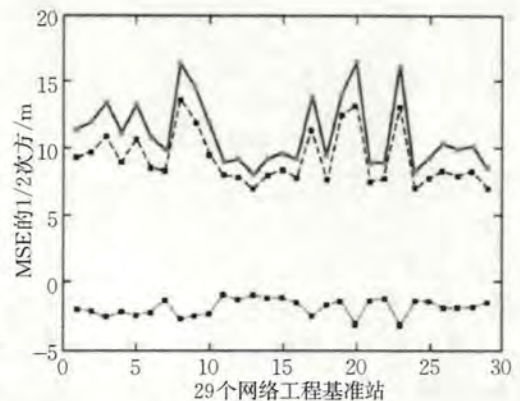


图4 外部检核的结果

用加权几何精度衰减因子能更准确地评定我国北斗二号导航卫星系统的定位精度。

3 实验与数据分析

3.1 实验设备

这次实验使用的是 UR370 BD2/GPS/GLONASS 三系统七频高精度接收机(图 5),软件采用卫星显控软件(CDT),如图 6 所示。



图 5 UR370 BD2/GPS/GLONASS 三系统七频高精度接收机

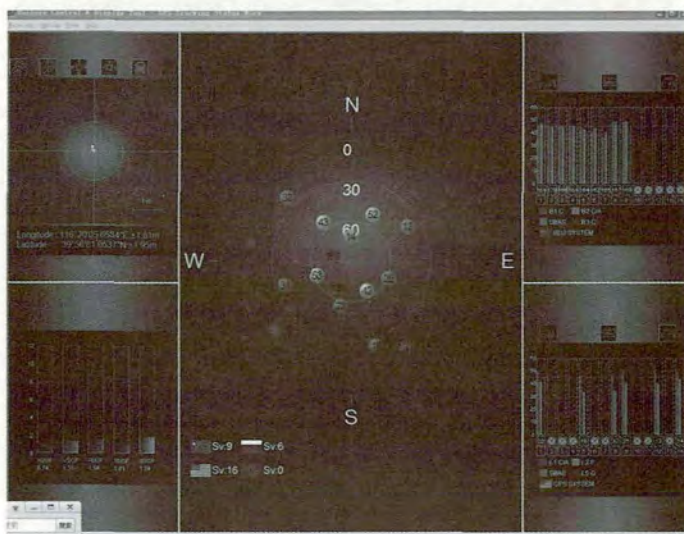


图 6 CDT 卫星轨道视图

3.2 实验数据

实验地点选择某大学,共选择三个点位,现场点位环境如图 7 所示,点名分别为 lqc、dpf、wzd。点位分布如图 8 所示。



图 7 现场点位环境



图8 点位分布

测量基线处理摘要如表1、表2所示。

表1 GPS 测量基线处理摘要

观测	开始	结束	解类型	水平精度 /m	垂直精度 /m	大地方位角	椭球距离 /m	高度增量 /m
lqc-dpf(B1)	lqc	dpf	固定	0.023	0.036	85°40'27"	147.154	-0.235
lqc-wzd(B2)	lqc	wzd	固定	0.026	0.063	328°41'37"	32.965	11.894
wzd-dfp(B3)	wzd	dpf	固定	0.009	0.014	95°57'11"	164.756	-12.210

表2 GPS-BD2 测量基线处理摘要

观测	开始	结束	解类型	水平精度 /m	垂直精度 /m	大地方位角	椭球距离 /m	高度增量 /m
lqc-dpf(B1)	lqc	dpf	固定	0.022	0.034	85°40'25"	147.156	-0.226
lqc-wzd(B2)	lqc	wzd	固定	0.024	0.054	328°43'13"	32.959	11.838
wzd-dfp(B3)	wzd	dpf	固定	0.009	0.013	95°57'09"	164.759	-12.207

GPS-BD2 解出的未知点坐标值分别为 307 491.523 m、498 670.753 m、49.214 m, GPS 解出的未知点坐标值分别为 307 491.530 m、498 670.749 m、49.222 m。

3.3 数据分析

在静态定位中,“BD2+GPS”两种卫星测出的数据与只有 GPS 卫星测出的数据差别不大,但是从水平精度与垂直精度方面来说,“BD2+GPS”两种卫星测出的数据精度要优于只有 GPS 一种卫星测出的数据精度。GPS-BD2 组合定位精度与可靠性优于 GPS 单系统定位结果。所以说 BD2 对于定位精度是有一定贡献的。用户在可见星数目较少的情况下,难以得到满足精度要求的结果,甚至无法进行定位解算。为了有效地发挥现有的导航定位系统的综合优点,将北斗与其他定位系统进行组合导航,获得高精度、高可靠性的用户定位精度具有重要意义。

4 结 语

在静态定位中,BD2-GPS 两种卫星系统定位精度略高于 GPS 一种卫星系统定位,所以说 BD2 可以为 GPS 定位做出一定的贡献。将来多种卫星系统定位可能将会成为一种趋势,因为其定位更加准确。

但是北斗现如今仍然存在一些不足。在静态定位的过程中,每台北斗接收机都要配置一台计算机,而GPS接收机却不用,所以北斗在测量的过程中会比GPS复杂一些。而且现在处理北斗数据的软件较少,市面上大多数软件只能处理GPS和GPS-BD2,缺少单独处理北斗数据的软件,所以在这方面是一个很大的缺陷。

参考文献:(略)

作者简介:杨旭东,男,1991年生,工程师,主要从事基础测绘、地理国情监测研究工作。

基于 VRS 的 BDS 定位精度分析*

王何鹏,郭 杭,陈新东

(南昌大学信息工程学院,江西 南昌 330031)

摘 要:高精度差分定位由最初单基站实时动态定位(RTK)方法发展到现在的网络定位,虚拟基准站(VRS)技术更是这一领域的研究热点。目前,GPS的VRS技术研究比较深入,但北斗的VRS技术还不够完善。本文基于鄱阳湖地区网络RTK实测数据,通过线性内插模型编写的VC++事后虚拟参考站观测文件生成软件,对北斗和GPS数据分别进行虚拟基准站差分定位。结果表明,本文的内插模型同样适用于北斗,在中长距离VRS定位中北斗和GPS均可以达到厘米级的定位精度,且能够提供与GPS相当的定位精度结果,可为鄱阳湖地区北斗的VRS技术研究和实际工程测量提供理论依据。

关键词:VRS;网络RTK;北斗;差分定位;精度

1 引 言

北斗卫星导航系统(简称北斗)是我国自主研发的卫星导航系统,随着北斗的迅速发展,高精度的定位需求越来越多,而基于虚拟基准站技术的北斗差分定位系统依靠网络将基准站连接到计算中心,联合若干基准站数据进行解算,可以有效解决距离带来的差分定位精度降低的问题并提供米级、分米级甚至厘米级的实时定位服务,可以满足高精度定位用户的需求。

本文基于鄱阳湖地区网络实时动态定位(RTK)实测数据,通过内插模型编写的VC++事后虚拟基准站观测文件生成软件,对比了北斗和GPS在中长距离中的虚拟基准站(virtual reference station, VRS)定位结果,验证了北斗的VRS定位技术的可行性。

2 VRS 系统组成和基本原理

2.1 VRS 系统组成

VRS系统包括三个组成部分:固定基准站网、用户应用子系统(移动站)、数据处理与控制中心(数据传输等)。

(1)固定基准站网是VRS技术的数据来源,采用双频高精度接收机,用于实现对卫星信号的捕获、跟踪、记录和传输,然后将数据实时地发送给数据处理与控制中心。

(2)用户应用子系统通常是各种常见的RTK流动站接收机。根据不同的应用方向,可以分为测绘与工程用户系统(厘米级、分米级)、车辆与导航用户系统(米级、亚米级)等。

(3)数据处理与控制中心是VRS技术网络系统的核心组成部分,既要完成数据处理又要完成通信控制,中心一方面通过通信线如光缆、ISDN或电话线等与所有的固定基准站搭建通信,另一方面使用无线网络如GPRS、GSM或CDMA等把虚拟观测信号播报给移动站用户,主要功能由控制中心软件完成。

* 基金项目:国家自然科学基金项目(41764002)

2.2 VRS 基本原理

VRS 系统工作原理如图 1 所示。每个固定基准站将观测的原始数据通过数据通信线发给控制中心,移动用户在工作前,先给控制中心发送一个大概的位置坐标,数据中心接收到这个大概的坐标后通过数据解算为流动站用户建立虚拟基准站。根据大概的坐标,数据中心通过解算挑选一组最佳的网络基准站,整体地改正卫星的轨道偏差和对流层、电离层、大气折射带来的误差,将高精度的差分结果(包括参考站的精确坐标和载波相位观测值)发给移动站。这个差分结果就等同于在移动用户站附近生成了一个虚拟的基准站,从而解决了 RTK 作业在距离上的问题,确保了定位精度。

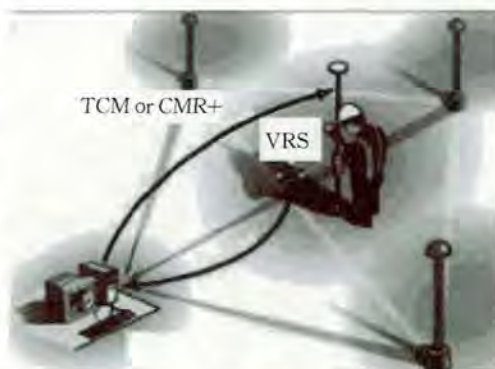


图 1 VRS 工作原理

3 数学模型

3.1 VRS 载波相位观测值计算模型

VRS 载波相位观测值可以由下式表示,即

$$\varphi_v^j = \varphi_A^j + \frac{1}{\lambda} \Delta \rho_{AV}^j + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{-\Delta \nabla I_{AV}^{ij} + \Delta \nabla T_{AV}^{ij} + \Delta \nabla O_{AV}^{ij} + \Delta \nabla M_{AV}^{ij}}{\text{空间相关改正数}} + \frac{\epsilon_{\Delta AV}^j}{\text{随机误差项}} \right) \quad (1)$$

式中, λ 是载波相位波长, φ 是载波相位观测值, ρ 是站星间几何距离, I 是电离层延迟, T 是对流层延迟, O 是卫星轨道偏差, M 是多路径误差, ϵ 是噪声; 上标 i, j 代表卫星的编号; $\Delta, \Delta \nabla$ 分别表示单差双差因子; 下标 A 和 V 分别代表主基准站和虚拟基准站。几何配置由站点的几何分布决定, 令 $\Delta \nabla S_{AV}^j = -\Delta \nabla I + \Delta \nabla T + \Delta \nabla O$, 忽略随机误差项, 则 VRS 观测值模型可以简化为下式, 即

$$\varphi_v^j = \varphi_A^j + \frac{1}{\lambda} \Delta \rho_{AV}^j + \frac{1}{\lambda} \Delta \nabla S_{AV}^j \quad (2)$$

参考站载波相位观测值和几何配置是已知的值, VRS 观测值模型中只有空间相关改正数未知, 因此需要建立适当的误差计算模型。

3.2 线性内插模型

当各基准站基线上的空间相关误差确定后, 就可以使用特定的内插算法计算虚拟基准站处的空间相关改正数。国内外学者提出了许多利用 VRS 网络数据生成误差改正数的方法, 主要有线性组合法、低阶曲面法、线性内插法、基于距离的线性内插法、最小二乘配置法等。本文实验采用线性内插法, 该方法实现简单、计算量小、效率高, 适用于基准站数量较少的情况。

线性内插法的原理: 利用基准站坐标和基准站间的改正数计算内插参数, 进而内插出虚拟基准站处的改正数。具体算法如下

$$\Delta \nabla R_{Ai} = a_1 (X_i - X_A) + a_2 (Y_i - Y_A) \quad (3)$$

式中, 下标 A 为主基准站, $\Delta \nabla R_{Ai}$ 为主参考站与参考站 i 的综合距离相关误差(电离层延迟误差、对流层延迟误差、卫星轨道偏差)改正量, X, Y 为平面坐标值。当所选择的基线数 $n=2$ 时, 可以直接求解参数 a_1 和 a_2 , 当所选基线数 $n > 2$ 时, 可以根据最小二乘原理求解参数 a_1 和 a_2 。

求得 2 个参数后, 就可依据 VRS 虚拟站的平面坐标 (X, Y) 计算出虚拟站与主参考站的空间相关改正数, 即

$$\Delta \nabla R_{AV} = a_1 (X_V - X_A) + a_2 (Y_V - Y_A) \quad (4)$$

4 实验与分析

选取鄱阳湖地区德安(DEAN)、湖口(HUKO)、都昌(DUCH)、鄱阳(POYA)、进贤(JINX)5个连续运行基准站的数据进行实验,每个参考站都采用 Trimble NetR9 基准站型接收机和 Zephyr Geodetic 2 天线,时间为2017年12月30日。所选基准站的采样间隔均为30 s。5个站的概略位置如图2所示。

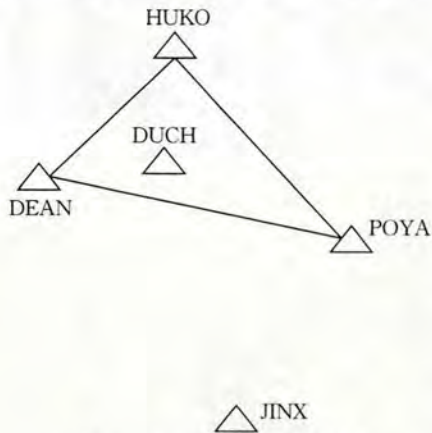


图2 基准站与流动站位置

计算过程如下:

(1)读取各个基准站观测数据,选取各个基准站相同历元数据,解算双差模糊度。

(2)生成卫星导航定位基准站(CORS)网各基线双差改正数,内插虚拟基准站误差改正数,生成虚拟观测值。

(3)最后将测试模拟流动站所在位置的观测数据和虚拟观测值进行短基线相对定位。

本文基于 VC++ 编写了相应程序,实现上述过程。

对于网内实验,选取 DEAN、HUKO、POYA 作为基准站,DEAN 站为主基准站,DUCH 站作为测试模拟流动站,HUKO、POYA 站之间的距离为 91 km,DEAN、POYA 站之间的距离为 96.1 km,HUKO、DEAN 站之间的距离为 64.6 km,DUCH、

DEAN 站之间的距离为 42.4 km。分别用 GPS 数据和北斗数据进行网内实验,得到 DUCH 站的定位结果,如图3、图4所示。

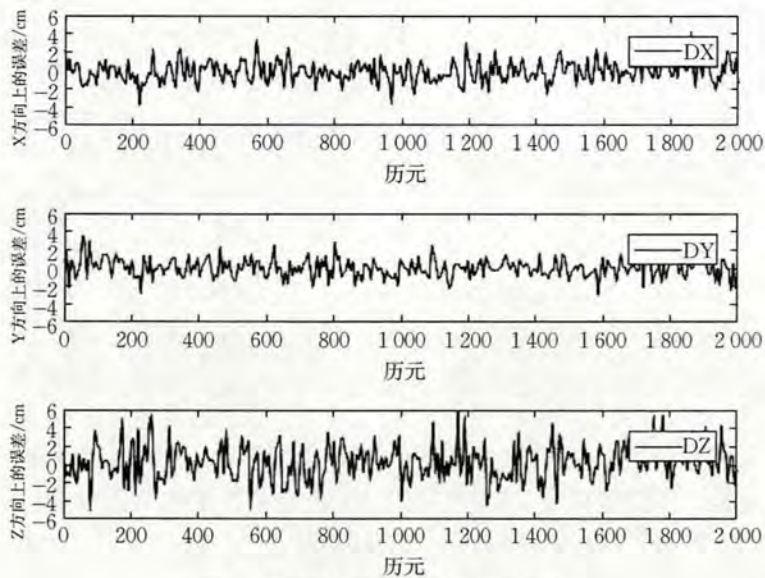


图3 DUCH 站网内 GPS 定位结果

由图3和图4分析可知,GPS解算结果在X、Y、Z方向上的最大误差分别约为4.2 cm、3.5 cm、5.8 cm,标准差分别为1.5 cm、1.25 cm、2.1 cm。北斗解算结果在X、Y、Z方向上的最大误差分别约为4.4 cm、4.2 cm、7 cm,标准差分别为1.6 cm、1.4 cm、2.6 cm。该结果表明在中长距离VRS试验网覆盖区域内利用GPS和北斗数据解算的点位坐标精度均在厘米级,且北斗能够提供与GPS相当的定位精度结果。

对于网外实验,与网内实验基准站相同,选取DEAN、HUKO、POYA,POYA站为主基准站,JINX站作为测试模拟流动站,JINX、POYA站之间的距离为79.8 km。用北斗数据进行网外实验得到JINX站的定位结果如图5所示。

由图5分析可知,北斗解算结果在X、Y、Z方向上的最大误差分别约为8.2 dm、7.1 dm、13 dm,标准

差分别为 2.5 dm、2.3 dm、4.1 dm。该结果表明在网外实验中,随着流动站渐远离基准站覆盖区域,与距离相关的误差的相关性慢慢降低,导致整周模糊度参数不能确定,定位精度降为分米级甚至更低。

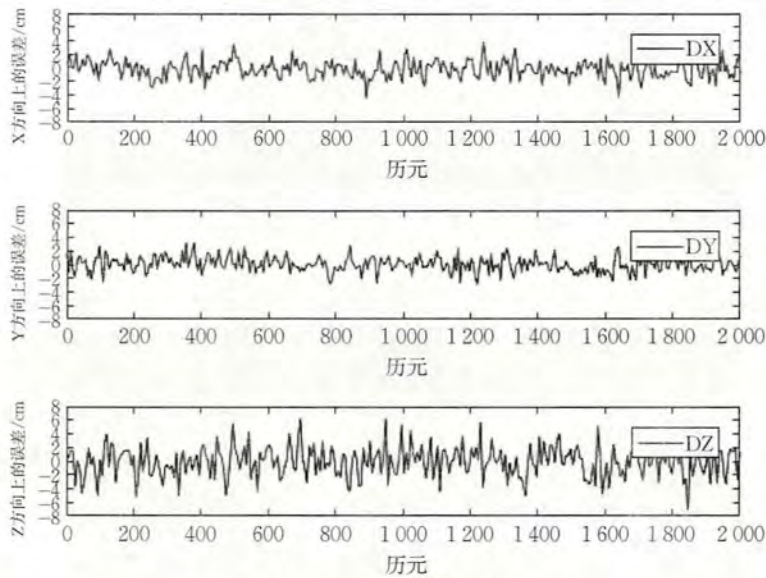


图4 DUCH 站网内北斗定位结果

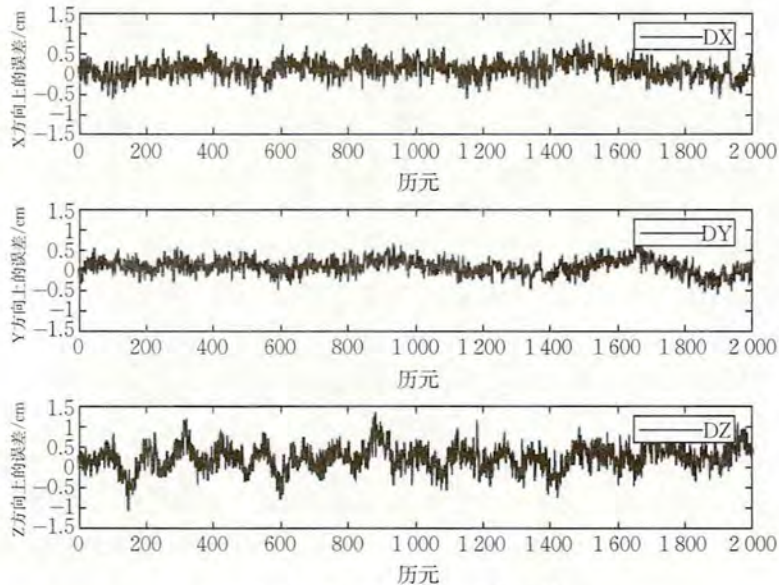


图5 JINX 站网外北斗定位结果

5 结 语

VRS 技术可以解决 RTK 作业距离上带来的问题,其应用于中长距离基准站网络,可以实现厘米级高精度定位结果。本文分别使用北斗和 GPS 数据进行 VRS 定位解算验证了北斗 VRS 技术的可行性,结果表明北斗和 GPS 在 X、Y、Z 方向上定位精度均能达到厘米级,且北斗的 VRS 定位技术能够达到与 GPS 相当的定位精度结果,为北斗的 VRS 技术的研究和发展提供了理论依据。

参考文献:(略)

作者简介:王何鹏,硕士,主要从事北斗和 GNSS 精密定位方面的研究。

基于天空地多层次观测的地质灾害识别监测应用研究

——以矿山为例

吴 雨,况长虹,胡文蓉,张帅毅

(1. 四川九洲北斗导航与位置服务有限公司,四川 成都 610000;

2. 四川九洲卫星导航投资发展有限公司,四川 绵阳 621000)

摘 要:识别、发现、监测地质灾害隐患是我国防灾减灾工作最重要的内容之一。本文针对矿山安全生产领域提出了一套综合运用多种技术的地质灾害识别、监测方法,即利用卫星遥感进行大范围勘测识别;同时,利用无人机航飞影像和地质条件、地形地貌、气象水文等数据,基于德尔菲法(专家打分法)选取综合指数模型进行计算,获得小范围地质灾害危险性评估结果;基于上述评估结果,利用北斗高精度形变监测终端和多种监测设备对灾害隐患点进行实时监测。最终在四川省金刚煤矿等多个煤矿的试点应用验证了本文所述方法的可行性。

关键词:地质灾害;隐患识别;监测;北斗;遥感;天地一体

1 引 言

滑坡、沉陷等地质灾害是危害矿山安全的主要灾害种类之一。矿产资源开采容易对自然环境造成破坏并引发地质灾害,严重威胁矿山工作人员的生命安全,不利于矿山企业的持续健康发展。充分利用现代技术手段对矿山地质灾害进行防治,是矿山生产安全的重要研究课题,而提前发现和有效识别重大地质灾害潜在隐患并进行主动防控,是地质灾害防治领域集中关注的焦点和难点。自然资源部陆昊部长认为,当前防范地质灾害的核心需求是要搞清楚“隐患点在哪里”“什么时候可能发生”,这是目前地质灾害防治急需突破的难题和瓶颈。目前,行业内遵循的相关技术标准是国土资源部 2004 年颁布并实施的《地质灾害危险性评估技术要求(试行)》,由于该技术要求只是对评估方法做出原则规定,故地质灾害危险性评估方法多样,缺少对具体方法的内容和适用性等的规范和推广。

矿山地质灾害隐患点多具有高位、隐蔽性等特点,传统的人工排查和群测群防手段难以提前发现此类灾害隐患。进入 21 世纪,卫星遥感、无人机三维摄影测量、激光雷达(LiDAR)等现代遥感和测绘技术逐步被应用于地质灾害隐患点排查,其识别的重点主要为高位、隐蔽、平面投影面积相对较大、某方面特征显著的灾害隐患。但是卫星遥感等技术自身具有不可避免的缺点和局限,例如,星载光学遥感会受卫星重访周期和气候条件的限制;InSAR 受大气对流、地形起伏、卫星分辨率等因素影响较大;无人机三维摄影测量、激光雷达对设备、人员要求较高,难以做到周期性排查等。与遥感等周期性隐患排查手段相比,通过部署北斗或 GPS 等传感监测设备,对隐患点进行实时动态监测,该方式具有精度高、实时性强等优势,但部署相关设备、系统的成本较高,如何选择合适的关键点位进行部署是监测是否有效的关键点和难点。不难看出,基于遥感的测绘排查技术和基于北斗的实时动态监测技术在地质灾害防治上具有很强的技术互补性,通过有效设计,能实现识别与监测的有机结合、周期与实时的有机结合,可以相互补充和校验,可以最大限度地识别已存在的灾害隐患。

2 基于天空地多层次观测的地质灾害识别监测方法

本文所述基于天空地多层次观测的地质灾害识别监测方法,指综合运用卫星遥感、无人机航测、北斗+N 地面监测等技术手段,实现矿山地质灾害隐患点的识别、排查和监测。具体而言,第一步,利用卫星

光学遥感和 InSAR 识别矿山及其周边范围在一定时期内形变位移较为显著的区域;第二步,利用无人机对上述区域进行测绘,获取数字正射影像图(DOM)、数字高程模型(DEM)、数字线划图(DLG)等专题产品;第三步,邀请安全生产、煤矿、地质灾害监测等相关领域的专家,根据不同隐患点的类型和具体情况建立综合指数模型,形成量化评价标准;第四步,结合地质、水文、气象等相关历史数据,评价隐患点的风险水平,进而确定部署监测设备的具体位置;第五步,部署“北斗+N”监测设备,对隐患点进行连续、实时的监测。整体方法流程如图 1 所示。

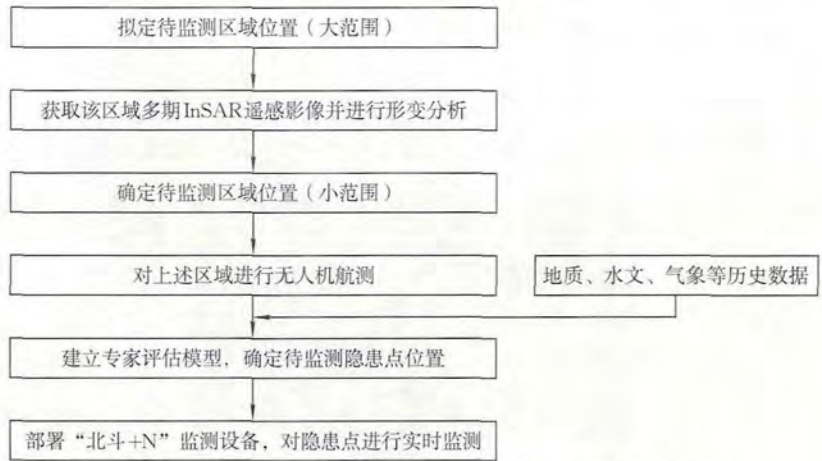


图 1 基于天空地多层次观测的地质灾害识别监测方法总体流程

2.1 基于卫星遥感的地质灾害隐患区域排查

本文采用 Li 等所述方法,采集矿山及周边区域光学遥感影像,利用不同时段和期次的光学遥感影像的光谱和纹理差异,结合地形地貌特征,从而使人工就能较易识别出历史上曾经发生过的古老滑坡体和具有明显变形迹象的区域。采用 Wasowskia 等所述方法,通过对重复轨道观测获取的多时相雷达数据,集中提取具有稳定散射特性的高相干点目标上的时序相位信号进行分析,反演研究区域地表形变平均速率和时间序列形变信息,从而获取厘米级甚至毫米级的形变测量精度。

本文以四川达州某煤矿为研究对象,采集该煤矿及周边区域 2018 年至 2019 年内的多期卫星遥感影像,并进行处理分析,得到地质灾害隐患区域排查结果,如图 2 所示。

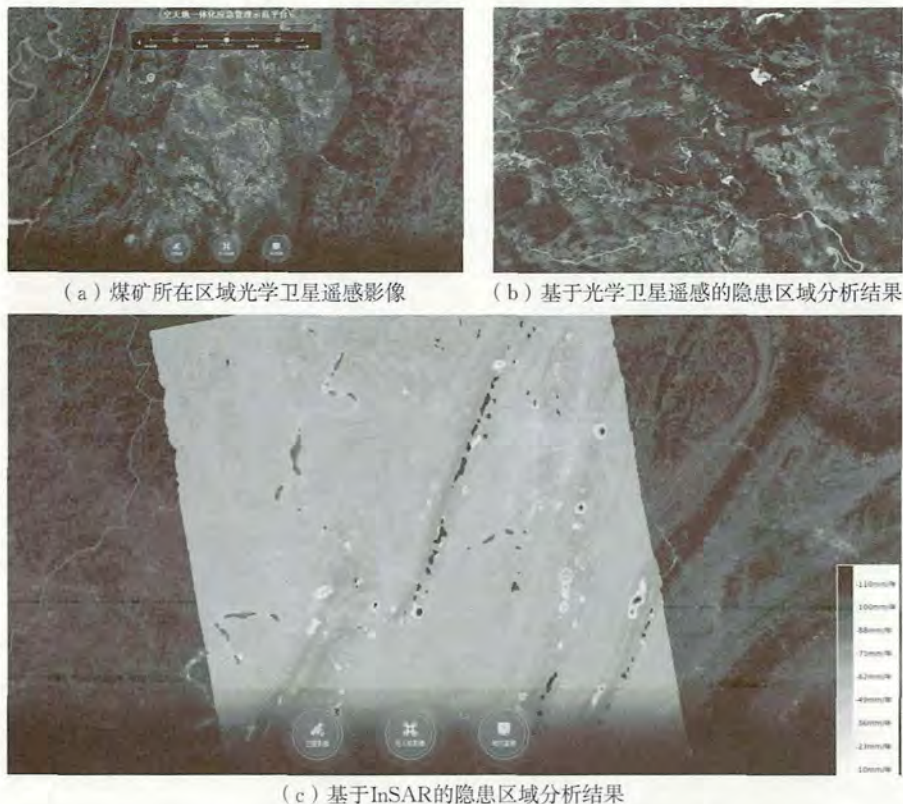


图 2 基于卫星遥感的地质灾害隐患区域排查结果

2.2 无人机航测

在通过卫星遥感分析确定的隐患待排查区域内,采用无人机进行低空航测,获取并处理得到目标区域的 DOM、DEM、DLG 专题图产品,供后续专家判断参考,如图 3 所示。

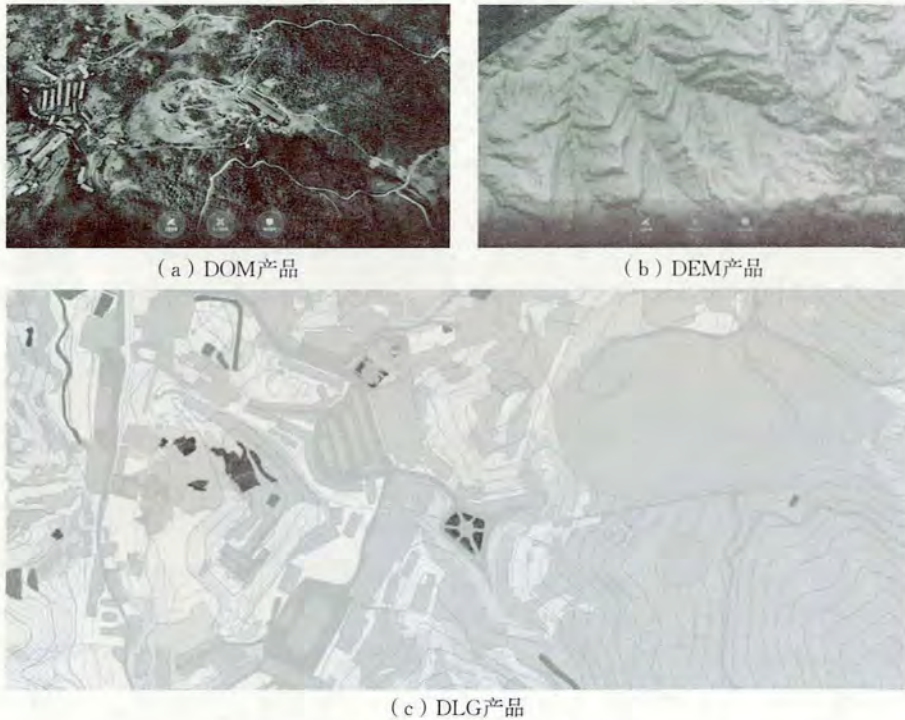


图 3 无人机航测结果

2.3 基于德尔菲法的隐患监测点评估

基于德尔菲法的专家意见集成方法能够发挥专家智慧在综合集成系统研究中的作用,对于群体决策、综合评价以及各类专家知识库构建和专家系统开发应用等方面具有重要的理论和应用价值。本文参考罗冠枝所述地质灾害影响因子评估方法,进一步根据具体地质灾害隐患点类型及重要程度不同的相关危险影响因子的,赋予危险影响因子不同的权重,采用综合指数模型中的加权平均法计算各评价对象的稳定性指数值,其计算公式为

$$K = \sum_{i=1}^n P_i Q_i$$

式中, K 为稳定指数值; P 为各危险影响因子量化值; Q 为各危险影响因子的权重; i 为所有评价因子的计数, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, n 为危险影响因子的总个数。

结合评估区地质条件和工程资料,将各危险影响因子量化值 P 分为 3 个等级,分别按照 N_1 、 N_2 、 N_3 进行赋值,对应高危险、中危险和低危险评级。

根据此次研究的煤矿主要地质灾害类型,本文分别针对滑坡类和沉陷类地质灾害设计了地质灾害隐患量化评价标准,如表 1、表 2 所示。

表 1 滑坡类地质灾害隐患量化评价标准

危险影响因子	权重	因子量化分级					
		低危险	得分	中危险	得分	高危险	得分
边坡坡度/(°)	Q_1	<30	$N_3 Q_1$	30~50	$N_2 Q_1$	>50	$N_1 Q_1$
岩性	Q_2	硬岩	$N_3 Q_2$	软质岩	$N_2 Q_2$	松散土	$N_1 Q_2$
边坡高度/m	Q_3	<30	$N_3 Q_3$	30~100	$N_2 Q_3$	>100	$N_1 Q_3$

续表

危险影响因子	权重	因子量化分级					
		低危险	得分	中危险	得分	高危险	得分
水文地质条件	Q_4	简单	N_3Q_4	中等	N_2Q_4	复杂	N_1Q_4
岩体结构	Q_5	整体结构	N_3Q_5	块状结构 层状结构	N_2Q_5	碎块结构 散体结构	N_1Q_5
活动断裂	Q_6	弱	N_3Q_6	中等	N_2Q_6	强烈	N_1Q_6
年降雨量/mm	Q_7	<200	N_3Q_7	200~800	N_2Q_7	>800	N_1Q_7
地震烈度	Q_8	<6	N_3Q_8	6~8	N_2Q_8	>8	N_1Q_8
人类工程活动	Q_9	合理	N_3Q_9	欠合理	N_2Q_9	不合理	N_1Q_9
滑坡规模/($\times 10^3 \text{ m}^3$)	Q_{10}	<10	N_3Q_{10}	10~100	N_2Q_{10}	>100	N_1Q_{10}
植被覆盖率/%	Q_{11}	>60	N_3Q_{11}	60~20	N_2Q_{11}	<20	N_1Q_{11}
无人机航测成果	Q_{12}	合理	N_3Q_{12}	欠合理	N_2Q_{12}	不合理	N_1Q_{12}

表 2 沉陷类地质灾害隐患量化评价标准

危险影响因子	权重	因子量化分级					
		低危险	得分	中危险	得分	高危险	得分
岩体结构	Q_1	整体结构	N_3Q_1	块状结构 层状结构	N_2Q_1	碎块结构 散体结构	N_1Q_1
岩性	Q_2	硬岩	N_3Q_2	软质岩	N_2Q_2	松散土	N_1Q_2
水文地质条件	Q_3	简单	N_3Q_3	中等	N_2Q_3	复杂	N_1Q_3
开采深厚比	Q_4	>40	N_3Q_4	30~40	N_2Q_4	<30	N_1Q_4
采空区尺寸	Q_5	>1.4	N_3Q_5	1.2~1.4	N_2Q_5	<1.2	N_1Q_5
工作面推进速度	Q_6	匀速	N_3Q_6	变化较小	N_2Q_6	变化显著	N_1Q_6
活动断裂	Q_7	弱	N_3Q_7	中等	N_2Q_7	强烈	N_1Q_7
年降雨量/mm	Q_8	<200	N_3Q_8	200~800	N_2Q_8	>800	N_1Q_8
地震烈度	Q_9	<6	N_3Q_9	6~8	N_2Q_9	>8	N_1Q_9
无人机航测成果	Q_{10}	合理	N_3Q_{10}	欠合理	N_2Q_{10}	不合理	N_1Q_{10}

本文在此次某煤矿地质灾害隐患识别监测研究过程中,通过邀请煤矿企业,以及安全生产、地质灾害监测、测绘、卫星导航等领域的专家,采用专家打分——层次分析法确定危险影响因子的种类和权重,最终确定各因子的量化评分标准。

针对达州某煤矿滑坡类和沉陷类地质灾害隐患,危险影响因子量化值 P 取值分别设为 30、20、10。当 K 值大于 24 时,稳定性差;当 K 值大于 16 且小于 24 时,稳定性中等;当 K 值小于 16 时,稳定性好。

将各危险影响因子的历史观测数据代入评价标准并进行计算(客观值通过煤矿企业和相关部门的历史观测、测绘数据获取,主观值通过专家打分加权平均获取),判断该区域是否有必要部署北斗+N 监测设备。

2.4 基于“北斗+N”的隐患点实时监测

通过在上述步骤确定的拟监测区域部署“北斗+N”集成监测设备,设备主要由北斗高精度定位模块、雨量传感器、环境传感器、声光报警器等组成,可实时监测地表移动变形量(包括下沉、水平移动等),以及地面降水、温度、湿度等情况,如图 4 所示。

结合地基增强网数据,实现高精度定位自适应解算。隐患点的形变监测精度可以达到平面不超过 $2.5 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \cdot D$,高程不超过 $5 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \cdot D$ 。

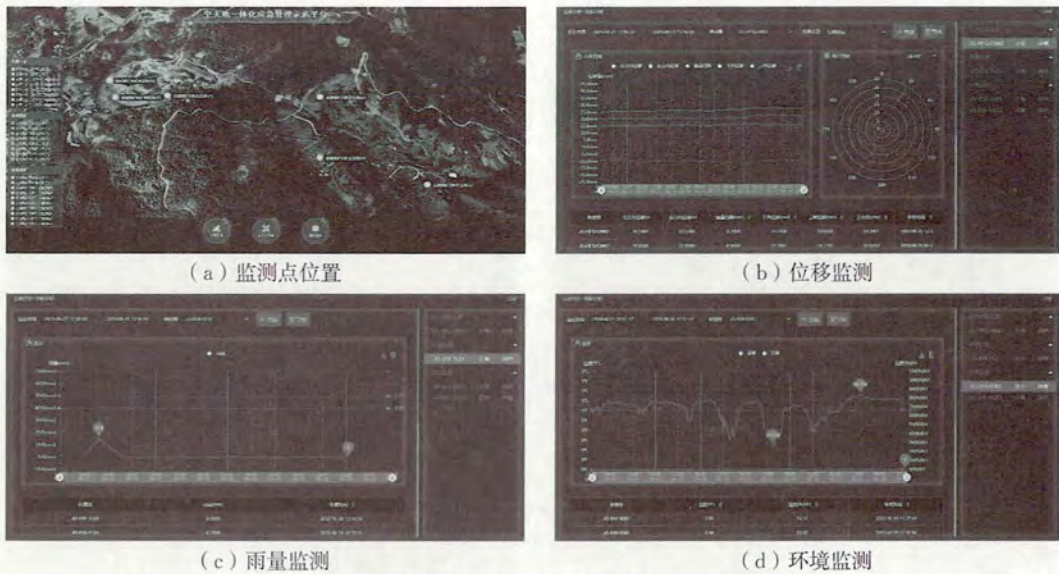


图4 达州某煤矿部署的北斗+N实时地质灾害监测系统

3 结 语

本文针对当前地质灾害监测工程应用中存在的问题,如卫星遥感、无人机航测等现代测绘技术具有的种种限制,时效性难以保证,基于北斗等传感器的实时监测系统部署选点没有详细的实施标准规范,过于依赖工程技术人员经验,部署成本和效果难以量化控制等,提出了基于天空地多层次观测的地质灾害识别监测方法。该方法结合了现代遥感、测绘技术和北斗高精度形变监测技术的优势,引入专家打分评估法,针对具体的地质灾害隐患点,建立量化评估标准,从而使隐患识别拥有较强的目的性和可操作性,可以在现实工程实践中指导监测设备部署选点。

在四川多个煤矿的实际应用,证明了该方法的可行性。下一步将继续对监测点位采集的监测数据进行长期分析,以验证本文方法的精确性,并对西方算法进行改进。

参考文献:(略)

作者简介:吴雨,男,1983年生,工程师,主要从事卫星导航与位置服务及三维图像处理方面的技术研究和产品研制。

高频岸基 GNSS 监测站探测海面风速研究*

刘 奇,张双成,刘 宁,王丽霞,马中民

(长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘 要:基于多路径效应的 GNSS-IR 遥感技术的出现,使得岸基 GNSS 测站可以作为一种全新的潮位监测补充手段。当前 GNSS-IR 技术在海洋监测中的应用局限于潮位监测,应用相对单一。事实上,之前的研究仅利用了 SNR 序列中干涉信号的主体部分,忽略了其高频振荡细节部分的潜在价值。基于此,本文首先通过仿真实验,发现海浪波动的信息可以有效地被记录在 SNR 序列中,其表现为环绕相干信号的高频小幅振荡,并且海浪的波动幅度变化与相干信号的高频振幅变化保持一致;其次提出利用高低频 SNR 数据组合求取相干信号的高频振荡序列的方法,并利用实测高频数据进行对比验证,发现干涉信号的高频振幅与风速的大小有着良好的一致性,相关系数为 0.47,并且频率越高、频率差异越小的组合所获取的 SNR 高频振荡序列与风速的相关性越高。实验研究结果表明,GNSS-IR 技术不仅可以用于海面测高,基于高频 GNSS 数据的 GNSS-IR 技术还具有探测海面风场和浪高的潜在优势,因此极大地扩大了岸基 GNSS 在海洋环境监测领域的应用。

关键词:GNSS-IR;SNR;风速;阵风;海平面

1 引 言

在全球气候变暖,海平面逐步上升,且极端天气频发的背景下,基于全球导航卫星系统(GNSS)的反射信号技术在海洋环境监测上发挥着越来越多的作用,并可以提供多种有关海洋环境参数的监测结果。随着全球导航卫星系统的迅速发展,GNSS-R 技术可以提供更精准和更全面的监测产品。

利用 GPS 反射信号进行海面测高的概念于 1993 年提出,在随后的 20 多年中,许多学者就 GNSS 反射信号进行了大量的研究。当前的研究方向分为两种:一种是基于相位延迟的双天线反射(GNSS-R)技术,另一种是基于信噪比(SNR)观测值的单天线干涉反射(GNSS-IR)技术。GNSS-R 具有多种作业模式,并可以应用于海面测风、海面测高、海冰探测、海洋盐度、土壤湿度探测及移动目标探测等。GNSS-IR 以地基作业模式为主,可用于土壤湿度、雪深、植被变化、火山喷发、海面高度等地表环境监测,其在海洋环境监测方面则以测高为主。利用岸基 GNSS 测站进行潮位监测可以获得厘米级的监测精度。基于 GNSS-IR 获取的长周期潮位变化,还可以求取平均海平面的变化趋势和潮波系数。利用北斗卫星导航系统同样可以获取区域潮位高度变化。利用小波分解等方法准确获取干涉信号,则可以在一定程度上提升 GNSS-IR 监测结果的稳定性。

对于海面风场的研究,基于 GNSS-R 技术的进展相对较多,其监测精度可达 2 m/s,而 GNSS-IR 技术对于海面风场的监测研究目前尚未开展。基于此,本文首先从高频 SNR 序列着手,通过仿真实验了解 SNR 高频振荡序列与海面波动的关系,再利用实测数据对比检验 SNR 高频振荡的幅值和海面风速大小的关系,确定最优组合,最后利用长周期的 GNSS 数据反映对应时段风速大小的变化。

2 理论与仿真

当大地测量型接收机布设在海岸边时,其接收的是直射信号和经由海面反射的反射信号所组成的混

* 基金项目:国家重点研发计划(2019YF1509802);陕西省自然科学基金(2020JM-227);国家自然科学基金(41104019)

合信号,如图1所示。多路径效应是GNSS高精度定位的主要误差,它与反射面的结构和电介质参数密切相关。当卫星截止高度角较低时,GNSS接收的反射信号是右旋极化的,这时,具有相同频率的反射信号与直射信号会发生干涉现象,这一现象主要反映在SNR的变化上。在截止高度角较低时,这种干涉信号会比较明显,因此通常利用高度角较低的SNR观测值进行潮位监测。

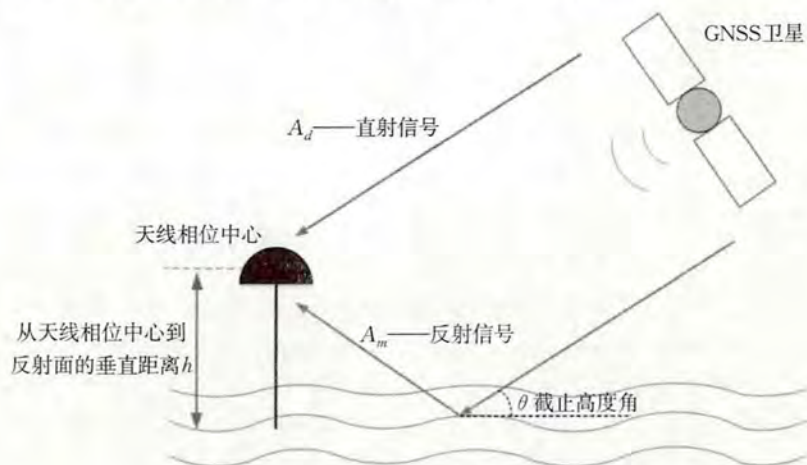


图1 GNSS反射信号原理

2.1 理论

多路径效应发生时,接收机记录的混合信号是直射信号和反射信号的矢量和,因此SNR可描述为

$$SNR = A_d^2 + A_m^2 + 2A_d A_m \cos\varphi \quad (1)$$

式中, A_m 为多径反射信号的振幅, A_d 为直射信号的振幅, φ 为两信号间的相位差。SNR序列可以分为两部分,以直射信号为主导的趋势项部分和两种信号干涉形成的振荡序列。由于截止高度角低时多路径效应严重,所以在SNR序列的两端,振荡序列表现得相对明显。移除SNR趋势项后,残差序列遵循以下关系

$$dSNR = A \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} x + \varphi\right) \quad (2)$$

式中, A 是残差序列的振幅, λ 为载波波长, $x = \sin\theta$, h 为天线相位中心到水面的垂直距离, φ 为相位差。可以通过对SNR残差序列进行频谱分析获取其频率 f ,再根据 $f = 2h/\lambda$ 获取海面变化。事实上,本文仅仅使用了残差序列的主体部分,也就是类似于余弦函数的振荡趋势,如图2所示。

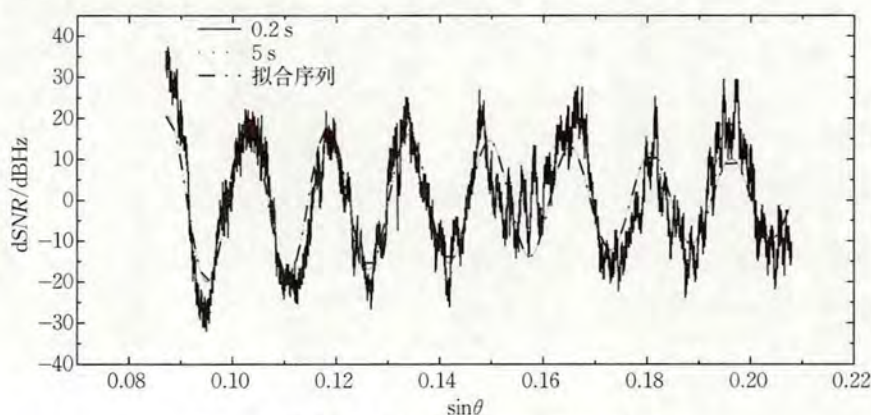


图2 不同采样频率的SNR残差序列及拟合序列

通过观察实测数据,可以发现SNR残差序列并不是完全保持稳定的余弦变化,而是有着很多类似于毛刺状的高频振荡序列围绕在主体趋势上。这部分高频振荡信号并没有在之前的研究中得到分析和运用,而是仅作为观测噪声不予处理。在图2中,比较同一颗卫星不同采样率的SNR残差序列,可以发现高频数据比低频数据的高频振荡信号更多,其振幅更大,将整个低频率序列都包裹在高频率序列中。基于此,本

文提出一个假设:高频 SNR 残差序列中的高频振荡信号部分是由海浪波动引起的,位于海面上的卫星信号反射点受到不断变化的海浪影响,随着海面上下波动,将这种波动信息记录在 SNR 观测量中。由于低频数据的采样率相对较低,不能记录这种连续的波动信息,所以其 SNR 序列相对平稳,它所包含的高频振荡序列相对收敛且平稳。

2.2 仿真实验

在之前的研究中,GNSS-IR 仅被用于海面测高,但是通过对比不同频率的 SNR 残差序列,可以发现高序列中含有较多且振幅较大的类高频信号。因此,尝试通过仿真实验探究这种高频振荡序列是否是海浪的小幅度且高频的变化引起的。首先,利用式(2)重构 SNR 残差序列,假定海面是理想状态下的绝对静止状态,设定一个固定的天线相位中心到水面的垂直距离 h ,构造 SNR 残差序列。然后在先前高度的基础上,加入一个类似余弦函数的高频小幅振荡信号 Δh ,对比两者的差异。

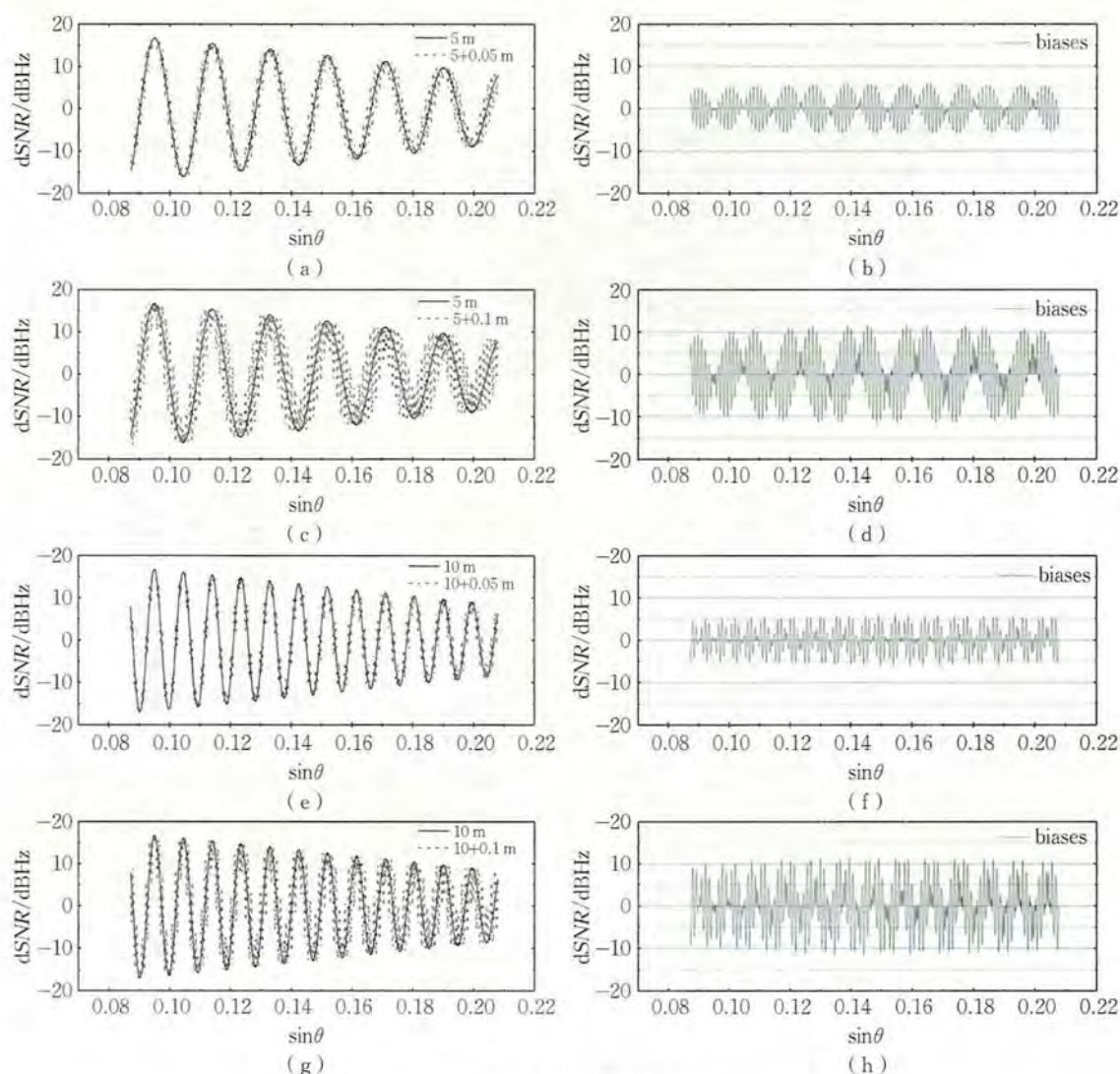


图3 不同仿真策略的仿真结果

在仿真实验中,先将高度 h 分别设为 5 m 和 10 m,可以发现静态水面时的 SNR 相干信号是一个光滑且振幅逐渐变小的余弦函数,两者的区别在于高度越高,相干信号的频率越高,波形越密集。但是加入类似正弦函数的波浪信息 Δh 后,相干信号就变得比较粗糙,出现如图 2 所示的高频振荡序列,将不加海浪波动的相干信号包裹在其中。同时可以看到不论站高有多高,在加入振幅为 0.05 m 的海浪波动后,尽管残差序列的频率和波形有差异,但是两种相干信号相减所获得的残差序列的振幅都是一样大的。不管是站高 5 m 或者 10 m,在将波浪波动的幅度扩大为 0.1 m 后,残差序列的振幅同样变大为 10。这个结果

表明,海浪波动可以触发相干信号出现高频振荡序列。仿真实验中只考虑了加入波浪的情况,忽略了地形、观测噪声等其他干扰项(这些也会在相干信号引入振荡偏差),但需要指出的是,风是引起海浪的主要原因。上述仿真实验确切地指出了海浪的变化可以在相干信号中加入高频振荡,并且海浪的振幅可以量化影响高频振荡的幅值,因此可以基于两者间的联系开展海浪及海面风速探测的研究。

3 实验分析与讨论

为了探讨使用高频振荡序列探测海面风速的可行性和准确性,使用了位于美国华盛顿的星期五港湾的 SC02 站观测的数据。图 4 显示了 SC02 站的观测环境和位置。该站配备了 TRIMBLE NETR9 双频大地测量型接收机和扼流圈天线,距 SC02 站约 359 m 处存在一个潮汐测量站,但该潮汐测量站提供的 6 分钟采样间隔的潮汐数据不能满足由风引起的实时高频海浪信息的实验数据需求,因此将风速数据作为参考数据。



图 4 SC02 站的观测环境和位置

SC02 站提供了不同采样率的观测数据,其中 0.2 s 的高频数据仅有几天,不能使用较长观测时长的数据进行对比分析。因此,首先利用 0.2 s 的单天数据分析高频 SNR 序列中的高频振荡序列与风速的关系。在仿真实验中,采用的策略是利用加入海浪时的 SNR 干涉信号减去静态水位时的 SNR 干涉信号来获取高频振荡部分,但是在实测数据中,真实无偏差的瞬时高度是无法获取的,而且受不同潮波的影响,平均海面还存在缓慢的变化。因此,通过公式拟合获得理想状态下的相干信号,再与实测数据相减获得序列是含有较大误差的。这个序列不仅含有高频信息,还有相干信号与拟合序列间的偏差,而这个偏差则会改变高频振荡序列的幅值。所以,利用不同采样率的 SNR 序列可以组合求取两者间的偏差,从而获得高频振荡序列。由于采样率较高,更多反射点随海浪波动而变化的信息被记录在高频数据中,这种小幅振荡会更加密集详细地展现在 SNR 残差序列中。而低频数据仅仅记录了极小部分对应时刻下的海浪变化,因此无法记录波浪的整体变化信息。通过两者相减这种方法,可以保证相干信号的主体部分不做任何改动,在这个基础上通过损失掉极小部分的高频信息可以将高频振荡部分从 SNR 干涉信号中提取出来。

为了验证相干信号中的高频振荡序列和风速的关系,采用 2017 年第 233 天的不同采样率数据组合,相减获取高频振荡序列。对比不同组合获取的高频振荡序列和风速的关系,可以验证两者间的联系以及确定获取高频振荡序列的最优组合。本文分别利用采样间隔为 1 s、5 s、15 s 和 30 s 的数据相减,0.2 s 采样间隔的数据与 1 s、5 s 和 15 s 的数据相减,再选取残差序列中振幅最大的 100 个极大值,求其平均值,以此作为序列的幅值。求取不同组合获取的 SNR 振荡序列和风速的相关性,结果如表 1 所示。

表 1 不同组合下高频振荡序列与风速的相关系数

组合类型	SNR (1~5 s)	SNR (1~15 s)	SNR (1~30 s)	SNR (0.2~1 s)	SNR (0.2~5 s)	SNR (0.2~15 s)
阵风风速	0.318 6	0.245 2	0.334 8	0.431 2	0.241 6	0.128
平均风速	0.316 9	0.253 5	0.331 5	0.430 8	0.258 5	0.146 8

验潮站观测了平均风速(wind speed)和阵风风速(gusts speed)的观测值。通过相关性统计发现,高频振荡序列的振幅与阵风的相关性相对更好。这些组合中,0.2 s/1 s 组合获取的 SNR 高频振荡序列与阵

风风速的相关性最高,这也说明利用高频 SNR 数据可以在一定程度上反映风浪和风速的变化。较低的采样间隔使反射点随海浪上下波动的信息被完整地记录在 SNR 数据中,而这种波动则表现为干涉信号的高频波动。1 s 采样数据获得的高频振荡与风速的相关性略差,这是因为其采样率相对较低,海浪的波动变化信息并不能完全被记录下来,其所获取的 SNR 高频振荡序列中海浪信息相对较少,而随机噪声等也会混杂其中,从而导致产生偏差。

为了更好地比较干涉信号中高频振荡序列的振幅与风速的关系,在此给出阵风风速与各个组合的对比,如图 5 所示。很明显可以看出,0.2 s/1 s 组合的振幅变化与风速的大小相关性最好。在 11~16 h,风速较小,其振幅相对较小;在 19~22 h,风速迅速增大,振幅也随之变大,在这期间风速出现了小幅度波动,而振幅也很敏感地给出了一致的变化;在 18 h,振幅出现了一个很大的异常值,这在所有组合中都存在,所以这个误差可能属于系统噪声,其量级较大,掩盖了真实的海浪信息,导致其与风速的量级完全不符。同时观察振幅的最小值,可以发现,随着组合间采样间隔的增大,振幅的最小值也逐渐增大,0.2 s/5 s 组合的振幅增加至 11,0.2 s/15 s 组合的振幅则从 5 增加到 8,而振幅与风速的相关性也逐渐降低。笔者认为随着对比数据采样率的逐渐降低,高频数据与低频数据的一致性逐渐降低,即组合获取的高频振荡序列中不仅有高频毛刺,还加入了相干信号主体间的细小偏差,而这个则会明显地提升振荡序列的振幅,甚至将高频振荡信号抵消或者过分放大。

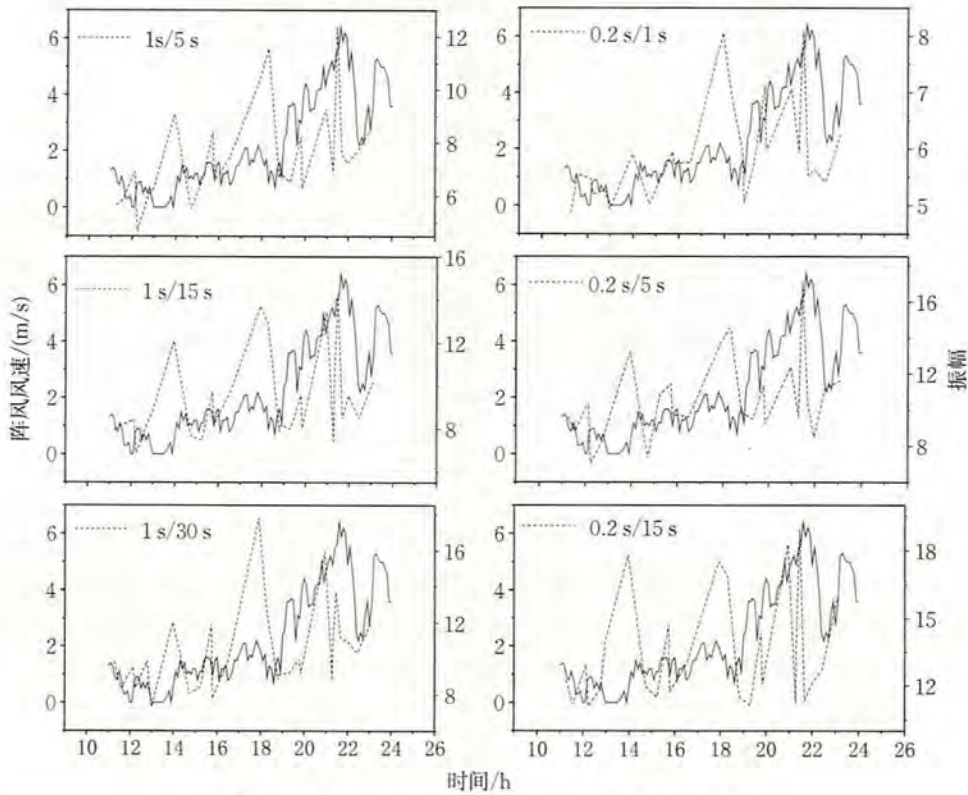


图 5 两种组合的高频振荡序列的振幅与阵风风速

上述实验仅利用了 13 h 的数据进行比较,尽管两者有着很好的一致性,但是由于数据的跨度太短,不能证明这种方法具有通用性及时效性,因此采用 2017 年 36 天的数据进行一个长周期的对比,如图 6 所示。其中 SNR 的 1 s/5 s 的组合与平均风速和阵风风速的相关性分别为 0.457 1 和 0.469 8,也可以看出振幅对阵风更为敏感。

从图 6 中可以看出,SNR 高频振荡序列的振幅与风速有着良好的一致性。当风速较小时,振荡序列的振幅相对收敛,即使风速小幅增加,振幅仍然可以给出很好的回应;当风速迅速提升时,振幅也会迅速增大,始终和风速的变化保持一致。在 330~335 天中,局部风速最大的时候,部分振幅的峰值变得异常大;而在 364 天附近,在风速异常大的时候,振幅的大小仅表明该天风速中等。出现这样的结果,一方面可能

是 SNR 高频振荡部分对于较大风速的敏感较差,另一方面可能是高风速时,海浪的变化更为迅速剧烈,而 1 s 的数据并不能将这种变化信息完整记录下来。SNR 数据中的高频振荡部分是由反射点在海面的波动而造成的,因此相干信号中的高频振荡与海浪有着更好的相关性。引起海浪波动的原因有很多,而风速仅是其中影响较大的一个。

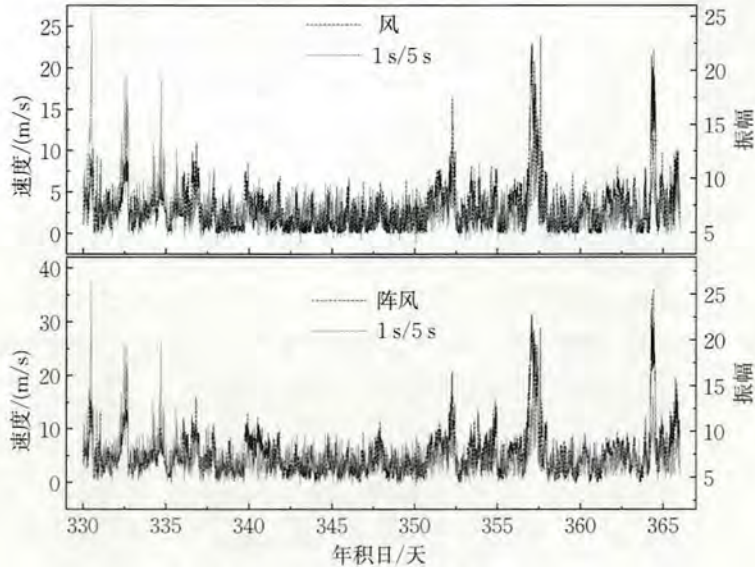


图 6 1 s/5 s 组合振幅与平均风速和阵风风速的时间序列

通过上述实验,可以发现高频 SNR 序列中所包含的高频振荡序列与风速有着较好的相关性,反射点在海面的波动信息被完整地记录在高频 SNR 观测量中。通过分离干涉信号中的高频振荡序列,求取其最大振幅,从而反演海浪波动和海面风速的大小是可行的。这种方法对于低风速有着很好的相关性,而因为海浪随风速变化的特性,使得在高风速的情况下,虽然表现得很敏感,但是不够精确,容易出现量级大小不符合的现象。通过对比不同组合获得的高频振荡序列的振幅和风速的关系,发现无论是平均风速还是阵风风速,频率相近的高频组合获取的振荡序列有着更好的收敛性和敏感性,与风速的变化保持着高度一致。此外,验潮站和 GNSS 观测站相距 359 m,风速可能有所偏差,如有并置的风速数据,相信可以有更好的结果。

4 结 语

本文研究结果突破了 GNSS-IR 在海洋环境监测的局限性,证明了 GNSS-IR 用于反演海面浪高和海面风速的可行性。高频 GNSS 数据保证了反射点在海面波动信息被完整地记录在 SNR 观测数据中,通过对 SNR 干涉信号中的高频振荡部分进行分析,可以有效地获得海面的波动情况及风速的大小。由于高频 SNR 振荡序列的振幅变化与风速变化保持一致,所以可将这种高频振荡的振幅作为评判海面粗糙度的一个重要指标。当前的研究仅给出了相关性,而没有给出风速和振幅之间的量化关系,但是利用 GNSS-IR 进行海面浪高和风速的监测确是真实可行的,在后续的工作中可开展两者间的量化关系研究。

基于 GNSS-IR 技术,用高频 GNSS 数据可以更好地进行动态海面改正,提升潮位监测的时空分辨率,而且可以获取海面的波浪变化信息及风速变化,从而集测高、测风和测浪等多项功能于一体,使岸基 GNSS 测站可以输出更多种类的产品,这也使 GNSS-IR 在海洋环境监测中扮演一个更为重要的角色。上述的研究都是在高频 GNSS 数据的基础上开展的,所以建议岸基 GNSS 测站尽可能给出高频的观测数据,从而保证这些工作的开展,而这些研究也会极大地丰富 GNSS 测站在海洋环境监测中的应用。

参考文献:(略)

作者简介:刘奇,男,1994 年生,博士生,主要研究领域为 GNSS 遥感技术及其应用。

北斗卫星搜救地面测试验证系统综述

尚丽娜¹, 陈付亮¹, 何泽骅^{2,3}

1. 航天恒星科技有限公司, 北京 100086;
2. 中电科(宁波)海洋电子研究院有限公司, 浙江 宁波 315040;
3. 中国交通通信信息中心, 北京 100011)

摘要:在北斗中轨卫星上搭载搜救载荷,推动北斗卫星加入国际搜救卫星组织,有利于促进北斗全球化应用,提高我国搜救服务水平,展示和发展我国卫星导航及搜救事务软硬实力。根据国际搜救卫星系统的相关要求,空间设备提供方应建设相应的地面测试验证系统,保障搜救载荷的在轨测试和入网测试,能对搜救载荷进行长期、连续、准确的监控。

关键词:COSPAS-SARSAT; MEOSAR; 北斗; 中轨搜救; 测试验证; 搜救载荷

1 引言

全球卫星搜救系统(COSPAS-SARSAT, C/S)由加拿大、法国、美国和苏联联合建立,在全球范围内提供公益性的搜索与救援(SAR)服务。COSPAS-SARSAT 与联合国(UN)、国际海事组织(IMO)、国际民用航空组织(ICAO)和国际电信联盟(ITU)有长期合作关系,是参与国家最多、用户数量最庞大的国际搜索与救援组织。国际海事组织管理下的各种海上船只和国际民用航空组织管理下的民航客机,以及很多个人用户均装备了遇险信标(distress beacon)。在遇险情况下,信标通过主动或被动发射 406 MHz 无线电求救信号,并由全球卫星搜救系统获取遇险信标信号,解算遇险位置信息并开展救援任务。目前,COSPAS-SARSAT 已成功地应用于世界范围内大量的遇险搜救行动中,在人道主义救援领域起到了极其关键的作用。

北斗卫星导航系统是我国独立自主建设的全球性卫星导航系统。经交通运输部总体协调和全力推进,2018年2月,COSPAS-SARSAT第59次委员会会议同意将北斗卫星导航系统纳入全球中轨卫星搜救系统,并批准了在《COSPAS-SARSAT 406 MHz MEOSAR 实施计划》(C/S R. 012)等相关文件中增加北斗卫星导航系统的修订,标志着北斗系统正式加入国际搜救卫星系统,使我国具备了从“地面设备提供国”升格为“空间设备提供国”的基本条件,这有利于提高全球范围内的人命搜救和财物救援能力,有助于北斗系统国际化发展,对提高北斗系统国际影响力有积极推动作用,有效提升我国大国形象。

为保证中轨卫星搜救系统良好运行,需要及时在全球中轨卫星搜救地面系统中发布卫星状态和搜救载荷状态。为了规范此方面的要求,2016年至今,COSPAS-SARSAT发布了多个关于MEOSAR地面测试验证监控系统的相关文档,明确要求各“空间设备提供国”负责各自载荷设备的验证、测试、入网、运维等工作。美国、俄罗斯和欧盟均已按照以上相关技术要求,针对GPS、GLONASS和Galileo等系统建设了中轨卫星搜救地面测试验证系统。按照国际搜救卫星组织相关决议要求,北斗系统也建设了相应的地面测试验证系统,保障搜救载荷的在轨测试和入网测试,能对搜救载荷进行长期、连续、准确的监控。

2 系统组成

北斗卫星搜救地面测试验证系统可同时对4颗北斗中轨卫星的搜救载荷能力进行测试验证,其分系统包括天线跟踪分系统、信道分系统、信号处理分系统、辅助测试设备和综合保障设备等,如图1所示。

天线跟踪分系统按照跟踪计划完成对所携带搜救载荷的北斗中轨卫星的程序跟踪,并对卫星所搭载

的搜救载荷转发的 L/S 频段的射频遇险信标信号进行接收、放大处理,并将放大后的射频信号送往信道分系统进行放大变频处理。

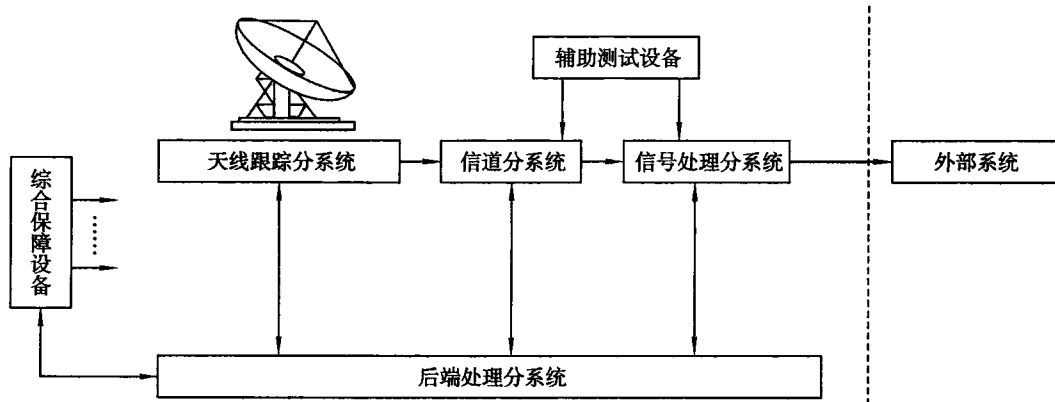


图 1 北斗卫星搜救地面测试验证系统

信道分系统由低噪声放大器、变频器、中频切换矩阵等组成。其作用是接收天线跟踪设备发送的 L/S 频段射频信号,并进行放大、变频、矩阵切换等处理,最后将中频信号送往后端信号处理设备;对信号模拟器输出的 70 MHz 中频信号进行变频、功率放大等处理,并将产生的射频信号送给天线跟踪设备。低噪声放大器输出的信号也支持对搜救载荷的在轨测试和入网测试。

信号处理分系统(SPS)由信号处理设备(SPE)组成,信号处理设备接收来自信道分系统的 70 MHz 中频信号,完成对信标信号的检测、解调、解码、参数(到达时间(TOA)和频率信息(FOA))估计、C/N0 测量等,并将相关的信息打包发送给定位服务器做进一步定位处理。

后端处理分系统(BES)是定位处理中心与设备监控中心,其主要任务是接收信号处理分系统的处理结果,利用定位方程对信标位置进行定位解算和定位改进,并进行定位精度估计;利用跟星策略制定跟星计划,对天线控制单元下达跟踪指令,控制天线进行卫星跟踪;监视站内各设备和系统的工作状态等。

辅助测试设备由频谱仪、信号发生器、网络分析仪、合成孔径雷达(SAR)信号模拟器(SAR-SS)、SAR 测试信标设备(SAR-TBE)组成。在轨验证阶段前,它为系统集成联试过程提供必要的测试手段以验证系统的功能及技术指标,同时提供故障诊断功能。

综合保障设备为系统的日常运营提供基础保障,主要包括时统设备、外部网络通信设备及供电保障设备。

当进行测试时,测试信标发出 406 MHz 的遇险信号,被北斗卫星接收,北斗卫星上的 SAR 转发器将此信号转换成 1 544 MHz 进行转发,北斗卫星搜救地面测试验证系统接收至少 4 颗卫星转发的同一个遇险信标信号,并根据不同卫星转发的属于同一遇险信标信号到达北斗卫星搜救地面测试验证系统的时间信息(TOA)和频率信息(FOA),解算出遇险信标位置等相关信息,并通过与测试信标的真实位置进行对比,验证信号是否匹配。

北斗卫星搜救地面测试验证系统的信息流如图 2 所示。

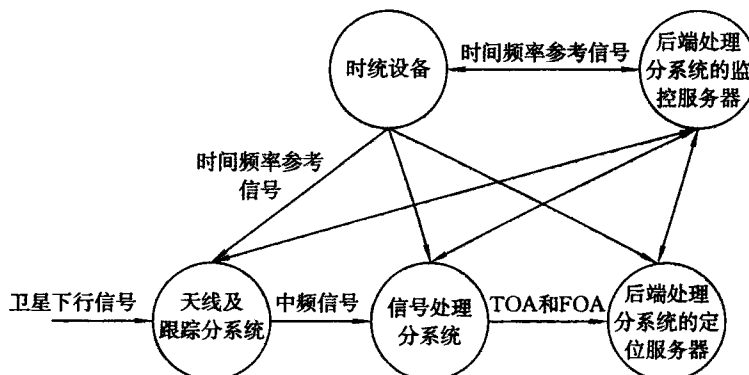


图 2 北斗卫星搜救地面测试验证系统信息流

3 搜救信号定义

COSPAS-SARSAT 用户信标分为一代信标和二代信标两种,这两种信标的编码方式和体制完全不同。目前绝大多数用户信标为一代,所以本文以一代信标为例。

一代信标发射的信号周期均值为 50 s ($47.5\sim 52.5\text{ s}$),发射信号宽度在短信息时为 $440\text{ ms}\times(1\pm 1\%)$,长信息时为 $520\text{ ms}\times(1\pm 1\%)$ 。信号信息速率为 $400\text{ bit/s}\times(1\pm 1\%)$ 。信号分成两部分,前 $160\text{ ms}\times(1\pm 1\%)$ 为无调制载波,对于短信息,后 $280\text{ ms}\times(1\pm 1\%)$ 为 112 位数据段;对于长信息,后 $360\text{ ms}\times(1\pm 1\%)$ 为 144 位数据段。数据段的前 15 位均为 1,作为位同步头,接着是 9 位帧同步头,帧同步头后面 1 位表示信息长短,“1”表示长信息,“0”表示短信息,剩余位(长信息 119 位,短信息 87 位)为信息内容。

先对发射信号的数据进行曼彻斯特编码,再采用残留载波归零二相编码形式进行处理,调制载波相位相对于无调制载波相位为 $1.1\text{ rad}\pm 0.1\text{ rad}$,如图 3 所示,这是一种理想的相位跳变情形,相位的变化在瞬间完成。

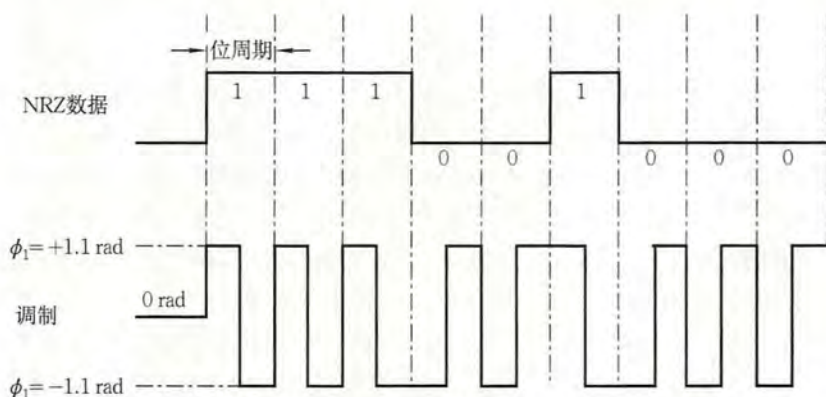


图 3 数据编码和调制

图 4 给出了仿真条件下调制信号的时、频域形式。

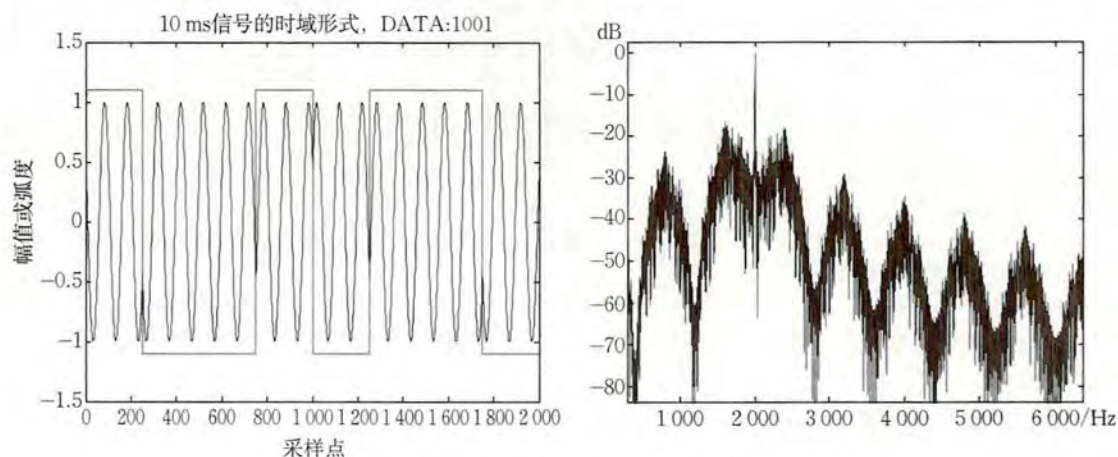


图 4 仿真的调制信号时、频域形式

4 搜救信号定位处理方法

信标的被动定位处理方法将使用时间延迟与频率法。它们在目标定位方面具有很大的应用价值,国内外有很多学者致力于此方面的研究,目前已经取得了很多重要的成果。时延与频率估计方法种类繁多,

从性能上也各有千秋,在不同的应用背景下需要采用不同的估计方法,以达到最好的估计效果。

时间延迟估计是 20 世纪 80、90 年代国际信号处理研究的热点问题,经过 20 多年的发展,时间延迟估计算法已经得到了比较充分的研究,并在某些研究难点上继续发展,如高分辨率时延估计、多径多源时延估计等。总的来说,时间延迟估计基本算法及其改进算法如图 5 所示。

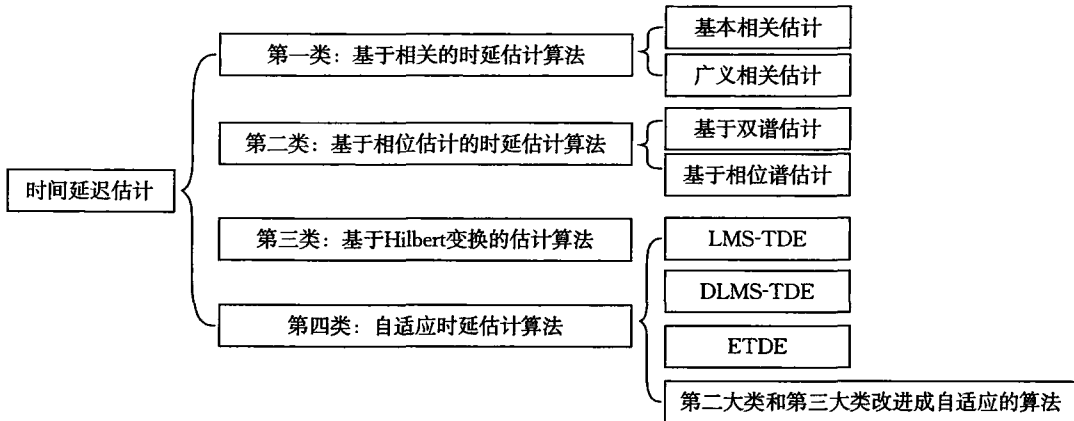


图 5 时间延迟估计算法分类

图 5 中的第一类算法是一种较早提出的时延估计算法。其优点是算法简单、容易理解,对它的研究最为充分;其缺点是计算量相对较大。第二类算法是把时间延迟估计问题转化为相位谱估计问题,双谱估计是从高阶统计量的角度处理的,而相位谱是从二阶统计量的角度处理的。双谱估计的算法是图 5 所有算法中计算量最大的一种。第三类算法把波峰位置的搜索转化为过零点的搜索,是有利于在相关峰平坦的条件下得到较好结果的时延估计。第四类算法是计算量相对较小的算法,其计算原理有基于自适应滤波器的、直接时延估计迭代的,也有基于第二大类和第三大类改进而成的。

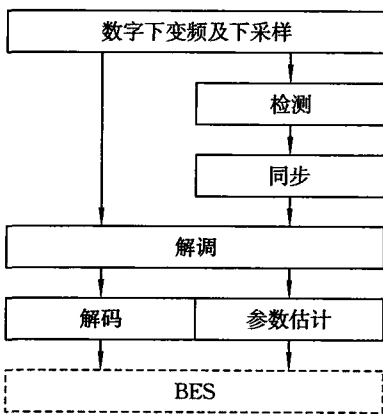


图 6 信号处理设置的算法

在信号处理设备中,首先需要对输入的 70 MHz 中频信号进行变频,变换采样机采样率,然后在合适的采样率进行信号检测,一旦检测到信号,需要对信号进行帧同步和位同步处理,同步完成后进行信息的解调和解码,最后利用原始信号和解调信号进行参数估计,参数估计采用第一类算法。其信号流程及模块间的相互关系如图 6 所示。

5 测试验证方法

5.1 在轨测试方法

对搜救载荷进行在轨测试,需检查搜救载荷在轨工作情况,确保北斗卫星及搜救载荷在轨工作正常。主要测试内容有搜救转发器输入、输出特性,发射等效全向辐射功率(EIRP)等。

利用信号源发射上行单载波信号(一般为被测信道的上行中心频率),同时利用频谱仪读取卫星下行单载波信号的功率。按规定的步长调节信号源的输出功率,直至卫星转发器到达额定功率,从而得到被测信道的输入、输出特性,同时根据测得的转发器额定输出功率,对频谱仪读数,并综合考虑空间链路与接收设备损耗、校准参数的因素计算转发器的卫星 EIRP 值,测试方法如图 7 所示。

5.2 功能性验证方案

功能性测试利用北斗卫星搜救地面测试验证系统的通用和专用仪器设备进行,主要开展以下业务类测试:

(1)处理门限与系统冗余测试。测试单个处理通道,接收并处理得到有效/完整信标信息,确认通道的处理门限。

(2)干扰测试。通过搜救信号模拟器模拟遇险报警信号,信号源产生频带内的干扰信号,调整遇险报警信号和干扰信号的强度,测试处理通道的抗干扰能力。

(3)消息能力、消息传输时间测试。调整信标发射功率,记录每接收1个、2个、7个信标信号时,有效/完整消息的检测概率和处理时延。

(4)独立二维定位能力测试。通过测试系统的独立定位概率、独立定位精度,以及信标发射与处理完成之间的时延来评估系统的独立二维定位能力。

(5)信标信号的独立二维定位能力测试。通过计算系统接收信标信号的独立定位概率及独立定位精度,测试系统对于信标信号的二维定位能力。

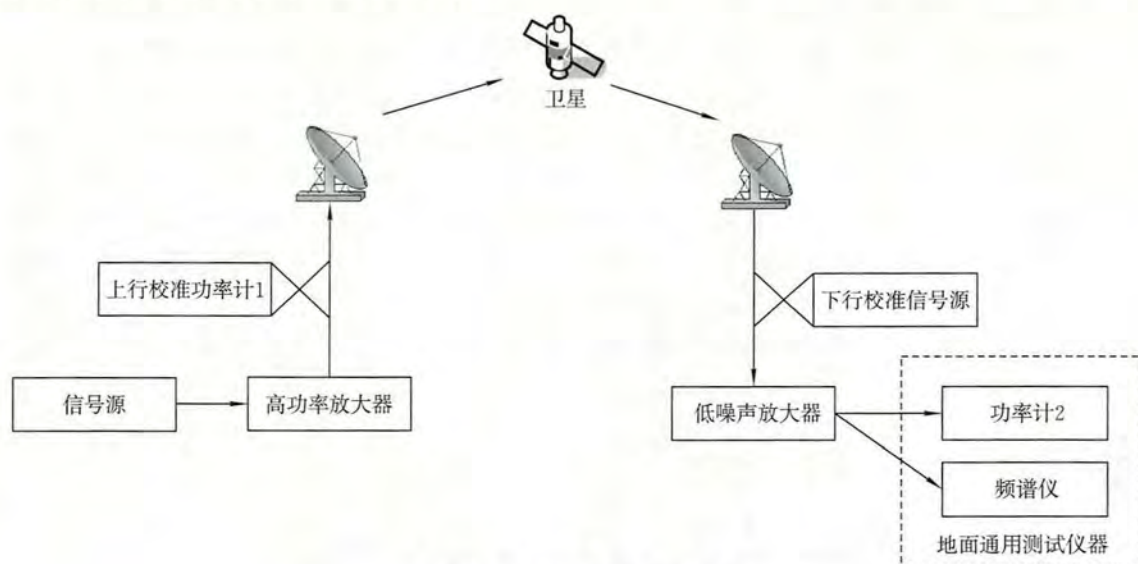


图7 搜救转发器在轨测试功能

6 结 语

本文主要介绍了北斗卫星搜救地面测试验证系统的构成及其承担的相关测试应用等。该系统将支撑北斗搜救载荷的正常运行,使载荷更好地服务于公益事业,推动北斗系统全球化应用的发展。

参考文献:(略)

作者简介:尚丽娜,女,1981年生,高级工程师,主要从事卫星应用方面的研究。

地球自转参数对北斗导航卫星轨道的影响及一致性分析

张龙平,周万振,于含章,田光才,龚宵雪

(航天宏图信息技术股份有限公司,北京 100195)

摘要:2020年6月23日,成功发射北斗三号最后一颗全球组网卫星,北斗三号全球卫星导航系统星座部署完成。地球自转参数(ERP)是卫星轨道确定和坐标转换的重要基础。本文给出精密定轨中ERP解算原理,对Xpole、Ypole、UT1-UTC施加多种组合不同大小的误差,进行14组实验,分析ERP对GEO、MEO、IGSO三类卫星轨道的影响;对Xpole、Ypole、UT1-UTC施加不同大小误差,进行30组实验,分析ERP和卫星轨道的一致性。结果表明,轨道和坐标转换随着ERP的误差增加而增大,当Xpole、Ypole、UT1-UTC同时存在误差时,引起的轨道积分误差最大,而ERP误差对积分过程影响甚微(误差100 mas和0.5 ms引起的误差为mm级);ERP参数中对卫星轨道坐标转换影响最大的是UT1-UTC,对Xpole和Ypole的影响相当;在此实验中ERP对轨道三维的影响最大达到m级,Xpole和Ypole对GEO卫星X和Y轴影响较小,UT1-UTC对GEO卫星轨道Z轴的影响较小,为mm级。

关键词:北斗三号;地球自转参数;轨道积分;坐标转换

1 引言

北斗三号全球卫星导航系统由我国自主建设、独立运行,并可以向全球用户提供全天候、全天时、高精度的导航、定位、授时服务。2018年12月27日宣布北斗三号基本系统建成并开始向全球提供服务;2020年6月23日,成功发射北斗三号最后一颗全球组网卫星,北斗三号全球卫星导航系统星座部署比原计划提前半年全面完成。整个系统空间段由24颗中圆地球轨道(MEO)卫星、3颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星、3颗地球静止轨道(GEO)卫星组成,除了可以提供基本导航和短报文通信外,还增加了精密单点定位、星基增强、国际搜救等服务,其卫星轨道的精度严重影响各项服务的应用。

地球自转参数(ERP)包括反映地球自转相对于地壳运动的极移变化参数(Xpole/Ypole)及其变化率(DXpole/DYpole),反映地球自转轴不规则特征(UT1-UTC),以及反映地球自转速率变化的日常变化参数(LOD)。地球自转参数是实现地心惯性坐标系与地心地固坐标系相互转换的重要参数和卫星轨道属于统一基准框架内产品,其精度和一致性对于坐标框架的建立维持及卫星导航系统服务具有重要意义。精密定轨过程在地心惯性坐标系进行,用户使用的轨道是在地心地固坐标系。如果在精密定轨时初始ERP精度不高,会导致惯性坐标系轨道出现系统性偏差,地心地固坐标的卫星位置也会出现厘米至米级的偏差,影响用户使用。国际GNSS服务组织从20世纪90年代就已开始研究GNSS技术确定地球自转参数,近几年国内外学者也对利用GNSS解算地球自转参数进行了大量研究和实验,但并未分析地球自转参数对导航卫星定轨的影响及卫星轨道与地球自转参数一致性的问题。

在精密定轨过程中,ERP对卫星轨道的影响主要为轨道积分和坐标转换。轨道积分,即ERP影响的摄动力模型,在积分中对轨道的影响;坐标转换,即在定轨过程中地心惯性坐标系与地心地固坐标系之间的坐标转换,即一致性问题。本文给出北斗卫星精密定轨中ERP解算的观测原理,对Xpole、Ypole、UT1-UTC施加多种组合、不同大小的误差,进行14组实验,分析ERP对GEO、MEO、IGSO三类卫星轨道的影响;对Xpole、Ypole、UT1-UTC施加不同大小的误差,进行30组实验,分析ERP和卫星轨道的一致性。

2 北斗卫星精密定轨中 ERP 解算原理

北斗卫星导航系统(BDS)精密定轨观测方程简写为

$$\rho_k = [(x_k - X_k)^2 + (y_k - Y_k)^2 + (z_k - Z_k)^2]^{\frac{1}{2}} + \Delta\rho_k \quad (1)$$

考虑到坐标框架转换,为了公式推导方便,将上式简写为

$$\rho_k = \bar{\rho}_k + \Delta\rho_k \quad (2)$$

式中, ρ 是第 k 历元卫星到测站间的观测距离, $\Delta\rho$ 是测量误差等效距离, $\bar{\rho}$ 是理论距离,其可以表示为

$$\bar{\rho}_k = |\mathbf{R}\mathbf{X}_s - \mathbf{R}\mathbf{X}_r| \quad (3)$$

$\mathbf{X}_s = [x_s, y_s, z_s]$ 和 $\mathbf{X}_r = [x_r, y_r, z_r]$ 为卫星和接收机在地心地固坐标系中的坐标, \mathbf{R} 为地心地固坐标系到地心惯性坐标系的旋转矩阵,得

$$\mathbf{R} = \mathbf{P}\mathbf{N}\mathbf{S}\mathbf{U} \quad (4)$$

式中, \mathbf{P} 为岁差转换矩阵, \mathbf{N} 为章动转换矩阵, \mathbf{S} 为地球自转转换矩阵, \mathbf{U} 为极移转换矩阵。日常变化 (θ_x) 和极移运动参数 (θ_x, θ_y) 都包含在 \mathbf{S} 和 \mathbf{U} 中,在进行定轨过程中估计 ERP 时,观测方程需要线性化,即

$$\rho_k = \bar{\rho}_0 + \frac{\delta\bar{\rho}_k}{\delta\theta_0} \Delta\theta + \Delta\rho_k \quad (5)$$

式中, $\bar{\rho}_0$ 是参考时刻 ERP 近似值, $\Delta\theta = [\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z]$, $\delta\bar{\rho}_k/\delta\theta_0$ 可以表示为

$$\frac{\delta\bar{\rho}}{\delta\theta_0} = \begin{bmatrix} \frac{\delta\bar{\rho}}{\delta\theta_{x_0}} & \frac{\delta\bar{\rho}}{\delta\theta_{y_0}} & \frac{\delta\bar{\rho}}{\delta\theta_{z_0}} \end{bmatrix} = -\frac{(\mathbf{R}_0\mathbf{X}_s - \mathbf{R}_0\mathbf{X}_r)^T}{\bar{\rho}_0} \mathbf{P}\mathbf{N} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_0 \frac{\partial\mathbf{U}}{\partial\theta_{x_0}} & \mathbf{S}_0 \frac{\partial\mathbf{U}}{\partial\theta_{y_0}} & \frac{\partial\mathbf{S}}{\partial\theta_{z_0}} \mathbf{U}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \mathbf{R}_0 、 \mathbf{S}_0 、 \mathbf{U}_0 为 ERP 初始值计算的地心地固坐标系到地心惯性坐标系的旋转矩阵。因此矩阵可简单

化处理,经过大量实验分析,忽略微小的影响, $\frac{\delta\mathbf{U}}{\delta\theta_{x_0}}$ 、 $\frac{\delta\mathbf{U}}{\delta\theta_{y_0}}$ 、 $\frac{\delta\mathbf{S}}{\delta\theta_{z_0}}$ 可以简写为

$$\frac{\delta\mathbf{U}}{\delta\theta_{x_0}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\frac{\delta\mathbf{U}}{\delta\theta_{y_0}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{\delta\mathbf{S}}{\delta\theta_{z_0}} = \begin{bmatrix} -\sin\text{GAST} & -\cos\text{GAST} & 0 \\ \cos\text{GAST} & -\sin\text{GAST} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \gamma(t - t_0) \quad (9)$$

式中, GAST 是格林尼治真恒星时; t 、 t_0 分别为观测时刻儒略日和参考时刻儒略日。

3 ERP 对北斗卫星轨道积分的影响

ERP 误差主要影响卫星轨道三个旋转轴的摄动加速度,考虑到对 GEO、MEO、IGSO 三类卫星的影响,进行了 14 组实验,每组实验采用 2017 年 299~305 天的数据,共 7 天。1~7 组测试方案如表 1 所示,分别对三类卫星在 Xpole、Ypole 上加 10 mas 的误差,在 UT1-UTC 上加 0.05 ms 的误差,在 Xpole 和 Ypole 上分别加 10 mas 和 10 mas 的误差,在 Xpole 和 UT1-UTC 上分别加 10 mas、0.05 ms 的误差,在 Ypole 和 UT1-UTC 上分别加 10 mas、0.05 ms 的误差,在 Xpole、Ypole、UT1-UTC 上分别加 10 mas、10 mas、0.05 ms 的误差。8~14 组测试方案如表 2 所示,方法类似,加的误差值略有不同,统计了 7 天的

平均值。两组测试精度如图 1 和图 2 所示。

表 1 1~7 组测试方案

卫星类型	Xpole /mas	Ypole /mas	UT1-UTC /ms	Xpole+Ypole / (mas+mas)	Xpole+UT1-UTC / (mas+ms)	Ypole+UT1-UTC / (mas+ms)	Xpole+Ypole+UT1-UTC / (mas+mas+ms)
GEO	10	10	0.05	10/10	10/0.05	10/0.05	10/10/0.05
MEO	10	10	0.05	10/10	10/0.05	10/0.05	10/10/0.05
IGSO	10	10	0.05	10/10	10/0.05	10/0.05	10/10/0.05

表 2 8~14 组测试方案

卫星类型	Xpole /mas	Ypole /mas	UT1-UTC /ms	Xpole+Ypole / (mas+mas)	Xpole+UT1-UTC / (mas+ms)	Ypole+UT1-UTC / (mas+ms)	Xpole+Ypole+UT1-UTC / (mas+mas+ms)
GEO	100	10	0.5	100/100	100/0.5	10/0.05	100/100/0.5
MEO	100	10	0.5	100/100	100/0.5	10/0.05	100/100/0.5
IGSO	100	10	0.5	100/100	100/0.5	10/0.05	100/100/0.5

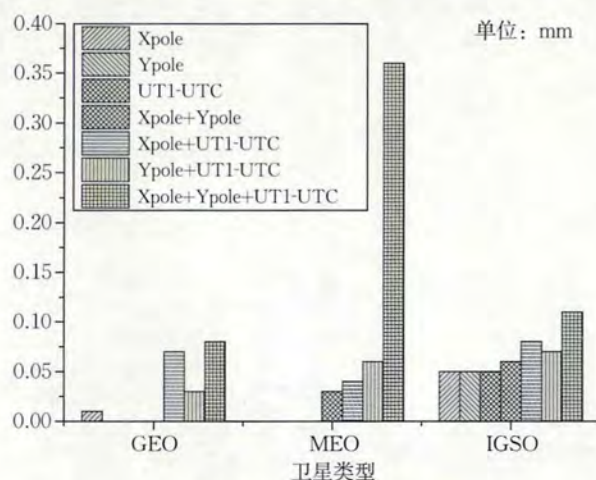


图 1 1~7 组测试精度

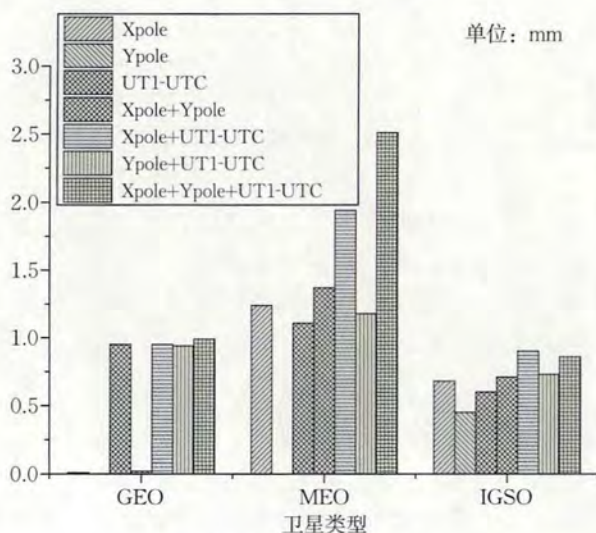


图 2 8~14 组测试精度

积分过程中轨道误差随着 ERP 的误差增加而增大;当 Xpole、Ypole、UT1-UTC 同时存在误差时,引起的轨道误差最大;Xpole、Ypole 对 GEO 卫星影响最小,几乎为 0 mm。但总体来讲,在测试范围内的 ERP 误差对积分过程影响甚微(误差 100 mas 和 0.5 ms 引起的误差为 mm 级),因此在精密定轨过程中,一定精度内的 ERP 对轨道积分的影响可以忽略不计,采用短期初始 ERP 基本可以满足精密定轨需求。

4 ERP 与北斗卫星轨道一致性分析

精密定轨过程中,ERP 用于地心惯性坐标系与地心地固坐标系之间的坐标转换,为了充分说明 ERP 与轨道误差之间的关系,进行了 30 组实验,每组实验采用 7 天的数据,30 组实验方案如表 3 所示。其中 Xpole 和 Ypole 分别设置 0.1~1.0 mas 各 10 组实验,UT1-UTC 设置 0.1~1.0 ms 各 10 组实验,测试精度如图 3 至图 5 所示。

表 3 8~14 组测试方案

参数	误差量									
Xpole/mas	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Ypole/mas	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
UT1-UTC/ms	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

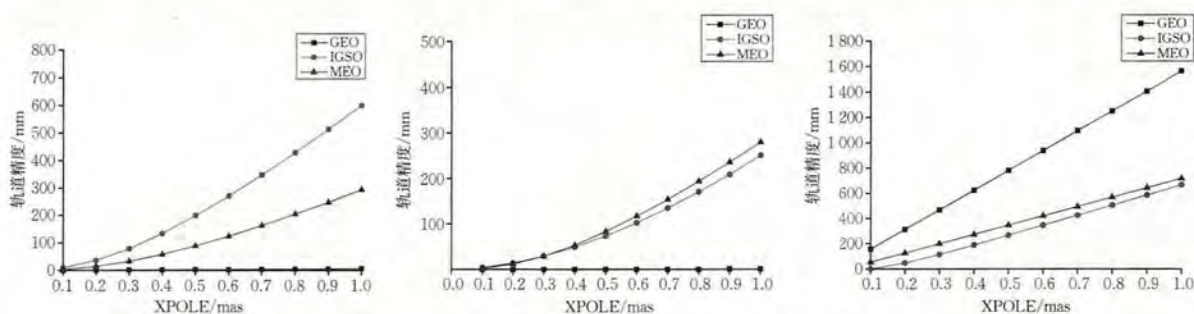


图 3 Xpole 对轨道 X、Y、Z 三个方向的精度影响

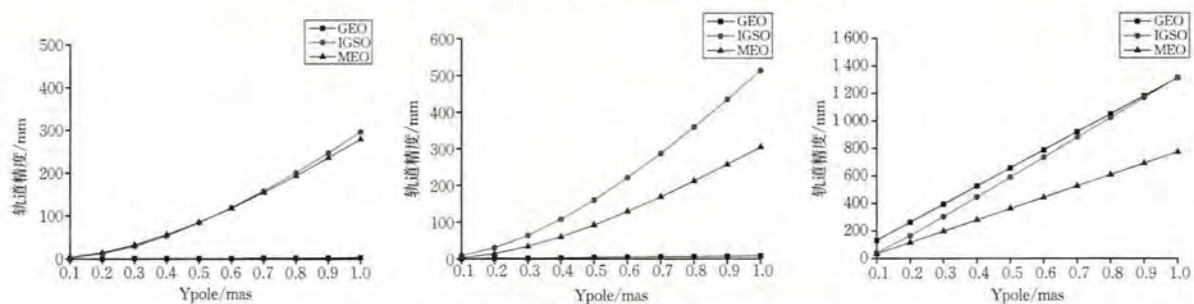


图 4 Ypole 对轨道 X、Y、Z 三个方向的精度影响

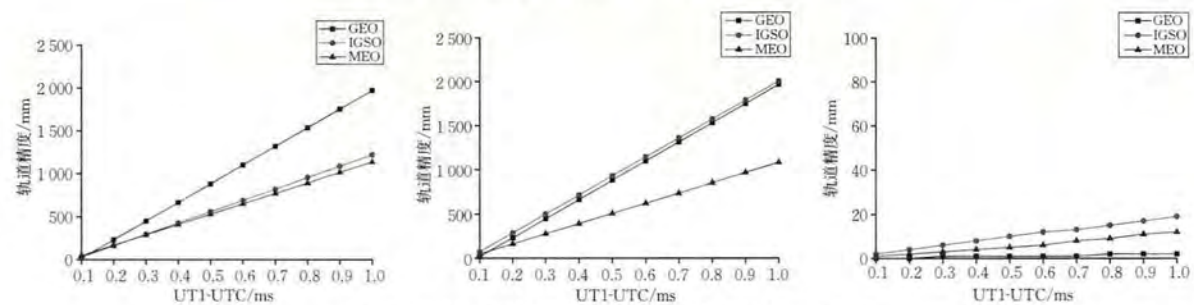


图 5 UT1-UTC 对轨道 X、Y、Z 三个方向的精度影响

随着 ERP 施加误差的增大,对卫星轨道的影响也逐渐增大。ERP 参数中,对卫星轨道坐标转换影响最大的是 UT1-UTC,对 Xpole 和 Ypole 的影响相当。Xpole 和 Ypole 对 GEO 卫星的 X 轴和 Y 轴影响很小,为 mm 级,但对 Z 轴影响很大;UT1-UTC 对 GEO、MEO、IGSO 卫星的 X 轴和 Y 轴影响很大,但对轨道 Z 轴的影响最小,为 mm 级。总体来说,在此误差的测试内,ERP 对轨道的影响最大达到 m 级,会严重影响框架的一致性,因此在地心惯性坐标系与地心地固坐标系转换时,要充分考虑地球自转参数的精度。

5 结 语

本文给出精密定轨中 ERP 解算原理,对 Xpole、Ypole、UT1-UTC 施加多种组合、不同大小的误差,进行了 14 组实验,分析 ERP 对 GEO、MEO、IGSO 三类卫星轨道的影响;对 Xpole、Ypole、UT1-UTC 施加不同大小误差,进行了 30 组实验,分析 ERP 和卫星轨道的一致性。本文实验得到如下结论:

(1)轨道和坐标转换随着 ERP 的误差增加而增大。

(2)当 Xpole、Ypole、UT1-UTC 同时存在误差时,引起的轨道积分误差最大,而 ERP 误差对积分过程影响甚微(误差 100 mas 和 0.5 ms 引起的误差为 mm 级),采用短期预报的初始 ERP 基本可以满足精密定轨需求。

(3)ERP 参数中对卫星轨道坐标转换影响最大的是 UT1-UTC,对 Xpole 和 Ypole 的影响相当。在此误差的测试内,ERP 对轨道三维的影响最大达到 m 级,Xpole 和 Ypole 对 GEO 卫星 X 轴和 Y 轴影响较小,UT1-UTC 对轨道 Z 轴的影响较小,为 mm 级。在地心惯性坐标系与地心地固坐标系转换时,要充分考虑地球自转参数的精度。

本文研究可为精密定轨中 ERP 解算策略的选取和优化提供参考。

参考文献:(略)

作者简介:张龙平,男,1988 年生,博士,工程师,主要从事卫星导航工作。

基于北斗三号 RDSS 链路的语音传输技术研究

李明凡¹, 张红领²

(1. 北京神州天鸿科技有限公司, 北京 100088; 2. 中国人民大学, 北京 100872)

摘要:基于北斗三号 RDSS 链路的语音传输关键在于合适的语音编解码技术, 采用 SELP 声码器及 VAD 技术, 每超帧 60 bit 参数量化, 编码速率 1.2 kb/s 或 0.8 kb/s, 实现在重建语音客观 MOS 值不低于 3.0 的情况下, 单条报文传输 11~17 s 语音。采用 ARQ 可靠传输协议, 实现连续语音的分包传输。

关键词:北斗三号; RDSS; 语音传输; 语音编解码; SELP; VAD; MOS; ARQ; 传输协议

1 引言

北斗卫星无线电定位服务(RDSS)短报文通信作为北斗特色服务,在水文水利、森林防火、气象、船舶、电力巡检、野外救援等领域发挥了重大作用。北斗三号 RDSS 业务服务容量达 1 800 万次每小时,单条报文最大长度 14 000 bit,服务能力与北斗二号相比有大幅提升,已具备以传统短报文通信服务为主,向短语音传输等创新业务发展的有利条件。

据调研,实用的北斗语音传输要求是在重建语音客观平均评定评分(MOS)值不低于 3.0 的情况下,单条报文传输语音达到 10 s 以上。

高品质语音编码速率一般不低于 4 kb/s,对应每秒语音的编码数据量不低于 4 000 bit。北斗三号 RDSS 业务单条报文最大长度为 14 000 bit,服务频度一般为 30 s,单条报文可传输 3 s 语音,10 s 语音需分包传输 4 条,耗时至少 2 min,与传统通信手段相比效率仍显低下。

必须采用针对北斗三号 RDSS 链路的语音编解码技术,将 10 s 语音的数据量压缩到一条报文可以传输的程度,并且重建语音客观 MOS 值不低于 3.0,北斗语音传输才能实现实时传输,具备实际应用价值,进而成为北斗三号 RDSS 应用的标准配置。更长的连续语音则需分包传输,应根据北斗 RDSS 业务特点,采用适当传输协议,实现可靠传输。

2 基于北斗三号 RDSS 链路的语音编解码技术

2.1 语音编解码技术

语音编解码技术已有 60 余年的发展历史,但只在近 20 年随着计算机和微电子技术的发展才获得了飞速进步。近几年来高质量语音编解码技术已经开始大规模实用化,各种国际标准的制定集中反映了这种趋势。目前,国内外主流的声码器算法有美国的政府标准 MELP、MELPe,美国的 AMBE3000,欧洲的 ACELP,中国的 AHELP、SELP 等。根据在国际上应用最广泛的 2.4 kb/s 编码速率的声码器上比较,中国的 SELP 声码器重建语音的客观 MOS 分值最高。

SELP 声码器的技术指标是在 2.4 kb/s 编码速率下, $MOS > 3.2$; 在 1.2 kb/s 编码速率下, $MOS > 3.0$; 在 0.6 kb/s 编码速率下, $MOS > 2.7$ 。

利用高质量的语音激活检测(VAD)技术,去除语音中的间隔、无声、无语音段,仅仅对语音段进行编码,对无语音段只用极少的比特标识,可在保持语音质量的情况下有效降低编码速率。

采用 SELP 声码器,辅以 VAD 技术,技术指标又大幅提高,目前能达到在 1.2 kb/s 编码速率下,

MOS>3.19;在 0.8 kb/s 编码速率下, MOS>3.0。

要在北斗三号 RDSS 链路提供的单条报文里完成高质量、较长时间的语音传输,选择先进的声码器算法是关键,辅以 VAD 技术的 SELP 声码器是较合适的选择。

2.2 SELP 声码器技术

2.2.1 SELP 模型

SELP 模型分为编码端和解码端两个部分。在编码端先对原始语音信号进行高通滤波,然后通过参数分析提取各种能够表征语音信号参数,再对这些参数进行量化传输。

在解码端利用反量化后的这些参数合成语音信号。激励信号的产生采用多带正弦混合激励,激励信号由浊音部分和清音部分混合而成,混合比例由各子带的浊音度决定。激励信号经过合成滤波器和后滤波器后得到最终的合成语音。

2.2.2 SELP 编码器设计

SELP 编码器(图 1)通过对每帧语音信号进行滤波预处理、线性预测分析、余量谱幅度分析、子带清浊音分析、基音周期分析、能量参数分析等处理,进行相应的参数量化。

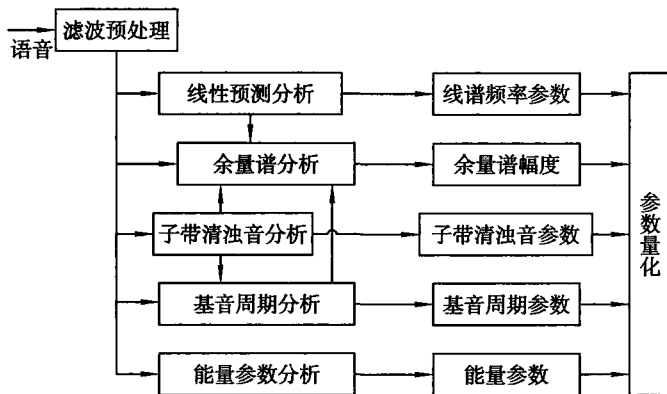


图 1 SELP 编码器原理

(1)滤波预处理:将带宽 60~3 800 Hz 的模拟语音信号,进行预处理,滤除语音中的直流分量和 50 Hz 的工频干扰。

(2)线性预测分析:对预处理后的语音信号进行线性预测分析,提取出线性预测(LPC)系数,然后将其转换为线谱频率(LSF)参数。

(3)余量谱幅度分析:从线性预测分析后的余量信号中提取出 10 维的余量谱幅度。

(4)子带清浊音分析:子带清浊音的分析采用两个自相关函数联合判断,一个是带通语音信号的自相关函数,另一个是包络信号的自相关函数。

计算基音周期附近最大的语音自相关和包络自相关,然后采用域值法联合判定各子带的清浊状态。

(5)基音周期分析:采用自相关法提取基音周期参数并采用前瞻一帧的动态规划算法对基音周期参数进行平滑。

(6)能量参数分析:为了提高算法的抗误码性能,SELP 算法没有直接提取增益,而是从语音信号中提取语音信号能量。

2.2.3 SELP 解码器设计

SELP 解码器(图 2)在接收到比特流之后进行反量化,从而得到 LSF 参数、基音周期参数、清浊音参数、能量参数和余量谱幅度,然后对它们进行插值,利用插值后的参数合成语音。具体流程如下。

(1)将从信道中接收到的比特流进行拆包处理,得到 LSF 参数、能量参数和基音周期参数的码本索引值。

(2)反量化重要帧的 LSF 参数并用插值算法恢复出非重要帧的 LSF 参数,然后将其转换为 LPC 系数用于语音合成。

(3)反量化能量参数,由于编码端是在对数域对能量参数进行量化,解码端需要将其从对数域转

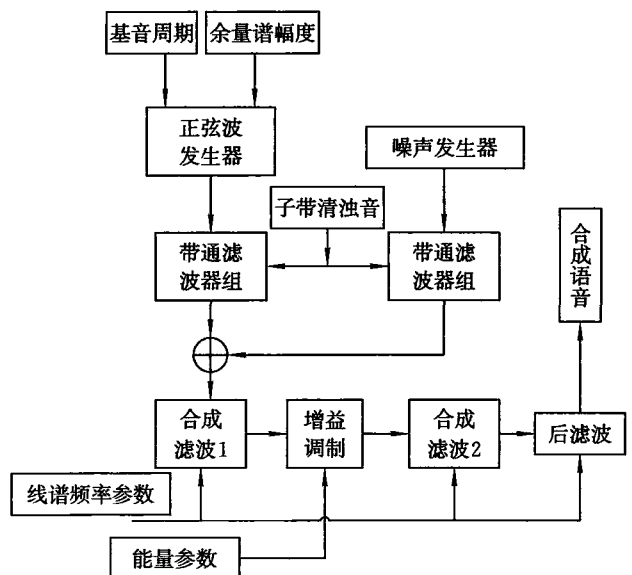


图 2 SELP 解码器原理

换过来。

(4)利用反量化得到的 LSF 参数和能量参数恢复出全带 V/U 判决和各个子带的带通浊音度系数 (BPVC)值。

(5)反量化基音周期参数,同样将其从对数域转换过来。

(6)用 LSF 参数、能量参数、基音周期参数和恢复得到的 BPVC 值来合成语音。

2.3 基于北斗三号 RDSS 链路的 SELP 声码器技术参数分析

原始输入语音为 8 kHz 采样,16 位线性 PCM A/D 转换后得到的 128 kb/s 码流。SELP 声码器采用分帧处理,每帧语音长度为 25 ms,包含样点数 200 个。单帧或多帧组成一个超帧,以超帧为单位量化特征参数。为了提高量化效率,采用分级矢量量化技术,根据北斗三号 RDSS 链路的特点,每个超帧量化参数为 60 bit。

对不同大小的超帧进行参数提取量化,形成不同的编码速率,超帧越大,编码速率越低。将 2 个分帧组成一个 50 ms 超帧进行量化,1 s 语音可量化为 $60 \times 1\,000 / 50 = 1\,200$ (bit),即编码速率为 1.2 kb/s;将 3 个分帧组成一个 75 ms 超帧进行量化,1 s 语音可量化为 $60 \times 1\,000 / 75 = 800$ (bit),即编码速率为 0.8 kb/s;将 4 个分帧组成一个 100 ms 超帧进行量化,1 s 语音可量化为 $60 \times 1\,000 / 100 = 600$ (bit),即编码速率为 0.6 kb/s。

目前最新的辅以 VAD 技术的 SELP 声码器技术指标为:0.6 kb/s, MOS > 2.9;0.8 kb/s, MOS > 3.0;1.2 kb/s, MOS > 3.19。MOS 值低于 3.0 的编码速率效果较差,暂不予考虑。

北斗三号 RDSS 单条报文最大长度可达 14 000 bit,想满足 MOS 值不小于 3.0 且单条报文传输不少于 10 s 语音的实用要求,编码速率只能选 1.2 kb/s 或 0.8 kb/s,用 1.2 kb/s 编码速率可传输 11 s 左右的语音,用 0.8 kb/s 编码速率可传输 17 s 左右的语音。

用户可以在语音质量和单条报文传输语音时长两个维度进行权衡,关注语音质量的,可采用 1.2 kb/s 编码速率,关注传输语音时长的,可采用 0.8 kb/s 编码速率。

考虑到实际应用中不可能所有条件下单条报文均能达到最大长度,也可根据不同使用条件选用不同的编码速率。在单条报文长度 14 000 bit 的条件下,可选 1.2 kb/s 编码速率;单条报文长度较短时,选用 0.8 kb/s 编码速率。

3 基于北斗三号 RDSS 链路的语音传输技术

根据前文的分析,实用的、常用的北斗语音传输只需单条报文传输 10 s 以上语音即可。部分场景下如需传输更长的语音,则需进行分包传输。

北斗三号 RDSS 链路的特点决定了数据在传输过程中难免出现丢包、错包等情况,应设计可靠的传输机制和传输协议,具备丢包自动重传功能,保证传输数据的连续性、正确性和完整性。

3.1 语音可靠传输协议设计

基于北斗三号 RDSS 链路的语音传输协议在北斗三号 RDSS 出入站信号体制框架下进行设计,以实现低功耗、少开销、高效率、高可靠的语音传输。

自动请求重发协议即 ARQ 协议,通过使用确认和超时两个机制,在不可靠传输链路上实现可靠的信息传输。ARQ 协议包括停止等待 ARQ 协议、连续 ARQ 协议和选择性重传 ARQ 协议,拥有错误检测、正面确认、超时重传、负面确认及重传等机制。

根据北斗三号 RDSS 链路的特点,综合运用停止等待 ARQ 协议、选择性重传 ARQ 协议实现语音的可靠传输,效率较高,对北斗信道资源占用较小。

在分析 ARQ 协议的基础上,借鉴 TCP/IP 协议的思想和技术特点,合理定义传输协议数据包格式。

3.1.1 同步包和回执包

在进行语音数据传输前,发送端需要确定接收端北斗设备是否具备数据接收条件,因此引入 TCP/IP

的同步(SYNC)和确认、答应(ACK)机制。

发送端向接收端发送同步包,发送完就暂停发送,等待接收端的确认。接收端接收同步包后向发送端发送同步回执包。发送端收到了同步回执后,才开始向接收端发送数据包。

如果接收端由于未开机或信号失锁等原因未能成功接收同步包,则不会发送任何信息。发送端在发送同步包后设置一定的超时等待时间,超时仍未收到确认,重发同步包。如果发送端发送 N 次同步包,仍未收到接收端的回执,说明无法正常完成传输,可终止数据传输。为提高传输效率,同步包中也包含了第一包数据。

同步包格式和回执包格式分别如图 3 和图 4 所示。

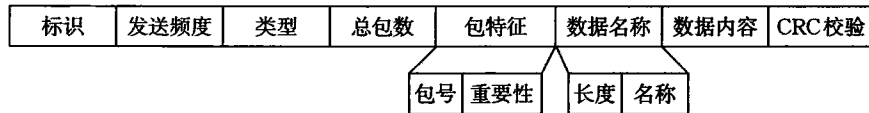


图 3 同步包格式

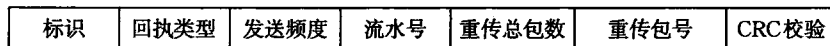


图 4 回执包格式

同步包格式说明如下。

- (1)标识:协议标识(8 bit)。
- (2)发送频度:发送端北斗 RDSS 服务频度(8 bit)。
- (3)类型:所传输数据类型(8 bit)。
- (4)总包数:所传输数据的总包数(8 bit)。
- (5)包特征: N 个,由包号(8 bit)与重要性(8 bit)组成, N 为总包数。
- (6)数据名称:由数据名称长度、数据名称组成。
- (7)数据内容:在同步包中传输第一包数据内容。
- (8)循环冗余码(CRC)校验:从标识开始到校验之前每个字节异或的结果(8 bit)。

回执包格式说明如下。

- (1)标识:协议标识(8 bit)。
- (2)回执类型:同步回执、重传回执、接收完成回执(8 bit)。
- (3)发送频度:接收端北斗 RDSS 服务频度(8 bit)。
- (4)流水号:对应传输数据的唯一标识(24 bit)。
- (5)重传总包数:重传回执时,对应重传数据的总包数(8 bit)。
- (6)重传包号:对应重传数据包的 N 个包号, N 为重传总包数。
- (7)CRC 校验:从标识开始到校验之前每个字节异或的结果(8 bit)。

3.1.2 数据包

当所传输语音数据超过单条报文最大长度时,将数据拆分为多个数据段,每段数据前添加包头信息组装成独立的分包数据,分别进行传输。接收端接收到全部数据包后再进行组包和解码处理。数据包格式如图 5 所示。

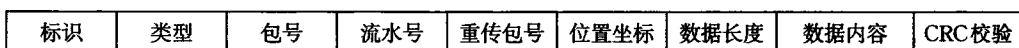


图 5 数据包格式

数据包格式说明如下。

- (1)标识:协议标识(8 bit)。
- (2)类型:数据类型(8 bit)。
- (3)包号:当前数据包的包号(8 bit)。
- (4)流水号:对应传输数据的唯一标识(32 bit)。

- (5)重传包号:前一未收到数据包的包号(8 bit)。
- (6)位置坐标:发送端当前位置(64 bit)。
- (7)数据长度:本分包数据字节数(24 bit)。
- (8)数据内容:本分包数据内容,长度可变。
- (9)CRC 校验:从标识开始到校验之前每个字节异或的结果(8 bit)。

3.2 北斗语音可靠传输流程

北斗语音数据传输流程可分为传输确认、数据发送和接收、数据丢包自动重传三个部分。

3.2.1 传输确认

传输确认采用停止等待 ARQ 机制。发送端按照最大发送电文长度将语音编码数据拆解为多个压缩数据段,按照同步包和数据包的格式顺序组装,向接收端发送同步包,设置同步回执接收超时等待时间,等待接收端发送的同步回执。

接收端收到同步数据包后,提取发送频度、数据类型、数据名称、总包数、包特征和数据内容等,并按照提取的信息设置对应数据接收缓存队列和接收超时等待时间,向发送端发送同步回执,等待后续传输数据。

发送端等待接收端确认后,才开始数据传输。通过传输确认,保证发送端向接收端的传输是有效传输,避免北斗信道资源浪费。

单包语音数据可通过同步数据包直接传输,提高传输效率。

3.2.2 数据发送和接收

发送端在收到接收端的同步回执后,以规定频度顺序发送缓存列表中的数据包,不等待接收端对每一包数据的确认。发送最后一包数据后,设置接收回执超时等待时间,等待接收端发送的重传回执或接收完成回执。

接收端对接收数据内容进行校验,校验失败则丢弃数据。接收到最后一包数据后,判断是否缺包,将缺少的包号顺序排列为重发包号列表向发送端发送重发回执,如无缺包,则向发送端发送接收完成回执,开始组合语音压缩数据包、解码等过程。

3.2.3 数据丢包自动重传

连续传输语音数据包时,采用选择性重传 ARQ 机制,发送端只对重发回执中需重发包号的对应数据包进行重发。循环数据发送和接收过程,直到接收端正确接收全部数据。

4 结 语

北斗三号系统的建成为实现实用的北斗语音传输提供了有利条件。在北斗三号 RDSS 链路条件下,可采用辅以 VAD 技术的 SELP 声码器技术进行语音的编解码,采用 1.2 kb/s 编码速率,可实现单条报文传输 11 s 左右语音,采用 0.8 kb/s 编码速率,可实现单条报文传输 17 s 左右语音,并且语音质量客观 MOS 值均达到 3.0 以上。北斗语音的传输,以 17 s 以下单条报文实时传输最为实用。超过 17 s 的连续语音需分包传输,采用 ARQ 自动重传机制,实现可靠传输。连续语音传输会有一定延迟,用户体验稍差。

北斗语音传输协议目前建立在北斗三号 RDSS 出入站协议的应用层协议下,各家单位均可自行设计。在积累一定应用经验,应用较为成熟时,将各家协议优化提升为北斗三号 RDSS 出入站系统级协议,实现北斗语音传输协议和应用的标准化。

语音传输在北斗三号手持机上的应用需求较多,使用也较为方便,可优先进行研究。

参考文献:(略)

作者简介:李明凡,男,1969 年生,教授级高级工程师,主要从事北斗系统运营、北斗系统应用集成、北斗终端研发、北斗服务平台、北斗通信协议、北斗业务标准化领域的研究。

一种基于 HD8040 北斗导航芯片的音频方案*

闫 岩

(深圳华大北斗科技有限公司, 北京 100081)

摘 要:导航产品的应用场景中,音频播放是常用功能,如各种导航信息的语音提示、背景音等。常见的传统方案是直接采用非压缩音源(PCM 格式)或者使用压缩音源(如 mp3 格式)外加对应解码芯片解码为 PCM 格式,最终通过 PWM 或 I2S 等接口输出为模拟音频。前者输出方式简单,无须解码过程,但由于 PCM 格式文件未进行压缩,所以文件体积大,一般需要额外的 flash 等存储芯片;后者可以实现高压缩比的音频文件压缩存储(如 mp3 格式可以实现 10:1 的压缩比例)以节省空间,但是在播放时需要外接硬件解码芯片,或者在控制芯片中使用算法进行软解码,占用大量芯片资源。故以上两种传统方案都存在明显的固有缺点。

关键词:HD8040;北斗导航芯片;音频;解码;ADPCM

1 引 言

由于传统音频输出方案都存在明显的缺点,为了在音频数据体积、解码运算占用资源、是否需要独立解码芯片、产品成本及体积等各项相互制约的条件中找到一个较为平衡的解决方法,本文将介绍一种以自适应差分脉码调制(ADPCM)编解码算法为核心的音频输出方案。HD8040 系列芯片作为一款导航系统级芯片,除可以实现导航定位这一核心功能以外,还集成了大量常用的硬件通信接口及功能模块,其中的 ADPCM 模块可以实现对 IMA-ADPCM 格式的音频文件硬解码为 PCM 格式数据,并通过 PWM 或 I2S 接口输出音频。

2 IMA-ADPCM 音频数据格式及算法

脉码调制(PCM)通过采样、量化、编码三个步骤,可以将一个时间连续、取值连续的模拟音频信号转换成时间离散、取值离散的数字信号。

但由于 PCM 不对数据进行压缩,通常数据量比较大,因此差分脉码调制(DPCM)便应运而生。它通过存储相邻采样点间的差值,而非原始采样值的方式来达到减少数据存储大小的目的,即当知道前一点的值和它与下一点间的差值时,即可计算出下一点的值。通常 16 bit 的 PCM 数据可以压缩为 4 bit 的 DPCM 数据,实现 4:1 的数据压缩比。

实际的音频信号一般是比较连续的,相邻采样点间差值有些较小,有些较大。当差值较大时,有可能用 4 bit 无法表示,通过增大表示差值的位数(如 8 bit 或 16 bit)可以解决这个问题,但会导致数据量变大,没达到压缩的目的,而且这种差值较大的情况出现概率很小。为了解决这个问题,后期又推出了适应性更强的自适应差分脉码调制(ADPCM)。它定义一个因子,用差值除以因子的值来表示两点之差,如果两点之间差值比较大,则因子也比较大。通过引入因子,可以使 DPCM 编码自动适应差值比较大的数据。PCM 和 ADPCM 的采样示意如图 1 所示。

HD8040 芯片支持的 IMA ADPCM 数据解码,是 ADPCM 的一个分支,其最大特点在于编码和解码过程无须任何乘法及浮点运算。它通过将乘法转换为 MCU 芯片擅长的移位运算,从而极大地提高了运

* 基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC1506203)

算速度,节省了宝贵的运算资源。

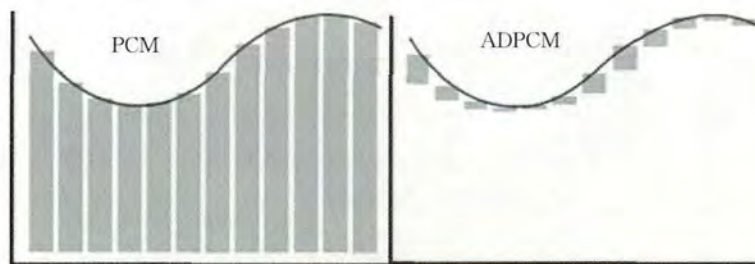


图1 PCM与ADPCM的采样示意

3 HD8040 解码 ADPCM 音频流程

3.1 ADPCM 数据获取

ADPCM 格式的数据源可以在 PC 端将 PCM 格式的数据转换得到,其算法原理如下(伪代码)。

假设声音信号从零开始,需要初始化两个变量 `int index = 0, prev_sample = 0;`
下面的循环将依次处理声音数据流,其中 `getnextsample()` 得到一个 16bit 采样数据, `outputdata()` 可以将计算出来的数据保存起来

```
int index = 0, prev_sample = 0;
while (还有数据要处理)
{
    cur_sample = getnextsample();           // 得到当前的采样数据
    delta = cur_sample - prev_sample;       // 计算相对于上一个采样值的增量
    if (delta < 0) delta = -delta, sb = 8;
    else sb = "0";                          // sb 保存符号位

    code = 4 * delta / step_table[index];   // 根据 steptable[] 得到一个 0~7 的值
    if (code > 7) code = "7";              // 描述声音强度的变化量

    index + = index_adjust[code];          // 根据声音强度调整下次取 steptable 的序号
    if (index < 0) index = 0;
    else if (index > 88) index = 88;

    prev_sample = cur_sample;
    outputode(code | sb);                  // 加上符号位保存起来
}
```

得到 4 bit 表示采样值的 ADPCM 数据后,将其保存到内部或者外部 flash 中存储。HD8040 的 ADPCM 模块可以将 4 bit 的 IMA ADPCM 数据解码为 16 bit PCM 数据,并且支持单声道或双声道数据,解码后的 PCM 数据可以直接连接到芯片内的 I2S 模块或者 PWM 模块进行输出。整个数据处理过程全部通过 DMA 进行数据传输,硬件直接解码,并通过中断处理进行流程控制,对芯片的中央处理器(CPU)及随机存储器(RAM)资源占用极小,并且声音播放流畅,支持 8 kHz 普通语音达到 44.1 kHz CD 音质的任一采样频率。

3.2 软硬件流程

下面将以双声道, I2S 接口输出为例介绍 HD8040 软硬件的处理流程,分别如图 2 和图 3 所示。

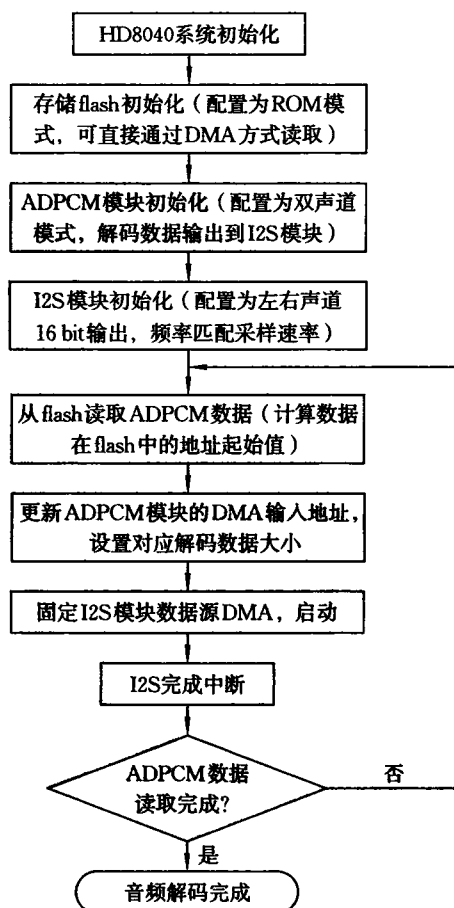


图2 HD8040的ADPCM音频数据处理流程软件流程

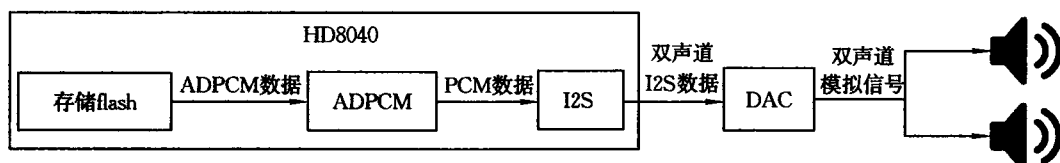


图3 HD8040 ADPCM音频数据处理流程硬件示意

4 结 语

本文方案以 HD8040 北斗导航芯片特有的 ADPCM 音频解码模块为核心,实现了在音频数据存储体积、解码对 CPU 及 RAM 的资源占用,以及输出音质等各项参数之间的平衡。另外由于可以使用片内 flash 存储压缩数据,故无须增加外部存储芯片,并且无须片外独立解码芯片,故使用此方案的产品可以在简化设计的同时降低成本并减小体积。

参考文献:(略)

作者简介:闫岩,男,1982年生,工程师,研究方向为北斗导航芯片产品应用开发。

GPS 经费预算研究

林悦, 窦长江

(北京卫星导航中心, 北京 100000)

摘要:美国每年初都会公布 GPS 下一财年的经费预算。通过经费预算,可以监控战略目标的实施进度。本文分析了 GPS 2016 财年至 2021 财年的财政预算,并对 GPS 未来 5 年的财政预算计划进行了归纳,通过对比研究,总结出 GPS 发展规划的趋势,为研究 GPS 发展战略提供依据。

关键词:预算;GPS;系统 PNT

1 引言

预算是一种系统的方法,可以用来分配财务、实物和人力资源,以实现既定的战略目标。通过预算可以监控战略目标的实施进度。美国每年都会在本年初公布下一年度的财政预算申请,其结构由投资项目、金额和预算说明组成。预算说明是明确本年度的重点任务。通过对年度预算的跟踪研判,可以分析出美国实际实施项目及其战略重点的转移,为情报研判提供可靠证据。

2020 年 2 月,白宫公布了 2021 财年的预算申请,在国防领域申请投资 7 405 亿美元,比 2020 财年增加 25 亿美元,其中天基领域投资 155 亿美元。天基领域的国防投资近 10 年来呈现先降后升的趋势(图 1),最近 5 年基本保持上升状态。由此可以看出,近年来各国逐渐意识到太空将是下一个战略制高点 and 军事要地,纷纷加入航天领域的竞争,航天技术迅猛发展。美国作为航天超级大国,为了保护其战略地位,近几年不断增加在航天领域的投资。特别是 2020 年初美国天军的成立,更是象征着美国将太空视为下一个军事和商业战场,不断谋求更大的制太空权。全球定位系统(GPS)作为美国天基系统的重要组成部分,其预算一直占天基领域国防投资的 10% 以上。

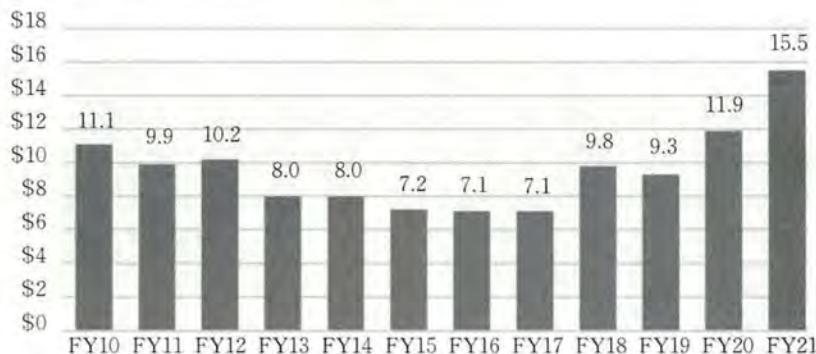


图 1 美国天基领域国防投资

通过对 GPS 年度预算投资规模和投资重点的分析,可以总结出 GPS 领域发展重点、发展趋势和任务目标,切实掌握 GPS 发展特点。本文主要以 5 年为一个周期进行研究,剖析 2017 财年到 2021 财年的预算构成,以及未来 5 年(2022—2027)的预算规划。一是因为 5 年为一个传统的预算周期;二是从天基领域的国防投资看,近 5 年的天基领域投资呈现上升特点,说明美国对天基领域的重视程度增加;三是由于 GPS II F 卫星于 2016 年 2 月全部发射完毕,2017 财年开始全力发展新一代 GPS III/III F 星座,而 GPS 地面段下一代控制系统计划(OCX)原计划于 2016 年完成,但因为种种原因延迟至今尚未完成,因此 2016—2021 这 5 年是 GPS 现代化实际实施的开始阶段。

2 近 5 年 GPS 项目预算分析

GPS 是美军方重点发展的作战武器之一,可为军民用户提供世界范围内、全天候的定位、导航和授时(PNT)服务。GPS 现代化的内容主要包括:新一代的 GPS III 星座卫星可以完全兼容旧的 GPS 卫星信号,兼容新的 Galileo 民用信号,并发射功率更高的 M 码军用信号;GPS 新一代地面控制系统将能够运行新一代 GPS 信号,并提升 PNT 性能;“M 码早期使用”(MCEU)升级项目为战斗人员、飞行器、船只和武器装备提供 PNT 服务,确保美军在复杂环境中的作战能力。

2017 财年,开展 GPS III F 星座第一阶段建设,即基础的可行性分析,成果将用于 GPS III F 第二阶段,也就是卫星的生产设计。2017 年 12 月,美空军宣布将在 2019 财年预算中开始编制新的 GPS III F 项目。参议院要求国防部降低现有的地面运控系统(OCS)的 M 码风险,提升集成各种武器装备系统和弹药的接收设备性能。对于国外的 PNT 系统,禁止使用中国北斗卫星导航系统和俄罗斯格洛纳斯(GLONASS)系统的 PNT 服务,批准与 Galileo 系统的合作。参议院要求建立 PNT 备份和补充系统,防范在 GPS 受到破坏情况下可能出现的风险。在民用 GPS 方面,民用 GPS 信号监测、广域增强系统(WAAS)和 GPS 民用需求监管均获得投资,PNT 项目也有专项投资。WAAS 将支持双频 GPS,非交通部管理的国家差分 GPS 项目(NDGPS)也在 2017 财年得到拨款。从 2017 财年开始,美国交通部的 GPS 项目开始通过国务卿办公室获得资金,原来资金由联邦航空管理局下拨,说明 GPS 项目的层级提升,日益成为美国的核心战略利益。2017 财年 GPS 国防总预算为 9.082 62 亿美元,构成如图 2 所示。

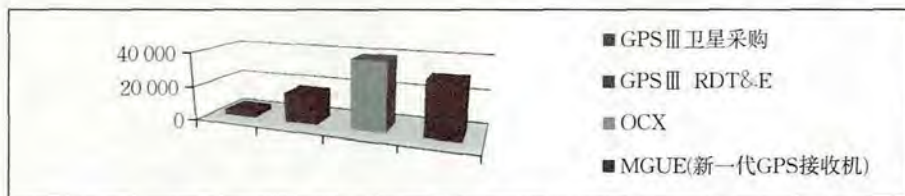


图 2 2017 财年 GPS 国防预算

从 2018 财年开始,美军方不再编制用于采购 GPS II F 卫星的预算,最后一颗 GPS II F 卫星于 2016 年 2 月发射升空,说明到 2017 年 GPS II F 星座已经组网调试完成,成为 GPS 的主用星座。2018 财年,在国防部提交的需求草案基础上,最终方案增加了 1 000 万美元用于 GPS III 研发中的 GPS 备份技术研究,增加了 9 850 万美元用于 GPS 军用手持机的第二阶段升级改造。参议院要求空军拿出方案,尽可能减少新一代 GPS 技术研究和基础设施建设延期风险,增加对现有技术和基础设施的再利用。2018 财年,明确做出预算用以对抗俄罗斯的威胁,增加美军在 GPS 信号受阻地区的 PNT 能力,加强与日本 QZSS 在空基 PNT 系统方面的合作。在本土防御方面,白宫要求于 2017 年 12 月 15 日前就 GPS 毁坏对美国本土安全和军事行动造成的威胁进行分析,包括分析 PNT 可靠性、本土作战的冗余部分和 PNT 的替代系统。在民用 GPS 预算中,对交通部拨款用于 WAAS 建设、GPS 车辆追踪、WAAS 双频操作系统的研发建模。2018 财年 GPS 国防总预算为 12.912 06 亿美元,构成如图 3 所示。

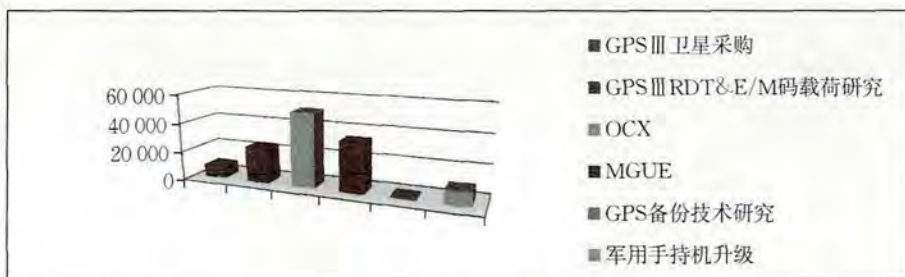


图 3 2018 财年 GPS 国防预算

2019 财年,GPS 增加 GPS III F 研发预算的列支,开始进行现有地面段和空间段设备升级。该财年预

算提出,国防部应在一年内全面评估当前的地面运控系统(OCS)经过升级改造能否达到下一代 GPS III 地面运控系统(OCX)的性能要求,协调军方各部门拿出一个军用接收机 M 码升级的解决方案;GPS 的军用接收机需能接收欧盟 Galileo 系统和日本 QZSS 的卫星信号,但在风险较高时可以转换为接收单频信号,为此军用接收机将开展第二阶段的增量改造。2019 财年,白宫提出要探索 GPS 备份技术,组织力量寻找 GPS 在电子战中的弱点。民用 GPS 的 WAAS 预算为 9 632 万美元。白宫要求美国联邦航空管理局 (FAA) 升级 WAAS,以减少 GPS III 项目滞后带来的风险。2019 财年 GPS 国防总预算为 14.245 8 亿美元,其中 GPS III F 研发、新一代地面运控系统和新一代 GPS 接收机的投资占到总投资的 84%,GPS 现代化进入新阶段,具体构成如图 4 所示。

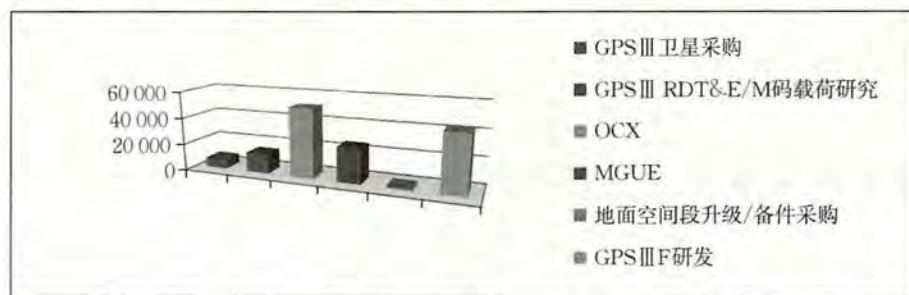


图 4 2019 财年 GPS 国防预算

2020 财年,开始进行 GPS III F 的卫星采购,财政预算中提出空军需研发新型的 GPS 接收机,可以兼容欧盟 Galileo 系统和日本 QZSS 信号,建立开放式系统解决方案,提供强有力的 PNT 服务保障,连续 4 年提出加强与 Galileo 的信号兼容,连续 3 年提出加强与 QZSS 的合作。同时,军用 GPS 终端应既能够接收多源信号,又可以接收单源信号。美国国防部成立专门部门负责 GPS 军用接收机 M 码卡升级。参议院要求国防部于 2020 年 2 月 1 日前就需要升级的 GPS 军用接收机数量、更换成本和更换所需时间提交报告,审计部门将根据该报告做出估算,最终决定是进行 GPS 军用接收机软件升级还是硬件的整体替换。WAAS 获得拨款,但民用信号监测和 GPS 车辆追踪未获得拨款。参议院要求交通部于 2020 年 12 月拿出一套地基 GPS 备份时间系统的研发方案,但交通部未能如期完成。2020 财年 GPS 国防总预算为 17.132 4 亿美元,构成如图 5 所示。

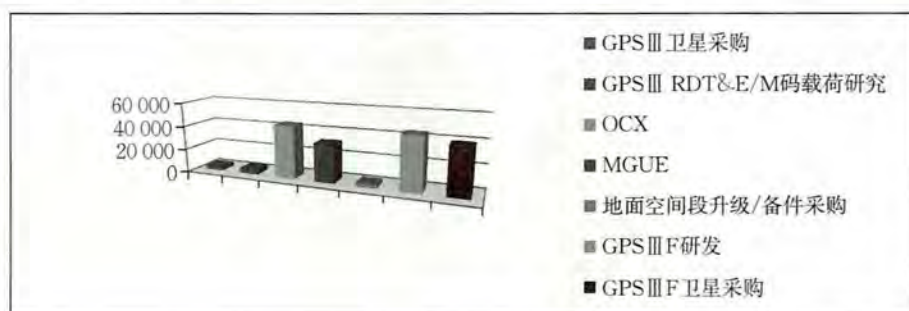


图 5 2020 财年 GPS 国防预算

2021 财年,新成立的美国天军取代美国空军向美国国防部申报 GPS 项目国防预算,包括空间段升级,支持 SV05-10 星的工艺流程、系统设计和组装集成,继续支持 GPS III F 星座中 SV11 以后的卫星研发和 SV14/15 星的生产,生产方为洛克希德马丁公司。地面段和用户段,继续新一代地面运控系统 GPS OCX 第一和第二阶段的集成测试,其承包商为雷声公司。在 OCX 交付使用之前,提升旧一代地面运控系统能力。支持新一代 GPS 接收机 MGUE I 阶段增量的测试和主要平台集成,支持 MGUE II 阶段增量的 3 个研发合同和 MGUE I 阶段增量报废装备的预处理方案。MGUE I 阶段增量承包商为 L3Harris 技术、罗克韦尔柯林斯国际和雷声公司。美天军的“M 码早期使用”(MCEU)升级项目已于 2020 年第一季度交付,春季开始将在 GPS 现有地面运控系统安装操控 M 码加密 GPS 信号的部件。行政管理上,支持 GPS 办公室作为主管部门行使协调空间段、控制段、用户段项目,统筹军民需求的职责使命。在民用 GPS

需求方面,2021 财年预算并未做出专门规划,仅对 GPS 的 WAAS 做出 8 390 万美元预算,用于联邦航空局的设备采买。2021 财年 GPS 国防总预算为 18.092 17 亿美元,具体构成如图 6 所示。

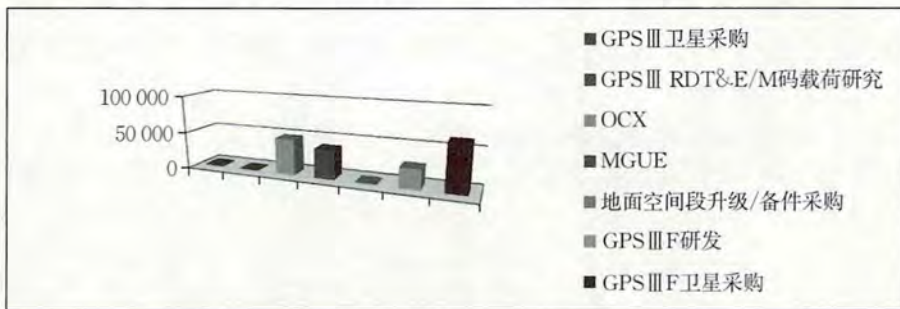


图 6 2021 财年 GPS 国防预算

3 GPS 项目未来 5 年的主要预算规划

未来 5 年, GPS 项目的预算规划主要用于 GPS III / III F 卫星采购, 以及地面段和空间段的设备升级。

GPS III F 卫星计划在未来 5 年内采购 11 颗卫星, 分别为 2021 年采购 2 颗, 2022 年采购 2 颗, 2023 年采购 2 颗, 2024 年采购 3 颗, 2025 年采购 2 颗, 加上 2020 财年采购的 1 颗, 到 2025 年, GPS III F 卫星采购数为 12 颗。该星座最终将部署 19 颗卫星, 2025 年后还将采购 7 颗卫星, 按照每年 2~3 颗的速度计算, 估计 2028 年前后完成全部 GPS III F 卫星的采购。

GPS 地面段和空间段 OCS 设备升级预计 3 年完成。在 OCX 全面建成后, OCX 将全面替代 OCS。从预算来看, OCX 应该在 2025 年前后建成。

4 GPS 预算项目分析和结论

(1) 空间段。从近 5 年美军在空间段的投入可以看出, 美国在 2019 财年基本完成对 GPS III 卫星的研发工作, 同步开展了对 GPS III F 的研发。第一颗 GPS III 卫星已于 2018 年发射, 第二颗已于 2019 年发射, 第三颗拟于 2020 年发射。2020 财年开始采购部署 GPS III F 星座。GPS III F 逐渐接替 GPS III 星座成为未来 GPS 星座的重点发展系统。具体的年度费用支出对比如图 7 所示。



图 7 空间段费用支出对比

(2) 地面段。从近 5 年美军在地面段的投入可以发现, 美军在持续升级地面段系统。2018 年从单纯的投入新系统研发, 开始转投旧系统的再利用, 主要是因为 OCX 的研制建设进度不断滞后, 而 GPS III 卫星已于 2018 年开始发射, 需要对其进行操控。2020 年 3 月, 美国空军宣布接收洛克希德马丁公司开发的地面应急运控系统升级设备, 此次设备升级可以使 OCS 在下一代 OCX 交付前, 操控包括 GPS III 卫星在内的所有在轨卫星。财政支出符合此前公开的 GPS 现代化的发展规划。具体的年度费用支出对比如图 8 所示。



图8 地面段费用支出对比

(3)用户端。美国近5年在军用用户端的研发费用呈现稳中有升的状态,随着2018年开始部署新的GPSⅢ卫星,GPS军用接收机也将面临升级更新。目前未有信息表明国防部是否应参议院要求,于2020年2月1日前就需要升级的GPS军用接收机数量、更换成本和更换所需时间提交报告。待该报告最终提交之后,美军将最终决定是进行GPS军用接收机软件升级还是硬件的整体替换,但是可以肯定的是,美军从未停止对新一代GPS接收机的研发。具体的年度费用支出对比如图9所示。



图9 军用用户端费用支出对比

(4)民用项目。相对于军用项目,美国在GPS民用项目方面的投入逐年减少,研究项目也从民用GPS信号监测和车辆跟踪等缩减为单纯的WAAS建设。此现象表明,在GPS整体投入中,不断增加其军用投入,减少民用投入。究其原因,大概是因为GPSⅢ卫星技术将彻底实现军码和民码分离,GPS主要是为军事目的服务,而GPS在民用导航市场上的压倒性优势也决定了它可以利用民间资本发展GPS项目,将国家资金集中在GPS军用服务的发展上。具体的年度费用支出对比如图10所示。



图10 GPS民用项目费用支出对比

通过横向和纵向的对比分析,可以得出GPS过去5年和未来5年的发展规划,即不断推进GPS现代化,在空间段、地面段和用户段全面升级。GPSⅡF卫星和GPSⅢ/ⅢF卫星的替代将在未来5年完成,从2017年GPSⅡF卫星组网完成,2028年前后的ⅢF卫星采购完成,可以推算出一代卫星的更新时间约为10年。

特别需要注意的是,美国近5年来,公开禁止使用中国北斗和俄罗斯GLONASS的PNT服务,加强与Galileo系统和日本QZSS合作,这是公然承认将中俄视为战略敌人,将欧日视为战略伙伴。

5 结 语

美方越来越清晰地认识到过度依赖 GPS 的 PNT 服务极为脆弱,因此要求寻找 GPS 在电子战中的弱点,就 GPS 毁坏对美国本土安全和军事行动造成的威胁进行分析,探索 GPS 备份技术,建立 PNT 备份和补充系统,防范在 GPS 受到破坏情况下的风险。2020 年 3 月,美国总统特朗普签署题为“通过负责任地使用定位、导航与授时服务以增强国家弹性”的行政命令,除强调 GPS 在国家关键基础设施运行中的重要作用外,还要求各部门采取行动,发展不完全依赖 GPS 的 PNT 基础设施。美国国土安全部迅速做出响应,不断根据计划推进民用关键设施对 GPS 的依赖度和脆弱性测试。据此可以推断出,美国未来在卫星导航领域,除了不断更新导航技术、提高自动化水平外,重点将是进一步推进 PNT 体系的建设,加强新抗干扰技术的研发。

参考文献:(略)

作者简介:林悦,女,1984 年生,工程师,多年从事卫星导航领域信息研究、对外交流协调等工作。

北斗卫星导航系统在水汽探测的应用研究

周悌慧,刘晋虎,吕霖冰,田宗彪

(国家测绘产品质量检验测试中心,北京 100830)

摘要:基于 GNSS 水汽探测技术,利用北斗卫星导航系统数据对深圳地区 2018 年 9 月 16 日特大暴雨天气的水汽探测进行研究,并对用 GPS 技术得到的水汽 GPS/PWV 和用探空方式得到的水汽 Radio/PWV 进行了比对。结果表明,北斗卫星导航系统水汽反演数据 BDS/PWV 与 GPS/PWV、Radio/PWV 的均方根误差都小于 3 mm,相关系数均大于 0.95,北斗卫星导航系统反演的水汽走势与实际降水情况基本一致,证实了用北斗卫星导航系统探测水汽的可靠性和准确性,为今后用北斗卫星导航系统技术辅助预报降水天气提供参考。

关键词:北斗卫星导航系统;湿延迟;可降水量;水汽探测

1 引言

可降水量(PWV)是天气预报中降雨强度预测的重要指标。传统水汽探测运用卫星遥感、探空气球和微波辐射计等技术手段,但普遍存在时空分辨率不足、开销较高和易受天气影响等缺点。相较于传统水汽探测手段,全球导航卫星系统(GNSS)气象学技术在水汽探测方面具有全天候、费用低、水汽预测精度较高等优势。Bevis 等首次提出了用地基全球定位系统(GPS)技术探测水汽的方法,2006 年上海市气象局成立了上海市卫星遥感和测量应用中心,成为 GNSS 气象学研究和应用的专业机构;王朝阳等对利用我国沿海 GNSS 站点数据提取天顶水汽含量的方法进行了对比研究;夏明飞对联合空基和地基 GNSS 观测反演大气水汽也进行了探索研究。随着北斗卫星导航系统(BDS)的全球组网正式建成,BDS 的应用也越来越广泛,运用 BDS 进行水汽探测的 GNSS 气象学技术的实现也逐步开展,多位学者从各自领域分别从可靠性、精度等方面进行了研究。本文针对 BDS 在中低纬度地区信号较好的特点,利用 BDS 数据对深圳地区 2018 年 9 月 16 日大暴雨前后的 PWV 变化值进行了研究,为极端天气的水汽反演和天气预报提供参考。

2 地基 GNSS 气象学技术的基本原理

地基 GNSS 气象学技术就是运用安置在地面上的 GNSS 接收机来测量卫星信号在大气中的总延迟量,通过分离干延迟量估算湿延迟量,进而计算接收机上空的 PWV。地球中性大气会给 GNSS 信号的传播带来延迟,包括两部分。第一部分是指一些要素的混合物(除去水汽的所有要素)带来的延迟,这个部分通常称为“干延迟”;第二部分是由水汽引起的延迟,这部分称为“湿延迟”。大气延迟计算公式为

$$D(EL) = DZ \times DM(EL) + WZ \times WM(EL) \quad (1)$$

式中, D 是总延迟, EL 是高度角, DZ 是干延迟, WZ 是湿延迟, DM 是干延迟的投影函数, WM 是湿延迟的投影函数。投影函数是与各个延迟的高度角有关的数学模型。干延迟在国际上的研究已经比较成熟,通常用萨斯塔莫伊宁(Saastamoinen)模型计算得到,湿延迟与当地的气候条件高度相关,总延迟减去干延迟就可以得到湿延迟,天顶湿延迟与 PWV 之间的关系为

$$PWV = \Pi \cdot WZ \quad (2)$$

式中, Π 是一个与气温、气压相关的无量纲转换因子。以上就是地基 GNSS 气象学的基本原理。

3 地基 GNSS 反演大气可降水量处理流程

地基 GNSS 反演大气可降水量处理流程如图 1 所示。

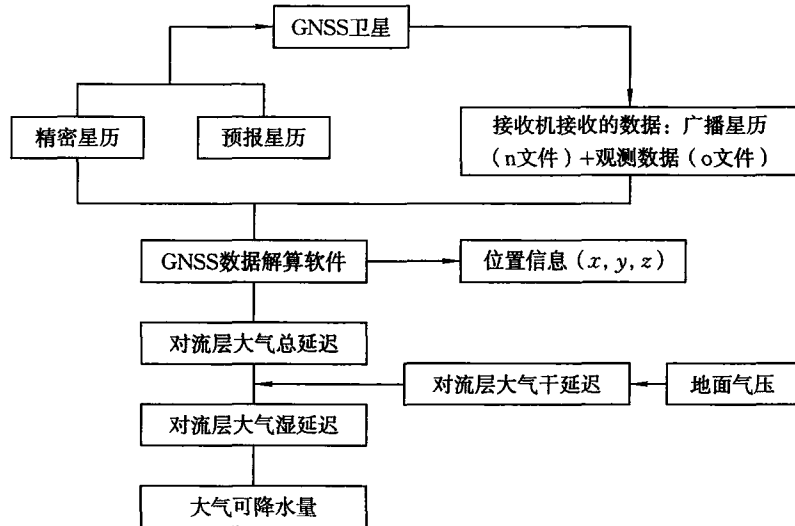


图 1 地基 GNSS 反演大气可降水量处理流程

4 深圳大暴雨期间水汽反演

4.1 站点选择

针对本次实验选取的站点,采取引入长距离测站的方式获得站点 PWV。考虑长距离影响,本次实验分别从新疆、河北、湖北、云南四个省各选取一个国家测绘基准工程 GNSS 连续运行基准站,再从深圳本地连续运行基准站中选取一个站点参与计算。深圳地区暴雨发生的时间是 2018 年 9 月 16 日,对应的年积日为 259,为了更能反映该天 PWV 的前后变化特征,选取了 9 月 15 日~9 月 19 日(相对应的年积日为 257~261)共 5 天的数据进行解算。

4.2 PWV 的提取及其精度分析

4.2.1 数据处理

为进行多种数据的比对,本次实验分别用 BDS 观测数据和 GPS 观测数据进行了水汽反演计算,将 BDS 反演的水汽表示为 BDS/PWV,将 GPS 反演的水汽表示为 GPS/PWV。

利用 GAMIT 软件对 5 天的数据进行解算,在解算前对解算控制文件——sestel 文件的相应参数进行设置。其中,与 GNSS 气象学相关的参数主要有:①Choice of Observable = LC_HELP,采用电离层组合方式,尽量减弱电离层影响;②Interval zen = 1,每小时估算一次天顶延迟,使气温气压影响细化,能更好地估算延迟量;③Elevation Cutoff=10,考虑水汽和 BDS 信号的综合影响,卫星截止高度角设置为 10°。在解算时为了较精确地得到深圳站 PWV,对深圳站坐标进行强约束,计算时加入该站气象观测数据,在设置好相关文件后,对 5 天数据进行批处理。

4.2.2 结果分析

目前世界气象部门对大气中水汽的探测主要还是依赖于探空气球,探空气球所测得的水汽本文用 Radio/PWV 表示。本文利用的是与深圳地理位置相近的香港探空气球测得的水汽数据。为了验证 BDS/PWV 的正确性,本文将 BDS/PWV 分别与 GPS/PWV、Radio/PWV 进行比较。BDS/PWV 和

GPS/PWV 在时间尺度上具有较好的一致性,均可设置成每小时获取一次水汽数据,探空气球则是每 12 小时测一次数据,时间间隔比较长, Radio/PWV 数据可以从美国怀俄明大学的网站上下载得到。

1. 水汽探测比对分析

无线电探空仪是气象部门常用的大气数据探测设备,精度较高,常用作新方法的检验标准。本次统计收集了年积日 257~261 共 5 天 10 期次的探空水汽数据 Radio/PWV,深圳站点 BDS/PWV 与 Radio/PWV、GPS/PWV 的比对结果如表 1 和图 2 所示。

表 1 BDS/PWV 与 Radio/PWV、GPS/PWV 相关性

PWV 精度比对方式	均方根误差/mm	相关系数
BDS/PWV 与 Radio/PWV	2.37	0.965
BDS/PWV 与 GPS/PWV	1.43	0.983

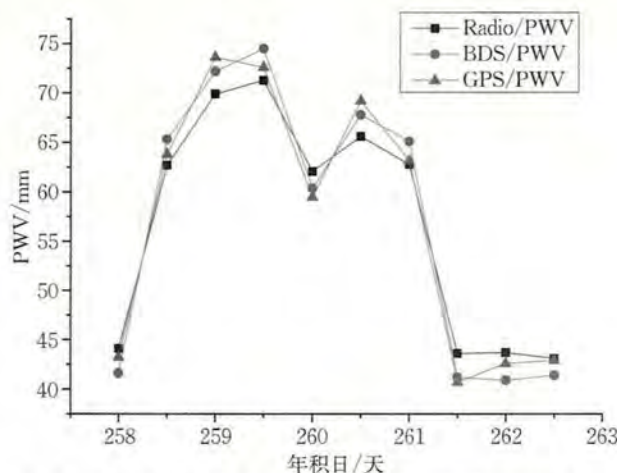


图 2 BDS/PWV 与 Radio/PWV、GPS/PWV 时间序列

由表 1 和图 2 可以得出:①BDS/PWV、GPS/PWV 和 Radio/PWV 三者的水汽反演走势基本一致, BDS/PWV 与 Radio/PWV、GPS/PWV 的均方根误差都小于 3 mm,相关系数都大于 0.95,由此可见, BDS 的水汽探测精度符合目前气象水汽预报的精度需求;②BDS/PWV 与 GPS/PWV 的均方根相对较小,相关系数较高,这是由于 BDS/PWV 和 GPS/PWV 的技术流程接近,并且两者时间精度较为一致;③BDS/PWV 在遇到暴雨爆发前后期间(258~260)变化较 Radio/PWV 更为灵敏,时间分辨率更高。

2. BDS/PWV 与降水情况的相关性分析

从气象部门可以查阅 2018 年 9 月 15 日至 9 月 19 日的气象数据,结合图 2 中 BDS/PWV 的走势,可以得出两者之间的相关性,具体如表 2 所示。

表 2 BDS/PWV 与天气情况相关性

日期	年积日/天	BDS/PWV/mm	天气情况
9 月 15 日	258	41~72	多云转雷阵雨
9 月 16 日	259	64~74	暴雨到暴雨
9 月 17 日	260	64~68	阵雨到阵雨
9 月 18 日	261	43~62	多云到多云
9 月 19 日	262	40~42	多云到多云

从表 2 可以看出,9 月 15 日, BDS/PWV 迅速增大,天气由多云转雷阵雨;9 月 16 日, BDS/PWV 继续逐级变大且持续维持在高位,天气情况是暴雨到暴雨;9 月 17 日, BDS/PWV 在 64~68 mm 之间波动,天气是从阵雨到阵雨;之后 2 天的 BDS/PWV 数值迅速下降,天气也转变为多云天气。从以上分析可以得出, BDS/PWV 与降水存在高度的相关性, BDS/PWV 的数值短时间内迅速增大则预示着强降雨。

5 结 语

本文基于地基 GNSS 气象学技术,利用 BDS 数据反演了 2018 年 9 月 15 日~9 月 19 日的水汽数据 BDS/PWV,并分析了 9 月 16 日暴雨天气前后 BDS/PWV 的变化特征,将其结果分别与 GPS/PWV、Radio/PWV 进行了比对,并将 BDS/PWV 与实际降水情况进行了验证分析。结果表明:①BDS 水汽反演数据 BDS/PWV 与 GPS/PWV、Radio/PWV 的均方根误差均小于 3 mm,相关系数均大于 0.95,BDS/PWV 在数值上与 GPS/PWV 更为接近;②BDS/PWV 与实际降水情况存在高度正相关,当 BDS/PWV 迅速增大且维持在较高位置时,实际天气情况将发生强降雨,当 BDS/PWV 由高位迅速下降且持续低位时,实际天气将由降雨转为多云等其他天气;③相较于探空仪每 12 个小时测量一次水汽的手段,对 BDS 数据可根据需求测算更为精细的时序 PWV。上述结果表明,BDS 水汽反演数据 BDS/PWV 具有较高精度,与实际天气走势基本一致,可为降水预报提供参考。

参考文献:(略)

作者简介:周悌慧,男,1985 年生,硕士,工程师,从事测绘地理信息产品质检。

水下考古实时定位监控系统的构建与应用研究

朱世乾¹,梁国庆²,马 深³

(1. 湖北省水下文化遗产保护中心(国家水下文化遗产保护武汉基地),湖北 武汉 430063;

2. 国家文物局水下文化遗产保护中心 北京 100094;

3. 天津水运工程勘察设计院,天津 300450)

摘要:针对水下考古中面临的实时定位、水流监测、沟通指挥等关键技术,对目前国内外相关前沿科技和应用进行介绍和研究,结合水下考古实践需求,将相关技术进行整合,设计了一套水下考古实时定位监控系统。经实践应用,该系统较好地解决了水下实时定位、水流监测、沟通指挥等需求,提高了水下考古的安全系数和工作效率,扩展了水下考古工作领域,提升了水下考古科技化水平。

关键词:水下考古;水下定位;ADCP;水下通话;实时定位监控系统

1 引言

水下遗存是指沉没于河湖、海洋等水域中的古代沉船、城址、码头等人类活动的遗存。在水下考古诞生后相当长的时期内,人们通常通过岸上参照物来确定水下遗存的位置。伴随着卫星定位技术的产生和发展,人们得以在海洋、湖泊等水面开展高精度定位,水下考古的工作范围大大扩展,很多远离陆地的水下遗存得以被发现。

水下遗存沉没于水底,与水面之间存在一定距离。如果要对水下遗存进行精细化作业,实现对水下考古队员的实时监控,需要进行水底定位。卫星信号无法穿透水体,水底的定位工作要远复杂于陆地和水面的定位工作。

考古队员在潜水作业中需要与潜伴和水面队员进行沟通。目前国内水下考古主要采用水肺潜水(轻潜),无法广泛采用工程潜水常用的可以实时通话的管供式潜水(商业潜水),因此,探索并采用合适的水下语音通信系统显得极为重要。

水面考古队员需要实时掌握水下队员的位置、状态、工作情况和水流变化等信息,并进行沟通指挥,这就需要一套能够将水下实时定位、语音沟通和水流监测等技术整合的系统。通过借鉴、分析国内外相关前沿技术,结合工作实践,整理出一套水下考古实时定位监控系统,对于提升水下考古的科技含量,提高水下考古安全系数和工作效率,扩展水下考古工作领域和范围等具有重要的意义。

2 超短基线水下实时定位技术

卫星信号无法传输至水下,因此无法通过全球导航卫星系统(GNSS)确定水下队员的实时位置。在以往的工作中,只能通过观察水下队员的气泡来了解大体位置。受波浪、水流的影响,这种以气泡定位的方法存在很大偏差。声波信号可在水中传播,因此国际上很早就开始研究水下声学定位技术。

水下声学定位是指利用水下声波进行定位的技术,根据应答器基阵的长度可分为长基线定位系统(LBL)、短基线定位系统(SBL)和超短基线定位系统(USBL)。LBL定位精度较高,在边长100 m的三角形定位区域内定位精度可达到1 cm;SBL定位精度次之,目前最先进的SBL定位精度可控制在2.5 m内;USBL定位精度比前两种方法稍差,其定位精度一般为水深的0.5%~1.0%。长基线和短基线设备复杂,作业程序繁多,不适用于潜水员水下考古作业。

超短基线定位系统操作方便,定位精度可满足工作要求,因此可应用于水下考古领域。超短基线定位系统主要由发射接收单元和水下应答信标两部分组成。该系统根据声波在水中传播的往返时间及声速测量水声换能器到水下信标的距离,利用安装在水声换能器探头中的多个水听器接收阵接收水下信标应答信号的相位差,从而确定发射接收机相对于船舶的方位,进而可以通过距离与方位的测量确定水下目标的位置(图1)。通过将超短基线的信标绑定在水下考古队员上,水面平台可了解水下队员的相对实时位置及运动轨迹。

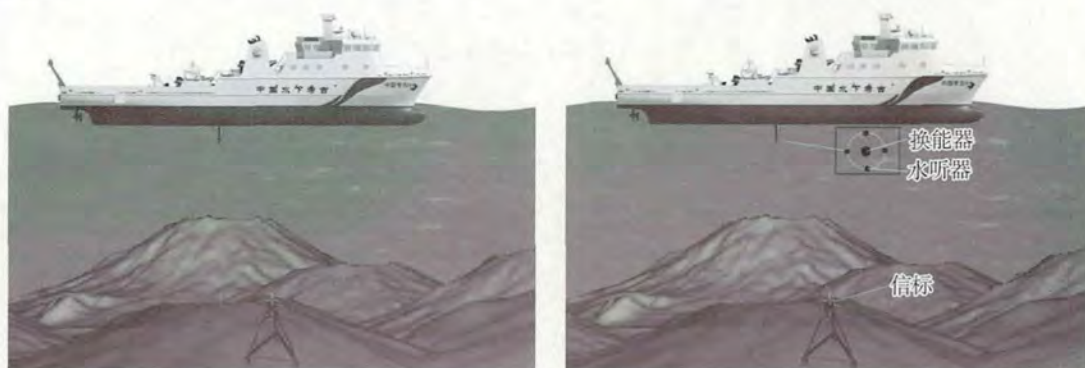


图1 超短基线定位系统

因超短基线定位系统所获取的信标位置仅是相对于换能器的实时位置,在超短基线定位系统绑定船舶(水面平台)尺寸后,可获取信标相对于船舶的实时位置。在船只搭载 GNSS 的前提下,经过特定的算法,可将信标相对于船舶的位置转化为信标的 GNSS 位置,水下考古队员或遥控潜水器(ROV)等水下移动目标携带信标后,水面便可实时了解其位置(图2)。

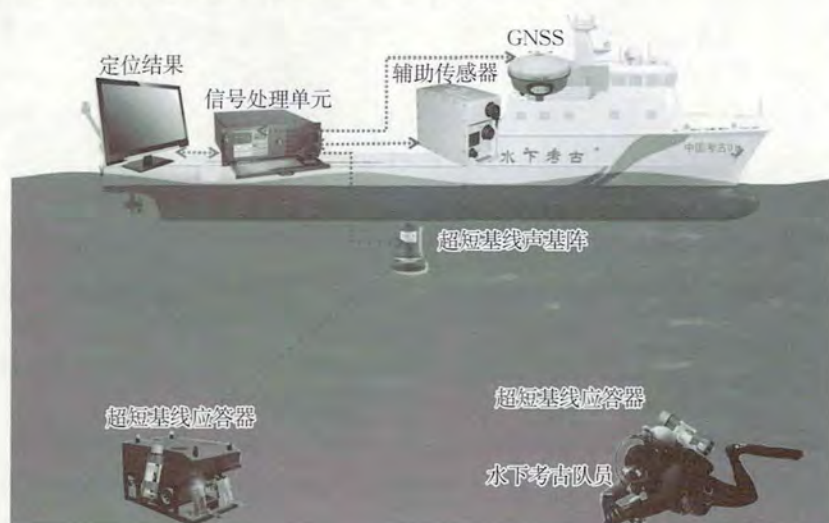


图2 超短基线配合 GNSS 技术示意

3 水下语音通话技术

3.1 水下喇叭

在水下考古中,通常将具备防水性能的水下扬声器置于水体中,通知水下考古队员的潜水时间、所在位置等信息。

3.2 水下语音通话系统

水下喇叭只能起到船上人员对潜水员单向喊话的功能,而潜水员的声音无法传达至水面,潜水员之间

也无法通话。为实现潜水员之间、潜水员与船体平台之间的信息交流,就需要一套水下语音通信系统。

国际上对水下语音通信系统研究较早,早期多采用模拟单边带调制的方式进行水声通信,但这种通信方式受水文环境影响较大。20世纪90年代后期,国外学者开始将数字技术引入水声通信系统,尝试用数字信号处理器实现水下语音信号的处理和传输,同时国内的相关研究也开始起步。近年来,基于数字信号处理技术的调制解调技术已逐渐取代模拟技术成为研究的热点,并且很多基于数字处理技术的扩频技术、信号编解码技术、分集技术和自适应技术等新技术都已应用到水下潜水员语音通信领域中,为克服水下环境噪声影响、减少传输损失等提供了帮助(图3)。结构外形方面也由分体式、大体积向模块化、小型化、低功耗和一体式发展,更好地适应了水下行动和作业需求。这些新型的水下语音通信系统由用于检测并发送潜水员语音的麦克风送话器和便于潜水员能够听到声音的、通过潜水员的牙齿和头骨传导到耳蜗的声音传导器组成,多采用通信机和全面罩一体化设计。通信机本体置于全面罩侧面,采用干电池供电,佩戴方便、操作简单(图4),适用于水下考古作业。例如,OTS、SCUBAPRO等品牌的新型水下语音通信机在水下考古领域进行了实践应用,取得了很好的效果。



图3 潜水员水下语音通话系统示意

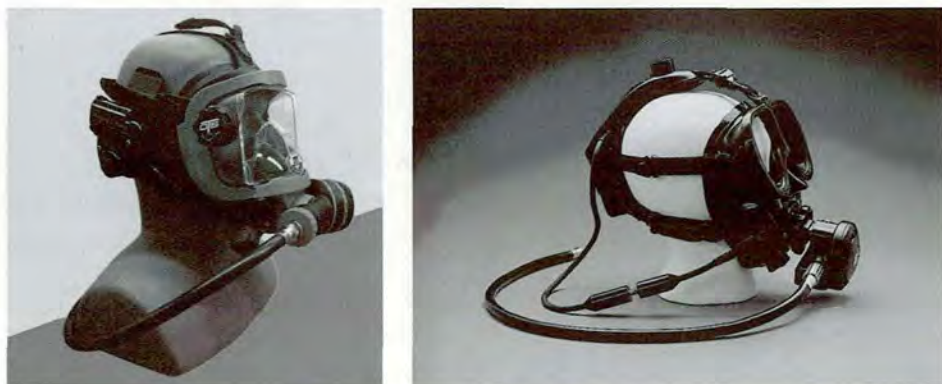


图4 新型全面罩式水下语音通信机

3.3 水下多体制通信系统

水下语音通信系统只能实现声音间的传输,视频、图像等传输只能依赖电缆传达(图5),这给潜水员的水下行动带来了不便,并且很多潜水作业无法采用商业潜水装备。随着深海载人潜水器领域的发展,多通信体制的水声通信传输系统研发取得了较快进展。例如,中国科学院声学研究所率先采用单边带调制技术实现了水声通信系统,该系统包括了四种通信体制(语音、图像、视频、文字)以适应载人潜水器在海上航行及深海探索的需要,且已经成功装备到了我国自主研发的深海载人潜水器蛟龙号上(图6)。但是,目

前尚缺乏适用于水下考古领域的小型、便携的水下多体制通信系统,只能期待新科技、新产品的出现。

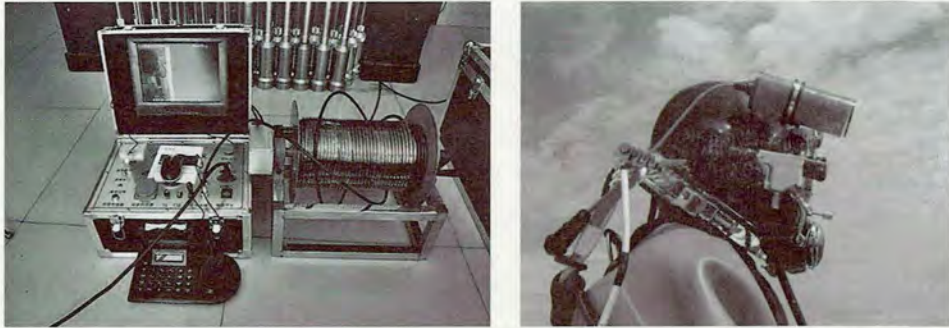


图5 常用水下线缆式视频监控系统

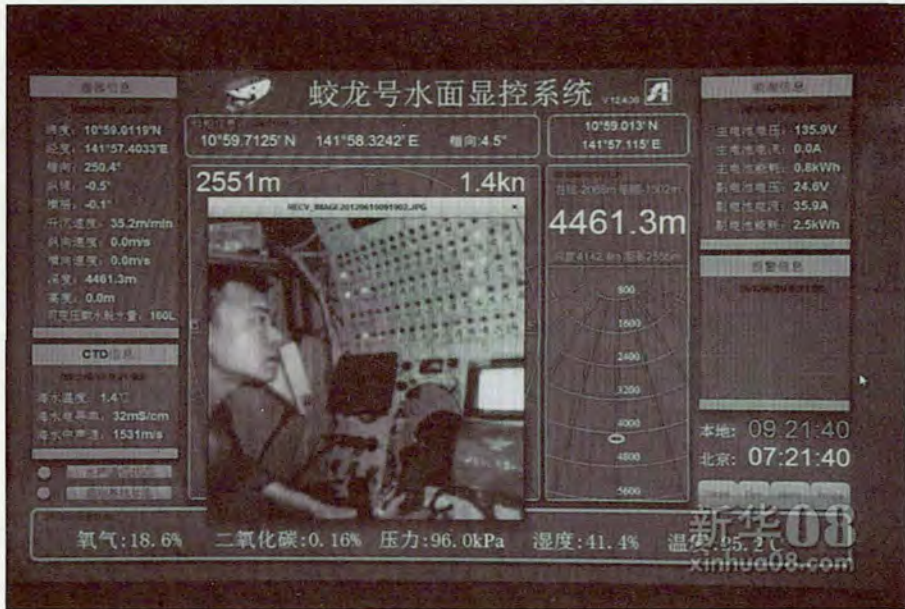


图6 蛟龙号上使用的水下多体制通信系统

4 水流监控技术

潜水员水下作业与水流息息相关,流速太大时不仅无法在水下工作还会危及人身安全。通常在开展潜水前需了解流速、流向,并需在潜水过程中时刻关注流速的变化,这就需要能够测量并显示流速的仪器——流速仪。目前我国水下考古使用较多的是直读式旋桨海流仪,该类型流速仪虽具有轻巧便携、操作简单的优点,但是其测量的仅是旋桨所在深度的流速和流向,而不同深度的水流并非一致,尤其在海水中差别更大。为提高潜水作业的安全性,需要实时掌握不同深度水流的整体变化信息。

声学多普勒海流剖面仪(ADCP)具有测量不同深度流速、流向等的功能,是一种基于超声波原理的声学流速计。其原理是:按一定规则排列的4个声波换能器向水中发射脉冲声波,然后聆听被水中颗粒物散射回来的声波,假定水体中颗粒物与水体流速相同,依据反射信号的多普勒频移计算颗粒物沿声束方向的移动速度;利用水底脉冲测量水深及测量船相对于地球的速度矢量,两者矢量差值就是要测量的流速矢量,通过测量声波的往返时间,将其乘以水中声速即可粗略计算散射体的距离,再经过测量声波的多普勒效应频移,则能计算出散射体在该声束方向上的速度分量。

ADCP 组件包括:一个放大电路,一个接收器,一个用以测量声波往返时间的时钟,一个用以测定方向的罗经,一个运动姿态传感器,一个模拟—数字转换器和一个用以处理返还的声学信号并分析其多普勒频移的数字信号处理器,一个用以校正声速在当前海水状态方程下的偏差(此校正过程假定盐度保持在一个

预设的常值上)的温度传感器。测量数据可以存储在内置的存储器中,也可实时输出到用户端的软件上,分别称为自容式和直读式(图7至图9)。



图7 ADCP实时显示的水深、流速、流向等数据



图8 固定在水底自容式测流速

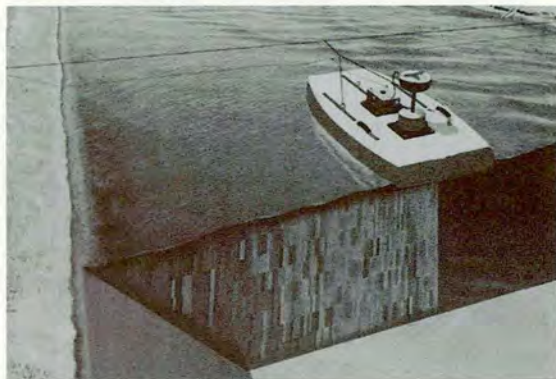


图9 安装于船底走航式测流速

5 水下考古实时定位监控指挥系统

结合水下考古工作的需求及实践经验,将水下定位、水下语音通信、水流监测等技术进行整合,构建一套综合控制系统,可以整体直观地掌握水流、潜水员位置、遗址状况等信息。

该系统由水面甲板处理系统、水下发射接收系统和软件系统组成。水面甲板处理系统负责将数据整合处理并显示:实时定位系统界面显示水下遗址的地形图及考古队员的所在位置和移动轨迹,水流监测界面显示不同深度的流速、流向变化,语音通信控制台可与潜水员开展语音通话。水下发射接收系统负责发射并接收声波信号:超短基线换能器通过支架安装于船侧,换能器头入水深度应超过船底,负责向信标发射信号并接收信标返回的信号。水流监测所用的 ADCP 换能器通过支架安装于船侧,深度应超过船底;水下语音通信系统换能器在船侧悬挂入水即可。潜水员气瓶上绑定超短基线信标,信标头部与气瓶头方向一致。水下语音通话机集成在全面罩中,负责与水上语音控制台通话(图10、图11)。软件系统负责对数据进行处理整合:水下定位软件可采用 hypack 导航软件,将水下遗址三维地形图加载进软件,将 GNSS 数据、超短基线数据导入软件,通过处理整合,可将潜水员(超短基线信标)相对于换能器的实时位置转化为潜水员在水下遗址的实时位置。ADCP 可采用 WinRiver 软件进行数据处理并显示为不同深度的流速、

流向变化。水下语音通话系统没有单独的操作软件,已集成于控制器中。



图 10 水下考古实时定位监控系统的结构

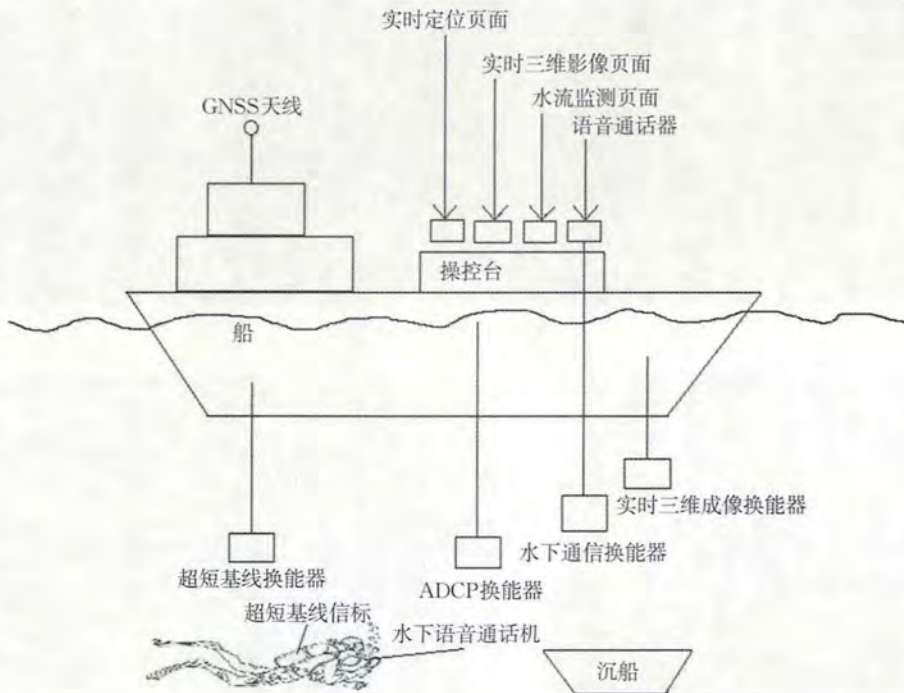


图 11 水下考古实时定位监控系统示意

在实际应用中需对设备进行连接、调试、软件校准、工程文件建设、数据检测等工作,调试正常后即可使用。将三台显示器和水下语音通话控制台安装于工作台上,安排专门工作人员进行实时监控,了解水下状况并与考古队员开展沟通指挥工作。

6 实践应用

在 2019 年舟山近代沉船调查项目中,尝试对水下考古实时定位监控系统进行实践运用,对水下实时定位、水流监测、语音通信技术进行了整合运用,取得了较好的效果,证明了该系统能够很好地服务于水下考古工作。

开展潜水工作前先用多波束测深系统获取沉船水下三维地形图;将超短基线换能器、ADCP 换能器安装于船侧,深度超过船底,将水下语音通话系统换能器在船侧悬挂入水;将 GNSS 天线安装于船侧,将换能器连接至甲板处理系统,连接各设备并通电调试;在 hypack 软件中建立测量工程,将沉船三维地形图、GNSS 数据、超短基线定位数据导入,经校准调试,使信标的 GNSS 位置显示在沉船位置底图上;将 ADCP 数据导入 WinRiver 软件,设置为每隔 1 m 深度显示流速流向,更新时间设置为 10 s;调试水下语音通信系统,确定语音通话正常。

为掌握流速的变化趋势,在开展潜水作业前将自容式 ADCP 放置在遗址水域,采集了一个月的水流信息,数据导出并打印张贴于工作平台。受潮汐等因素影响,相隔一个月的水流变化不大,可为预测水流

变化及安排每天潜水工作提供参考。在实际工作中通过监测每天水流变化,发现两个月的水流变化大体相同,但时间上有一定的叠加延后。

开展潜水工作前,先查看流速监控界面的海水流速和流向,流速在安全范围内方可安排潜水。根据 hypack 定位界面将平台入水点移动至拟调查位置并投放浮标,考古队员沿浮标绳入水即可到达沉船的拟调查位置附近。潜水时,将超短基线信标绑定在考古队员气瓶上,考古队员在水下的深度、位置、移动轨迹实时显示在 hypack 定位界面。监控人员可观察了解考古队员的水下状态(位置、深度、移动),并通过水下语音通话系统与其沟通指导,这样考古队员可根据监控人员的指挥到达沉船的不同位置开展工作,并将工作情况及时传达至水面。监控人员发现水流变化时可及时通知考古队员,控制工作时间或通知人员及时出水(图 12、图 13)。



图 12 潜水员水下位置的实时显示页面

此次开展工作的水域深度大,水流变化急,能见度差,沉船锈蚀严重,周围还缠绕着较多的渔网,水下考古作业难度很大。本次调查中通过对水下实时定位监控系统的应用,得以准确把握水流规律及变化情况,合理安排潜水工作时间,最大限度地提高了潜水安全,使水面工作人员及时掌握水底工作情况,潜水沟通及指挥得以实现,提高了工作效率和安全系数,使水下考古调查任务得以顺利完成,并为今后在类似水域开展水下考古工作奠定了基础。



图 13 水下考古实时定位监控系统的应用场景

7 结 语

水下考古实时定位监控系统是结合工作需要,借鉴国内外科研成果,对 GNSS 定位技术、超短基线定位技术、水流监测技术、水下语音通信技术等的综合运用,解决了水下考古工作中的潜水安全、沟通指挥、实时工作场景监控等需求。在 2019 年舟山近现代沉船调查中对该系统进行了实践应用,取得了较好的效果,证明该系统能够很好地提高水下考古工作效率,保障潜水员安全,扩展水下考古工作范围。但该系统尚需进一步完善,如超短基线定位精度和信号延误的问题,也期待将更多新技术、新设备引入该系统,更好地促进水下考古事业的发展。

参考文献:(略)

作者简介:朱世乾,男,1987 年生,硕士,馆员,研究方向为水下考古物探技术研究与应用。

面向自然资源调查的北斗定位关键技术研究

余永欣,刘博文,龚芸,秦飞,杨旭东,张译

(1. 北京市测绘设计研究院,北京 100038; 2. 城市空间信息工程北京市重点实验室,北京 100038)

摘要:按照自然资源统一管理需求,基于我国完全自主知识产权的北斗卫星导航系统,开展面向自然资源调查的北斗定位若干关键技术研究,在北斗定位关键算法、设备构造、软件平台等方面均取得了突破,研究成果广泛应用于自然资源调查,形成了一个高精度、高时效、高自动化、全天候的现代化北斗精准位置信息综合服务系统,为自然资源统一调查、管理提供可靠的技术保障。

关键词:北斗定位;最小二乘法;多星座导航;自然资源调查

1 引言

依照国务院机构改革方案,新组建的自然资源部着力推进自然资源统一管理。新时代自然资源统一管理重点体现在资源管理和空间管理的一体化上,需要按照自然资源是一个生命共同体的理念,做好自然空间重点要素的监测和调查,以实现“山水林田湖草”等自然资源的统一监管和系统治理。

近年来,面对自然资源统一管理需求,国家积极开展了地理国情普查、地理国情监测、全国土地调查、全国风险灾害普查等自然资源监测和调查,为解决在传统调查任务中利用纸质图件采集、记录、标绘存在的流程复杂、效率低、采集精度不够、自动化程度低、受制于天气因素等诸多问题,利用我国自主研发的北斗定位技术,结合航空遥感、地理信息、现代互联网、云计算、区块链等技术,打造纵向联动、横向协同、互联互通的自然资源实时移动调查系统,通过对北斗定位关键技术的研究和攻关,实现遥感影像快速发布、自然资源一张图分布展示,以及空间自然资源实时调查、巡视和监管,并打造可视化表达的一体化服务体系,解决自然资源调查中的若干关键技术难题,为深度、持续开展自然资源调查提供重要的科学技术支撑。

2 北斗卫星导航系统概述

北斗卫星导航系统(BDS)是中国自主研发、独立运行的全球导航卫星系统,与美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、欧盟的Galileo系统并称为全球四大导航卫星系统。

2020年6月23日上午9时43分,长征三号乙运载火箭在西昌卫星发射中心载着北斗三号最后一颗卫星升天,这意味着中国北斗全球星座全面部署完成。借由此次发射,中国的卫星导航和位置服务顺利在全球垄断市场中凿开了一个口子,实现了中国的又一个全面技术自主。

北斗卫星导航系统建设目标是建成独立自主、开放兼容、技术先进、稳定可靠、覆盖全球的导航系统。随着北斗卫星导航系统全球组网完成,“北斗+”和“+北斗”的理念将逐步推广。北斗卫星导航系统正促进卫星导航产业链形成,形成完善的国家卫星导航应用产业支撑、推广和保障体系,推动卫星导航在国民经济社会各行业的广泛应用。BDS可在全球范围内、全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠的定位、导航、授时服务,并兼具短报文通信能力。

面向未来自然资源统一管理需求,亟须建立基于我国自主导航的全天候、空天地一体化的自然资源调查系统,构建北斗卫星导航空间基准服务共享平台、自然资源调查移动采集和巡查系统、自然资源空间规划一张图数据库等。积极稳妥推进北斗卫星导航系统在我国国民经济中的应用,推进北斗导航产业的科学技术成果转化。

3 关键技术与研究

我国 BDS 的全面建成,将使国内相关导航领域实现弯道超车。作为一个大国,中国必须建成一个统一的对 BDS 的高精度定位数据、网络进行监控管理的运维平台,集成北斗超快速事后 GNSS 数据解算技术,集成基于北斗短报文和区域差分的卫星导航定位技术,以及集成 BDS、GPS、GLONASS、Galileo 系统联合数据的自动解算、自动平差等多个关键技术。

3.1 融合 GNSS 多星座组合导航的北斗定位高精度算法研究

针对 BDS、GPS、GLONASS 和 Galileo 等单星座系统定位中存在的定位精度不足、可见星不多、定位可靠性不强等问题,研究了一种利用 BDS、GPS、GLONASS 和 Galileo 多星座信息在统一坐标系中采用最小二乘法进行组合导航定位的方法。

该方法通过泰勒级数展开的方法将一组非线性的观测方程转换为线性方程,并利用最小二乘法对其进行求解,然后获得用户坐标。将 4 个系统的时间和坐标都统一到 GPS 的时空参考系中,则观测方程可统一为

$$\rho_i^j = [(x_u - x_i^j)^2 + (y_u - y_i^j)^2 + (z_u - z_i^j)^2]^{\frac{1}{2}} + c\Delta t_i \quad (1)$$

式中, (x_u, y_u, z_u) 为用户实际位置, (x_i^j, y_i^j, z_i^j) 为导航卫星的实时位置。

假设用户初始位置为 (x_u^0, y_u^0, z_u^0) , 那么 $\delta_{x_u} = x_u - x_u^0, \delta_{y_u} = y_u - y_u^0, \delta_{z_u} = z_u - z_u^0$, 将式(1)在 (x_u^0, y_u^0, z_u^0) 处用泰勒级数展开,并取一次近似表达式,移项后可得

$$\rho_i^j - c\Delta t_i = \begin{bmatrix} x_u^0 - x_i^j & y_u^0 - y_i^j & z_u^0 - z_i^j \\ R_{i0}^j & R_{i0}^j & R_{i0}^j \end{bmatrix} \cdot [\delta_{x_u} \quad \delta_{y_u} \quad \delta_{z_u} \quad c\Delta t_i] \quad (2)$$

式中, i 为星座类型, j 为 i 类星座中的第 j 颗导航星, ρ_i^j 为实际测量得到的伪距, R_{i0}^j 为

$$R_{i0}^j = [(x_u - x_i^j)^2 + (y_u - y_i^j)^2 + (z_u - z_i^j)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由以上模型可知,对于不同的星座和不同的可见卫星,观测方程式(1)、式(2)包含了 $\delta_{x_u}, \delta_{y_u}, \delta_{z_u}, \Delta t_{\text{bei}}, \Delta t_{\text{glo}}, \Delta t_{\text{gal}}, \Delta t_{\text{gps}}$ 共 7 个未知数,当同时观测到 7 颗以上的导航卫星时,可得冗余代数方程,用最小二乘法进行迭代求解和补偿,即可实现用户定位解算。

假设观测到 n 颗 GPS 卫星, m 颗 BDS 卫星, k 颗 GLONASS 卫星和 l 颗 Galileo 卫星,则组合定位方程的矩阵形式及其解形式可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{AX} &= \mathbf{B} \\ \mathbf{X} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

从而得到用户的位置。

融合了 GNSS 多星座组合导航的 BDS 定位高精度算法解决了多个卫星系统的兼容设计,在跟踪环路设计时考虑参数设计方法,以保证环路的灵活性。高精度定位解算单元包括 BDS 在内的卫星定位坐标解算,可以实现全星座数据的接收和处理,通过 BDS 标准差分电文解算得到高精度位置。

3.2 基于 BDS 的具有便携、多频、节能、稳定、兼容的高性能集成天线

卫星接收天线在 BDS 终端起着不言而喻的重要作用,天线的性能、尺寸直接关系到整个定位设备的品质和便携性。由于导航卫星信号容易被干扰和遮挡,目前手持导航设备都会匹配外部收发天线,使用时需要用射频线缆将模块和无源天线相连。总体来说,便捷性差、外观尺寸大、线缆衰减高、直流压降大、电耗大等缺点大大限制了其应用的场合。

为了提升 BDS 调查定位设备的性能和品质,自主研发了一款基于 BDS 的融合高介电常数材料实现微带天线小型化特殊结构设计的通信天线,使天线各项性能指标达到较高的设计精度,突破载波模糊度快速解算、接收机通道一致性、全频超宽带技术等难题,较好地满足全频段测量型天线的设计指标要求,更好

地服务于全频北斗卫星终端设备,天线相位中心稳定度优于 5 mm。集成天线能较好地锁定跟踪卫星信号,支持所有 GNSS 卫星星座信号,可充分利用多星座进行组合定位,极大地缩短了定位时间,提高了观测结构的可靠性。

手持导航设备多采用电池供电,能量有限,整机工作瞬时需要提供较大电流,这种现象往往导致手持设备的电池电量急剧减少,电池使用寿命大大降低,影响了整机的使用寿命。研发组开展相关技术研发,通过无源小型化天线仿真、储能电路设计和天线系统集成实现了技术突破,研发的超级电容储能模块电路形式简单、体积小,极大地降低了北斗发射模块工作对电池的冲击,有效延长了天线电池的使用时间和寿命。

该天线采用频率阻抗网络消耗表面波,将其转换成无害的热能,天线具有剖面结构低,稳定性好的特点,同时还具有全向性、主波束宽、右旋圆极化的功能,可以更好地消除源自地面的多路径反射,并降低电离层的干扰。将带隙结构独特的频率选择性用于集成天线的设计,减小交叉干扰和抑制表面波,提高天线的增益,改善天线的辐射特性,从馈电网络设计、滤波器选择、双工器技术等三个方面研究,保证通道时延抖动最小,满足系统对通道时延一致性的设计要求。与此同时,在北斗接收机天线中添加自动调整天线方向的算法,对天线的接收方向进行调整,抑制干扰信号的接收,达到对有用信号抗干扰的目的。

综合上述研究成果设计的基于 BDS 的高性能集成天线,具有便携、多频、节能、稳定、兼容的卓越性能,极大地改善了天线搜星视野,提升了搜星速度,稳定了锁定解算等产品性能。

3.3 基于 BDS 的面向自然资源调查的图库一体化综合调查设备

根据自然资源统一监管、调查的目标,基于 Andriod 系统,研发了一种以 BDS 为主、兼容所有其他导航系统面向自然资源调查的高精度信息设备,实现 BDS 高精度定位,支持多星组合定位。该设备融合了自然资源调查一体化解决方案,运用海量信息、云计算、5G 网络技术的分布式存储、数据备份、数据减缩技术,解决了便携存储需要的高安全性、可靠性、可扩展、开放式操作、易管理等调查要求。

该设备具有采集、计算、编辑、存储等基础资源服务,创新了资源弹性调度和均衡负载、海量矢量数据动态快速渲染、高性能空间分析引擎和全空间一体化等新技术,可以快速实现自然资源空间定位、数据采集、编辑处理、符号化显示、数据字典处理、数据质检、数据分发、打印制图、数据入库等扩展应用,实现通过调查平台便可完成自然资源数据获取、编辑、存储、共享等流程化管理,快速便捷地解决自然资源空间立体化调查中的技术难点。

基于 BDS 的高精度自然资源调查设备的软硬件设备兼容性好、界面友好、基于 Andriod 系统运行流畅,可快速实现空间要素的样本点采集、样本点调查和核查、数据字典管理、属性填写、调查轨迹采集、元数据采集、调查结果统计表格输出等功能,研究基于 5G 网络、基于位置服务(LBS)的 BS+CS 交互云平台,以空间定位为基础,通过云技术实现便携调查设备、调查系统、服务器之间的交互,极大地提升了自然资源调查的整体效率和水平。

自然资源综合调查设备主要对“山水林田湖草”自然资源进行统一调查、监测,满足自然资源行政管理部门的实际业务需求。该系统搭载了调查区域的高分辨率遥感影像数据云平台,针对不同应用装载专题应用数据,可实现基于 BDS 的定位和其他导航定位功能,针对核查问题记录、上报的标绘,简化工作流程,提高工作效率。综合设备系统具有导航定位、信息采集、视频拍摄、展示、查询、分析、统计及轨迹记录等功能,为政府部门开展自然资源调查工作提供移动便捷、高效的调查设备技术支撑。

4 结 语

通过开展面向自然资源调查的北斗定位关键技术的研究,形成了一套稳定性强、可靠性高的自然资源移动调查综合系统,基于 BDS 的自然资源调查技术攻关和应用在当前背景下都具有十分重要的意义。北斗卫星导航系统是国家重要信息基础设施之一,我国高度重视 BDS 的建设。随着最后一颗组网卫星的发射升空,越来越完善的 BDS 一定能带来巨大的社会和经济效益,不仅在自然资源调查等行业占据重要地

位,而且能在网络通信、交通运输、建筑勘探、森林防火和国家安全等诸多领域发挥重要作用。

本文研究的定位系统和综合调查设备具有稳定性较好、定位精度高、自动化强的特点,相关技术和研究成果甚至是北斗卫星导航系统在自然资源领域的首次应用,可在生态文明建设等多项工作中得以推广应用。可以说北斗卫星导航系统已日趋完善,北斗导航时代越来越近了。

参考文献:(略)

作者简介:余永欣,男,1978年生,高级工程师,主要从事自然资源调查及GNSS测绘技术应用与实践。

基于 CORS 增强的移动智能终端定位测试分析

熊先才,黄 凯,杨 凯

(重庆市规划和自然资源调查监测院,重庆 401123)

摘 要:本文的研究目的是分析并测试适合自然资源调查监测领域推广的基于 CORS 的移动智能终端增强定位方案,文中选取典型设备进行实验,比较其在自然资源调查监测实际场景中的定位效果。测试结果表明,低成本的外置 GNSS 模块结合 CORS 的 RTD 服务可以获得亚米级的定位精度,而采用 CORS 的 RTK 服务,在开阔地单频 RTK 外置 GNSS 模块也能得到固定解并获得厘米级的定位精度,但其在复杂环境下难以固定,移动状态易导致卫星失锁,依赖虚拟位置服务,为篡改虚拟定位结果留下了漏洞。而高成本的内置双频 GNSS 模块的一体化移动智能终端,采用 CORS 的 RTK 服务,可以获得媲美传统 RTK 测量的厘米级定位服务,并且该方案安全性强,值得推广。

关键词:CORS;移动智能终端;自然资源调查监测

1 引 言

近年来,基于移动智能终端的自然资源调查监测应用发展迅速,已经快速融入了土地执法监察、国土资源评价、矿产资源规划等众多领域,改革了自然资源调查监测领域的管理模式。移动智能终端集无线通信传输、全球导航卫星系统、地理信息应用、遥感影像数据为一体,管理者可以轻松获取云端传送的各类自然资源图层数据,及时掌握第一手的调查监测数据,做到自然资源的有效监控、违法行为的高效处置,极大地提高了工作效率。

然而,消费级的移动智能终端产品由于自身硬件条件和能耗的限制,定位精度低,无法满足自然资源调查监测工作对高精度位置服务的要求。而随着卫星导航定位连续运行基准站(CORS)在全国范围内的大面积覆盖和连续运行,CORS 系统以其让用户无须架设基准站,即可享受高精度的差分增强位置服务的技术特点,为移动智能终端获取高精度位置服务提供了一条便捷的途径。

本文在介绍移动智能终端基于 CORS 的差分定位原理的基础上,分析适合自然资源调查监测领域的智能移动终端 CORS 增强定位方案,并选取典型设备进行实验,分析不同场景下的实测效果,比较各方案的优劣。

2 基于 CORS 的移动智能终端差分定位原理

消费级移动智能终端产品一般使用伪距单点定位算法计算位置信息,其定位精度只能达到 10 m 左右,限制了在终端上运行的自然资源调查监测领域地理信息系统(GIS)产品的应用,而采用基于 CORS 的实时差分定位技术可大幅提升移动智能终端的定位精度。实时差分定位技术主要分为实时动态定位(RTK)技术和实时伪距差分(RTD)技术,其中,RTD 技术是对伪距观测值进行实时动态差分改正,RTK 技术是对载波相位观测值进行实时动态差分改正。简单来说就是利用覆盖该区域的若干个全球导航卫星系统(GNSS)基准站构成的 CORS 网,各个基准站将基站的观测数据上传到 CORS 服务器,CORS 服务器根据接收的移动智能终端上传的概略坐标,生成相应的伪距/载波相位差分改正值,经通信网络播发回移动智能终端,最终移动智能终端利用该差分数据和 GNSS 模块获取的卫星数据计算得到高精度的位置信息,基本流程如图 1 所示。

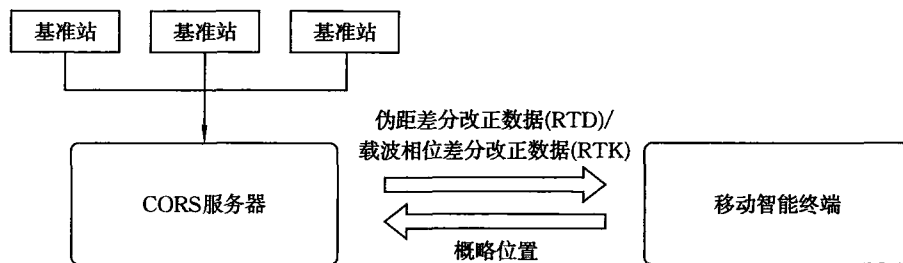


图1 基于 CORS 的移动智能终端差分定位原理

3 基于 CORS 的移动智能终端增强定位方案

从上文可知,移动智能终端获取高精度的位置信息依赖于 GNSS 模块。然而目前消费级移动智能终端导航定位芯片基本上不支持 CORS 差分数据解算功能,直接采用该芯片获取 CORS 差分定位服务,需要开发具有 CORS 差分数据获取并解码、芯片卫星数据解码、实时差分定位解算等诸多功能的专业应用。另外,在硬件方面,消费级移动智能终端产品的天线难以保持对卫星信号的锁频,抗多路径效应能力弱,复杂环境下获取的原始观测数据差;在软件开发方面,设备系统版本和定位芯片型号多样导致应用程序接口(API)不统一,存在开发适配难度高、推广难度大等局限。

因此,可考虑将专业的 GNSS 模块与移动智能终端相结合。依据 GNSS 模块与移动智能终端集成度的不同,常见有两种解决方案。一种是外置 GNSS 模块通过 USB-OTG 或者蓝牙通信等方式与移动智能终端进行数据通信。为了让终端系统内的所有应用均使用高精度的定位服务,该方案的 GNSS 模块需要终端系统中的应用程序配合使用。首先,需要预先打开终端系统中的虚拟位置服务,并将该应用程序设置为虚拟位置应用。然后,在应用程序上完成 CORS 服务器 IP、端口号、账户名、密码、RTD/RTK 服务的源节点等信息的配置。一旦外置 GNSS 模块连接移动智能终端,该模块会借助移动智能终端的网络调用配置信息连接 CORS 获取差分数据,解码后解算出定位结果。最后,该应用程序会读取外置 GNSS 模块的定位结果,并作为终端系统位置服务共享给系统中的其他应用,并时刻显示 GNSS 模块的定位状态。另一种是采用将 GNSS 模块内置的一体化移动智能终端进行数据通信。该方案本质上是把内置的 GNSS 模块直接代替原有移动智能终端的低端定位芯片,内置的 GNSS 模块定位结果以数据包的形式直接发送到系统底层位置服务,其终端系统中也需要给对应的应用程序配置 CORS 服务器信息,显示 GNSS 模块的定位状态。

一方面,上面从技术实现的角度分析了适合自然资源调查监测领域推广的基于 CORS 的移动智能终端增强定位方案。外置 GNSS 模块依赖终端系统的虚拟位置服务,存在篡改虚拟定位结果的漏洞,而内置 GNSS 模块的一体化移动智能终端则避免了这个弊端。另一方面,从控制成本推广的角度,外置 GNSS 模块可以充分利用移动智能终端的普及优势,随插随用,适合低成本的外置 GNSS 模块,有利于基于 CORS 的差分增强定位终端设备的快速部署,而内置 GNSS 模块的一体化移动智能终端性能出众,适合高精度的内置 GNSS 模块,方便统一采购。

4 测试分析

本文选取低成本的西博微盒 RTD(ST806L-36G)和单频 RTK(ST126K-36G)产品作为外置 GNSS 模块连接智能手机,在自然资源调查监测常见实际场景下与以支持双频 RTK 功能的华测 LT700H 平板为代表的高成本的内置 GNSS 模块的一体化移动智能终端方案进行实测效果比对。

4.1 静态定位测试

为模拟自然资源调查监测时场景的快速定位,在重庆市规划和自然资源调查监测院附近一个空旷地

选择一个固定点,使用 RTK 测量该点坐标作为真实坐标。将西博微盒 RTD 产品天线放置在固定点上,连接 CORS 的 RTD 服务,采样率设为 1 s,测量 10 min。如图 2 所示,西博微盒 RTD 产品连接 CORS 的 RTD 服务后, N 方向外符合误差为 0.953 m,达到亚米级的定位精度。



图 2 西博微盒 RTD 产品静态定位误差

此后,将西博微盒单频 RTK 产品天线与华测 LT700H 平板天线对准该空旷地固定点,连接 CORS 的 RTK 服务,静态测量 2 min,测量结果如图 3 所示。保持实验条件不变,仅将固定点位更改为附近商业区楼间的一处空地,测量结果如图 4 所示。

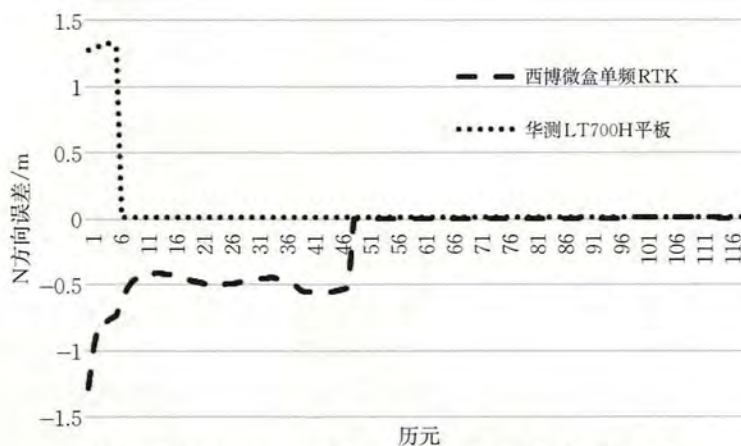


图 3 两种 GNSS 模块产品在空旷地静态测量的定位结果

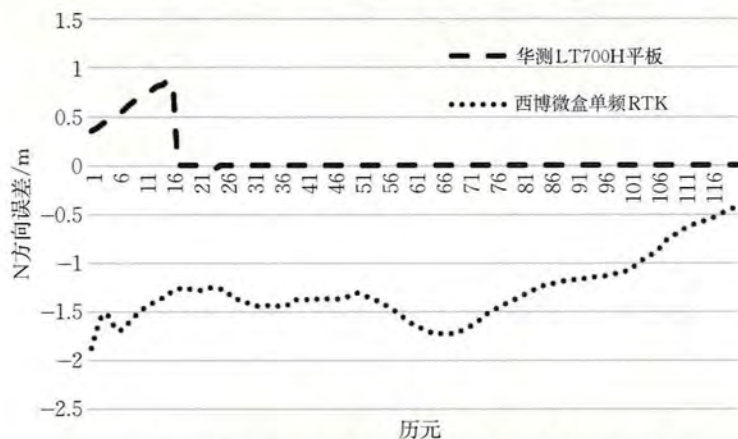


图 4 两种 GNSS 模块产品在楼间空地静态测量的定位结果

从图 3 和图 4 可以看到,华测 LT700H 在空旷地和楼间空地均能快速得到固定解,西博微盒单频 RTK 产品在空旷地 50 s 才缓慢收敛得到固定解,甚至在楼间空地的实验时间内仍处于缓慢收敛的浮动解

状态。这说明西博微盒单频 RTK 产品易受环境中的多路径误差影响导致模糊度固定效率大幅下降,实际测量场景中可能无法固定,只能得到浮动解。经 5 次实验取平均值,西博微盒单频 RTK 产品固定解 N 方向外符合误差为 2.8 cm,华测 LT700H 为 1.5 cm。

4.2 移动稳定性测试

为模拟作业人员连续测量多个点时的移动情形,将西博微盒单频 RTK 产品和华测 LT700H 平板在初始点进行初始化后,测试人员拿着产品移动到另几个点测量,整个过程中产品的 GNSS 状态如图 5 所示。图 5 中纵轴是 NEMA-0183 协议中的 GNSS 状态值。从图 5 可以看出,西博微盒单频 RTK 产品在移动过程中会导致 GNSS 信号失锁,每测一个点后需要原地等待以重新固定模糊度,而华测 LT700H 平板在初次固定后,作业人员移动过程中一直保持固定解状态。

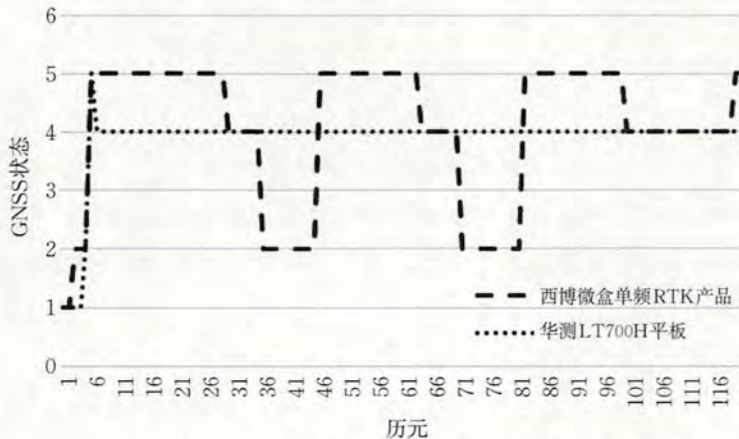


图 5 两种 GNSS 模块产品在移动过程中的 GNSS 状态

5 结 语

通过对基于 CORS 的移动智能终端增强定位方案的研究、测试、对比、分析,得到以下结论:

(1)低成本的外置 GNSS 模块的方案应用于自然资源调查监测领域,结合 CORS 的 RTD 服务,可以获得亚米级的位置服务,而采用 CORS 的 RTK 服务,在空旷地单频 RTK 外置 GNSS 模块也能得到固定解,并获得厘米级的定位服务,但是在复杂环境下难以得到固定解,只能得到浮动解,并且在动态移动过程中极易导致卫星失锁。此外,外置 GNSS 模块使终端中所有共享高精度的位置服务应用依赖于系统中的虚拟位置服务,为篡改虚拟定位结果留下了漏洞。

(2)采用内置双频 RTK 的 GNSS 模块的一体化移动智能终端方案,结合 CORS 的 RTK 服务,可以获得媲美传统 RTK 测量的厘米级定位服务,并且该方案安全性强,值得推广。

参考文献:(略)

作者简介:熊先才,男,1973 年生,博士后,正高级工程师,重庆市规划和自然资源调查监测院副院长,主要研究方向为测量数据处理及 3S 技术应用方面的研究。

大型水利枢纽水源工程三维 GNSS 施工控制网测量技术研究

吴恒友,胡 君,刘怀林

(贵州省水利水电勘测设计研究院有限公司,贵州 贵阳 550002)

摘 要:大型水利枢纽水源工程大多建设在高山峡谷区域,该区域地形起伏大,并且具有通视条件差、工程建设内容多、建筑物多等特点。如何在这样的条件下建立满足指导施工的控制网是一项重要的工作。本文从控制网方案布设及优化设计、数据观测获取、数据处理和检测分析、成果分析等方面详细论述了三维 GNSS 施工控制网的测量技术,对类似工程施工控制网的测量具有较强的参考价值。

关键词:GNSS;大型水利枢纽;施工控制网;EGM2008

1 引 言

大型水利枢纽水源工程一般包括大坝、溢洪道、泄洪放空隧道、取水口、隧道、发电厂房等。一般选址在高山谷地,地形陡峭,内部通行困难,植被覆盖茂密,通视条件较差,采用常规方法建立施工控制网工作量且施测困难。相比常规观测方法,GNSS 不仅具有观测速度快、成本低、精度高、全天候、不受地形和通视条件限制等优点,而且 GNSS 观测的数据具有内符合精度高等优势。本文以大型水利枢纽施工控制网为例,阐述如何利用 GNSS 技术建立三维施工控制网。

2 工程概述

贵州省黄家湾水利枢纽工程是综合利用的水利工程,主要任务是以城乡生活和工业供水、农业灌溉为主,并结合发电。测区最低高程 985 m,最高高程 1 110 m,地形起伏大,通视条件差,属于典型的喀斯特山区地貌。坝址距紫云县城约 20 km,距板当镇约 17 km,有 S309 省级公路从坝址右岸下游 1 km 左右附近通过,有乡村公路可通至坝址,另外有惠兴高速从坝址右岸附近通过,惠兴高速在板当、紫云有匝道口。水库总库容 15 720 万立方米,根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252—2017)的规定,水库工程等级为 II 等,工程规模属大(2)型。枢纽区施工控制网主要是满足枢纽工程建设需要,建筑物主要包括混凝土面板堆石坝、溢洪道、泄洪放空隧道、供水灌溉发电取水口、供水灌溉发电引水隧道、发电厂房、副坝等。建筑物等级方面,除供水灌溉发电引水隧道为 3 级、副坝为 3 级、发电厂房为 4 级外,其余均为 2 级建筑物。

3 投影面与起算数据选择

3.1 投影面选择

施工控制网范围最大高程为 1 110 m,最小高程为 985 m,高差为 125 m,平均高程面为 1 045 m,高程异常值为 30 m,边长归算到参考椭球面的形变量在 $-15.91 \sim -17.87$ cm/km 内,平均高程面上高程归算改正量为 -16.85 cm/km。施工控制网地处 1954 北京坐标系(中央子午线为 105°),东西向距离为 3.3 km,距中央子午线距离在 117.9~121.2 km,从参考椭球面投影到高斯平面的长度变形值为 17.08~18.05 cm/km。施工控制网区域高程归算改正量与投影长度变形值二者值大小相近,符号相反。经计算,

沿用 1954 北京坐标系(中央子午线为 105°),参考椭球面为投影面时,控制网范围长度综合变形范围值为 $-0.79\sim 2.14$ cm/km,符合《水电水利工程施工测量规范》(SL 52—2015)中规定的 2.5 cm/km,故平面施工控制网坐标系沿用 1954 北京坐标系(中央子午线为 105°)。

3.2 起算数据选择

枢纽区水源工程附近有 HJ07、HJ08、HJ18 三点。起算数据采用 GNSS 对三点进行观测校核,以 HJ07 为起算点,采用单点推算方法,得到其他已知点的计算坐标,从而得到彼此间的计算边长和计算方位角,与理论边长和理论方位角进行比较,如表 1 所示。

表 1 控制网起算点可靠性分析计算

已知边	理论边长 /m	计算边长 /m	理论方位角	计算方位角	边长相对 精度	方位角差 /($''$)
HJ07~HJ08	937.644 115	937.647 306	$95^\circ 44' 43.3''$	$95^\circ 44' 45.9''$	1/587 623	2.6
HJ07~HJ018	657.992 495	657.991 131	$307^\circ 17' 32.9''$	$307^\circ 17' 34.4''$	1/964 413	1.5
HJ18~HJ08	1 537.431 16	1 537.434 07	$108^\circ 41' 05.0''$	$108^\circ 41' 07.0''$	1/1 056 333	2.0

由表 1 可知,HJ07、HJ08 及 HJ18 控制点相互的可靠性满足精度要求,HJ07、HJ08、HJ18 分布满足要求。可以作为起算数据。

GNSS 控制网与高程控制网联测方面,水准路线经过 GPS 控制网点附近,尽量联测施工平面控制点,水准联测 GPS 控制点为 P01、P03、P05、P07、P10、P11、P15、P16、P18、P19。水准联测控制点多,分布均匀,能够为 GNSS 控制网高程拟合提供合理的起算数据。高程施工控制网起算以可靠、稳定的勘测设计阶段施测四等水准作为高程的起算构成闭合线路,高差闭合差不超出 $\pm 15\sqrt{L}$ mm 其中 L 为路线长度,单位为 km。起算点需至少通过原控制网内一个控制点检校,采用附合水准路线进行,附合差不超出 $\pm 25\sqrt{L}$ mm。水准点的高程为正常高,高程系统采用 1956 黄海高程系。

4 三维 GNSS 施工控制网布置方案

施工控制网采用 GNSS 观测方法。标石采用混凝土观测墩普通标石,现浇混凝土观测墩,下底半径 25 cm,上底半径 15 cm,地面上高 120 cm,强制对中标志结构。在现浇标石面盖板上烫印三等点点号,安装不锈钢强制对中标志。施工控制网主要是满足枢纽工程建设需要,平面控制网布设 21 个三等平面控制点,其中控制点 P12 由于方案调整受施工影响,并且其他控制点已能够满足施工建设要求,故取消该控制点布设,实际共布设 20 个三等平面控制点。能够满足混凝土面板堆石坝、溢洪道、泄洪放空隧道、供水灌溉发电取水口、供水灌溉发电引水隧道、发电厂房、副坝等建筑物施工建设要求。全网采用边连接形式构网,由多个重叠大地四边形和三角形组成。其最终观测形成的三等 GNSS 控制网图及点位分布如图 1 所示。

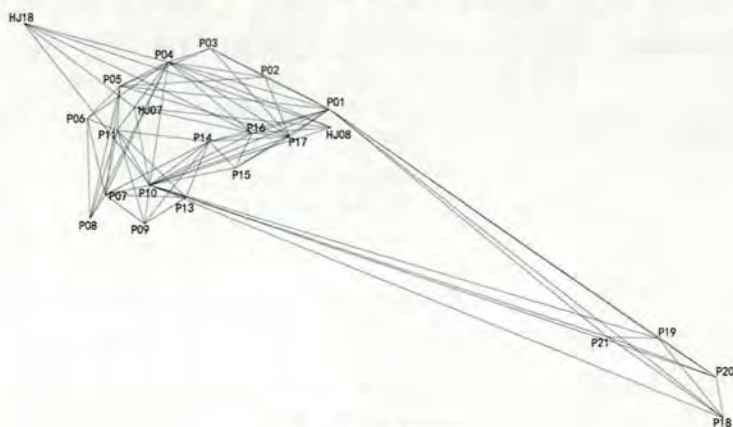


图 1 施工控制网

5 控制网优化设计

控制网布设完成后,根据已有资料得出控制点概略坐标及高程,然后对控制网进行优化设计,在保证控制网精度的前提下,减少工作量,提高工作效率。采用 CosaGPS 软件进行 GNSS 控制网优化设计,根据概略坐标文件及基线引导文件生成模拟三维基线向量成果。对模拟基线向量进行平差处理及精度评定,以平差处理结果及精度评定结果评价设计 GPS 控制网。GNSS 施工控制网最弱点为 P21, X 方向为 0.5 cm、Y 方向为 0.5 cm、Z 方向为 0.3 cm、最弱点点位中误差为 0.8 cm;最弱边为 P12~P13,平均边长为 171.402 m,边长较差为 0.04 cm,相对误差为 1/411 000,满足技术指标要求。

6 控制网的实施及精度评定

6.1 控制网观测

观测采用 6 台 Trimble R4 GPS 双频[标称精度 $\pm(3\text{ mm}+1\times 10^{-6}\cdot D)$]接收机按静态相对定位模式进行测量,每条边观测时段 ≥ 2 ,每个时段观测时间 $\geq 60\text{ min}$,卫星高度角 $\geq 15^\circ$,接收机两次观测的数据采样间隔设置为 30 s,点位位置精度几何因子 PDOP ≤ 6 。观测时天线整平对中误差不大于 1 mm,每时段观测前后各量取天线高一次,两次较差小于 2 mm,并取其平均值作为最后观测值。

6.2 观测数据后处理及精度分析

6.2.1 观测数据基线处理及各项检测

基线解算采用广播星历按静态相对定位模式进行,使用 Trimble 随机商用软件 TBC 3.8,并进行了数据处理和重复基线、同步环、异步环检核统计,按规范要求 GPS 控制基线向量网所有异步环闭合差应符合以下规定,即

$$W_x \leq 3\sqrt{n}\sigma, W_y \leq 3\sqrt{n}\sigma, W_z \leq 3\sqrt{n}\sigma, W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2}, W \leq 3\sqrt{3n}\sigma$$

式中, n 为闭合环边数; σ 为标准差,即基线向量弦长中误差(mm)。 $\sigma = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$, a 为固定误差, b 为比例误差, d 为弦长、单位为 km,其中 a 取 10 mm, b 取 5×10^{-6} 。控制网测量基线向量异步环闭合差统计如表 2 所示。

表 2 基线向量异步环闭合差统计

闭合环个数 (3边)	三维向量闭合差 W/mm				
	$0 \leq W \leq 5$	$5 < W \leq 10$	$10 < W \leq 20$	$20 < W \leq 35$	$W > 35$
1 192	682	363	125	22	0
相对闭合差 $f (1 \times 10^{-6})$					
$f \leq 1$	$1 \leq f < 2$	$2 \leq f < 5$	$5 \leq f < 10$	$10 \leq f < 25$	$f \geq 20$
95	294	562	206	35	0

控制网测量基线向量异步环闭合差最大为 P10—P18—P19,闭合差为 34.3 mm,闭合环长度为 172 891.7 m,闭合差限差为 $\pm 126.59\text{ mm}$ 。异步环相对闭合差最弱环为 P18—P19—P21,闭合差为 29.76 mm,闭合环长度为 47 074.3 m,相对闭合差为 21.24×10^{-6} ,闭合差限差为 $\pm 92.42\text{ mm}$ 。

由以上基线向量异步环闭合差统计数据可知:测量基线向量所有异步环闭合差均满足限差要求。

根据规范要求同一条边不同观测时段基线较差应满足 $d_s \leq 2\sqrt{2}\sigma\text{ mm}$ 。控制网基线重复观测较差如表 3 所示。

表3 重复观测基线较差统计

重复观测 基线数	重复观测基线较差 d_i /mm				
	$0 < d_i \leq 1$	$1 < d_i \leq 2$	$2 < d_i \leq 3$	$3 < d_i \leq 4$	$d_i > 4$
100	59	31	2	8	无

重复观测基线不同时段观测值较差最大为 P10—P21, 重复基线较差 $d_i = 3.92$ mm, 边长为 2 282.7 m, 重复观测基线限差为 ± 42.92 mm。重复基线相对较差最弱边为 P02—P03, 重复基线较差为 3.75 mm, 边长为 291.4 m, 基线相对较差为 12.8×10^{-6} , 重复基线限差为 ± 28.58 mm。

由以上统计数据表明: 平面控制网所有重复观测基线向量较差均满足限差要求。控制网基线向量网自身内符合精度高, 基线向量没有系统误差和粗差, 基线向量网的质量是可靠的, 在此基础上可以进行控制网平差计算。

6.2.2 测量控制网平差及精度分析

控制网平差包括三维无约束平差和二维约束平差。网平差和坐标转换采用 Trimble 随机商用软件 TBC 3.8。首先进行三维无约束平差计算, 以检定基线向量网自身的内符合精度及其系统误差和粗差。经三维无约束平差计算后精度统计如表 4 所示。

表4 控制网三维无约束平差精度统计

基线向量边长相对中误差		点位 3D 误差/mm	
最大	最优	最大	最优
P07—P08	P10—P21	P18、P20	P01、P04、P10
1/275 087	1/5 603 555	10.0	4.0

由控制网三维无约束平差精度统计数据可知: 控制网的基线向量网自身的内符合精度高, 基线向量没有系统误差和粗差, 基线向量网的质量是可靠的, 在此基础上可以进行二维约束平差。

由于可研阶段控制网与该施工控制网坐标系统一致, 均为 1954 北京坐标系(中央子午线 105°), 抵偿面为参考椭球面。可直接将起算数据代入施工控制网进行约束平差, 固定控制点 HJ07 平面坐标及所有联测水准点(P01、P03、P05、P07、P10、P11、P15、P16、P18、P19) 高程作为起算条件, HJ08、HJ18 平面坐标作为检校点。平面已知点检核结果及控制网二维约束平差精度统计如表 5 所示。

表5 控制网二维约束平差精度统计

基线向量 边长相对中误差		基线向量坐标 方位角中误差/(")		点位坐标 平面中误差/mm	
最大	最优	最大	最优	最大	最优
P07—P08	P10—P21	P19—P21	P10—P18	P18 等	P01 等
1/275 087	1/5 603 555	1.473	0.112	2.8	1.4

由表 5 可知, 控制网二维约束平差精度满足规范要求, 与优化设计数值吻合较好, 实施的结果优于优化设计的预估, 证明了优化设计的准确性。

6.3 基于 EGM2008 进行高程测量

GNSS 测量得到的是大地高, 需要转换为 1965 年黄海高程系下的正常高。

对于大地高、正常高及高程异常之间的关系和转换模型, 众多学者进行了研究和分析, 得出了较为一致的结论。

大地高与正常高之间的转换公式为

$$h = H - \xi \quad (1)$$

式中, h 为正常高, H 为大地高, ξ 为高程异常值。

在利用地球重力场模型 EGM2008 计算高程异常时, 考虑到该模型所采用的全球大地水准面与我国采用的 1956 年黄海高程系之间存在系统偏差, 因此式(1)可改写为

$$h = H - (\xi_M + \Delta h) \quad (2)$$

式中, ξ_M 为 EGM2008 高程异常值, Δh 为 EGM2008 高程异常与实际高程异常的偏差。 ξ_M 的计算公式为

$$\xi_M = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{a}{r} \right]^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (3)$$

在小区域内, Δh 近似为一固定值, 可利用 GNSS 测区内任意一个已知控制点的大地高 H , 与该点已知正常高相减得到其标准高程异常值 ξ , 然后利用 EGM2008 计算其模型高程异常 ξ_M , ξ 与 ξ_M 相减即为 Δh 。即可计算出高程异常值, 进而利用式(2)推算出该点的正常高。

大型水利枢纽水源工程一般建设范围不会超过 5 km^2 , 通常认为其为小区域。小区域高程控制成果的做法就是用一个已知点, 基于 EGM2008 拟合求取其他待测点的高程, 利用 1~2 个点做检查。检查结果满足设计要求, 则成果可靠, 精度也能满足要求。控制网有 22 点, 其中 10 个有三等水准成果。该方法求得的高程成果与三等水准比较, 较差小于 1 cm。

7 结 论

本文以黄家湾水利枢纽水源工程为例, 介绍了在高山峡谷区建立大型水利枢纽水源工程三维施工控制网的实际方法。依据地形情况和 GNSS 控制网的优化设计理论对控制网进行优化设计, 最终的实施成果与优化设计结果吻合得很好。获得的三维施工控制网的控制点成果具有精度高、可靠性强等特点。建立一套控制网同时获得平面和高程控制成果, 可见其工作效率高, 建网速度快。

参考文献:(略)

作者简介:吴恒友,男,1968年生,工程应用研究员,主要从事测绘技术管理和测绘应用技术研究工作。

北斗导航卫星系统在深海石油勘探方面的应用探讨

蒋冬伟,郭海荣,李林花,李金龙
(北京卫星导航中心,北京 100094)

摘要:深海石油勘探离不开与勘探方法相关的导航定位技术。我国北斗导航卫星系统,是具有我国自主知识产权的全天候、全天时和全领域的高精度导航卫星系统,从性能和技术指标上,完全符合深海石油勘探时的应用需求。本文从导航定位原理方面,分析 RTK、PPP、星基增强系统、短报文通信、授时等北斗相关技术在深海石油勘探方面的应用情景及效果。

关键词:北斗导航卫星系统;深海石油勘探;短报文通信;精密定位技术

1 引言

石油资源是国家经济发展的命脉,但已超越经济问题,成为关乎国家安全的战略问题。随着我国经济、社会的发展,对石油资源的需求也不断增加,虽然绿色能源产品不断出新,但是其续航能力限制了近期发展,所以在较长时间内,我国对石油的依存度还是很高。现阶段陆地和浅水区石油勘探开发已经接近饱和,深水海域必将成为未来石油资源勘探开发的重要领域,同时深水海域的石油勘探也将面临着技术和装备上的挑战。深海石油勘探离不开与勘探方法相关的导航定位技术。一直以来,我国都是引进国外的导航定位技术及相关服务,应用于深海石油勘探。国外的导航定位系统,技术成熟,性能稳定,但是价格昂贵,关键技术还严格封锁,在执行勘探任务时,非常被动。现如今,北斗导航卫星系统是具有我国自主知识产权的全天候、全天时和全领域的高精度导航卫星系统。在深海石油勘探作业时,应用北斗导航卫星系统,将可以大大提高导航定位的可靠性。下面就北斗导航卫星系统在深海石油勘探领域的应用进行探讨。

2 北斗导航卫星系统的简介

北斗导航卫星系统(BeiDou Navigation Satellite System,BDS)是我国自主研发的全球卫星与通信系统,是继美国全球定位系统(GPS)和俄罗斯格洛纳斯导航卫星系统(GLONASS)之后第三成熟的导航卫星系统。北斗导航卫星系统是我国自行研制的全球导航卫星系统,可全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠的定位、导航、授时服务,并具有短报文通信功能。

中国自 20 世纪后期开始探索适合国情的导航卫星系统发展道路,逐步形成了三步走发展战略:2000 年底,建成北斗一号系统,向中国提供服务;2012 年底,建成北斗二号系统,向亚太地区提供服务;2020 年,我国正在实施北斗三号系统建设,于 2020 年 6 月 23 日,北斗三号的最后一颗组网卫星成功发射升空,北斗导航卫星系统全球星座部署全面完成,后续进行变轨、在轨测试、试验评估等最后的调试攻关,届时,将为全球提供导航卫星服务。正在运行的北斗二号系统免费向亚太地区提供公开服务,定位精度优于 10 m,测速精度优于 0.2 m/s,授时精度优于 50 ns。

如图 1 所示,北斗导航卫星系统在军事、个人位置服务、气象应用、道路交通管理、铁路智能交通、海运和水运、航空运输、应急救援、农林牧副渔等领域均有非常广泛的应用。近年来,在我国深海石油勘探中,GPS 被广泛应用,如果发生信号中断等不可控的情况,造成勘探任务终止,损失还是很大的。随着北斗导航卫星系统的逐步完善,其既可以替代 GPS,即北斗导航卫星系统单一模式工作,也可以与 GPS 双系统联合工作,这种双系统模式,不仅可以增加卫星观测数,还可以缩短动态定位的初始化时间,为深海石油勘探

提供优质的导航定位服务。



图1 北斗导航卫星系统的应用领域

3 BDS 在深海石油勘探中的应用

3.1 深海石油勘探方法介绍

海洋石油勘探目前普遍采用的是地震勘探方法,是通过地震勘探船作业完成的。船上装备有记录地震波的地震数据采集记录设备和用于确定精确位置的定位导航系统,作业船舶拖带一定数量的水下勘探设备,包括接收地震数据的电缆和能够激发能量的气枪震源阵列,然后将其沉放到水下一定深度。作业时,电缆相等深度地拖在船后,勘探船拖曳电缆经过目标区域。船舶行进时,激发震源,同时接收地震数据,并进行数据采集。震源产生的地震波向地下传播,当遇到不同地层分界面时,就会发生反射,检波器将反射波引起的压力变化,转换为电信号,经数字化后记录到存储介质上,采集数据经专业地质解析就可找出石油的地质圈闭结构。

3.2 深海石油勘探对导航定位的技术要求

海洋地质勘探都是按预定的测线和测点测量,即每次都需要先找到准确的预定位置,再进行震源激发和数据接收,否则地震资料就会因为缺乏明确的位置信息而变得毫无价值,因此导航定位技术在深海拖缆式地震勘探作业时,有着举足轻重的作用。

深海石油勘探对导航定位有以下几点技术要求:

- (1)能够对作业船只的航行进行实时的导航及监控。
- (2)当勘探船只远离海岸线,离岸基测量控制点较远时,常规的差分测量控制点的电波已经无法到达勘探船只。
- (3)在海浪、海流的作用下,勘探船只每时每刻都处于运动状态,增加了导航定位的难度。
- (4)在深海勘探时,测量节点(测量传感器、采集站、地震激发点)都没有固定标记,造成拖缆式石油勘探导航定位的测点不可重复校正,即使重复校正也会浪费工时,因此对导航定位系统的可靠性要求更高。
- (5)在深海勘探时,勘探船只不在手机通信基站的无线电辐射范围内,无法向指挥管理部门发送位置报告和救助信息,指挥管理部门也无法监测勘探船只的位置和发送相关通知信息,那就需要可靠有效的通信链路来完成信号的收发。

3.3 精密定位技术及短报文通信在深海石油勘探时的应用

深海石油勘探作业时,北斗导航卫星系统在精准定位技术及短报文通信方面的应用,有以下几种

情况:

(1) 勘探船只的作业范围在岸基观测站的电波辐射范围内时,需要动态定位,可采用实时动态(real-time kinematic, RTK)测量,以解决勘探船只时刻处于运动状态下的实时导航与定位。

(2) 深海勘探船只的作业范围不在岸基观测站的电波辐射范围内时,需要精准定位,可采用精密单点定位(precise point positioning, PPP)。

(3) 深海勘探船只的作业范围不在岸基观测站的电波辐射范围内时,星基增强技术的应用,可对原导航卫星系统定位精度、完好性、连续性和可用性的改进,提供可靠的导航定位服务。

(4) 只要在能够收到北斗卫星信号的地方,无须架设通信链路,不受地域限制,均可利用短报文通信,向指挥管理部门发送位置报告及救助信息。

针对以上几点情况,本文将对精密定位技术在深海石油勘探作业时的技术应用展开说明。

3.3.1 实时动态定位

实时动态(RTK)定位是应用两台接收机,已知精确位置的岸基观测站,并且在已知点架设一台北斗信号接收机,并且有发射电台,可发射差分信号。将另一台北斗设备分别安装在海上石油勘探的震源船上,即为移动站,岸基观测站和移动站同步观测不少于四颗同一组卫星,用岸基观测站测得的实时载波相位来减弱公共误差,如大气、卫星轨道、时钟等误差,有效地减弱相关误差的影响,进而获得更精确的定位结果。方便实时导航定位,确保勘探作业时实时定位,便于记录数据。

在深海石油勘探的实际应用当中,对于实时动态定位,一般都采用“GPS+BDS”双系统联合定位。每一套系统均可独立计算提供精密坐标信息,两套系统互相校验并且在紧急情况下能自动切换,当主系统发生故障时备用系统可保证定位正常。利用双系统进行 RTK 定位,可增加观测卫星数量,改善星座位移精度几何因子(PDOP)值,有利于载波整周模糊度的快速固定,加速 RTK 定位的初始化。

3.3.2 精密单点定位

精密单点定位(PPP)技术是一种非差单点定位技术,将北斗的卫星轨道误差、卫星钟差及电离层延迟等主要误差源分别处理并加以“模型化”分析或者参数估计的方法,计算每个误差源及其误差修正值,通过数据通信链传输给用户,得到精确的当前位置。单频接收机还需电离层改正,双频接收机则只需要卫星轨道和钟差改正数,单频精密单点定位模式的工作流程,如图 2 所示。非实时的静态精密单点定位,可以采用 IGS、MGEX 与北斗地基增强系统观测网络的实时观测数据,事后处理北斗高精度轨道、钟差、区域电离层改正信息,实现北斗高精度广域服务。

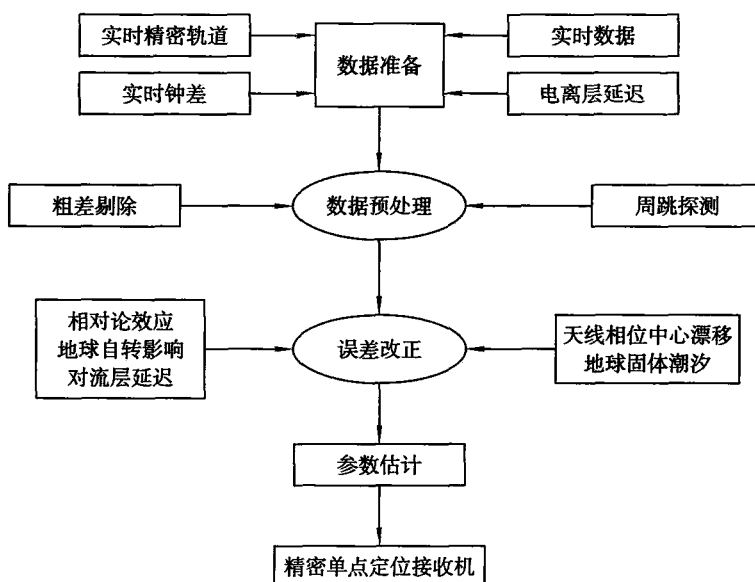


图 2 单频精密单点定位的工作流程

而在动态精密单点定位中,实时精密卫星轨道和卫星钟差的准确度决定动态精密单点定位的精度。

为了打破国外精密定位系统技术的垄断,我国建立了具有自主知识产权的羲和系统,其包括室内和室外高精度定位导航增强系统,填补了我国在实时动态精密单点定位方面的空白。

3.3.3 星基增强系统

在深海拖缆式勘探中,星基增强系统(SBAS)依托地球同步轨道(GEO)卫星搭载卫星导航增强信号转发器,向全球用户播发星历误差、卫星钟差、电离层延迟等多种修正信息,使更多地基增强信号无法覆盖的区域,如海洋、沙漠、山区等也能够实现高精度定位,实现对原导航卫星系统定位精度、完好性、连续性和可用性的改进,不必建立基准站就可以实现全球范围内的高精度定位,并且为无人区和深海区域的数据链路拓展了另一种可行性。

如图3所示,由大量分布极广的差分站(位置已知)对导航卫星(MEO和IGSO)进行监测,获得原始定位数据(伪距、载波相位观测值等),并发送主控站,通过计算得到各卫星的各种定位修正数,通过上行注入站发给GEO卫星,GEO卫星再将修正信息(卫星星历误差改正、卫星钟差改正和电离层改正信息)播发给广大用户,从而达到提高定位精度的目的。

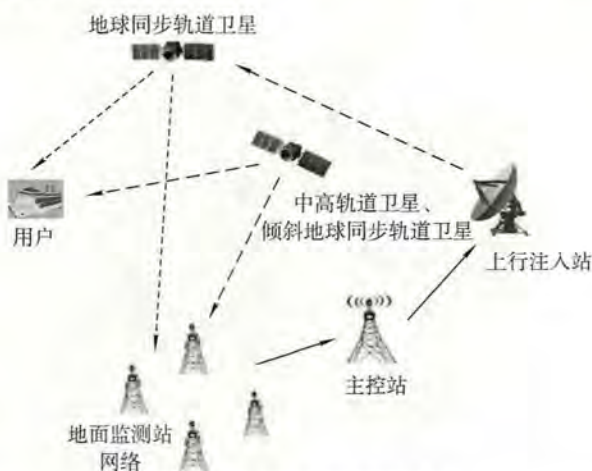


图3 BDS-SBAS系统构成

星基增强系统在精准农业、陆地测量、海洋应用等领域展现了极大的应用前景。如在地球物理调查、钻探、物探油气、地矿勘探等海洋应用领域,特别是深海高精度定位解决方案,提供亚米级定位精度。在深海石油勘探作业时,由于采用卫星代替了地面基站,勘探船只仅需要架设一台星基增强接收机,使用星站差分模式,便可以进行实时导航定位及数据采集。

3.3.4 短报文通信技术

通信信号不能覆盖深海无人区,岸基通信设施也无法涉及。为了建立通信网络,需要在海上专门增设远距离无线电台,这种方法费时费力。但是使用我国的北斗卫星短报文通信功能,只需一台支持无线电测定业务的用户机,小巧灵活,无须建中继站,便可以收发短报文来完成与指挥管理部门的通信。

利用北斗短报文功能可以将船只的位置信息及其他相关信息实时发送到监控平台,不受距离限制。因为北斗短报文是采用高轨道地球同步卫星,距地面30000km,几乎没有阻挡。短报文的通信过程是这样的,当船只向卫星发出通信请求,经卫星转发至地面中心站,地面中心站接收到通信申请信号后,经解码处理后再编码加入持续广播的出站广播电文中,经卫星广播给用户;用户机接收到卫星信号,经解码,获得报文内容,完成点到点的通信服务。

3.4 施工作业中的北斗授时

北斗导航卫星系统的系统时间称为北斗时(BDT)。北斗时属原子时,起算历元时间是2006年1月1日0时0分0秒(协调世界时,UTC)。BDT溯源到我国协调世界时UTC(NTSC,国家授时中心),与UTC的时差控制准确度小于100ns。北斗授时分为单向授时和双向授时。双向授时则不需要知道用户机位置和卫星位置,通过来回双向的传播时间除以2的方式获取,可以更精准地反映各种延迟信息,因此

估计精度较高,属于有源授时。如图 5 所示,单向授时需要事先计算用户机的位置,若位置未知,则需要先发送定位请求获得位置信息,然后用位置信息按照一定的数学模型由用户机自主解算出单向传播时延,卫星位置误差、建模误差(对流层模型、电离层模型等)等修正数据,便可实现精密的时间同步。在深海石油勘探作业中,一般采用单向授时,属被动授时方式,不占用系统容量,便捷可靠。

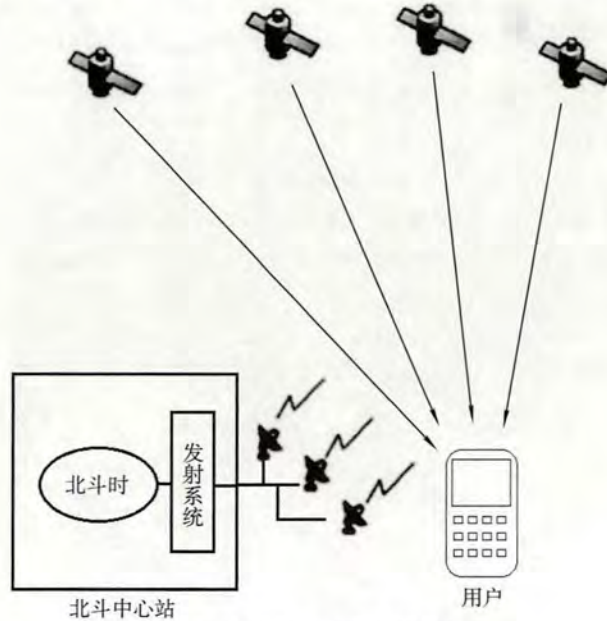


图 4 北斗卫星单向授时示意

在石油勘探过程中,在采集站和可控震源上安装北斗卫星信号接收装置,通过北斗授时,可以精确记录可控震源激发的瞬间时刻,根据这个精确时刻提取同样具有北斗标准时刻标记的采集站数据,达到同步的目的,便于收集到确实有效的数据被上传至上位机,更好地完成数据采集工作。

4 结 语

北斗导航卫星系统在导航、定位、授时等性能方面与 GPS 相当,而且还有 RDSS(无线电测定业务)体制,两种体制,相互嵌入,相互增强。在深海石油勘探作业时,使用北斗导航卫星系统将会大大提高定位精度,缩短动态定位初始化时间,这将大幅提升在深海地区的导航定位、对船只的监控搜救、施工作业等方面的导航定位服务能力。随着北斗三号系统的全球星座部署完成,导航定位精度逐步提高,服务范围将广至全球。北斗应用将更加规模化、产业化和国际化,为全球共享更优质的时空精准服务提供更多选择。

参考文献:(略)

作者简介:蒋冬伟,女,1984年生,助理工程师,主要从事导航定位方向的研究。

基于视觉与 IMU 融合的室内定位方法研究*

黄涛, 郭杭, 熊剑
(南昌大学, 江西 南昌 330031)

摘要:视觉 SLAM 中相机能够提供稳定的观测数据,但对于环境纹理特征不明显及图像采集帧率过快的情况,其运动估计能力会下降,需要其他的导航系统进行修正。惯性导航具有自主导航能力,可以提供高频率的位置、速度和姿态参数,完全不受外界干扰。视觉与 IMU 的组合结合了相机和 IMU 二者的优点,能够提高室内导航定位精度。通过对视觉与 IMU 融合的室内导航定位方法的研究,融合预积分 IMU 数据和图像特征信息,使用紧耦合方式,结合非线性优化方法,可获得高精度的视觉惯导里程计,回环检测和紧耦合方式配合以最小的计算消耗实现重定位,其比单传感器的室内定位精度更高。

关键词:室内导航;视觉 SLAM;IMU;组合导航

1 引言

同时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)自 1988 年由 Smith、Self 和 Cheeseman 提出并应用于机器人领域,旨在通过传感器获取的数据实现环境地图的构建及机器人定位。视觉 SLAM 以相机作为核心传感器,获得的图像所包含的信息更丰富,并且体积更小。仅依赖相机获取的图像信息进行移动机器人定位与导航存在精度不足的问题,并且移动机器人面临的环境也日益复杂,载体运动速度过快、环境中光线不足、障碍物过多时,定位与导航效果差强人意。惯性导航能自主地提供高频的速度、姿态和位置等参数,完全不受外界干扰,恰好弥补了视觉 SLAM 精度上的不足。同时,相机稳定的观测数据可解决惯性测量单元(IMU)的漂移问题。

2 视觉/IMU 融合定位建模

2.1 视觉 SLAM 框架

视觉 SLAM 流程如图 1 所示,包括五个步骤:

(1)传感器信息读取。在视觉 SLAM 中主要为相机图像信息的读取和预处理。在机器人中,还可能有码盘、惯性传感器等信息的读取和同步。

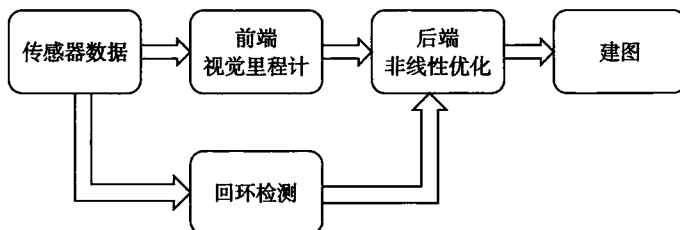


图 1 视觉 SLAM 总体流程

* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0502002);国家自然科学基金项目(41764002)

(2)视觉里程计(visual odometry, VO)。视觉里程计的任务是估算相邻图像间相机的运动,以及局部地图的样子。VO 又称为前端(front end)。

(3)后端优化(optimization)。后端接收不同时刻视觉里程计测量的相机位姿,以及回环检测的信息,并对其进行优化,得到全局一致的轨迹和地图。由于接在 VO 之后,又称为后端(back end)。

(4)回环检测(loop closing)。回环检测是为了判断机器人是否曾经到达过先前的位置。如果检测到回环,它会把信息提供给后端进行处理。

(5)建图(mapping)。它根据估计的轨迹,建立与任务要求对应的地图。

2.2 惯性测量模型

惯性测量单元(IMU)用于测量物体的加速度及三轴角速度,物体在载体坐标系下的加速度通过三轴加速度计获取,角速度通过三轴陀螺仪获取。通过加速度与角速度进而可以解算出物体在空间中的姿态。加速度计测量模型和陀螺角速度测量模型可表达为

$$\tilde{\alpha}^b(t) = (\mathbf{R}_b^w)^T(\alpha^w - \mathbf{g}^w) + \mathbf{b}_a(t) + \boldsymbol{\eta}_a(t) \quad (1)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{wb}^b(t) = \boldsymbol{\omega}_{wb}^b(t) + \mathbf{b}_w(t) + \boldsymbol{\eta}_w(t) \quad (2)$$

式中, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{wb}^b$ 为陀螺角速度测量值, $\boldsymbol{\omega}_{wb}^b$ 为理想值, \mathbf{b}_w 为随时间缓慢变化的误差, $\boldsymbol{\eta}_w$ 为高斯白噪声, $\tilde{\alpha}^b$ 为加速度计测量值, α^w 为理想值, \mathbf{b}_a 为随时间缓慢变化的误差, \mathbf{g}^w 为重力矢量, $\boldsymbol{\eta}_a$ 为高斯白噪声, 右上标表示在相应参考系的测量值, w 为世界坐标系, b 为载体坐标系。

由于存在式(1)和式(2)中的这些误差, IMU 测量会随着时间推移产生漂移, 为了避免漂移, IMU 常与其他传感器融合, 如相机或者激光雷达。

3 数据融合原理

视觉惯导 SLAM 系统中的信息融合是在里程计部分实现的, 视觉惯导里程计(visual inertial odometry, VIO)框架按照耦合方式不同可分为松耦合(loosely coupled)和紧耦合(tightly coupled)。松耦合方式是指相机和 IMU 分别估计自身的运动, 之后对其位姿采用滤波的方法耦合。紧耦合方式是指把相机和 IMU 的状态结合起来构建运动观测方程, 再对状态量进行估计。对紧耦合之后的数据处理方法又可分为滤波和优化两种方法, 基于优化的方法要考虑一段时间或者全部时间的数据, 这样能够得到精度较高的位姿估计。

理论上通过融合预积分 IMU 数据和图像特征信息, 使用紧耦合方式结合非线性优化的方法可获得高精度的视觉惯导里程计, 回环检测和紧耦合方式配合以最小的计算消耗实现重定位。首先确定状态量 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_0 \quad \mathbf{x}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{x}_n \quad \mathbf{x}_c^b \quad \boldsymbol{\lambda}_1 \quad \cdots \quad \boldsymbol{\lambda}_m]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_k = [\mathbf{p}_{bk}^w \quad \mathbf{v}_{bk}^w \quad \mathbf{q}_{bk}^w \quad \mathbf{b}_a \quad \mathbf{b}_g]^T, \quad k \in (0, n) \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_c^b = [\mathbf{p}_c^b \quad \mathbf{q}_c^b]^T \quad (5)$$

式(3)是滑动窗口内所有状态量, n 是帧数, m 是滑动窗口内特征点总数。式(4)中 \mathbf{x}_k 是在第 k 帧图像捕捉到的 IMU 状态, 包括位置、速度、旋转和加速度偏置, 陀螺仪偏置。式(5)为相机外部参数。目标函数为

$$\min_{\mathbf{X}} \{ \|\mathbf{r}_p - \mathbf{H}_p \mathbf{X}\|^2 + \sum_{k \in B} \|\mathbf{r}_B(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{z}}_{b_{k+1}}^b)\|_{\mathbf{P}_{b_{k+1}}^b}^2 + \sum_{l, j \in C} \rho(\|\mathbf{r}_C(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{z}}_l^{C_j})\|_{\mathbf{P}_l^{C_j}}^2) \} \quad (6)$$

式(6)中的三项分别为边缘化的先验信息、IMU 的测量残差、视觉的重投影误差。对于式(6)的目标函数, 可构造式(7)增量公式, 迭代求解状态量 \mathbf{X} 的最优解, 即

$$\begin{aligned} & (\mathbf{H}_p + \sum \mathbf{J}_{b_{k+1}}^{b_k T} \mathbf{P}_{b_{k+1}}^{b_k} {}^{-1} \mathbf{J}_{b_{k+1}}^{b_k} + \sum \mathbf{J}_l^{C_j T} \mathbf{P}_l^{C_j} {}^{-1} \mathbf{J}_l^{C_j}) \Delta \mathbf{X} \\ & = \mathbf{b}_p + \sum \mathbf{J}_{b_{k+1}}^{b_k T} \mathbf{P}_{b_{k+1}}^{b_k} {}^{-1} \mathbf{r}_B + \sum \mathbf{J}_l^{C_j T} \mathbf{P}_l^{C_j} {}^{-1} \mathbf{r}_C \end{aligned}$$

$$(\Lambda_p + \Lambda_B + \Lambda_C)\Delta X = b_p + b_B + b_C \tag{7}$$

视觉残差 r_C 是重投影误差, 定义为一个特征点在归一化相机坐标系下的估计值与观测值的差。估计值即特征点的三维空间坐标 $(x, y, z)^T$, 观测值为其在相机归一化平面的坐标。

$$r_C(\hat{z}_l^{c_j}, X) = \left. \begin{aligned} & \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \left(\hat{p}_l^{c_j} - \frac{p_l^{c_j}}{\|p_l^{c_j}\|} \right) \\ & \hat{p}_l^{c_j} = \pi_c^{-1} \begin{pmatrix} \hat{u}_l^{c_j} \\ \hat{v}_l^{c_j} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

式(8)将重投影和测量值都归一化为单位向量, 将视觉残差定义为两个单位向量的差。 $b_1 b_2$ 为正切平面的两个正交基。

IMU 残差定义为

$$r_B(z_{b_{k+1}}^{b_k}, X) = \begin{bmatrix} r_p \\ r_q \\ r_v \\ r_{ba} \\ r_{b\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{brw}(p_{wb_j} - p_{wb_i} - v_i^w \Delta t + \frac{1}{2}g^w \Delta t^2) - \alpha_{b_i b_j} \\ 2[q_{b_i b_j} \otimes (q_{b_i w} \otimes q_{wb_j})]_{xyz} \\ q_{b_i w}(v_j^w - v_i^w + g^w \Delta t) - \beta_{b_i b_j} \\ b_j^a - b_i^a \\ b_j^g - b_i^g \end{bmatrix} \tag{9}$$

4 实验验证与分析

为验证算法定位效果及数据的正确性, 进行了室内定位实验。实验基于 ROS 机器人操作系统完成传感器数据采集, 以运动捕捉系统 Vicon 采集的位姿数据为真值, 利用车载传感器数据进行导航定位解算。旨在以现有传感器作为定位参考, 提升定位算法精度。实验设备采用加拿大灰点 USB3.0 工业相机 CM3-U3-13Y3M, IMU 采用 Xsens 公司 MTi 系列产品, 移动平台为中型机器人开发平台 Husky。通过 ROS 系统提取传感器话题信息, 利用 rosbag 记录话题。传感器与小车实物如图 2 所示。

实验场地为中国北斗在上海的无人系统综合实验创新基地, 实验拟将传感器搭载在机器人小车上, 遥控小车在场地中行走一个闭环梯形路线, 全长约为 40 m, 地面为光滑平面, 小车相当于只在 XY 平面上移动, 在 Z 轴只有转动。图 3 为组合法轨迹与真实轨迹, 图 4 为算法轨迹与真实轨迹的误差图。搭载传感器的小车从起点 $(-3, -2)$ 出发, 最后回到起点。



图 2 传感器与小车实物

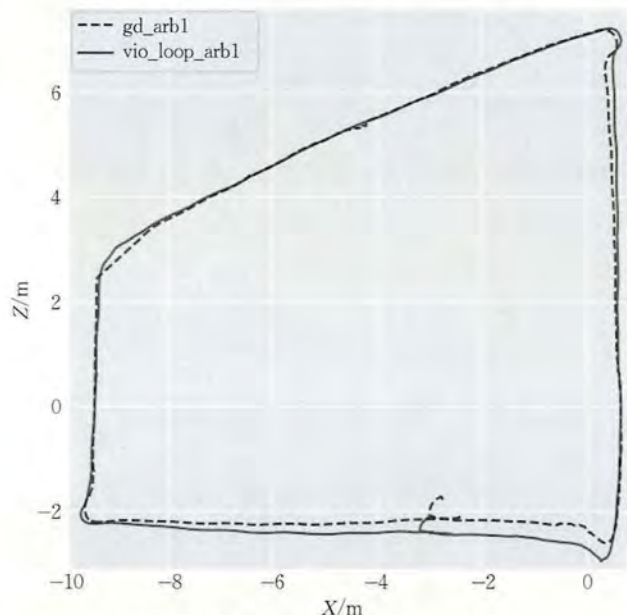


图 3 组合法轨迹与真实轨迹

分析可知组合定位算法能够有效消除累计误差,算法轨迹的整体误差在 0.2 m 左右,并且算法轨迹非常接近真实轨迹。在图 4 中,误差较大的区域集中在梯形轨迹的上底位置,这是由于在实际场地中,该区域背景单调,缺乏特征点,并且超出运动捕捉系统检测范围,导致真实轨迹有偏差,使得平均误差偏大,在轨迹的其他位置上误差均能保持在 0.2 m 左右。图 5 为组合算法轨迹与真实轨迹之间的绝对位姿误差统计,图 5 中误差偏大的区域集中在轨迹的上底位置,平均误差在 0.3 m 左右,相比于单传感器定位模型提高了 2~3 倍。

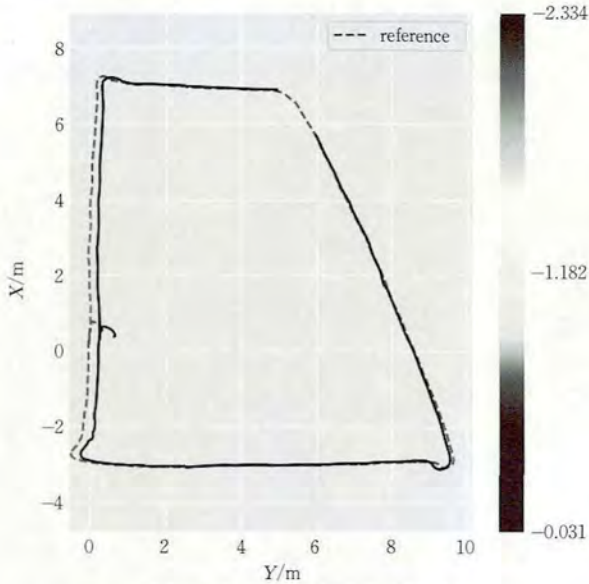


图 4 算法轨迹与真实轨迹误差

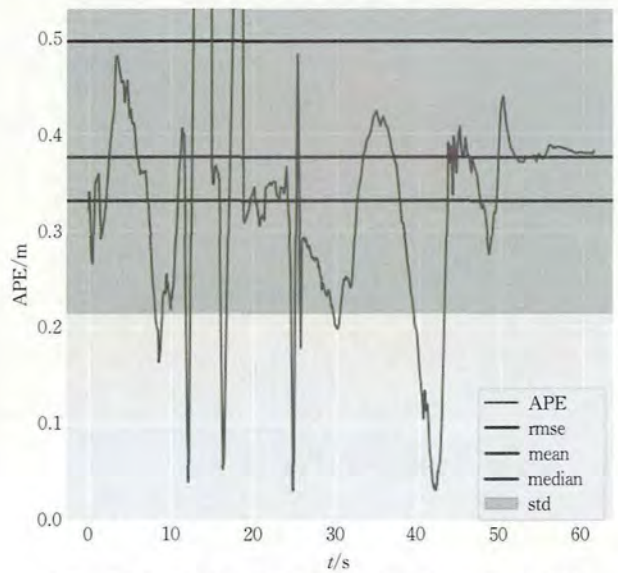


图 5 组合算法轨迹与真实轨迹的绝对位姿误差统计

5 结 语

研究验证了基于视觉与 IMU 融合的组合导航定位方法,通过融合预积分的 IMU 测量和特征点观测,使用紧耦合方式结合非线性优化的方法来获得高精度的视觉里程计,提高了系统的鲁棒性和精度。由于实验场地纹理信息不太丰富,相机测得的数据不太理想,另外传感器距离上次标定时间较长,难免出现形变。下一步考虑利用标定数据对设备进行二次标定,以克服形变给实验结果带来的影响。

参考文献:(略)

作者简介:黄涛,男,1996 年生,硕士,主要从事室内定位方面的研究。

网络化导航定位技术在韩国“世越号”沉船打捞中的应用

吴昊,隋海琛

(交通运输部天津水运工程科学研究院,天津 300456)

摘要:传统海洋施工导航定位存在数据无法共享、可扩展性差、设备和人力资源占用率高等问题。本文结合韩国“世越号”沉船打捞工程,讨论了施工局域网构建中串口协议转换为以太网、有线网络布设、无线网络布设等技术难点,提出了导航定位网络化的实施方案,并进行了实际应用。

关键词:导航定位;网络;沉船打捞;“世越号”

1 引言

通常的海洋施工导航定位都是在驾驶室、指挥室或其他需要导航显示的地点安放计算机,然后把GPS、电罗经及超短基线等设备直接以RS-232串口的形式连接,然后进行数据采集,在定位软件中显示。在此种作业模式下各站点独立运行,形成了信息孤岛,彼此间无法数据共享,每个站点需重复配置硬件设备和维护人员,造成了人力、物力资源的极大浪费,同时工作效率又得不到显著提高。

韩国“世越号”沉船打捞工程施工船舶众多,浮吊船、DP动力船、驳船、辅助拖轮等多达十几条。每条作业船除驾驶室导航显示外,还设有多个潜水指挥点、施工指挥点。因为是联合作业模式,各站点需要保持导航定位信息的一致性及同步性,所以每个站点均需显示全部的船舶动态、水下载体信息及海流实时监测信息。显然,传统作业模式已经无法满足施工要求,需要构建一套施工局域网,利用高效便捷的网络技术,实现导航定位信息共享和无人化维护值守。

本文结合韩国“世越号”沉船打捞工程,讨论了导航定位网络化的实现。

2 施工局域网构建

2.1 串口转换为以太网

因为绝大部分定位设备都采用RS-232串口协议输出数据,所以导航定位网络化首先需要将定位数据由串口通信转换为以太网通信。RS-232串口通信按位(bit)顺序发送和接收字节,它采取不平衡传输方式,即单端通信,最少只需一根传输线即可完成,可以在使用一根线发送数据的同时用另一根线接收数据。因此在单一计算机使用的情况下,串口通信简单便捷,易于设备连接。但由于串口发送电平与接收电平的差仅为2V至3V左右,所以其共模抑制能力差,再加上双绞线上的分布电容,其传送距离最大约为15m,最高传输速率为20kb/s。所以若需要长距离传输数据,或数据转发及共享,则串口通信模式将无法满足要求。

串口服务器可以实现串口与以太网之间的双向转换,其每个串口具备独立的操作模式,可以被设置成Real Com、Tcp Server、Tcp Client、UDP和Pair Com等多种工作模式。通过串口服务器可以在保留现有硬件设施的情况下,将分散的串口设备连接到以太网,并以网络的形式集中管理。串口转换为以太网并不是简单物理层和数据链路层的转换。由于串口协议本身不具有网络层和传输层,所以串口转以太网实际是将串口的数据作为TCP/IP的应用层数据,传输方式为TCP/IP封装传输。TCP/IP的工作模式可以分

为 UDP 模式和 TCP 服务端(TCP Server)/TCP 客户端(TCP Client)模式。UDP 模式是基于非连接的模式,只要有数据即可发送,不需要事先连接,所以这种模式更加接近于串口的通信方式。但是 UDP 协议无法保证数据不丢失,容易产生误码。TCP 模式由通信的两端构成,其中一方是 TCP 客户端,另一方是 TCP 服务端,由于采用可靠的数据传输机制,所以可以保证数据基本不误码、不丢失。

因为船舶施工环境较为复杂,网络连接极易遭受破坏而中断,所以串口服务器的“最大连接数”“心跳检测时间”和“网络等待”三个参数设置较为关键。

(1)最大连接数。最大连接数是服务器可以容纳客户端的最大数目,根据实际客户端的访问量设置最大连接数可以有效减轻服务器的负荷,防止服务器溢出或过载。

(2)心跳检测时间。客户端意外中断后,服务器并不能及时感知,会一直保留此客户端资源,从而导致新的连接无法建立。设置心跳检测时间后,服务器会定时发送询问信息,若客户端无反馈则认为此客户端已经中断,服务器将其移除,等待新的连接。

(3)网络等待。在链路较复杂或客户端反应较慢的情况下会存在较大网络延迟,从而造成网络堵塞,数据无法传输。设置网络等待可以不再等待阻滞的通道,继续下一通道传输,避免因一条通道受阻,造成整个网路瘫痪。

施工船驾驶室是船舶操作和施工指挥的中枢,因为其工作环境洁净,电力供应平稳,所以是 GPS、电罗经等主要定位设备和导航计算机主机的布置地点。在驾驶室内布设一台串口服务器,使用串口线将定位设备与其连接,按照各自设备不同的串口参数,设置串口服务器对应串口的参数。此串口服务器将承担定位数据分发的功能,所以设备串口的网络模式要设置为 TCP Server。USBL 超短基线定位系统、ADCP 海流监测系统等都安装于施工船甲板舷侧,受电缆长度的制约,其甲板单元或采集主机一般无法安置于驾驶室,而是就近选择控制室。同样,将其甲板单元或采集主机连接于串口服务器,根据其工作要求设置串口的网络工作模式,将串口通信转换为以太网通信。

2.2 有线网络布设

要组成施工局域网,需要将各导航计算机、串口服务器和终端使用网线层层拓扑级联。在局域网中常见的网线主要有同轴电缆、光缆和双绞线三种。

同轴电缆是指有两个同心导体,而导体和屏蔽层又共用同一轴心的电缆。最常见的同轴电缆由绝缘材料隔离的铜线导体组成,在里层绝缘材料的外部是另一层环形导体及其绝缘体,然后整个电缆由聚氯乙烯或特氟纶材料的护套包住。同轴电缆的优点是可以在相对长的无中继器的线路上支持高带宽通信。而其缺点是体积大,直径粗,不能承受缠结、压力和严重的弯曲,以及成本高。

光缆是由许多根细如发丝的玻璃纤维,即光纤外加绝缘套组成。由于靠光波传送,它的优点是抗电磁干扰性极好、保密性强、速度快、传输容量大等。光纤分成单模光纤与多模光纤,因依靠激光或 LED 光源来传输,故对端口清洁要求很高,普通的灰尘和指纹等都会导致光纤传输衰减变大,甚至通信中断。

双绞线采用了一对互相绝缘的金属导线对绞的方式来抵御频率小于 25 MHz 的电磁波干扰。把两根绝缘的铜导线按一定密度互相绞在一起,可以降低信号干扰的程度,每一根导线在传输中辐射的电波会被另一根线上发出的电波抵消。线对一般由一对 22-24 号线规的绝缘铜导线对绞而成,实际使用时,双绞线是将多对双绞线一起包在一个绝缘电缆护套里。双绞线具有直径小、重量轻、易弯曲、易安装、不易燃、独立性和灵活性等特点,比同轴电缆和光缆更适用于结构化综合布线,因此双绞线是综合布线工程中最常用的一种传输介质。

由于施工船体型庞大,上下层建筑高差较高,所以双绞线网线布设距离一般为几十米至上百米,网线材质的不同使其传输距离也不尽相同(表 1)。因此,在网线布设过长处需要增设路由器或交换机进行信号中继,以避免衰减。

表 1 网线材质及传输距离

网线材质	传输距离/m	备注
铜包钢网线	80	铁质网线,四铁四铝
铜包铝网线	100	普通铝制网线,不饱满无氧铜
铜包银网线	160~180	进口铝制网线,饱满无氧铜
全铜网线	80~100	青铜网线,纯度不高
无氧铜网线	100~120	铜制网线,纯度很高

2.3 无线网络布设

由于施工船实时处于运动状态,并且方位不定,所以船与船之间无法布设有线网络,而对于某些船舶而言工作点过于隐蔽,也无法布设有线网络。因此在构建施工局域网时,局部需要使用无线网桥技术进行网络桥接。无线网桥采用 OFDM 调制和 MIMO 天线技术,支持 802.11n 协议,可以利用多径进行传输,空中带宽高达 300 Mb/s,室外最远距离可达 30 km。无线网桥分为两种,即全向网桥和定向网桥。全向网桥为球面信号,可全向覆盖其周边区域,适于船舶之间通信;定向网桥为扇形信号,对其指向方向局部增强,适于单船内部通信。

要组成桥接的无线网络,首先需要将一台网桥设置为 Access Point,即接入点,然后将其他网桥设置为 Station,即客户端站。各客户端站连接到接入点,以接入点为中转,进行相互间的通信。施工船多配有吊机等高大钢结构物体,极易屏蔽网桥信号,因此网桥安装时要置于开阔、高空无遮挡处,彼此之间尽量通视。因为客户端站需要依靠接入点才能进行通信,所以全向网桥部署时,要将主作业船设置为接入点,其他辅助船作为客户端站。定向网桥接入点要置于通视良好处,各客户端站面向接入点方向(图 1)。

有线网络通信稳定,但布线相对烦琐,容易遭受甲板施工等外部物理损坏而中断,需要定期巡线检查;无线网络不受距离及空间限制,布设灵活,可扩展性强,但易受高大建筑、高频雷达等干扰,信号质量不稳定。二者根据实际情况相互结合,在各站点网络化完成后,利用有线网络和无线网络将各终端、路由器、交换机、计算机等层层级联,拓扑成施工局域网。在局域网内,利用远程控制软件可在任意地点监控、操作所有终端计算机,一点值守即可监控全局,从而极大节省人力资源,实现无人化作业(图 2)。

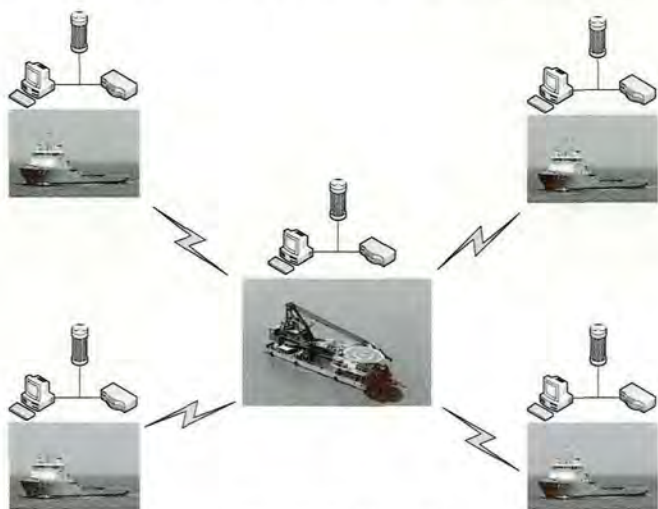


图 1 无线网桥部署

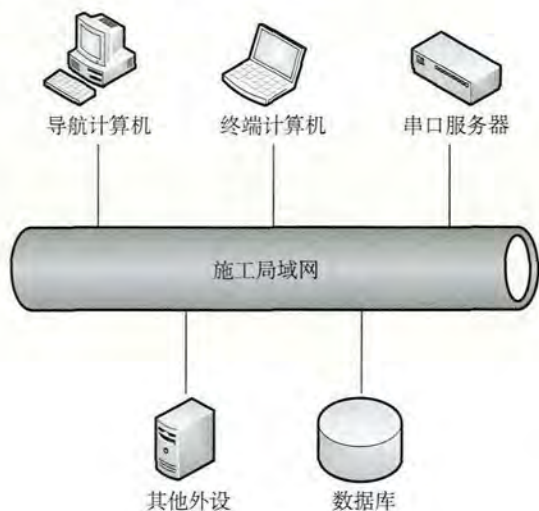


图 2 施工局域网构架

3 实际应用

“大力号”浮吊船是“世越号”沉船打捞工程的主作业船,超短基线系统、海流监测系统、波浪监测系统等均安装于此。该船工作点众多,施工环境繁杂,与其他船舶信息交流密切,以该船需求为依托构建了一

套完整的施工局域网络,涵盖有线网络布设、路由器中继、全向网桥布设、定向网桥布设及无线 Wi-Fi 广播等。在打捞施工约两年的时间里,施工局域网络全天候不间断运行,期间更是经历多次调整,均未出现中断或瘫痪的情况。纵观整个项目周期,施工网络结构强健,拓扑严密,层次合理,运行稳定,为整个项目的顺利完工做出了巨大贡献。

4 总结与展望

施工局域网络的构建,解决了“世越号”沉船打捞工程中导航定位信息共享的难题,摆脱了串口通信模式下占用大量设备、人力的弊病。以成熟的网络技术为依托,将传统导航定位技术网络化,使现场施工简单化、智能化、无人化,在显著降低成本的同时极大提高了作业效率,并且易于扩展,是未来导航定位技术研究的新方向。

参考文献:(略)

作者简介:吴昊,男,1984年生,硕士,高级工程师,主要从事海洋勘察测绘、地理信息研发工作。

基于北斗的油库监控预警系统设计

蒋 超,郭 强,谭周正,邓仕海,曹锴源

(61920 部队,四川 成都 610505)

摘 要:本文利用北斗卫星导航技术,设计了油库监控预警系统,利用该系统的实时监控和状态预警功能,有助于及时发现隐患,为应急救援提供翔实而准确的现场信息,确保油库的安全可靠运行,为精细化后勤保障打下基础。

关键词:北斗;油库;监控;预警

1 引 言

油库是重要油料保障实体,其数量多、分布广、情况复杂,存储有大量的易燃易爆燃料,对其监控管理存在一定的难度。油库的传统人工管理模式存在诸多不足,如管理成本高、人员压力大、危险系数高等,此模式无法满足日趋严峻的油库安全监管的需要,因此油库监管必须要做到远程实时监控和状态准确预警。考虑油库的涉密属性,监控的建设需兼顾保密和通信安全需求,本文根据油库安全监控预警的实际需要,提出了一种基于低功耗传感器技术和北斗卫星导航技术相结合的油库监控预警方案,实时监测油库内液位、油气浓度、油温、密度及压力等重要参数,设计了多传感器融合的油库危险预警平台,具有重要的理论意义和实践价值。

2 总体设计

2.1 系统功能

基于北斗的油库监控预警系统的主要功能是将油库各监测点采集的数据通过北斗卫星传输至中心监控,通过数据存储、分析、集中显控,根据监控显示和数据处理情况做出相应的信息预警、处置决策,从而实现油库的远程监控。具体功能如下:

(1)油库重要数据实时采集。通过布设各种类型的传感器实现对油库液位、油气浓度、油温、密度及压力等重要参数数据的自动化采集。

(2)监测数据实时安全传输。油库各监测点数据汇总后可以通过北斗用户终端将监测数据安全实时传送到监控中心。

(3)油库信息综合管理。中心监控对油库监测点监控要素集中监控,设置告警阈值,及时发现异常情况。对数据进行存储备份和统计分析,及时发现可能存在的隐患,并能根据分析结果及时发布预警信息,从而实现油库的远程综合管理。

2.2 系统结构

基于北斗的油库监控预警系统结构如图 1 所示,系统设计为两层体系结构,底层是油库监测点,上层是中心监控。油库监测点采用专业传感器采集现场数据,并以有线方式将数据汇聚到数据采集点。数据采集点将采集到的数据按照固定的格式发送到北斗用户机,经过卫星链路传送至中心监控。在油库监测点及中心监控各配备一台北斗用户机,数据以短报文通信的方式通过北斗卫星在前端油库监测点及中心监控之间传输。

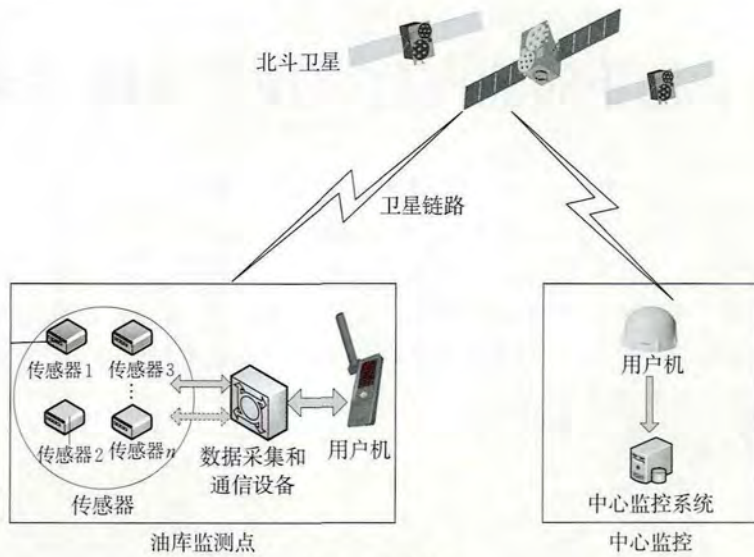


图1 系统结构

2.3 工作流程

油库监测点的主要工作流程如图2所示。

(1)监测信息采集:传感器对油库内监测点传感器信息进行实时监测,信息采集设备对目标信息和数据进行采集。

(2)信息预处理:对信息采集设备所采集的数据进行打包、编码等预处理,将其编制成适用于北斗用户机传输的数据格式。

(3)数据传输:北斗用户终端将预处理以后的数据通过北斗卫星链路发送至中心监控的北斗用户机。中心监控通常由北斗用户机、服务器、监控终端等组成,主要工作流程如图3所示。

(1)信息接收:中心监控的北斗用户机接收油库监测点的数据信息。

(2)数据处理:中心监控服务器将北斗用户机接收的数据进行格式转换、数据存储和必要的后期处理。

(3)监测管理:监测中心的应用软件平台对所有数据和设备工作情况进行全面监测、综合分析,形成有价值的统计分析结果。

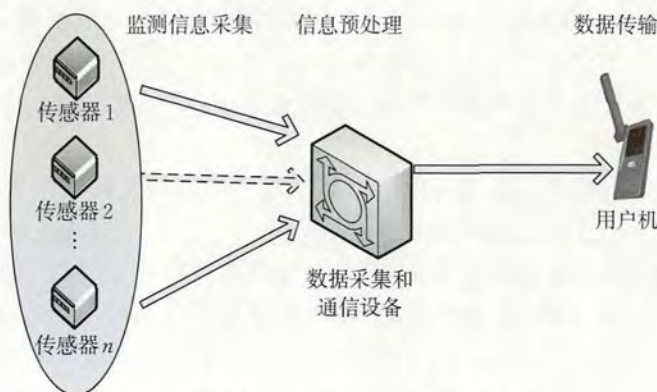


图2 油库监测点的主要工作流程

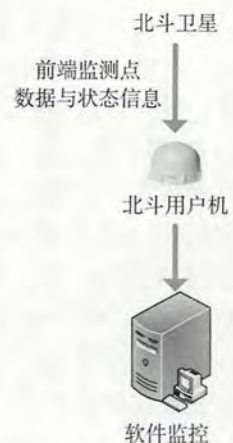


图3 中心监控主要工作流程

3 中心监控系统软件设计

3.1 体系结构

中心监控系统软件以三层体系结构为基础进行设计,确保数据、界面和控制的清晰分离,其体系结构

如图 4 所示。

(1)监控层:负责数据收集、格式转换,统计处理、集中显示、告警预警。

(2)逻辑层:北斗通信模块与前端监测点北斗通信接口兼容,实现北斗用户机通信信息的发送和接收;信息集成模块实现数据与监控的分离接口,确保数据存取安全;数据管理模块实现了数据库访问接口,可以高效快捷地访问数据库系统。

(3)数据层:基于强大的数据库系统进行数据管理和备份,响应各种类型数据请求。

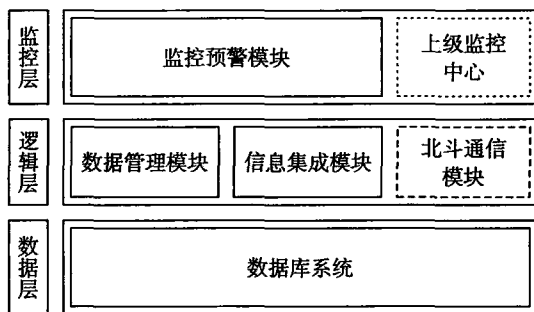


图 4 中心监控系统软件体系结构

3.2 需求分析

软件监控分系统是中心监控系统软件的核心内容。该系统具备全部监视和控制功能。该系统的主要技术指标需求和功能指标需求如表 1 和表 2 所示。

表 1 技术指标需求

序号	技术指标	指标要求
1	原始数据实时存量	≥80 个
2	定位通信频度	1 次/min
3	告警响应时间	≤5 min
4	数据存储能力	定位、通信、告警、数据
5	历史数据查询能力	未限制

表 2 功能指标需求

序号	功能要求
1	实时接收用户机收到的前端监测点短报文通信
2	实时接收用户机收到的前端监测点数据
3	油库监测点数据解帧为前端定位信息和传感器数据
4	对解帧数据进行告警判断,异常时发出告警声音
5	对解帧数据、定位、通信、告警进行数据库存储
6	显示某传感器某子项某数据的实时数据值和历史曲线图
7	显示某一类传感器所有实时数据自定义数量叠加曲线图
8	显示监测点、传感器类型、传感器子项的实时状态
9	对监测点、传感器类型、传感器子项的实时状态进行指示灯图标警示
10	根据监测点、传感器、序号、子项查询历史数据(未限制时限)
11	传感器类型、子项、数据、单位、小数点位数、数据量、主图像可自定义配置
12	监测点、定位用户机、监测点名称、安装的传感器可自定义配置
13	告警门限可自定义配置
14	显示部分系统运行参数设置
15	用户登录

3.3 模块组成

软件监控分系统功能实现主要由以下四个模块完成。

1. 北斗通信模块

北斗通信模块实现了对北斗用户机的访问,软件监控分系统调用本模块可以访问串口服务器连接的北斗用户机。该模块实现的功能如下。

(1)控制用户机,实现北斗用户机的定位、通信功能。

(2)实时接收北斗卫星转发的前端监测点用户机发送过来的短报文通信并进行解帧,获取定位、通信

和数据。

2. 信息集成模块

信息集成模块实现了所有用于数据接收、采集、融合、存储、提取、系统控制等功能的接口。软件监控分系统调用该模块实现数据操作,其中主要的数据接口如下。

(1)数据通信与采集接口:实现与通信设备的接口和对接收数据的解密和解帧方法。

(2)数据融合与存取接口:为响应软件监控分系统的数据控制请求,调用数据管理模块功能。

(3)系统设置与修改接口:实现用户认证、系统设置、功能设置、参数设置等系统控制功能,是请求执行、执行进度和反馈执行的方法。

3. 数据管理模块

数据管理模块设计为基于数据库系统的管理接口,用软件程序模块实现对数据库操作的封装,设计适合于本系统的数据库访问操作,使访问结构清晰,提高工作效率。该模块实现的主要功能如下。

(1)数据采集接口作为对数据库访问接口的扩充,通过一系列算法实现对需要存储的数据进行存储格式转换、提取格式转换、融合类型转换等操作。

(2)响应信息集成模块,对所有的实时数据和历史数据进行融合、存储和提取的管理,控制数据库系统完成相关数据提取工作。

4. 监控预警模块

监控预警模块读取各类数据,并实时刷新显示,用以实时监控油库状态,主要功能如下。

(1)监视油库监测点所有传感器实时状态,在发生异常时,能够第一时间按级别发出告警信息,能够根据告警级别显示不同的状态颜色并发出声光电告警。

(2)软件提供数据和曲线展示功能,可以查看传感器的单项数据及历史曲线,同时提供监测点同类型的所有传感器数据叠加比对的功能,为用户提供多种数据综合叠加状态展示,并根据状态曲线趋势及时提示系统隐患,发出预警信息。

(3)软件提供告警门限设置功能,便于用户根据某前端监测点实际情况进行传感器的告警门限设置,确保准确反映告警情况。

4 结 语

本文从油库实时监控预警的需求入手,设计了基于北斗的油库监控预警系统,利用低功耗传感器实时监测油库内重要参数信息,并通过北斗卫星实时传送至中心监控,实现了油库管理由“人工被动式”向“自动主动式”转变,提高了部队安全管理水平和综合保障能力,具有一定的推广应用价值。基于北斗的油库监控预警系统具有以下特有优势:

(1)系统可靠性高。系统采用北斗卫星实时传输数据,具有全天候、不间断、高稳定的特点。

(2)系统保密性好。油库位置和存储量等信息涉及工作秘密,北斗短报文通信能够以较低成本实现加密通信。

(3)便于后期组网。数据传输不依赖地面网络,不受地面基站传输限制,方便后期跨地区多油库的综合组网监控建设。

参考文献:(略)

作者简介:蒋超,男,1988年生,工程师,长期从事卫星导航理论研究,主要研究领域为导航应用和时频技术。

BDS/GPS 超短基线解算的非线性模型研究*

张 遼, 郭 杭, 王何鹏

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘 要:针对超短基线解算难以线性化处理进而影响模糊度固定及精度的问题,本文提出了一种非线性模型解算的方法。通过控制实验中基线长度得到了数条超短基线,使用本文方法解算了 GPS、BDS、BDS/GPS 组合系统三种模式下的数条超短基线。总体而言,BDS/GPS 组合系统较单 GPS、单 BDS 系统精度有所提升,BDS/GPS 组合系统各基线固定率、正确率更优,其解算成功率较单系统提高了 15%~25%。

关键词:BDS/GPS 组合系统;模糊度;超短基线;LAMBDA 算法;非线性模型

1 引 言

GNSS 定位有一个重要的参数,即整周模糊度,整周模糊度一旦固定,载波相位将与伪距一样参与定位解算,但伪距的定位精度为米级,因此载波在实现简单快速定位的同时,精度上比伪距高两个数量级。正确解算整周模糊度是利用载波相位观测值进行定位的关键所在。模糊度固定的方法很多,如浮点解取整、卡尔曼滤波和整数最小二乘等方法,其中基于整数最小二乘估计改进的 LAMBDA 算法对各种场合的适用性更好,因此得到广泛应用。在有些特定相对定位中,基线长度保持不变,因此基线长度可作为一个已知观测数,辅助整周模糊度的解算。

随着我国 BDS 的成功组建和 GPS 的升级换代完成,利用多星座组合提高卫星定位精度有了充分的可靠性。而且 BDS 在国内拥有更多的可视卫星,模糊度解算成功率更高。因此,BDS/GPS 组合导航定位必将成为今后发展的重要趋势之一。利用 LAMBDA 算法漏检率低的特点,同时又克服了算法中整数最小二乘搜索计算复杂度高的缺点,本文提出了一种非线性模型解算的方法。该算法针对超短基线情况下线性化模型对模糊度解算的提高效果不明显的问题,提出了非线性观测模型及搜索模型,提高了模糊度的解算成功率。本文利用接收机采集的数据,构建载波相位非线性双差观测模型,分析了 BDS、GPS 及 BDS/GPS 组合系统的基线解算精度和成功率。

2 BDS/GPS 组合超短基线解算方法

在进行高精度的基线解算时,一般采用线性观测模型。而在超短基线情况下,线性化模型对模糊度解算的效果提高不明显,本文的超短基线模糊度搜索方法是在 LAMBDA 算法的基础上,根据基线长度建立非线性观测模型。在基线长度非线性 LAMBDA 算法中,将基线长度的约束视为一个多维球体,通过模糊度向量与该球体的欧氏距离来搜索最优的模糊度。在模糊度的验证方法上,基线长度也可以作为一个很好的验证标准,当保证对应基线精度在毫米级时,则认为该模糊度是可取的。

2.1 非线性观测模型的建立

首先建立非线性双差观测模型,即

* 基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41764002)

$$\left. \begin{aligned} E(y) &= Aa + Bb, \quad a \in Z^n \\ \|b\| &= l, \quad b \in R^p \\ D(y) &= Q_{yy} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, n 为模糊度的个数, p 为基线向量维数($p=3$), $D(y)$ 为 y 的方差矩阵, $E(y)$ 为 y 的期望值矩阵。

在式(1)中有两个约束条件:一是模糊度 a 为整数,即 $a \in Z^n$;二是基线长度固定为一常量 l ,即 $\|b\|=l$,可描述为基线向量全集是由球心指向球面 S_l 的全体向量集合,球体半径为基线长度,即 $S_l = \{b \in R^p \mid \|b\|=l\}$,因此,当基线长度非线性时,可同样建立观测方程的最优估计目标函数为

$$\min_{a \in Z^n, b \in S_l} \|y - Aa - Bb\|_{Q_{yy}}^2 \quad (2)$$

此时,式(2)正交分解为

$$\min_{a \in Z^n, b \in S_l} \|y - Aa - Bb\|_{Q_{yy}}^2 = \|\hat{e}\|_{Q_{yy}}^2 + \min_{a \in Z^n, b \in S_l} (\|a - a\|_{Q_{aa}}^2 + \min_{b \in S_l} \|\hat{b}(a) - b\|_{Q_{b(a)b(a)}}^2) \quad (3)$$

式中, \hat{e} 为观测值对应于浮点解的残差,即 $\hat{e} = y - Aa - B\hat{b}$, $\hat{b}(a)$ 为整周模糊度向量 a 对应的条件基线,

$$Q_{b(a)b(a)} \text{ 为条件基线向量的方差-协方差矩阵,设基线浮点解为 } \hat{b}, \text{ 其表达式为 } \begin{cases} \hat{b}(a) = \hat{b} - Q_{ba}Q_{aa}^{-1}(a - a) \\ Q_{b(a)b(a)} = Q_{bb} - Q_{ba}Q_{aa}^{-1}Q_{ab} \end{cases}$$

对于基线向量全集 $S_l = \{b \in R^p \mid \|b\|=l\}$ 中与 $\hat{b}(a)$ 在 $Q_{b(a)b(a)}^{-1}$ 加权下的范数最小的基线,令其为最近基线向量 $\bar{b}(a)$, $\min_{b \in S_l} \|\hat{b}(a) - b\|_{Q_{b(a)b(a)}}^2$ 为该最近基线向量 $\bar{b}(a)$ 与条件基线向量 $\hat{b}(a)$ 在 $Q_{b(a)b(a)}^{-1}$ 加权后的欧氏距离, $\bar{b}(a)$ 的表达式为

$$\bar{b}(a) = \operatorname{argmin}_{b \in S_l} \|\hat{b}(a) - b\|_{Q_{b(a)b(a)}}^2 \quad (4)$$

为确定基线向量解 $\bar{b}(a)$,可将 $\bar{b}(a)$ 与 $\hat{b}(a)$ 在 $Q_{b(a)b(a)}^{-1}$ 加权后的距离二次多项式描述为椭球 E 与球 S_l 的最近距离,并且该欧氏距离的数学表达式为 $E = \{b \in R^p \mid \|\hat{b}(a) - b\|_{Q_{b(a)b(a)}}^2 = \text{常数}\}$,当浮点模糊度精度较好时,条件基线向量的方差-协方差矩阵很小,因此椭球 E 远小于球 S_l , $\bar{b}(a)$ 与 $\hat{b}(a)$ 之间的夹角很小,实际处理时将 $\bar{b}(a)$ 与 $\hat{b}(a)$ 近似为同方向,所以 $\bar{b}(a)$ 的表达式为 $\bar{b}(a) = \frac{l}{\|\hat{b}(a)\|} \hat{b}(a)$ 。

各基线向量描述如图 1 所示。

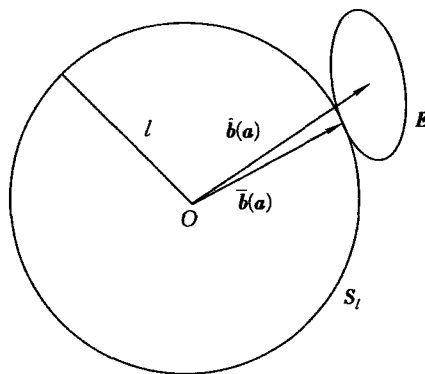


图 1 各基线向量图形描述

最近基线向量 $\bar{b}(a)$ 确定后,代入式(3),可得当基线非线性时,模糊度的搜索目标函数为

$$F(a) = \|a - a\|_{Q_{aa}}^2 + \|\hat{b}(a) - \bar{b}(a)\|_{Q_{b(a)b(a)}}^2 \quad (5)$$

在搜索空间中搜索使 $F(a)$ 最小的模糊度向量为待验证模糊度 \check{a}, \check{a} 对应的条件基线向量为待验证基线,该模糊度向量和基线向量表达式为

$$\check{a} = \operatorname{argmin}_{a \in Z^n} (\|a - a\|_{Q_{aa}}^2 + \|\hat{b}(a) - \bar{b}(a)\|_{Q_{b(a)b(a)}}^2), \quad \check{b} = b(\check{a}) \quad (6)$$

2.2 模糊度的搜索与验证

超短基线解算的模糊度搜索模型 $F(a)$ 既考虑了模糊度的整周约束,也考虑了基线长度的约束,因此更为合理,但 $F(a)$ 是两个二次型的和,搜索空间变得更复杂,不再是椭球区域,这样使模糊度的搜索变得更难,可选用传统 LAMBDA 算法,通过模糊度浮点解向量及其方差-协方差阵来建立模糊搜索模型,由该模型获取前 k 组最优的整数模糊度向量,组成模糊度候选值,为了提高搜索的速度,搜索空间不宜过大,同时为了确保正确的模糊度一定在搜索空间内,该向量组空间也不宜过小, k 一般取 5~10,本文取 $k = 6$ 。候选模糊度向量确定后,再从 k 组候选模糊度中搜索使 $F(a)$ 最优的模糊度向量 \hat{a} ,该向量需进行验证后才可确定为正确的模糊度解。由式

$$\begin{cases} \hat{b}(a) = \hat{b} - Q_{ba}Q_{aa}^{-1}(a - \hat{a}) \\ Q_{\hat{b}(a)\hat{b}(a)} = Q_{bb} - Q_{ba}Q_{aa}^{-1}Q_{ab} \end{cases} \text{和模糊度向量 } \hat{a} \text{ 可得到其对应的条}$$

件基线向量 $\hat{b}(a)$,最后通过验证该条件基线解 $b(\hat{a})$ 是否满足基线长度约束来判断模糊度向量 \hat{a} 是否正确,即

$$\text{abs}(\|b(\hat{a})\| - l) < \sigma_l \tag{7}$$

式中, σ_l 为常数,与相位观测值精度和基线长的测量精度有关,一般取 0.01 m, $\text{abs}(\cdot)$ 表示取绝对值。在基线长度非线性搜索方法中,搜索的正确模糊度使 $F(a)$ 最优的同时,其对应的条件基线长度 $b(\hat{a})$ 应满足式(7)的基线长度判定。

3 实验分析

为分析本文算法分别在 BDS、GPS、BDS/GPS 组合系统中的模糊度固定效果,采用 2019 年 9 月 20 日在南昌大学空间科学与技术研究院采集的数据进行解算,实验所用的数据采样间隔均为 1 s,历时 4 个多小时。

由图 2 可知,BDS/GPS 组合系统的可见卫星数可达 14~19 颗,较单系统增加约 1 倍;BDS 的可见卫星数基本稳定在 9 颗左右,而 GPS 的可见卫星数处于 6~10 颗,并且波动幅度较大,但部分历元 GPS 的卫星数超过了 BDS。由于 BDS 卫星可实现对区域的连续覆盖,故 BDS 卫星的升降较少,GPS 卫星的升降较多,说明组合系统卫星的空间几何构型得到了明显改善,系统稳定性也相应提高。

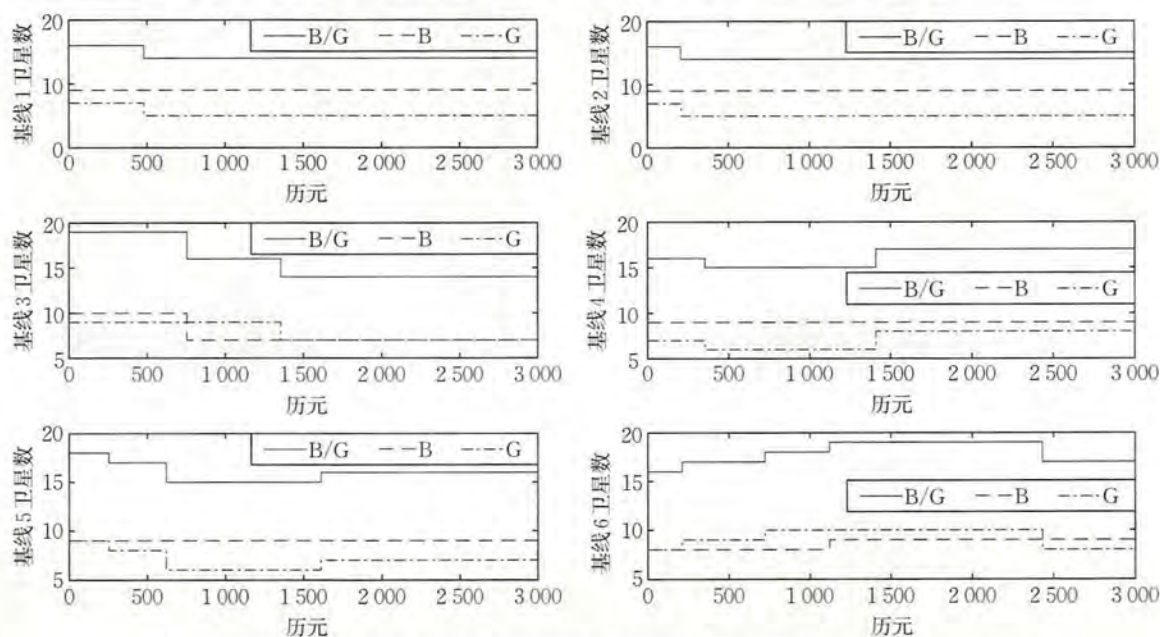


图 2 各条基线可见卫星数的分布情况(B 表示 BDS,G 表示 GPS,B/G 表示 BDS/GPS)

为对比各系统的解算效果,分析了上述三种系统单历元处理结果,确定搜索函数 $F(a)$,判定准则为 $\text{abs}(\|b(\hat{a})\| - l) < 0.01$ 。采用传统的 LAMDA 算法获取使 $N(a)$ 最优的前六组整周模糊度向量构成搜索空间,使非线性条件下搜索空间复杂的问题更简化。表 1 所示为模糊度搜索空间的确定及相应的正确模糊度。

表 1 模糊度候选值

基线	候选模糊度	$\text{abs}(\ b(\hat{a})\ - l)$	正确模糊度
基线 1	2/1/3/1/2/1/1/0/1/3	0.001	2/1/3/1/2/1/1/0/1/3
基线 2	1/5/0/8/4/1/8/5/1/6	0.659	
基线 3	3/-3/6/-6/0/1/-6/-5/1/0	1.262	
基线 4	-19/0/-1/-4/4/-9/-3/-1/2/-15	1.740	
基线 5	9/1/7/3/2/14/3/8/6/7	0.795	
基线 6	2/-4/6/-5/-2/1/2/-6/1/3	0.624	

使用各系统解算的各基线的模糊度固定成功率如表 2 所示。本文解算的基线长度在 0.688 ~ 2.168 m,均为超短基线,对比两种单系统解算的模糊度固定成功率可知,单系统解算的成功率相近并且不高,而组合系统的模糊度固定成功率明显提高,幅度为 15%~25%。

表 2 各基线的模糊度固定成功率情况

基线	基线长/m	BDS/%	GPS/%	BDS/GPS/%
基线 1	1.104 2	77.7	74.6	91.4
基线 2	2.168 8	73.4	72.3	91.1
基线 3	0.688 6	76.0	77.9	92.8
基线 4	1.673 1	68.6	66.5	89.9
基线 5	1.506 3	76.9	73.1	95.4
基线 6	1.145 2	78.5	72.3	92.6

模糊度固定后,计算各对应基线向量,通过三种系统解算各组数据的基线长度。图 3 分别是 BDS、GPS、BDS/GPS 的基线解算效果图。分析可知:组合系统的解算精度明显高于单系统。基线长度超短时非线性模型解算精度仍能达到厘米级,进一步说明 BDS/GPS 可用于高精度基线解算。

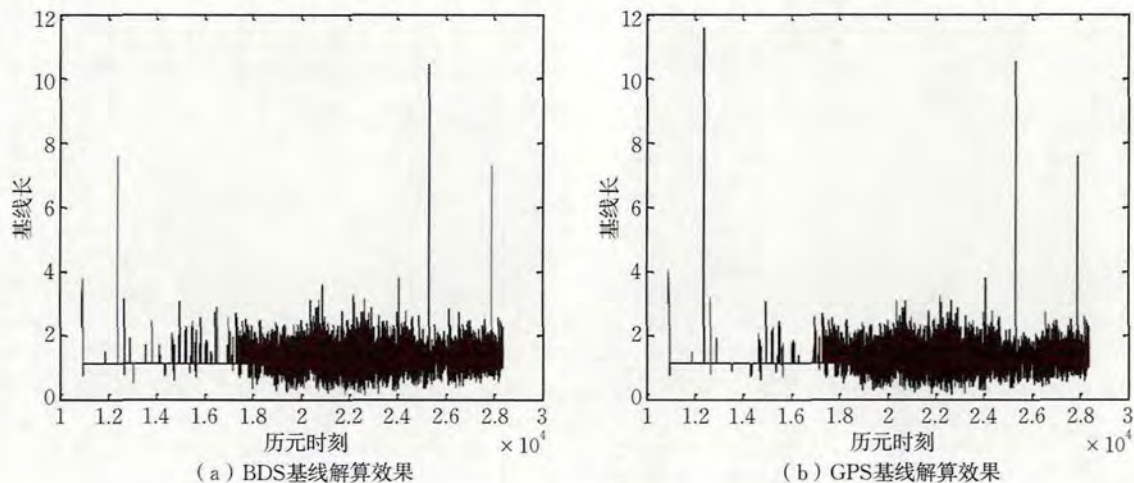
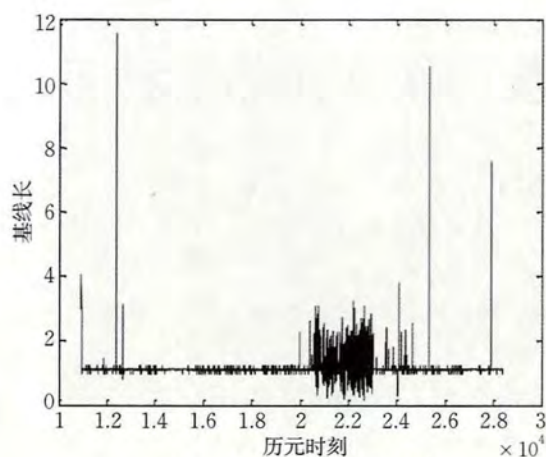


图 3 基线解算效果



(c) BDS/GPS基线解算效果

图 3(续) 基线解算效果

4 结 语

本文提出了一种非线性模型解算的方法,通过实验表明,单系统组合解算的成功率差异不大,非线性模型适宜 BDS/GPS 组合系统超短基线解算。对于单系统而言,BDS/GPS 组合系统的精度有所提升,BDS/GPS 组合系统各基线固定率、正确率更优,其解算成功率较单系统提高了 15%~25%。由于研究工作开始不久,本文方法仍存在精度限制,在后续工作中将进一步深入研究。将来的研究工作是融合卫星信号定位,如 GPS/IMU 的融合导航定位方法研究。

参考文献:(略)

作者简介:张遼,男,1995年生,硕士生,主要研究领域为 GNSS 导航定位方向。

基于多模导航的新型渔船监控系统设计与应用

陈付亮,薛 超,万 祥,薛玉斌,黄途文,刘 昂,王伊冰

(航天恒星科技有限公司,北京 100029)

摘 要:随着 2020 年北斗三号导航卫星系统的建成,我国的北斗系统具备了全球服务的能力。渔船监控是北斗系统的一项重要应用。本文主要针对基于多模导航的新型渔船监控系统的设计及应用进行了阐述,以北斗等导航卫星为技术支撑,综合运用了卫星通信、地面通信、地理信息系统、大数据、云计算等技术,接入多源数据,实现近海及远海渔船位置实时监控、渔船遇险告警救援信息实时接收、越界捕捞监管、禁渔区和禁渔期监控管理、远海渔民通信、气象信息发布及渔获信息交互等功能,以保障海洋渔业健康有序发展,保护海洋生态环境,以及保障渔民生命财产安全。

关键词:北斗;渔船监控;船载终端;信息管理

1 引 言

随着全球人口数量增加和人民生活水平的提高,特别是近些年来全球性粮食价格快速上涨,全球对水产品的需求持续增长。据联合国粮食及农业组织(FAO)估计,2016 年全球捕捞渔业和水产养殖业产量为 1.71 亿吨,世界人口动物蛋白摄入量的 17% 来自水产品。作为人类海洋开发史上最古老的产业之一,海洋捕捞业一直是水产品的重要来源。2016 年世界海洋捕捞产量为 7 930 万吨,占世界水产品总产量的 46.4%,海洋捕捞业仍然是渔业的主要支柱。然而,近年来过度捕捞现象日益严重,现代渔业捕获的海洋生物已超过生态系统能够平衡弥补的数量,结果使整个海洋生态系统退化。根据 2020 年的统计数据,全球渔船数量已达 456 万艘,其中亚洲渔船的总数最多,渔业资源产出丰富,但各国均面临渔业捕捞监管乏力、海洋监管信息化程序不足的问题。如果再不加以控制,海洋渔业资源将会加快萎缩,最终严重威胁海洋生态平衡。同时,海洋渔业是一项高风险行业,海上天气复杂多变,台风、风暴潮、海啸、海冰等自然灾害,以及海盗、疾病、船上设备损坏等其他因素都威胁着渔民的生命财产安全。因此,未来海洋渔业的发展迫切需提升渔业生产监管能力及应急救援能力。

目前北斗导航卫星系统已实现全球组网,渔业作为北斗系统应用的一个重要领域正在加速发展,为海洋渔业现代化作业与监管带来极大的提升,是北斗产业行业示范和应用推广的天然示范区。基于多模导航的新型渔船监控系统充分利用北斗、GPS 等导航卫星系统,结合卫星通信、地面通信、地理信息系统、大数据、云计算等技术设计实现,开展海洋渔船定位导航、渔船监管、海上搜救等应用,系统解决了渔船监管、渔业禁区非法捕捞等渔业作业过程中的问题,极大提高了海洋国家对渔业作业生产的信息化监管力度。

2 渔船监控系统的组成

渔船监控系统以位置服务为基础对渔船监控、渔船管理、危险求救处置等数据统一管理,并结合船载终端实现对渔船动态的智能监控,获取海量渔船与终端数据进行智能分析与智能处理,满足海洋渔业安全生产精细化、便捷化及智慧化的感知、分析、服务、指挥与监察需求,保障渔民海上劳作的安全,并为渔政管理部门的安全指挥提供精准的决策。渔船监控系统支持与其他海洋、渔业系统的信息交互,为渔政管理部门提供有利的渔业指挥支持。

渔船监控系统包括渔业信息管理平台、船载终端、通信链路三部分。在渔船监控系统留有其他外部渔

业系统的扩展接入接口,在满足统一信息格式规范的前提下,可实现不同系统之间的信息共享(图1)。

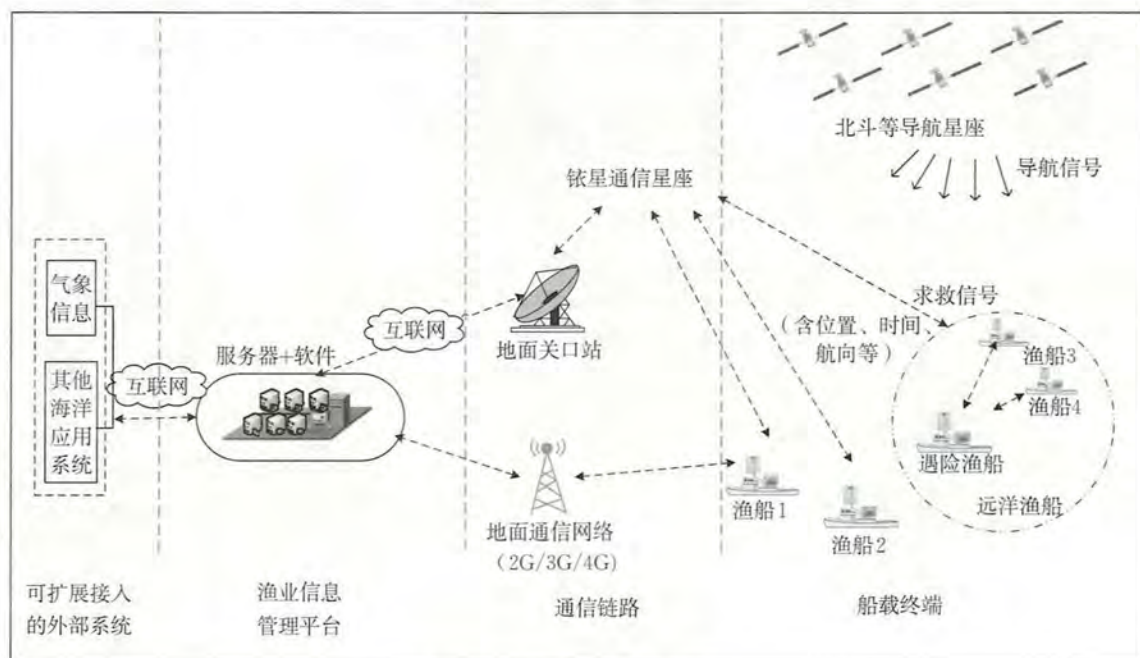


图1 渔船监控系统架构

3 渔业信息管理平台

3.1 平台架构设计

渔业信息管理平台架构设计,分为三个层次和一个保障体系。三个层次分别为应用系统及用户层、支撑平台层、云平台基础设施层。一个保障体系为信息安全保障体系,其对系统中的所有信息资产进行安全管理并从安全技术层面进行保护。

1. 应用系统及用户层

应用系统全面覆盖渔船及船员信息管理、渔船终端接入、渔船位置监控、地理围栏、报警管理等渔业管理相关业务。通过对渔业信息管理系统账户的分级管理,对应用系统进行统一账户管理、权限管理和配置管理,为管理部门、船主、渔民等用户提供不同的业务服务。

2. 支撑平台层

支撑平台层提供各系统内部数据交换、存储、处理等功能,同时还担任着与外部系统进行数据交换的任务,为整个系统的业务提供数据支撑。

3. 云平台基础设施层

自建云平台,新建系统,并接入外部系统,实现应用系统的整体部署和共建共用,推动渔业信息资源共享和业务协同。

渔业信息管理平台架构如图2所示。

3.2 平台功能与性能

渔业信息管理平台可接入多种类型的船载终端,提供渔业管理“一张图”,支持在电子海图上实时显示和刷新船舶位置、航速及航向信息;支持渔船/用户/终端管理、终端在线/离线查询、轨迹回放、渔获统计、气象信息管理和数据统计等功能。其提供一键报警、越界报警、历史警情查看、实时报警提示,缩短了从船舶报警到处置的时间窗口,提高了救援效率;可对船舶进行轨迹回放,支持按天、周及自定义时间段等进行

指定时间范围内的轨迹回放,以及进行区域内各船舶轨迹回放;自主研发配套移动 APP,极大提升了渔业信息管理平台的用户体验,系统解决了渔船监管、渔业禁区捕捞、非法捕捞、渔获上报实时性等渔业作业过程中的问题;支持多种类型终端数据接入,具有可扩展能力,适用于国家级渔业管理部门应用。

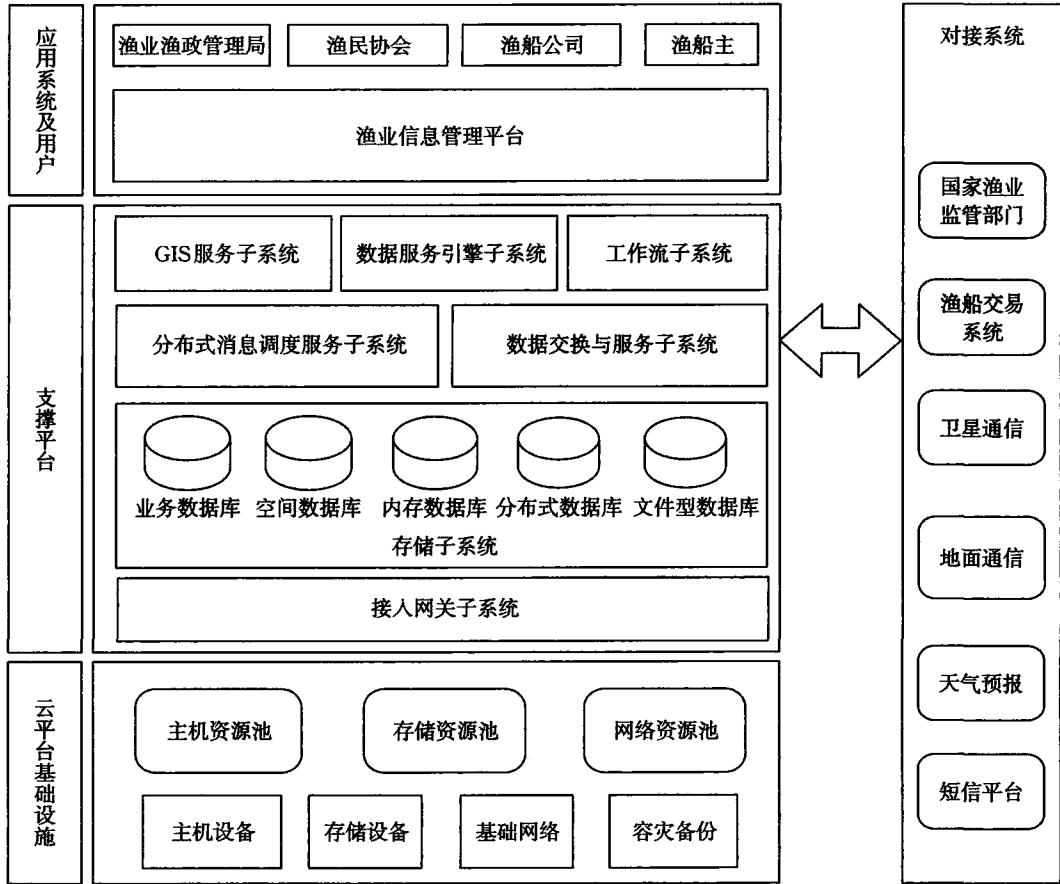


图 2 渔业信息管理平台架构

平台主要性能如下。

- (1)终端接入:50 万/套。
- (2)支持不少于 10 种不同数据格式终端接入。
- (3)对分布式数据库的写操作:超过 150 万条/秒。
- (4)平台存储:支持最高 PB 级数据的存储与处理能力,数据在线保存 1 年,离线保存 2 年。
- (5)平台稳定运行时间:7×24 小时。
- (6)系统具有灾备能力,实现一键式切换。
- (7)支持国际多语言切换。

4 船载终端

4.1 终端设计

北斗船载终端以通信为核心进行扩展应用。由于北斗短报文在船舶位置上报应用模式下相比卫星通信具有极大的成本优势,因此面向国内的产品主要采用北斗短报文进行位置上报;面向国际的产品主要采用卫星通信进行位置上报,此为本文主要介绍的终端产品。

船载终端采用终端主机与 GNSS 天线、卫星天线分体式设计,同时拥有配套 APP,用于连接手机或平板电脑,实现对终端的便携式操控(图 3)。



图3 船载终端示意

4.2 终端功能与性能

终端支持位置上报、电子围栏、渔获上报、海洋气象、电子邮件等功能。其支持北斗+GPS两种模式获取渔船位置信息,通过全球覆盖的铱星网络,将渔船位置实时上报至渔业信息管理平台,实现全天候渔业数据的交互;引入低成本、高速率、高效率的4G通信,实现与卫星通信的通信链路备份与互换,节约运营成本;提供终端配套APP,手机APP与渔船终端通过蓝牙互联互通,实现对终端的便携式操控;终端支持一键报警、火灾报警、人员落水报警、船舶碰撞报警、船舶搁浅报警、船舶故障报警、台风预警等报警信息,然后终端利用地面通信网络(4G/3G/2G)或卫星通信链路,将报警信息发送至渔业信息管理平台;支持电子邮件功能,方便长期远洋渔业作业的用户通过卫星通信链路收发邮件;支持天气、海浪、潮汐等气象信息接入,提前进行预警;支持渔获信息上报,包括渔获种类、重量、捕捞时间和捕捞海域等。

终端主要性能如下。

- (1)支持北斗、GPS双模定位。
- (2)支持铱星卫星通信、地面通信网络上报位置数据。
- (3)支持一键报警、海图显示、渔获上报、气象显示、邮件收发功能。
- (4)预留通信接口,支持后续更多应用功能扩展。
- (5)电源特性:DC 9~32 V宽压供电、防浪涌。
- (6)防护等级:IP67,防盐雾。
- (7)支持国际多种语言。

5 应用案例

2019年底,基于多模导航的新型渔船监控系统已应用于缅甸渔业部,为用户提供船只位置监控、一键报警、渔获信息、电子围栏等应用服务,解决了缅甸渔业部所面临的渔船监管、禁渔区非法捕捞等渔业生产作业问题,提高了用户对渔业作业生产的信息化监管力度,引起了缅甸用户的热烈反响。渔业信息管理平台及船载终端在渔船上的安装应用如图4所示。

6 结 语

本文设计的渔船监控系统面向全球渔业管理及其他类型船只管理用户,目前已实现产品国际化推广和规模化应用。该系统基于北斗及GPS导航卫星、结合卫星通信、地面通信、地理信息系统、大数据、云计算等技术构建,创新应用高精度船载导航、监控、数据处理等关键技术,重点针对渔船位置服务、捕捞监管、渔获上报等三个环节实施精细化监管,为渔业政府监管、渔民位置服务、渔获信息上报等渔业监管与交易过程提供整体解决方案。随着目前北斗三号星座全球组网成功,在“一带一路”战略背景及北斗国际化“走出去”战略的支持下,该系统将具有更广阔的国际化应用前景。



图4 渔业信息管理平台及船载终端在渔船上的安装应用

参考文献:(略)

作者简介:陈付亮,男,1984年生,高级工程师,主要研究方向为卫星综合应用、导航技术与应用等。

视觉惯性组合导航系统发展综述*

吴建峰, 郭 杭, 熊 剑
(南昌大学, 江西 南昌 330031)

摘 要:随着惯性和视觉传感器的普及和它们在导航系统中性能的互补性,视觉惯性组合导航系统(VINS)在移动增强现实、空中导航、自动驾驶等领域得到了广泛的应用。本文对现有的视觉惯性组合导航系统的开源方案进行了分析与对比,介绍了国内外在这一领域的研究成果,最后探讨了视觉惯性组合导航系统的发展趋势。

关键词:视觉惯性组合导航;状态估计;传感器融合;SLAM

1 引 言

视觉惯性组合导航系统(VINS)是导航定位领域的热点话题。精确的位姿估计可以被运用在机器人、无人机和增强现实(AR)等新兴产业。传统的基于视觉的定位方法,能提供6自由度摄像机运动和场景三维结构的实时估计。一般来说,惯性测量单元(IMU)被认为是与摄像头互补的传感器。通过与视觉测量融合,尺度、俯仰角和滚转角将具有能观性。惯性导航系统被广泛应用于测量传感平台的6自由度姿态(位置和方向),特别是在GPS无法使用的环境中,如水下、室内、城市峡谷。惯性导航系统通过一个6轴惯性测量单元测量与其刚性连接的平台的局部线性加速度和角速度。低成本的微机械使得移动设备和微型飞行器能够实现高精度定位,对移动增强现实和虚拟现实的各种新兴应用产生了巨大的影响。微惯性测量单元(MIMU)因其测量受到噪声和偏差的影响,在长期导航任务中估计的姿态不是十分可靠。虽然存在高端MIMU,但价格昂贵到难以全面部署。

尽管这个问题是有挑战性的,因为有大量的信息来减少运动漂移累积的时间,但在过去十年中,VINS已经引起了极大的关注。迄今为止,许多VINS算法可用于视觉惯性同步定位与地图构建(SLAM)和视觉惯性里程计(VIO),如扩展卡尔曼滤波器(EKF)、无迹卡尔曼滤波器(UKF)、批处理增量平滑器和基于(窗口)优化的方法。

本文在查阅了现有视觉惯性组合导航系统的开源方案的资料后,对不同的方法从不同角度分类,并且分析了不同做法的优势与劣势。最后对视觉惯性组合导航系统的发展趋势进行了探究。

2 视觉与惯性传感器

本节中对视觉惯性组合导航系统用到的两个传感器的模型进行了简单介绍,提供了一些视觉惯性组合导航系统的基本背景。

2.1 IMU 建模

IMU 原始陀螺仪与加速度计在 t 时刻的测量结果 \hat{w}_t 和 \hat{a}_t 为

$$\begin{aligned}\hat{a}_t &= a_t + b_{a_t} + R_t^w g^w + n_{a_t} \\ \hat{w}_t &= w_t + b_{w_t} + n_{w_t}\end{aligned}\quad (1)$$

* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0502002);国家自然科学基金项目(41764002)

式中, a_t 与 w_t 为 t 时刻加速度与角速度的真实值, R'_w 为 t 时刻世界坐标系到 IMU 坐标系的旋转矩阵。IMU 测量值是在本体坐标系中测量的, 它是平衡重力和平台动力的合力, 并受到 t 时刻加速度偏置 b_{a_t} 、陀螺仪偏置 b_{w_t} 和附加噪声的影响。假设加速度计和陀螺仪测量值中的附加噪声为高斯噪声, $n_a \sim N(0, \sigma_a^2)$, $n_w \sim N(0, \sigma_w^2)$ 。加速度计偏置和陀螺仪偏置被建模成随机游走模型, 其导数为高斯性质, $n_{b_a} \sim N(0, \sigma_{b_a}^2)$, $n_{b_w} \sim N(0, \sigma_{b_w}^2)$ 。

$$b_{a_t} = n_{b_a}, \quad b_{w_t} = n_{b_w} \quad (2)$$

给定对应于体坐标系 b_k 和 b_{k+1} 的两个时刻, 位置、速度和方向状态可以在 $[t_k, t_{k+1}]$ 时间间隔中, 在世界坐标系下通过惯性测量值传递。

2.2 相机测量模型

相机测量模型主要讨论的是某个特征点在二维像素坐标系下如何投影到当前三维相机坐标系下。摄像机观察视觉角点特征, 这些特征用于同时估计传感平台的自我运动。假设某个特征点的像素坐标为 (μ, ν) , 它在当前相机坐标系下的三维坐标为 (x, y, z) 。它们之间的关系为

$$z \begin{bmatrix} \mu \\ \nu \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, f_x 和 f_y 为像素坐标系与相机坐标系下的缩放系数。 c_x 和 c_y 为像素坐标系与相机坐标系之间的平移量。这四个参数统称为相机的内参, 在测量前需要对相机标定来获得内参。

3 视觉惯性组合导航系统的分类

视觉惯性组合导航系统的目的是最佳地融合 IMU 测量和摄像机图像, 以提供传感器平台的运动跟踪。在本节中, 将经典的方法在不同的层面进行分类, 并且对比它们之间的优势与劣势。

3.1 滤波算法与图优化算法

不管是对于单目相机、双目相机或 RGB-D 相机, 可以将视觉惯性组合导航系统的解决方案分类为基于滤波算法和基于图优化算法。Mourikis 和 Roumeliotis 开发了最早成功的 VINS 算法之一, 称为多状态约束卡尔曼滤波器。该方法使用基于四元数的惯性动力学进行状态传播, 与有效的 EKF 更新紧密耦合。它将通过相机图像检测和跟踪的特征添加到状态向量, 随后其视觉方位测量投影到特征雅可比矩阵的零空间, 从而在状态向量中保留仅与随机克隆的相机姿势相关的运动约束, 并通过消除成百上千个点特征的共同估计来降低计算成本。

图优化算法运用了批处理来解决一组测量值上的非线性最小二乘问题, 允许通过重新逼近减少误差, 但计算成本较高。Indelman 等, 使用因子图来对 VINS 建模, 然后类比了增量平滑与建图 (iSAM) 方法逐步解决。为了在应用于 VINS 时获得恒定的处理时间, 通常只将最近状态的有界大小的滑动窗口视为优化变量, 而忽略过去的状态和测量值。Leutenegger 等介绍了一种基于关键帧的优化方法 (OKVIS), 即非线性优化中使用一组非连续的过去相机姿态和一系列与惯性测量相关的最近惯性状态, 以实现精确的轨迹估计。Qin 等近期提出了一种基于优化的单目 VINS, 它可以在非实时线程中包含回环检测。

相比之下, 滤波算法虽然计算量较小, 但假设了马尔可夫性质及在线性化时只对线性点做一阶泰勒展开, 这些做法都会带来较大的累计误差; 图优化算法则考虑了多个状态, 对状态变量进行迭代线性化, 但由于计算量较大, 如何限制计算的复杂度成了研究非线性优化的重点。然而, 由于 IMU 数据频率较高, 对状态进行优化的计算量就更大, 因此目前处于滤波与优化并存的阶段。

3.2 紧耦合与松耦合法

VIN 融合视觉和惯性测量有多种方案, 大致可分为松耦合和紧耦合两种。具体地说, 在滤波或基于

图优化的状态估计中,松耦合是指 IMU 与相机分别进行自身的运动估计,然后对其位姿估计结果进行融合。尽管该方法计算效率高,但视觉和惯性约束的紧耦合会导致信息丢失;紧耦合是指把 IMU 的状态与相机的状态合并在一起,共同构建运动方程和观测方程,随后进行状态估计。

相比之下,松耦合在状态估计中的优化变量维度较小,因此计算效率很高,但是被认为是忽略了 IMU 与相机之间的约束导致次优化结果。紧耦合被认为是现存数据融合的主流方法。

3.3 直接法与间接法

视觉处理流是任何识别系统的关键组成部分之一,它负责将密集图像数据转换为运动约束,并将这些约束融入估计问题中,其算法可根据所使用的视觉残差模型分为直接算法和间接算法。作为经典技术,间接方法在提取和跟踪环境中的点特征的同时,利用几何重投影约束进行估计。当前最先进的间接视觉 SLAM 的一个例子是 ORB-SLAM2,它使用来自 3D 特征点对应的信息执行基于图形的相机姿势优化。

相反地,直接方法在其公式中是利用原始像素光度,并且包含更大百分比的可用图像信息。LSD-SLAM 是最先进的直接视觉 SLAM 的一个例子,它利用最小化摄像机关键帧对之间的光度误差进行优化。此方法还优化了包含关键帧约束的单独图形,允许合并信息量很大的循环闭包,以更正长轨迹上的漂移。这项工作后来从单目相机扩展到双目和广角相机以提高精度。其他流行的直接法以紧密耦合的方式估计关键帧深度和相机姿势,提供低漂移的结果。直接方法在虚拟仪器中的应用由于其即使在低纹理环境中也能可靠地跟踪动态运动而受到了广泛的关注。例如,Bloesch 等使用基于补丁的直接方法提供迭代 EKF 的更新;Usenko 等引入了基于离散预积分和直接图像对齐的滑动窗口 VINS;Eckenhoff 等集成直接图像对齐和不同的 IMU 预积分用于动态运动估计。

相比之下,直接法的优势在于不需要计算特征,但是假设了光度一致性,如果场景中存在光照变化,会带来非常差的估计结果。间接法虽然在计算特征上花了较多的时间,但是在复杂的室内外环境中,考虑系统的鲁棒性,间接法还是成为工程中的主流视觉算法。

4 组合传感器标定

融合不同传感器的测量数据之前需要对组合传感器做标定。使用单一传感器时,我们需要知道该传感器的内部参数,内部参数的标定在此不做讨论。由于视觉惯性组合导航系统的传感器不唯一,对传感器的标定可分为对多个传感器的空间标定及时间对齐。空间和时间参数的传感器校准问题一直是最近许多视觉惯性组合导航系统研究工作的重点。

对组合传感器的空间标定是指要准确地知道摄像机和惯性测量单元之间的刚体变换,即标定组合传感器的外部参数。Mirzaei 和 Roumeliotis 开发了基于 EKF 的相机和 IMU 之间的空间校准。对校准参数进行了非线性可观测性分析,以表明在给定随机运动的情况下,这些参数是可观测的。类似地,Jones 和 Soatto 基于不可分辨轨迹分析检验了相机和 IMU 的空间校准的可识别性,并在嵌入式平台上开发了基于滤波器的在线校准。Kelly 和 Sukhatme 通过 ICP-like 匹配方法对准这两个传感器的旋转曲线,求解了摄像机和 IMU 之间的刚体变换。Kalibr 校准工具箱使用传感器轨迹的连续时间函数表示以批处理方式校准多传感器系统的外部参数和内部参数。它允许直接计算预期局部角速度和局部线性加速度,因此预期惯性读数和测量惯性读数之间的差异将作为批处理优化公式中的误差。离线校准的一个缺点是,每次重新配置传感器套件时都必须执行离线校准。相比之下,在线校准方法在传感器套件的每个操作过程中都会估计校准参数,从而使它们在这种情况下更可靠、更易于使用。

此外,由于不正确的硬件触发、传输延迟和时钟同步错误,每个传感器当前时刻的时间戳数据可能不一致,因此,视觉测量和惯性测量之间可能发生时间轴偏差,这最终将导致不稳定或不准确的状态估计。Li 和 Mourikis 在移动设备使用的框架内,通过同时校准单个 IMU 摄像机之间的空间和时间坐标系进行导航,该框架延伸至包括摄像机和 IMU 的内部参数。Qin 和 Shen 通过插值图像平面上的特征位置,扩展了他们先前关于基于批处理的单目视觉识别系统的工作,以校正相机和 IMU 之间的时间偏移。

Schneider 等人提出了利用信息量最大的运动进行可观测性在线校正。Kim 等人通过将来自 IMU 帧的惯性读数转换为第二帧,重新制定了 IMU 预积分。这允许 IMU 和其他传感器(包括其他 IMU)之间的校准,依赖于计算陀螺仪测量的角加速度。

5 结 语

视觉惯性组合导航系统(VINS)在过去的十年中取得了重大的研究成果和进步,在实践中得到了越来越多的创新应用,但仍有许多挑战需要应对,下面列出一些有待讨论的问题。

(1)持续定位:虽然当前的系统能够提供精确的三维运动跟踪,但在大环境中,其鲁棒性不够好。因此,即使在具有挑战性的条件下(如恶劣的照明和运动),也需要启用持久的 VINS。

(2)高维目标跟踪:在动态复杂环境中导航时,除了高精度定位外,还经常需要实时检测和跟踪同一空间中共存的运动目标,如自主导航中的三维目标跟踪。

(3)分布式合作 VINS:尽管已经对多机协作 VINS 进行了初步研究,但开发实时分布式 VINS 仍然是一项挑战,如多台机器人联合建图。

参考文献:(略)

作者简介:吴建峰,男,1997年生,硕士,主要从事视觉惯性组合导航系统的研究。

多源信息融合的智能手机室内定位技术

王刚刚¹,李素敏¹,姜利辉²,任建国³,杨春³

(1. 北京麦钉艾特科技有限公司,北京 100013;2. 华润电力控股有限公司,深圳 580001;

3. 华润电力技术研究院有限公司,深圳 580001)

摘要:随着智能终端设备(主要是智能手机)越来越普及,面向公众的室内位置服务(LBS)突出越来越广泛的应用,如商超的店铺人流统计,电厂、矿山等工业场景的人员自动化管理。据统计,大多数人80%以上的活动时间集中在室内,而以GPS、北斗为代表的常用导航卫星信号在室内衰减严重,无法用于定位,因此对于室内的高精度人员定位技术提出了迫切需求。本文设计了一种基于指数权重的蓝牙定位算法,基于智能手机内置传感器,提出了一种融合蓝牙、惯性导航系统(INS)、磁场及地图信息的多源信息融合定位方法,经试验验证表明,静态下定位精度可达2 m(60%概率),动态下定位精度可达1.4 m(60%概率)。

关键词:室内定位;蓝牙定位;磁场定位;融合定位;PDR

1 引言

随着移动智能终端的大量应用,基于位置的服务(LBS)得到了越来越广泛的应用,如行驶车辆的导航、外卖等服务,但是这些需求主要基于以GPS为代表的卫星信号。对于卫星信号,要实现较高精度的定位,需要同时接收至少四颗卫星的信号,但在高楼林立的城市地区、山谷及室内环境下,卫星信号受到多径尤其是遮挡等因素的影响,几乎无法定位。据统计,大多数的LBS用户70%~90%的时间在室内,并且商业活动也大多数集中在室内场景,如商场、超市等;此外,随着5G的发展,工业场景人员和设备的定位需求也越来越广泛。因此,室内等无卫星信号环境下的定位需求越来越迫切。

针对LBS的广泛需求,不同研究机构提出了不同的定位技术,对于智能手机,目前主要采用Wi-Fi、蓝牙、磁场、惯性导航系统(INS)等技术。随着IEEE 502.11标准的成熟,Wi-Fi接入设备得到了广泛的使用,同时基于Wi-Fi的定位技术也得到了大量的研究,常用的Wi-Fi定位手段包括指纹法、三角定位法等。但由于访问接入点(AP)安装时需要弱电施工,这样给安装部署带来了麻烦,同时AP的部署密度一般较小,其定位精度受限。蓝牙技术联盟于2010年推出了蓝牙4.0版本,其显著的特点是功耗低、设备小,是一种理想的定位信标。在室内环境下,由于建筑物结构中含有大量的铁磁性材料,从而给室内环境带来了丰富的磁场特征,可作为一种天然的定位手段。惯性导航系统是一种独立的导航手段,其主要利用加速度计和陀螺仪提供连续且高频的位置输出,但其基于积分解算的数学原理,传感器小的误差在时间累积效应下也会带来巨大的误差,尤其是低精度的微惯性导航设备(MEMS-IMU)。目前绝大多数的智能手机都含有内置的MEMS-IMU,其虽无法提供长时的高精度定位,但可获取短时的高精度连续定位结果。

基于上述分析,本文提出了一种基于权重的蓝牙定位算法,并设计了一套融合蓝牙、惯性导航系统、磁场及地图的融合定位方案,结合了蓝牙、磁场的绝对定位及惯性导航系统的短时高精度定位,为室内定位提供了一种新的解决方案。

2 基于权重的蓝牙定位算法

基于4.0版本的蓝牙设备作为一种较为理想的定位信标,在其基础上开发了不同的定位技术,主要包括:①基于到达角度的定位方法(AOA),其主要通过未知节点和已知基站间的方向和角度进行位置估计。

未知节点通过发送无线信号至基站,获取相对角度,进而获取未知节点的位置。该方法原理简单,误差主要取决于到达角度的测量,对于天线的灵敏度和空间分辨率要求高,因此成本较高。②基于距离的定位方法,该方法主要通过测量未知节点到基站的距离实现定位,以实现测距方式的不同,又可分为到达时间的定位方法(TOA)、到达时间差的定位方法(TDOA)及基于信号传播模型的距离估计方法。但 TOA 及 TDOA 方法要求基站之间的时间同步,部署复杂,而基于信号传播模型的方法,在室内多径及遮挡的影响下,信号随距离衰减模型估计难度非常大。③基于指纹的室内定位方法,即蓝牙信标安装完毕后,通过在室内划定一定间隔的网格,然后采集网格处蓝牙信号强度,并生成离线的指纹库。定位阶段,通过测量得到的待定位点的信号强度,在指纹库中进行搜索匹配,将最佳匹配信号对应的位置作为当前的定位结果。该方法前期工作量大,并且需要定期维护指纹库,给施工和维护带来了较大的负担。

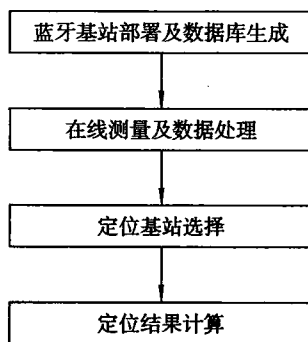


图1 基于权重的蓝牙定位算法流程图 式中, d_0 是参考距离, P_0 是在 d_0 处的信号强度, P 是距离 d 处的信号强度, 障碍物引起的误差 ξ 满足正态分布。

从式(1)可以看出, 蓝牙信号随距离呈指数衰减, 其在距离基站较近的范围内, 信号强度(RSSI)变化明显, 但是随着距离的增加, RSSI 分布趋于平缓, 而在 RSSI 变化明显的范围内, 其位置变化和 RSSI 的相关性较高。结合信号衰减模型及实际测量结果, 本文将蓝牙基站的部署间隔定为 6 m。

在部署完蓝牙基站后, 以 mac 地址作为蓝牙基站的唯一标识, 用于在线定位时蓝牙基站选取的依据, 蓝牙基站数据库由 mac 地址及该 mac 对应基站所处的位置组成。具体如式(2)所示, 即

$$DB = \{(mac_i, x_i, y_i)\}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

式中, mac_i 表示第 i 个蓝牙基站对应的 mac 地址, x_i, y_i 表示该蓝牙所处的平面位置坐标, N 表示安装的蓝牙基站总数目。

2.2 在线测量及数据处理

在线定位阶段, 通过智能手机进行蓝牙信号采集, 针对存在于数据库中的 mac, 将各 mac 所对应的在一定时间内的 RSSI 进行平均, 获取用于定位的 RSSI 信号, 具体如式(3)所示, 即

$$R_t = (r_{t1}, r_{t2}, \dots, r_{tN}) \quad (3)$$

式中, $r_{ti} = \frac{\sum_{j=1}^m RSSI_{t,ij}}{m}$, m 表示一定时间间隔内采集到的 mac_i 蓝牙基站对应的信号数目, $RSSI_{t,ij}$ 表示在该时间段内 mac_i 蓝牙基站对应的第 j 个信号所对应的信号强度。本文中时间段设定为 1 s。

2.3 定位基站选择

在一次定位过程中, 智能终端采集到的蓝牙基站数目较多, 选择合适的蓝牙基站用于定位会严重影响定位精度。本文用于选择定位蓝牙基站的流程如图 2 所示, 即对式(3)得到的信号强度进行排序, 得到信号强度最大的前四组数据, 计算对应的蓝牙基站距离最大信号强度基站的距离, 最后舍弃空间距离最大的蓝牙基站, 获得三个用于定位的基站。

针对前文分析的不同定位手段的优缺点, 本文提出了一种简单有效的基于权重的蓝牙定位算法, 该方法设备部署简单, 算法稳定可靠, 并且易于维护。该方法的算法流程如图 1 所示,

2.1 蓝牙基站部署及数据库生成

无论何种基于蓝牙信号的定位技术, 其均会受到蓝牙部署间隔的影响。蓝牙信号在空旷环境下的信号衰减模型为

$$P = P_0 + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \xi \quad (1)$$

2.4 定位结果计算

获取定位基站后,利用加权和的方式计算当前位置,如式(4)所示,即

$$P_t = \sum_{k=1}^3 \omega_k \cdot (x_k, y_k) \tag{4}$$

式中, x_k 表示选取的第 k 个蓝牙基站所处的位置, ω_k 表示该基站所占的权重, ω_k 的计算方法如式(5)所示,即

$$\omega_k = e^{\frac{r_{tk} - \text{threoid}}{10}} \tag{5}$$

式中, r_{tk} 表示该蓝牙基站对应的 RSSI, threoid 表示预先设定好的最大蓝牙信号强度,本文设置为 -60 dB。基于式(5)计算得到初步的权重之后,基于式(6)进行归一化,即

$$\omega'_k = \frac{\omega_k}{\sum_{j=1}^3 \omega_j} \tag{6}$$

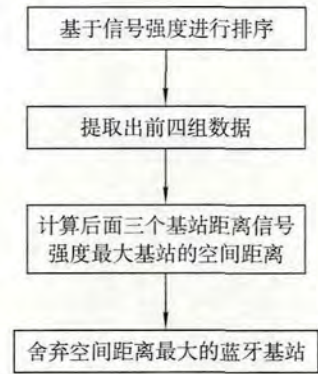


图2 定位基站选取流程

2.5 试验验证

试验场景选取办公室环境,该办公室为 $9\text{ m} \times 6\text{ m}$,安装的蓝牙基站位置如图3所示,并进行网格划分,获取39个定位测试点,基于前文定位方法,最终得到的定位误差概率累积分布如图4所示,可见,基于本文提出的蓝牙定位算法,在60%概率下,定位精度优于2 m。

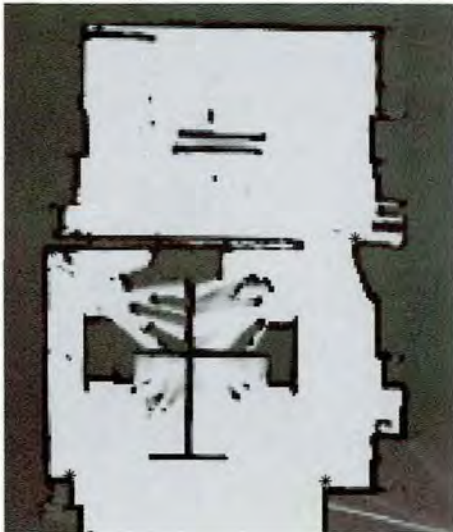


图3 蓝牙基站安装位置

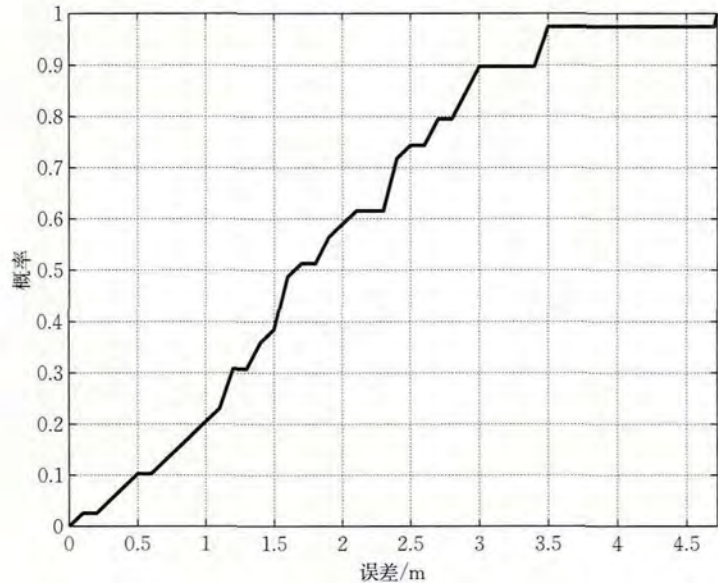


图4 误差概率累积分布

3 基于多源信息融合的定位方法

在前文蓝牙定位算法的基础上,本文提出了一种多源信息融合的室内定位方案,具体流程如图5所示。第一步,完成离线的蓝牙及地磁数据库的构建;第二步,在定位阶段,提取智能手机提供的姿态信息(这里主要是航向,由于目前大多数的智能设备均提供了成熟的滤波算法用于获取设备姿态,因此本文未加入姿态滤波算法)、加速度、磁及蓝牙扫描得到的信号强度,基于加速度数据进行行人步态检测及步长估计,并结合航向信息进行行人航位推算(PDR),然后将磁场数据和PDR结果进行对应(这里选取10步长度的PDR结果),获取一定长度的含有相对位置的磁场数据,在蓝牙定位结果的基础上,若当前的轨迹符

合判别条件,则在蓝牙定位基础上进行磁场匹配,输出磁场定位结果,若当前轨迹不符合判别条件,则直接输出蓝牙定位结果。

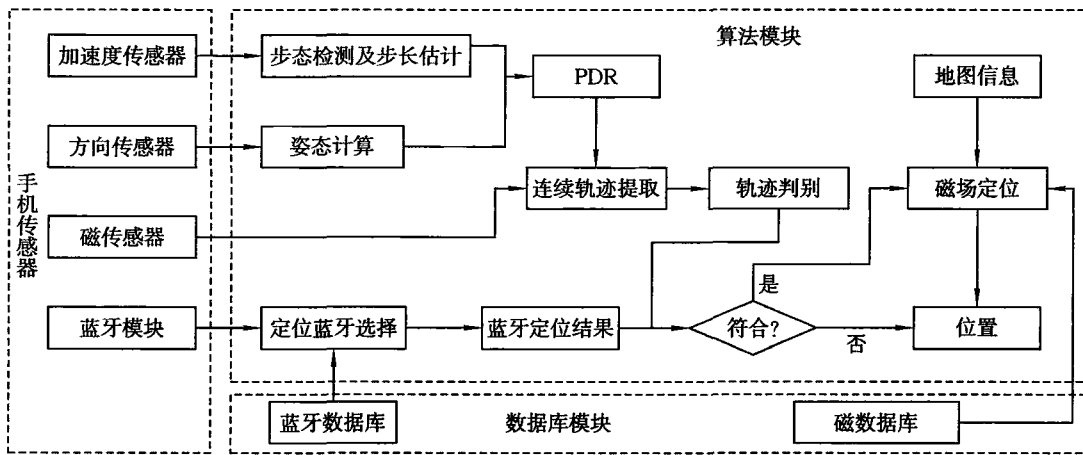


图5 多源信息融合的室内定位方案

3.1 数据采集及数据库的生成

磁场数据的采集基于专用设备进行,可同时获取室内平面图及高精度的位置和磁场信息。最终的数据库架构为

$$DB_{mag} = \{v_{i,j} \mid i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N\} \quad (7)$$

式中, $M = \frac{row}{2}, N = \frac{col}{2}$, row, col 表示室内平面图对应像素点矩阵的行数和列数(获取到的平面图,

20个像素点代表实际的1m), $v_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{处于障碍物中} \\ mag, & \text{其他} \end{cases}$, mag 表示该位置的磁场总强度。实际的平面位置可通过该点在数据库中所处的位置转换得到。

3.2 行人航位推算(PDR)

行人航位推算由式(8)计算得到,即

$$\left. \begin{aligned} Pos_X_i &= Pos_X_{i-1} + Len_step \times \cos(\psi) \\ Pos_Y_i &= Pos_Y_{i-1} + Len_step \times \sin(\psi) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, Pos_X_i, Pos_Y_i 表示当前相对位置, Len_step 表示当前一步的步长, ψ 表示由智能设备输出的航向信息。

行人步态检测基于式(9)得到,即

$$\left. \begin{aligned} Var(Acc) &> throld1_acc \\ Acc_max - Acc_min &> throld2_acc \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, Acc 为合加速度, $throld1_acc$ 为合加速度阈值, Var 为方差, Acc_max 为设定周期内合加速度的最大值, Acc_min 为设定周期内合加速度的最小值, $throld2_acc$ 为设定周期内合加速度峰值阈值。

行人步长估计由式(10)获得,即

$$Len_step = \frac{0.15 \times fs}{fs_step} + 0.3 \quad (10)$$

式中, fs 为惯性传感器采集频率, fs_step 为当前一步持续的时长。

3.3 融合定位方法

在融合定位方案中,轨迹判别主要基于当前提取轨迹的航向信息进行判别,即航向变化小于某个阈值时进行后续的融合定位。磁场定位流程如图6所示。

在获取蓝牙定位结果后,以蓝牙定位结果为中心,其一定范围内生成待定位样本,本文以蓝牙定位结果为中心,在 5 m 长度半径的圆内,以 0.5 m 间隔网格进行待定位样本生成,并且在某个网格上,以当前航向为中心,按 5°航向变化进行进一步的生成,假定生成的待定位样本数目为 R 。

在进行定位计算时,针对某个待定位样本,基于其位置和航向信息,将当前的轨迹投影到平面图上,提取其对应的磁场数据库中对应的磁场数据,并进行实时采集到的磁场数据和提取到的数据库中的磁场数据的距离计算,计算公式如(11)所示,即

$$dis_i = \begin{cases} 100\ 000\ 000, & \text{待定位样本轨迹穿越障碍物} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |M_{now,j} - M_{db,i}|, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中, dis_i 表示待定位样本 i 计算得到的距离, $M_{now,j}$ 表示当前轨迹第 j 个点对应的磁场值, $M_{db,i}$ 表示基于当前待定位样本提取得到的磁场数据库中的第 j 个磁场值, n 表示当前轨迹上含有的磁场数据数目。

基于式(11)计算得到距离信息后,根据式(12)计算初步的每个待定位样本的权重,即

$$w_i = \frac{1}{dis_i} \quad (12)$$

然后基于式(13)对权重进行归一化,即

$$w'_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^R w_j} \quad (13)$$

最后通过式(14)获取最终的定位结果计算,即

$$Pos = \sum_{j=1}^R w'_j (x_j, y_j) \quad (14)$$

式中, (x_j, y_j) 表示第 j 个待定位样本所处的平面位置。

4 试验结果

对本文所描述的多源信息融合的室内定位方法进行试验验证,验证场所选取为办公室环境,并包含一条长直走廊。试验场景平面图如图 7 所示,长 50 m,宽 20 m。蓝牙基站安装位置如图 8 所示,共安装有 14 个蓝牙基站。生成的磁场平面分布如图 9 所示。

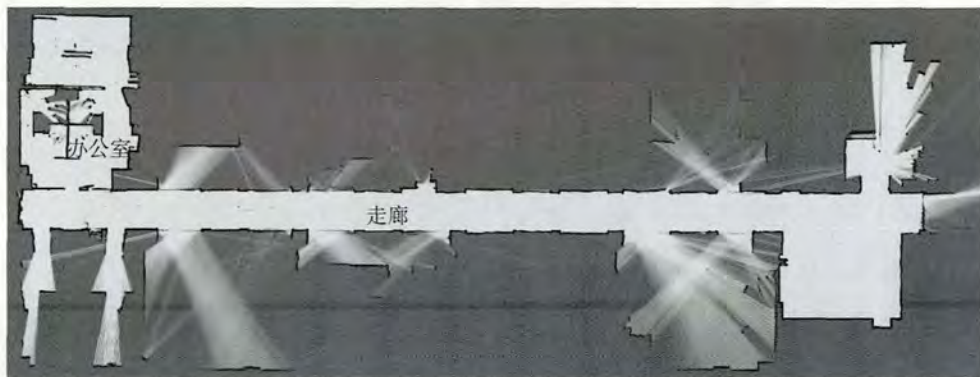


图 7 试验场景平面图



图 6 磁场定位流程

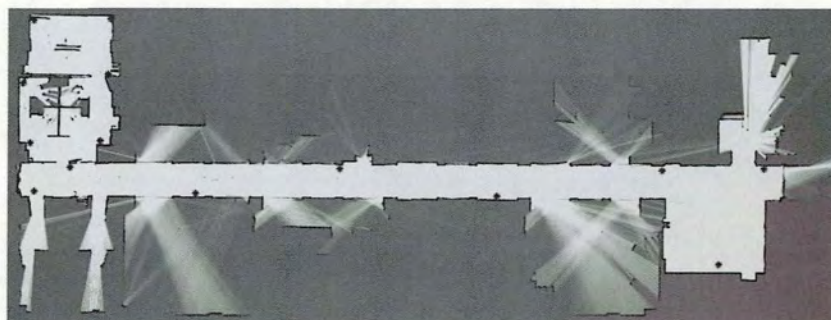


图8 蓝牙基站安装位置

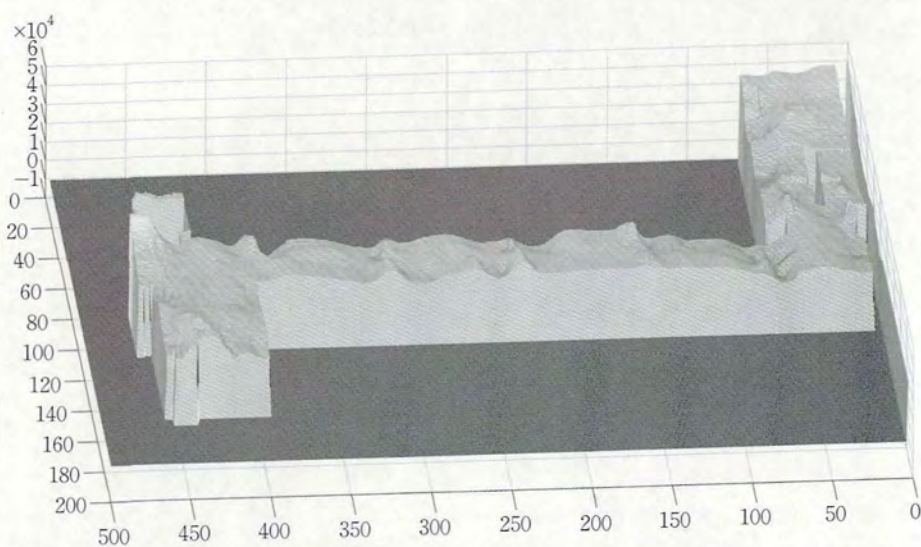


图9 生成的磁场平面分布

进行定位验证时,行走轨迹如图10所示,实时定位结果如图11所示,误差概率累积分布如图12所示,在60%概率下,定位误差小于1.4 m。

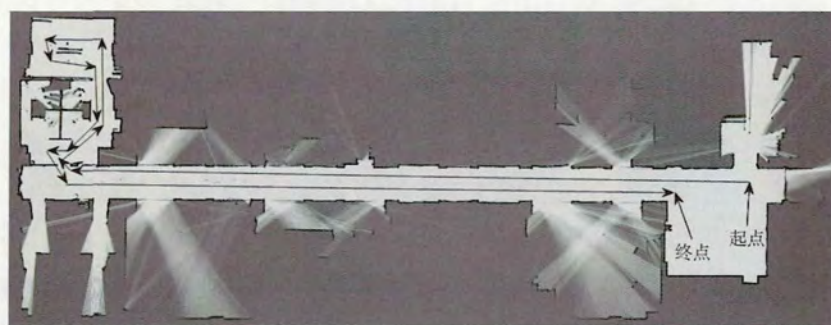


图10 行走轨迹

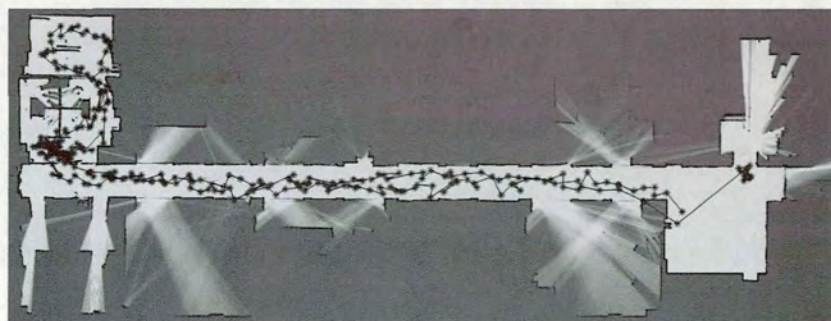


图11 实时定位结果

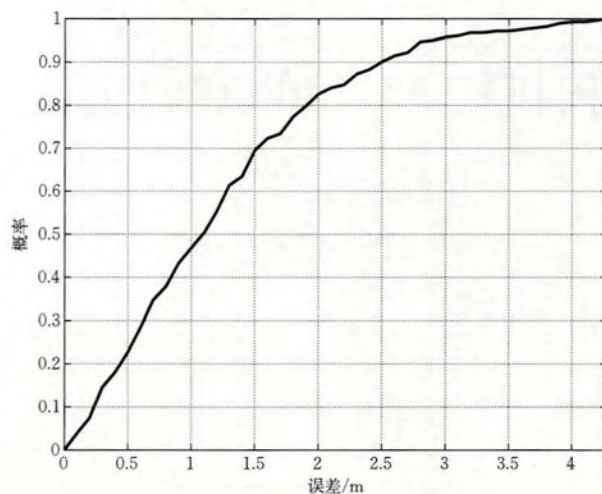


图 12 误差概率累积分布

5 讨论

本文针对当前蓝牙定位算法存在的不足,设计了一种基于权重的蓝牙定位算法,部署简单,易于维护,并且定位精度不差于传统的定位算法;在此基础上,设计了一种针对移动智能终端的多源信息融合的室内定位方法,融合 PDR、磁场定位、蓝牙定位及室内地图信息,试验结果表明,该方法在室内环境下可达到在 60% 概率下优于 1.4 m 的定位精度。

参考文献:(略)

作者简介:王刚刚,男,1986 年生,硕士,工程师,主要从事室内定位技术的算法研究和工程应用。

结合双目相机和 IMU 的室内定位方法研究*

汪志刚, 郭 杭

(南昌大学, 江西 南昌 330031)

摘 要:针对在室内环境下卫星信号受到遮挡而无法准确定位的问题,提出了一种结合双目相机和 IMU 的紧耦合室内定位方法。双目相机和 IMU 具有良好的互补性,非常适合应用于室内定位的研究中。首先利用 LK 光流法得到双目相机的位姿,然后利用 IMU 测得载体的速度、位姿、姿态信息;最后将双目相机的状态量和 IMU 的状态量合并在一起,共同构建运动方程以进行状态估计。经实验验证,本文方法具有良好的定位精度。

关键词:室内定位;双目相机;IMU;紧耦合

1 引 言

定位技术是现代社会最基础的技术之一,在航空、航海、测绘等各种场合得到广泛应用。传统定位技术以 GPS 卫星定位技术为代表,但它的应用范围有局限性,在卫星信号被遮挡的地方,如室内环境,使其不能正常工作。针对这一问题,一般使用相对定位的方法,即利用各种传感器对当前的位姿进行估计,并推算出下一时刻的位姿,达到室内定位的目的。

惯性测量单元(IMU)是惯性导航系统的关键传感器,它通过测量载体在三维空间中的加速度和角速度,解算出载体的姿态,达到定位的目的。IMU 的优势在于测量时不会受外界环境影响,短期内定位精度高。同样地,随着时间的推移,IMU 会出现零漂现象,带来很大的误差。而双目相机能一直感知外界丰富的信息,能很大程度上弥补 IMU 的零漂;同时双目相机在短时间内对动态物体不敏感,而 IMU 能提高一个精确的初始值。由此可见,IMU 和双目相机具有良好的互补性,这也说明本文方法的合理性。

2 视觉测量方法

首先在双目相机得到的前后两帧图像上提取特征点,然后使用 Lucas-Kanade(LK)光流法跟踪特征点的运动,以此推算出相机的位姿。

2.1 特征检测

特征点是图像信息的另一种表达形式,提取表现优异的特征点尤为重要。为了保证后续特征点跟踪的快速性,选用结构简单的 FAST 特征点,如图 1 所示。

如图 1 所示,在图像中选取像素 p ,假设它的亮度是 I_p 。设置一个阈值 T ,选定为 I_p 的 25%,以像素 p 为中心,选取半径为 3 的圆上的 16 个像素点。若选取的圆上有连续 9 个点与中心的亮度差超过阈值,则认定 p 为特征点。

此外,原始的 FAST 特征点经常出现扎堆现象,所以在第一遍检测后,还需用非极大值抑制方法在一定区域内仅保留响应极大值的特征点。

* 基金项目:国家自然科学基金项目(41764002)

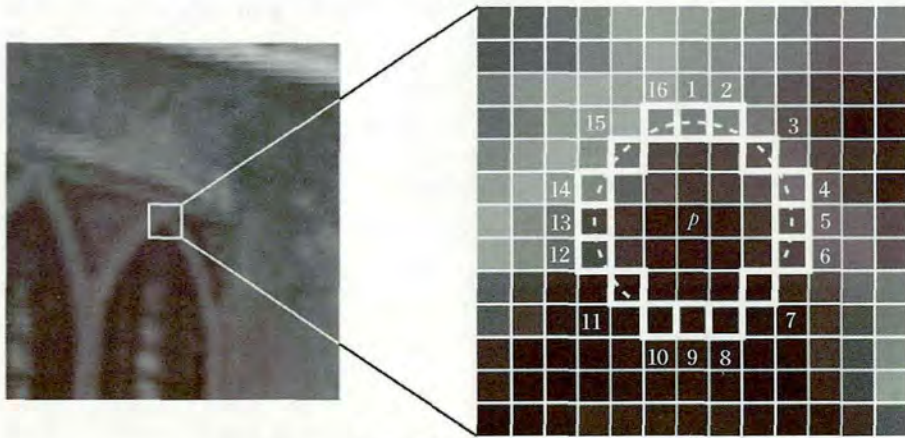


图1 FAST 特征点

2.2 用 Lucas-Kanade 光流法跟踪

LK 光流法是一种描述像素随时间在图像之间运动的方法,在 LK 光流法中,认为来自相机的图像随时间变化。那么, t 时刻,位于 (x, y) 处的像素,它的灰度为 $I(x, y, t)$,如图 2 所示。

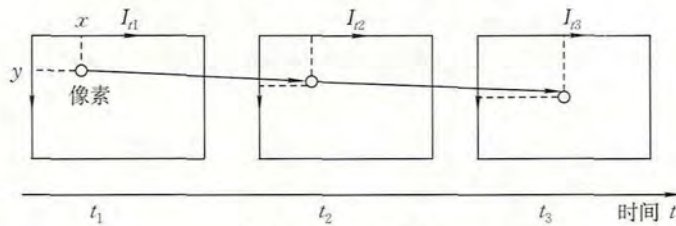


图2 LK 光流法示意

基于灰度不变假设,即同一个空间点的像素灰度值,在各个图像中不变,可得式(1),即

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) \tag{1}$$

对式(1)右侧进行一阶泰勒展开,并两边同除 dt , 得到式(2),即

$$I_x v_x + I_y v_y = -I_t \tag{2}$$

式中, v_x 和 v_y 分别是像素点在 x, y 轴上的运动速度, I_x, I_y 和 I_t 分别为像素点在 (x, y, t) 方向上的差分。

假设某一窗口内的像素具有相同的运动,则利用 3×3 窗口内的 9 个像素点建立 9 个方程,列成矩阵形式,如式(3)所示,即

$$[I_x \ I_y]_k \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = -I_{tk}, \quad k = 1, \dots, 9 \tag{3}$$

利用最小二乘法求解式(3)超定方程,可解得 $v^c = (v_x, v_y)$ 。由于 dt 已知,可计算出 $t + dt$ 时刻特征点的位置 $p^c = (x + dx, y + dy)$ 。

3 惯性测量方法

IMU 是测量物体角速度和加速度的装置,包含一个三轴加速度计和一个三轴陀螺仪。对于连续两个关键帧,它们的对应时刻分别为 k 和 $k + 1$,从 k 时刻的状态对 IMU 测量值进行积分得到 $k + 1$ 时刻的状态,即

$$p_{k+1} = p_k + v_t \Delta t_k + \iint_{t \in [k, k+1]} (q(a - b_a) - g) dt^2 \tag{4}$$

$$v_{k+1} = v_k + \int_{t \in [k, k+1]} (q(a - b_a) - g) dt \tag{5}$$

$$q_{k+1} = \int_{t \in [k, k+1]} q_k \otimes \left[\frac{1}{2}(\omega - b_g) \right] dt \tag{6}$$

式中, v, p, q 表示载体在惯性坐标系下的速度、位置和姿态, w, a 表示 IMU 的陀螺仪和加速度计的测量值, g 表示世界坐标系下的重力矢量, Δt_k 表示 k 到 $k+1$ 间的时间间隔; b_g 为陀螺仪的零偏, b_a 为加速度计的零偏。

4 视觉惯性紧耦合方法

紧耦合是指把 IMU 的状态和相机的状态合并在一起,共同构建运动方程,然后进行状态估计。利用滑动窗口技术将两者的状态量放到一个状态向量中,如式(7)所示。其中,第一个式子是滑动窗口内的整个状态向量, n 是帧数;第二个式子表示第 k 帧图像捕捉到的 IMU 状态,包含位姿、速度、旋转等;第三个式子是相机的速度与位置。

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{X} &= [x_0 \ x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ x_c] \\ \mathbf{x}_k &= [p_k \ v_k \ q_k \ b_a \ b_g] \\ \mathbf{x}_c &= [p^c \ v^c] \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

状态估计的本质是一个极大似然估计问题,针对状态向量,用非线性优化的方法进行最大后验概率推断,找出最优解。

5 实验

为了验证结合双目相机和 IMU 的室内定位方法的精度,在 WX-DP203 移动机器人实验平台(由实验室设计和开发)上搭载 Stereolabs ZED Mini 双目相机和一个九轴 IMU 传感器,在实验室内进行实验。在实验室内控制机器人行走半圈和一圈,记录实验数据,如图 3 所示。

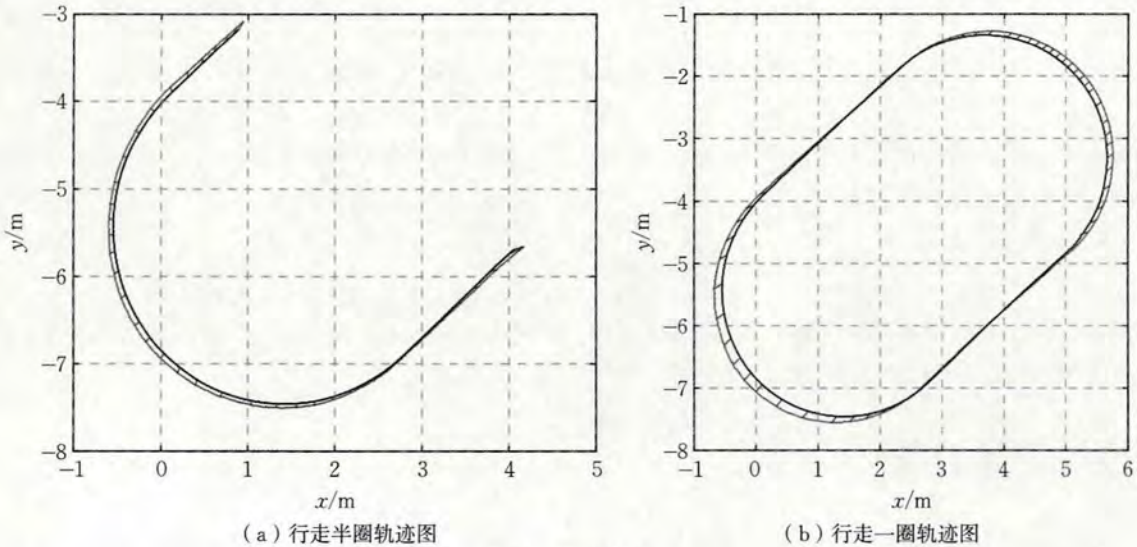
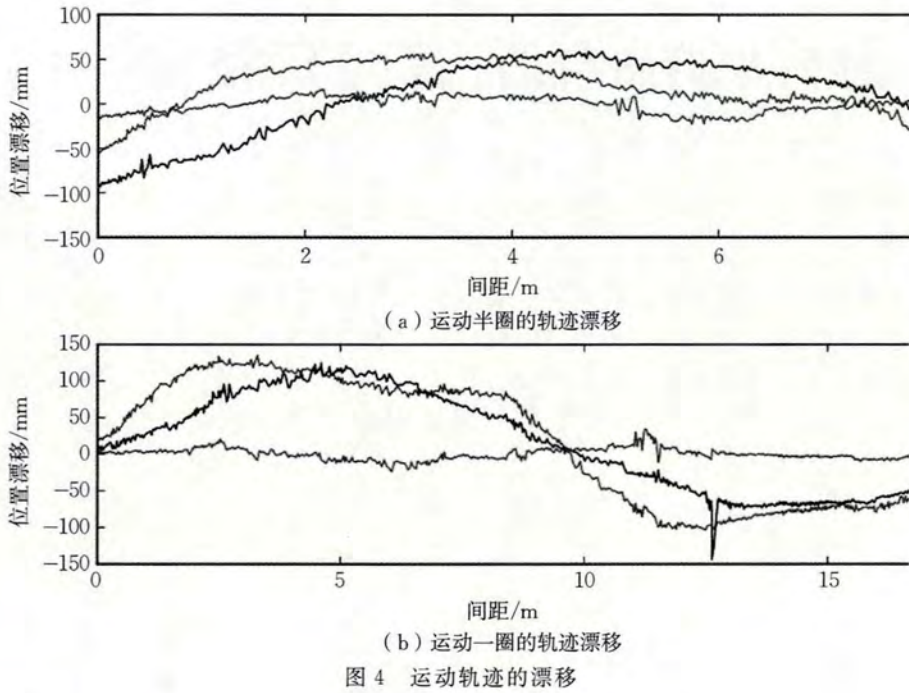


图 3 运动轨迹

在图 3 中,外层为运动轨迹,内层为真实轨迹;在图 4 中,三条轨迹分别为 x, y, z 方向上的漂移。由图可知,本文方法的精度很高,运动轨迹基本与真实轨迹贴合,误差控制在 0.15 m 以内,完全满足室内定位精度的需求。



6 结 论

本文将双目相机的状态量和 IMU 的状态量紧耦合,合并在一起进行状态估计。经实验验证,此方法的精度很高,误差控制在 0.15 m 以内,为室内定位研究提供了一条新思路。但也存在需要改进的地方,如运用 LK 光流法得到相机的位姿是基于两个假设的,这就给结果带来了不确定性。

参考文献:(略)

作者简介:汪志刚,男,1996 年生,硕士生,主要从事室内定位、组合导航等方面的研究。

异构集群融合通信系统研究与应用

张 钱,李志华,冯 建

(北斗天地股份有限公司,陕西 西安 710119)

摘 要:在现有的集群通信系统中包括许多通信协议体系,有 PDT、DMR、自组网对讲、公网对讲和其他私有协议对讲系统。这些集群对讲系统都是独立自成技术体系的,只能内部进行相互对讲通信,不能跨协议进行通信。此次研究开发一种异构集群融合指挥通信系统,打破通信协议壁垒,在对原有系统不进行改造的前提下,开发一套异构集群融合终端,对多种对讲系统进行接入,实现异构集群网络互联互通。

关键词:异构集群;融合通信;自组网对讲;公网对讲

1 引 言

无线集群对讲系统主要包括警用数字集群(PDT)、数字移动无线电(DMR)、自组网对讲、公网对讲和其他私有对讲协议系统。在现有的公安、消防、武警和其他应急通信团体之间,都是各自采购并应用各自独立的对讲系统。常态化条件下,都基本可以满足应用需求,但是在一些反恐、处突、应急救援等重大事件中,需要多个团体协同作战,在一个指挥调度中心的统一部署下,实现各团体协同通信。这种情况需要统一的指挥系统进行调度,实现高效通信指挥和救援。异构集群融合系统正好可以解决这种情况,在对原有系统进行更换和升级的条件下,即可实现多个集群对讲网络互联互通。

2 集群对讲通信系统现状分析

随着人们对于通信需求日益增大,集群对讲系统已经变得随处可见,它的低成本、易操作等特性受广大用户群体的一致好评。在现有的无线集群对讲系统中,主要包括 PDT、DMR、自组网对讲、公网对讲和其他私有协议对讲系统。

PDT 标准采用时分多址(TDMA)方式,12.5 kHz 信道间隔、4FSK 调制方式、数据传输速率为 9.6 kb/s。在满足基本业务的同时,增加了同播、动态频率资源管理等创新功能。PDT 标准以中国公安市场为基础,兼顾县、市、省、国家等不同级别用户需求及网络实际建设需要,既支持低成本单基站系统通信,也能做到高效的大区制覆盖,满足诸如四级联网的全国范围公安应急通信指挥网的建设要求。在地震、风灾、社会治安等紧急突发事件中,能迅速接入公安现有的 GIS 调度平台,实现灵活组网、高效率指挥调度、高质量语音及数据传输等功能,并具有迅速响应、安全保密的特点。

DMR 标准是针对中低端专业及商业需求起草的,适用于公用事业、学校、医院、酒店、物业等行业。DMR 标准采用 TDMA 方式,12.5 kHz 信道间隔、4FSK 调制方式、数据传输速率为 9.6 kb/s。DMR 数字对讲机的数字技术可更好地抑制噪音,尤其是在覆盖范围的边缘,拥有比模拟技术更优质的语音质量,这些优点均得益于窄带编解码器的应用及数字纠错技术。DMR 数字对讲机的一个主要优势在于可使单个 12.5 kHz 信道支持两个同步或独立的通话。

自组网对讲系统是基于无中心自组网通信技术开发的无线对讲系统,它属于一种私有通信协议,整个系统组网不需要依赖中心基站,可自动形成无线网状网。自组网对讲系统采用自中继无线通信技术和 LDPC 编解码技术,实现终端之间自动中继,相对于传统电台所使用的 RS 级联卷积码可有 5 dB 的编码增益,从而大大提高覆盖效果和传输距离。采用自中继无线通信技术支持任意节点可以接收处理来自多个

节点同时转发的同一信号,将这些来自不同节点转发的信号进行信号合并,最大可能地解调原始信息。因此具有更大的传输距离和更高的传输可靠性。自中继无线通信技术不需要路由,多个节点通过接收信号质量和场强自动判决是否启动转发,将中继由网络层多跳单点中继提升为物理层多跳多点中继,将中继从线状中继提升为网状中继,通过在物理层对接收信号质量和场强自动判决进行自动中继,并进行多点信号合并。

公网对讲是一种依赖现有的移动通信网络开发的语音对讲系统。系统最大的优势是通信距离不受限制,可实现全球范围对讲。公网对讲需要建立一个中心对讲服务器,通过服务器建立数据连接和转发通信。

3 异构集群融合通信系统的研究

异构集群融合通信系统具有可扩展性和兼容性强的特点,它不仅能够与现有存在的对讲系统进行融合接入应用,也可以与将来的新的对讲系统进行融合接入。每个类型对讲系统只需要将其模拟语音输入和输出信号、PTT 对讲控制信号、COR 语音检测信号进行接入,就可实现不同对讲系统融合组网通信,通过其中一个对讲系统的呼叫,其他对讲系统都可以接收对应的语音信息。系统组网示意如图 1 所示。

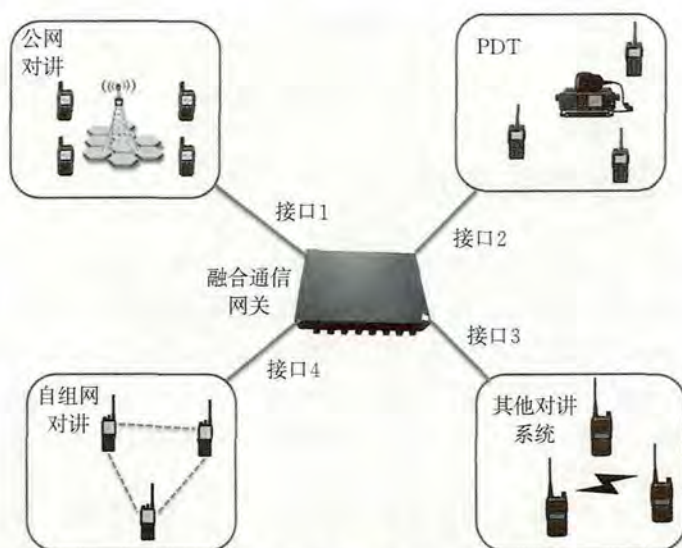


图 1 异构集群融合通信系统组网示意

如图 1 所示,异构集群融合通信系统的核心是融合通信网关,通过网关的接口,直接将公网对讲系统、PDT 系统、自组网对讲系统、其他对讲系统进行连接,每一路信号都在融合通信网关中进行语音编解码和信号检测控制,实现不同类型的集群系统互联互通。融合通信网关的组成原理如图 2 所示。

融合通信网关采用多 ARM 处理器设计,具有低时延和高效率的处理特点,为用户提供更好的体验感。网关主要包括输入输出、语音编解码、通信链路检测控制、子 ARM 数据处理、核心 ARM 数据处理几个部分。一个核心 ARM 处理器用于处理与各个子 ARM 处理器之间的通信,实现数据转发和通信链路控制;各个子 ARM 处理器分别控制每个接口对应的通信链路和语音编解码数据,每个时间点只能有一路占用通道,其他的通信链路接收数据。同时由于每个对讲系统的声音和控制信号的电平不一致,设置专用调节接口,控制每个对讲系统的输入和输出语音信号的电平大小和控制信号的高低电平方式,增强融合通信网关的兼容性。

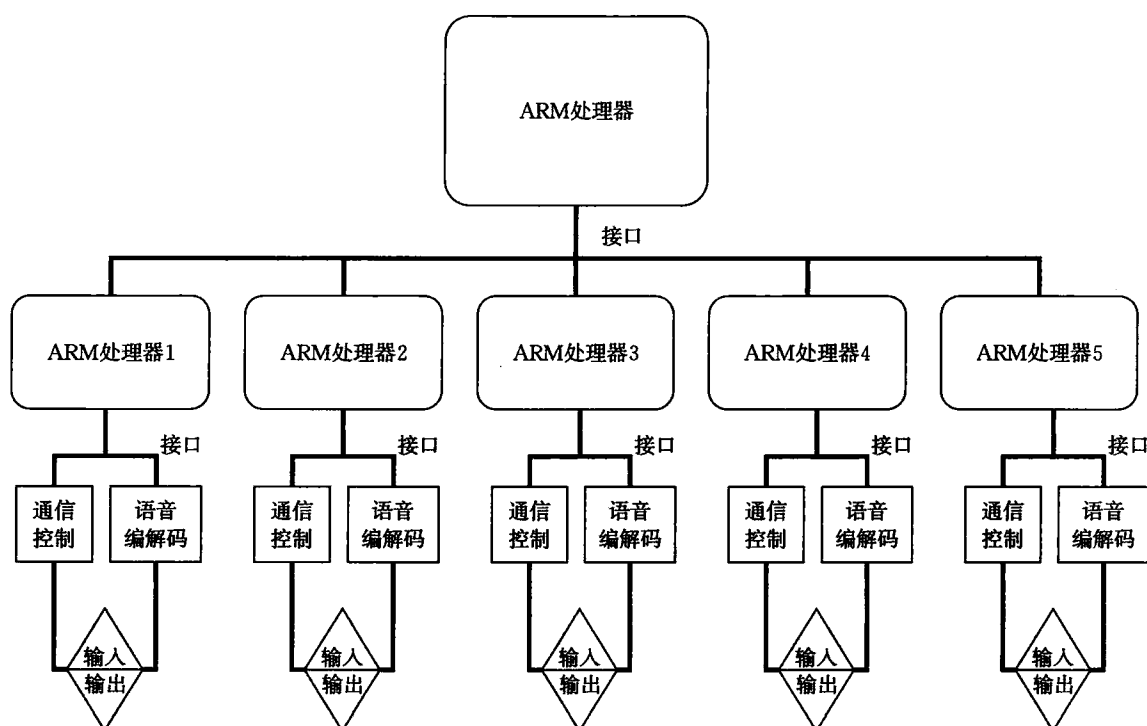


图2 融合通信网关的组成原理

4 异构集群融合通信系统应用

异构集群融合通信系统可以充分利用各个集群系统的特点优势,进行融合组网应用,尤其是在应急通信等场景中,具有高效性、统一性等特点。由于系统本身不需要对原有的对讲通信进行改造,所以也是用户平滑过渡、性价比较高的一种兼容扩展通信方式。以煤矿应急救援指挥通信为例,在煤矿现有的集群对讲系统可以满足煤矿地面平时联络的使用需求,对于井下的应用采用本安型对讲系统,当发生紧急事故时,需要救援人员井下进行救援,由于通信距离较远,所以需要采用自组网具备自中继功能的对讲通信系统;整个系统的组网应用如图3所示。

如图3所示,在指挥中心布设一套异构集群融合通信系统,实现公网对讲、矿用原有对讲系统和应急条件下应用的自组网通信系统接入。井下事故现场离地面指挥中心较远,需要采用自组网对讲机进行通信,才能实现地面和井下的互联互通,救援人员下井后通过中间节点进行对讲,自中继传输到地面指挥中心,地面指挥人员通过公网对讲机或其他类型的对讲机都可以接收语音对讲信息,并且下达相关指挥调度命令,实现高效救援。

煤矿应急救援是异构集群融合通信系统的一个典型应用,还有政府公安反恐处突、大型安保、能源企业生产调度等活动也是非常典型的应用。随着未来对讲通信的智能化发展,对讲终端的形态也会逐渐多样化和小型化,但是异构集群融合通信系统的需求是不会发生变化,它的兼容性和扩展性也将得到更多用户场景的认可。

5 结语

本文主要介绍了多类型的集群对讲系统,为打通各个系统的通信壁垒,实现对讲系统之间的互联互通,详细介绍了异构集群融合通信系统的设计原理和应用场景。通过上述描述,提供了一种全新的异构集群融合通信解决方案,并设计了一种异构集群融合通信网关,实现多类型的对讲通信系统接入。

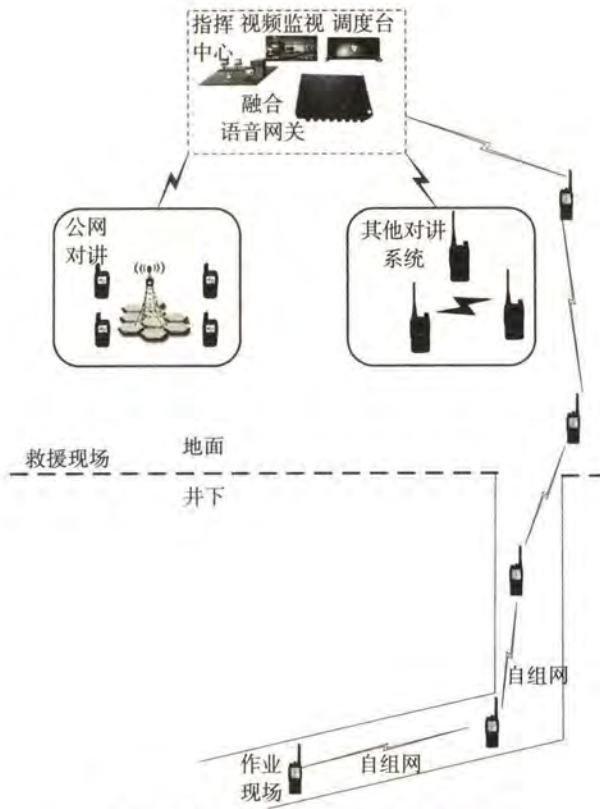


图3 异构集群融合通信系统的组网应用

参考文献:(略)

作者简介:张钺,男,1967年生,高级工程师,担任北斗天地股份有限公司的技术总监,主要从事应急通信方面的研究。

