

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107846

基于北斗/5G的航空应急救援信息优化处理技术研究*

王尔申 舒皖森 刘云天 别玉霞 徐嵩 刘慧超

(沈阳航空航天大学 电子信息工程学院 沈阳 110136)

摘要: 为提高航空应急救援系统中北斗定位精度和指令传输效率,研究了基于北斗/5G的信息优化处理技术。建立了基于北斗星基增强的定位精度优化算法模型,研究了北斗时空信息传输压缩编码方法,并设计了基于北斗/5G融合的航空应急救援系统平台。利用搭建的系统对定位精度和信息传输性能进行了验证分析,实验结果表明:应急救援终端定位精度优化后在1 m左右,并且有效降低了北斗短报文单次通信内容所需字长,提高了通信效率,实现了救援终端与指挥中心的信息可靠处理,研究结果对航空应急救援系统信息交互具有一定的参考价值。

关键词: 航空应急救援;北斗卫星导航系统;星基增强;5G通信;北斗短报文

中图分类号: TN967.1;TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Research on optimization processing technology of aviation emergency rescue information based on BDS/5G

Wang Ershen Shu Wansen Liu Yuntian Bie Yuxia Xu Song Liu Huichao

(School of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to improve the positioning accuracy and instruction transmission efficiency of BeiDou in aviation emergency rescue system, the information optimization processing technology based on BeiDou/5G is studied. The optimization algorithm model of positioning accuracy based on BeiDou satellite-based augmentation is established. The compression coding method of BeiDou spatial and temporal information transmission is studied, and an aviation emergency rescue system platform based on BeiDou/5G fusion is designed. The positioning accuracy and information transmission performance are verified and analyzed by the system. The results show that the positioning accuracy of emergency rescue terminal is about 1 meter after optimization, and the word length required for a single communication content of BeiDou short message is effectively reduced. The communication efficiency is improved, and the information reliable processing between the rescue terminal and the command center is implemented. The results have certain reference value for the information exchange of aviation emergency rescue system.

Keywords: aviation emergency rescue; BeiDou navigation satellite system; satellite-based augmentation; 5G communication; BeiDou short message

0 引言

长期以来,我国是世界上自然灾害最严重的国家之一。2020年,我国全年各种自然灾害共造成1.38亿人次受灾,直接经济损失高达3701.5亿元。此外,我国每年在公共卫生、社会安全等突发公共事件方面遭受的损失及其之后带来影响也不容忽视。航空应急救援作为灾害事件发生后应急救援的重要组成部分,具备响应速度快、现场交互能力

强等特点^[1],是减少灾害事件损失的有效途径之一。随着我国航空应急救援体系的日益完善,对航空应急救援的要求也在不断提高。

目前,应急救援的要求主要涉及定位、通信等关键技术的应用。定位方面,邵小强等^[2]在使用TOA(time of arrive)定位的基础上,应用改进卡尔曼滤波器对定位结果进行修正,提高矿井下环境应急救援的定位精度。唐诗洋等^[3]提出一种基于伪基站的大范围手机搜寻定位技术及其

收稿日期:2021-09-12

* 基金项目:国家自然科学基金(62173237)、辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10100045)、辽宁“百千万人才工程”项目(04021407)、辽宁省自然科学基金(2019-MS-251)、辽宁省教育厅科研项目(JYT2020142)、辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1907022)、沈阳市高层次创新人才计划项目(RC190030)资助

系统架构,有效地提高了人员搜救效率。王坚等^[4]采用全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)与超宽带(ultra wide band, UWB)技术组合方法,实现了室内外无缝定位,为灾害现场大面积室外区域与小区域局部室内的整体定位提供了一种解决方案。陈红梅等^[5]利用 GNSS、UWB 及惯性导航系统(inertial navigation systems, INS)的绝对导航信息及三者之间的相对导航信息,构建协同导航滤波器,设计了协同导航算法,虽然应用于无人机,但仍是一种可借鉴并应用于应急救援过程中定位关键目标的思路。2020年7月31日,北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)正式开通,现已覆盖全球,可帮助解决对灾害现场人员定位的问题^[6]。通信方面,张玉等^[7]根据无线 Mesh 网络的功能特性,对具有不同功能的网络节点的位置部署与资源配置进行了具体的规划设计,优化了 Mesh 网络在矿井下应急救援应用中的通信功能。李攀等^[8]利用无人机在空中悬浮形成通信中继站,建立浮空通信中继平台,有效解决了森林消防的指挥通信问题。文献[9]采用北斗与无线网络相结合的通信方式进行数据传输,为数据传输提供一种通信方法,具有一定应用价值。

本文针对现有研究存在的不足,研究了基于北斗/5G的信息优化处理技术,设计了基于北斗星基增强定位的多网融合的航空应急救援系统,提高了对救援终端的定位精度与救援指挥的通信效率,较好地解决了应急救援过程中救援人员进行航空应急救援对定位信息与通信质量的需求问题。

1 航空应急救援系统总体设计

航空应急救援系统基于北斗星基增强定位技术、5G 通信技术、北斗短报文通信技术等进行设计,编写应急救援系统软件程序,建立应急救援系统平台,结合应急救援终端形成 5G 通信链路与北斗短报文通信链路,并在此基础上实现平台所在的应急救援指挥中心与终端的通信、指挥、调度等功能,构成整个航空应急救援体系。本系统能够自主切换通信方式为 5G 通信或北斗短报文通信,实现实时通信。航空应急救援系统包括上位机、北斗设备、网关设备,并具备终端状态信息显示、双向通信等功能。

应急救援系统平台由上位机、北斗设备、网关设备等组成。上位机由操作设备和数据库两部分组成,操作设备以 PC 机为主,并根据需求选择是否额外使用服务器。上位机用于显示来自应急救援终端的定位、状态信息,以及执行应急救援指挥中心与应急救援终端通信、向应急救援终端发送指令时的可视化操作。数据库建立在操作设备中,作为操作设备的信息存储介质。操作设备可将需要存储的数据和设置存入数据库中,并根据应急救援指挥中心需要随时调取这些数据和设置。北斗设备主要指北斗收发一体机,用于接收和发送北斗短报文信息。本系统使用的收发一体

机型号为 GX239A,具有北斗 RNSS/GPS 定位功能、北斗 RDSS 定位功能和北斗短报文通信功能,可为野外作业的用户提供实时的位置监控、北斗短报文通信等安全保障服务。操作设备与北斗设备连接后可通过指令以卫星通信的方式与应急救援终端进行短报文通信。网关设备用于在操作设备与外部网络之间建立通信链路,使操作设备与应急救援终端能够进行 5G 通信。平台各部分组成分布结构如图 1 所示。

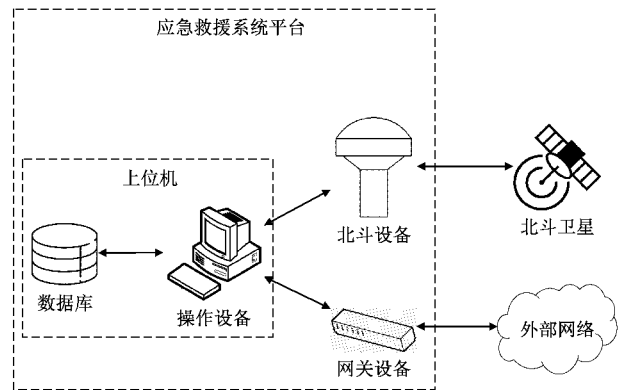


图1 应急救援系统平台

航空应急救援系统应用于自然灾害或事故灾难发生后救援现场的查看、运输、营救等工作场景。灾害发生后,应急救援指挥中心根据获取到的灾害基本信息调度应急救援终端飞往灾害发生地进行营救。应急救援指挥中心能够接收并存储应急救援终端实时传回的飞行定位和状态信息,为日后灾情评估等事后分析提供历史数据,也可根据这些信息监视终端的当前飞行情况。应急救援指挥中心与终端进行双向通信,对终端进行指挥调度。应急救援指挥中心可同时指挥多个应急救援终端,从而实现对整个航空应急救援过程的统筹规划。

2 北斗定位增强算法研究

2.1 北斗星基增强系统

北斗星基增强系统(BeiDou satellite-based augmentation system, BDSBAS)是一种广域的增强系统,能够通过星座部分发送信号实现对 GNSS 的增强。主要由空间星座部分、地面控制站等组成。地球静止轨道卫星组成了空间星座部分,它通过和 GNSS 导航信息相似的信号来实现增强效果,发送的这些信号被地面监控站处理以此来消除导航误差生成增强信息播发给用户,用户收到这两类信息进行差分处理,进而提高导航定位精度。

2.2 快慢变改正数修正

快变改正数的修正首先接收到通过接收机播发的 BDSBAS 增强电文第 2~5 电文,然后对其播发的对应当前时刻的快变改正数叠加到伪距观测值上,其结果为:

$$\rho_c(t) = \rho_{measured}(t) + PRC(t_{of}) + PRC(t_{of}) \times (t - t_{of}) \quad (1)$$

式中： $\rho_c(t)$ 为修正后的伪距观测值； $\rho_{measured}(t)$ 为改正前的伪距观测值； $PRC(t_{of})$ 为电文播发的快变改正数信息； t_{of} 为当前广播的快变改正值的时刻。

慢变改正数分为卫星时钟慢变改正数和卫星星历慢变改正数，分别提供时域和空域的改正信息，通过增强电文第 25 电文播发。通过卫星时钟慢变改正数改正的卫星钟差为：

$$\Delta t_{SV,correct}(t) = \Delta t_{SV} + \delta a_{f_0} + \delta a_{f_1}(t_k - t_0) + \delta a_{f_{G0}} \quad (2)$$

式中： $\Delta t_{SV,correct}(t)$ 为得到改正后的卫星钟差； δa_{f_0} 与 δa_{f_1} 均为钟差和钟漂(通过速度编码决定)； t_k 为当前时刻； t_0 为一个基准时间，大概 2 min 发送一次信息； $\delta a_{f_{G0}}$ 为 GLONASS 卫星的改正参数，在增强电文第 12 电文中播发，针对非 GLONASS 卫星，该值为 0。

经 BDSBAS 播发的慢变改正数改正后卫星坐标为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_k \\ \dot{y}_k \\ \dot{z}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{x} \\ \delta \dot{y} \\ \delta \dot{z} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (3)$$

式中： $[\dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k]^T$ 为修正后的位置坐标； $[x_k \ y_k \ z_k]^T$ 为卫星位置的原始坐标； $[\delta x \ \delta y \ \delta z]^T$ 当速度编码为 0 时， $[\delta \dot{x} \ \delta \dot{y} \ \delta \dot{z}]^T$ 为卫星位置的变化量；为卫星位置的变化量变化率，当速度编码为 0 时， $[\delta \ddot{x} \ \delta \ddot{y} \ \delta \ddot{z}]^T$ 为 0。

2.3 电离层改正数

电离层改正数通过增强电文第 18 电文和增强电文第 26 电文播发。首先进行电离层穿刺点对电离层格网点的估计，最后通过穿刺点周围的格网点播发对应的电离层延迟改正数。穿刺点计算方式为：

$$\begin{cases} \phi_{PP} = \sin^{-1}(\sin\phi_u \cos\psi_{PP} \cos\alpha) \\ \lambda_{PP} = \lambda_u + \sin^{-1}(\sin\psi_{PP} \sin\alpha / \cos\phi_{PP}) \\ \psi_{PP} = \pi/2 - \theta - \sin^{-1}[(R_e \cos\theta / (R_e + h_i))] \end{cases} \quad (4)$$

式中： ϕ_{PP} 与 λ_{PP} 分别为穿刺点位置纬度和经度； ϕ_u 与 λ_u 分别为用户的纬度和经度； ψ_{PP} 为用户与穿刺点的地球投射之间的地球中心角； α 与 θ 分别为用户到卫星的仰角和方位角； R_e 为近似地球半径，计算中取 6 378. 136 3 km； h_i 为最大电子密度层的近似高度，计算中取 350 km。

在确定用户电离层穿刺点之后，需适当选取穿刺点周围电离层格点，然后采用内插法进行加权计算用户电离层穿刺点的垂直延迟，计算公式为：

$$I_{vpp}(t) = \sum_{i=1}^n W_i(x_{pp}, y_{pp}) \cdot I_{IGP_i} \quad (5)$$

式中： $I_{vpp}(t)$ 为电离层垂直延迟误差； $W_i(x_{pp}, y_{pp})$ 为格网点对穿刺点的内插系数； x_{pp} 为穿刺点的经度； y_{pp} 为穿刺点的纬度； I_{IGP_i} 为格网点处的电离层垂直延迟。在计算完 $I_{vpp}(t)$ 后，因其矢量方向与卫星至接收机矢量方向不一致，需将其投影至卫星视线方向后使用。

2.4 精度测试评估

北京站 2020 年 11 月 17 日的定位的误差分量序列与

总误差序列对照如图 2~5 所示。

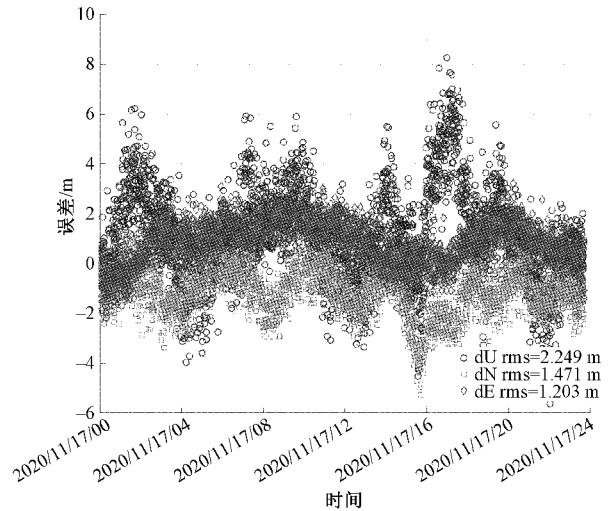


图 2 基本导航定位误差分量序列

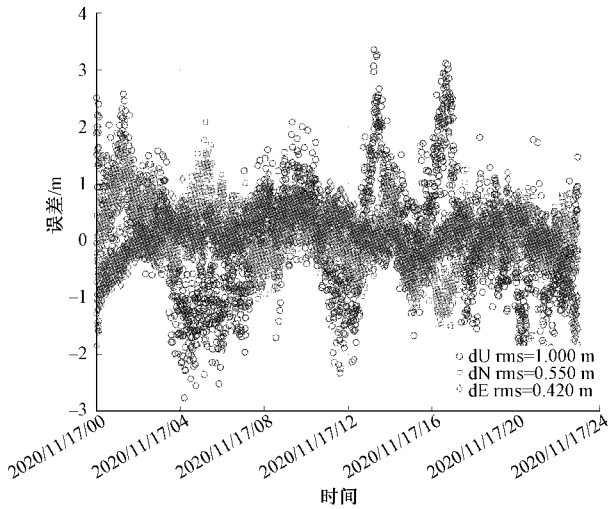


图 3 星基增强定位误差分量序列

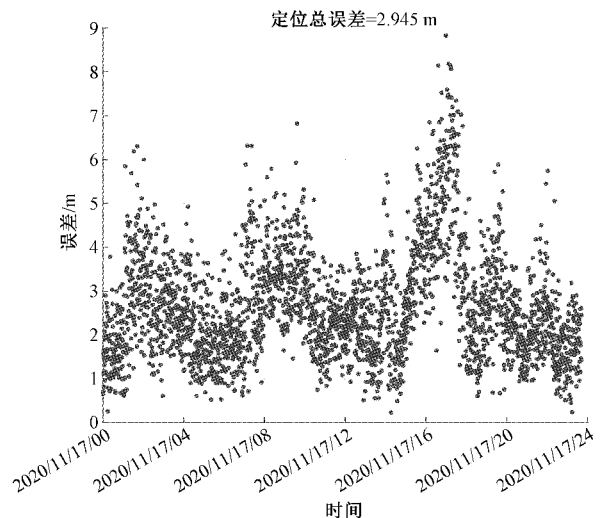


图 4 基本导航定位总误差序列

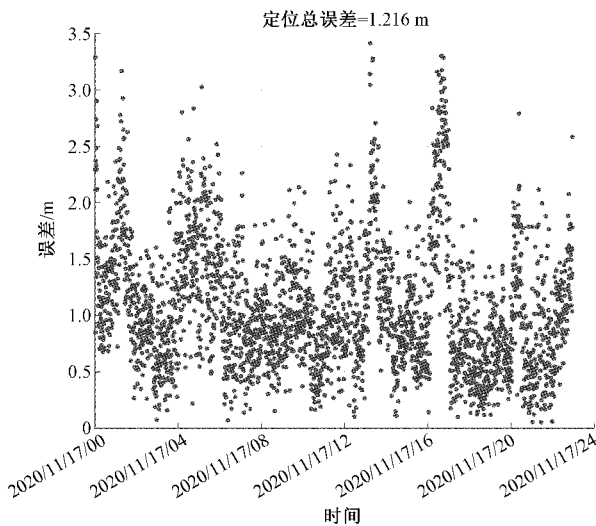


图5 星基增强定位总误差序列

考虑到仿真多天数据量大的问题,本文仅给出了2020年11月17日的误差序列,图中dE、dN、dU分别代表东、北、天3个方向的误差分量。在评估时间段内定位结果较稳定,基本导航在评估时间段内平均定位总误差为2.945 m,而星基增强在评估时间段内平均定位总误差为1.216 m,三维方向定位精度提升了41.29%。可以看出基本导航定位误差序列分布比较分散,而星基增强定位误差在高程方向得到了很好的修正。这种误差的分布变化说明了星基增强电文中播发的电离层误差、轨道改正数以及钟差改正数对用户测距误差具有正向修正的作用。此时刻定位误差较小于传统定位误差是由于观测站的不同、以及被观测增强卫星的几何结构较好导致的。

基本定位在当天16时定位误差出现了强烈的跳变,高程误差可达8 m,这是由于基本导航的更新星历有关,更新前后的卫星轨道和钟差没有完全衔接。通过图3可以发现,增强定位结果减缓了这种跳变现象。这说明星基增强播发的实时轨道、钟差快慢变改正数起到了作用,同时如果没有及时收到实时改正信息,也可利用过期的差分信息,采用降效参数进行对定位精度的有效约束,使得定位精度增加的同时减少出现精度跳变的现象。

上述结果表明,星基增强服务可使传统的单频标准单点定位的定位误差精度提升50%左右,单频增强定位的水平和垂直定位误差要明显优于单频标准单点定位的定位结果。

3 应急救援通信技术研究

针对航空应急救援时可能面临救援区域与应急救援指挥中心距离较远、救援现场地理通信环境不佳的问题^[10],本文提出一种融合5G无线网络与北斗短报文通信的通信解决方案,通过航空应急救援终端设备的软件自适应

切换,达到应急救援终端与应急救援指挥中心不掉线通信的目的。整体通信链路如图6所示。

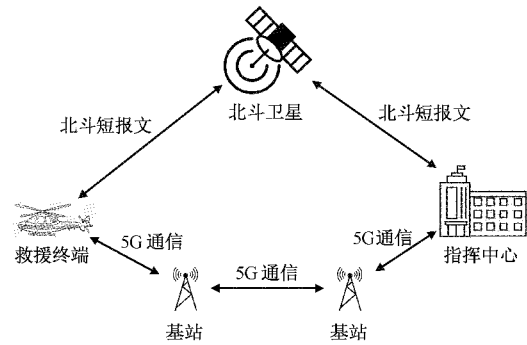


图6 应急救援通信链路

3.1 北斗/5G自适应通信链路

5G通信作为当前新一代移动通信技术,具有传输速率高、延迟低等优点^[11]。本系统采用5G通信作为主要通信链路,实现航空应急救援过程中应急救援终端与应急救援指挥中心的即时信息交互。

航空应急救援面对的救援环境错综复杂,通信基站的限制使5G通信的使用受到了局限。北斗短报文通信能够使用户通过北斗卫星进行卫星通信。卫星通信时延较大,但其灾难容忍性强,在灾害事件发生时仍能提供有效通信的特点^[12-14]使其可以作为航空应急救援通信的备选方案。

本文系统在采用5G通信作为主要通信链路的基础上,增设北斗短报文通信链路。在航空应急救援过程中应急救援终端与应急指挥中心如果遇到无法使用5G通信的情况时,使用北斗短报文进行通信。

系统设立5G通信与北斗短报文通信自适应切换机制,基于5G通信模块的接收信号强度指示(received signal strength indication,RSSD)参数,由控制模块通过指令对5G通信模块进行查询后确定,并对查询结果进行判断。应急救援终端运行过程中,控制模块会不断查询5G通信模块的RSSI。如果RSSI对应信号强度低于预设值,控制模块会选择使用北斗短报文通信作为当前通信方式,并通过北斗短报文通知应急救援指挥中心使用北斗短报文进行通信;如果信号强度高于预设值,控制模块会立即切换通信方式为5G通信,并通过5G通信通知应急救援指挥中心进行相应的通信方式切换。通信自适应切换流程如图7所示。

在使用北斗短报文作为通信方式的情况下,应急救援终端与应急救援指挥中心只进行定长时间间隔的必要通信,时间间隔内的通信内容会被分别按照时间先后顺序存储在各自本地数据存储单元中。当通信方式切换为5G通信时,存储在应急救援终端与应急救援指挥中心数据存储单元的内容会在附加时间戳后按照时间先后顺序通过5G通信发送至对方,从而弥补在短报文通信时间间隔内信息缺失的不足。

3.2 短报文编码压缩技术

北斗短报文单次通信的内容容量上限大约为70 Byte,

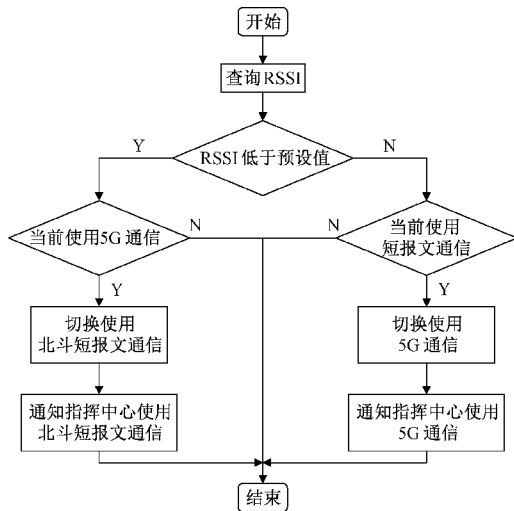


图 7 通信自适应切换流程

并且受服务频度限制,无法在短时间内多次使用^[15 16]。为应对上述问题,本系统通过模式化操作,针对不同短报文内容进行编码压缩处理,具体处理方式有:

1)对短报文发送的指令进行简化处理,使用指定字符或字符串作为指令区别标识,删去指令中无实际意义的内容,最终实现“发送即有用”。

2)对需要发送的数据信息进行进制变换,对需要发送的状态信息进行量化表示。例如,若需要通过北斗短报文收发经纬度坐标时,可在短报文内容编写时将经纬度数值使用十六进制表示。若经、纬度数值指示为东经、北纬区域坐标,则数值以正数结果表达;若经、纬度数值指示为西经、南纬区域坐标,则数值以负数结果表达。接收该内容的短报文可按照上述思路逆向解析出对应的经纬度,且结果不会出现歧义。

短报文编码压缩流程如图 8 所示。

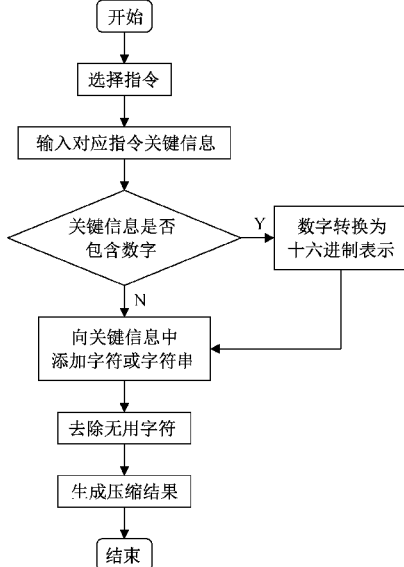


图 8 短报文编码流程

各类报文信息压缩前后占用字长对比如表 1 所示。

表 1 信息字长对比

报文信息	压缩前/Byte	压缩后/Byte
经度	10	8
纬度	9	8
汉字	2	1
英文	1	1

可以看出,对短报文内容进行编码压缩处理可有效缩短报文长度,节约报文字节占用量,提高短报文收发效率。

4 应急救援系统平台软件设计

应急救援系统平台软件按照功能划分,可分为信息收发模块、信息存取模块、信息处理模块、定位修正模块、电子围栏模块、轨迹回放模块、信息显示模块、信息交互模块、应急指令模块。平台软件组成及模块之间关系如图 9 所示。

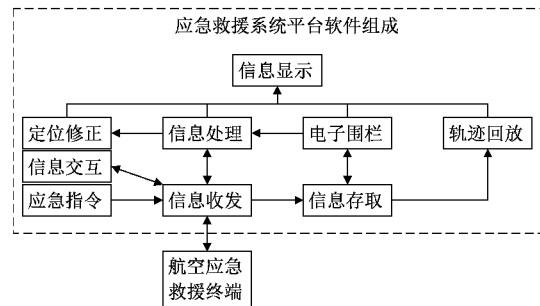


图 9 应急救援系统平台软件功能框图

应急救援系统平台软件基于 Windows 操作系统进行设计,以 PC 机作为软件载体,搭建系统操作及运行的可视化程序。应急救援系统平台软件可视化界面如图 10 所示。平台在接收到来自终端的定位信息后,立即通过后台处理,显示实际定位结果,在地图上标出相应坐标点,实现信息可视化。

实际测试中,针对应急救援系统平台软件信息收发功能,测试系统信息处理与响应情况。测试结果如表 2 所示。

表 2 系统测试结果

测试项目	测试次数	正确响应次数	成功率/%
信息发送	10 000	8 731	87.31
信息接收	10 000	8 694	86.94
信息显示	10 000	9 993	99.93

测试结果表明,系统在接收和发送信息时,会出现作为接收方的一侧收不到指定短报文信息,造成信息丢失的现象,其主要原因为使用的北斗短报文收发设备自身功率及使用环境限制造成的信息接收方并未接收到相应短报文信息所致,并考虑在今后的系统优化中更换北斗短报文收发



图10 应急救援系统平台软件可视化界面

设备以提高系统信息收发成功率;系统信息显示错误主要表现为接收到的信息在不符合系统设置的规则时并未触发报警显示,造成信息漏警现象,其原因主要为收到的信息所指示的数据精度不够高,导致系统软件程序在针对数据做出误判所致,在优化了系统程序,提高数据精度以后,信息显示成功率已得到有效提高。所有测试结果均符合预期,并达到了系统设计指标。

5 结 论

本文研究北斗星基增强技术提高定位精度,研究北斗短报文/5G自适应通信机制及报文压缩编码方法提高应急救援信息的通信效率,并设计了航空应急救援系统平台。实验结果表明:终端系统的定位精度能够达到米级,北斗短报文信息收发效率得到提高,中心系统与终端信息交互的可靠性得到提升,实现了救援终端与指挥中心的全时域通信,为航空应急救援提供了有效的信息优化方法。在未来的设计中,进一步融合滤波算法优化定位性能,扩展系统通信模式,为航空应急救援系统发挥更大的效能提供技术支撑。

参考文献

- [1] 林毓铭. 航空救援:增强应对突发事件的硬实力[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2011, 24(4): 15-18.
- [2] 邵小强,李康乐,陈熙,等. 基于改进卡尔曼滤波和参数拟合的矿井 TOA 定位方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5):1616-1624.
- [3] 唐诗洋,疏学明,申世飞,等. 基于伪基站的地震废墟人员搜寻定位技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),

2016, 56(12):1278-1283.

- [4] 王坚,刘纪平,韩厚增,等. 应急救援无缝定位关键技术研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1126-1136.
- [5] 陈红梅,常林江,徐振方,等. 复杂环境下 GNSS/INS/UWB 紧组合的无人机协同导航算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7):98-107.
- [6] 王尔申,孙彩苗,黄煜峰,等. 改进粒子群优化的卫星导航选星算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(1): 1-6.
- [7] 张玉,杨维,韩东升,等. 井下应急救援通信网络拓扑规划与资源配置[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(7):61-66.
- [8] 李攀,刘维,宁锐,等. 浮空通信中继平台在森林消防队伍指挥通信中的应用研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(1):68-71.
- [9] 王尔申,舒皖森,徐嵩,等. 基于北斗卫星导航和 GPRS 的井盖状态监测系统[J]. 工业和信息化教育, 2021(8): 108-114.
- [10] 程海. 矿山井下灾变环境及复杂工况条件下应急救援设备的性能检测[J]. 电子测量技术, 2020, 43(17): 148-152.
- [11] CHEN S Z, KANG S L. A tutorial on 5G and the progress in China [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2018, 19(3): 309-321.
- [12] 王尔申,左权,雷虹,等. 基于通航飞机平台的北斗短报文通信性能评估[J]. 沈阳航空航天大学, 2021, 38(2): 52-57.
- [13] 杨泓渊,赵玉江,林君,等. 基于北斗的无缆存储式地震仪远程质量监控系统[J]. 吉林大学学报(工.学版), 2015, 45(5):1652-1657.
- [14] 黄正睿,潘淼鑫,陈崇成,等. 集成 LoRa 与 BDS 的应急环境监测数据获取与传输技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(4):530-537.
- [15] 陈亮,莫云音,张国平. 基于北斗船载终端的气象信息可视化技术设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9):115-121.
- [16] 谢军,庄建楼,康成斌. 基于北斗系统的物联网技术与应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 329-337.

作者简介

王尔申,博士,教授,主要研究方向为卫星导航、航空电子技术等。

E-mail: wanges_2016@126.com