

北斗/GPS 组合伪距差分系统伪距修正信息生成及应用

蒙聚杰,符杰林,王 玫,王俊义,杨 飞

(桂林电子科技大学 认知无线电与信息处理教育部重点实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:一般导航系统单点定位精度只有 15 m 左右,不能满足某些要求定位精度较高的场合,差分定位能很好的解决定位精度不高的问题.本文在差分 GPS 的基础上,提出和构建了基于北斗/GPS 的组合伪距差分系统,通过该系统产生的伪距改正数能显著的提高用户的定位精度.同时,由于 RTCM2. X 格式没有定义北斗系统的伪距差分电文格式,本文提出一种改进的 RTCM 差分电文使其适用于北斗系统用户,以便于北斗用户使用此数据传输协议进行差分定位.

关键词: 北斗/GPS; 组合差分; RTCM; 差分定位

中图分类号: P228. 4

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2016)10—0036—05

The Generation and Application of Pseudorange Correction Information of the Beidou/GPS Combined Pseudorange Differential System

MENG Ju-jie, FU Jie-lin, WANG Mei, WANG Jun-yi, YANG Fei

(Key Laboratory of Cognitive Radio & Information Processing, the Ministry of Education, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541000, China)

Abstract: In general, the positioning accuracy of single point navigation system is only about 15m. It can't satisfy some fields of precision position. Differential positioning can be a good solution to the problem of low positioning accuracy. In this paper, On the basis of differential GPS, the BDS/GPS combined pseudorange differential system was designed, the user's positioning accuracy can be significantly improved by pseudorange correction generated by the scheme. At the same time, due to the Beidou system of pseudo range differential message format isn't defined in the RTCM2. X format, this paper proposes an improved RTCM differential message format to make it applicable to the user of the Beidou system, so as to facilitate the Beidou user to use this data transmission protocol for differential positioning

Key words: beidou/GPS; combined difference; RTCM; differential positioning

1 引言

通常 GPS 和北斗在水平面上的精确度(95%的置信度)为 10~15 m 左右,无法满足某些较高精度邻域的需要.差分 DGNSS 是一种提高定位精度的方法,通常可以使定位精度达到米级甚至分米级.随着北斗系统的发展,结合北斗系统的多系统组合导航已成为十分重要的研究方向^[1-3],多系统组

合差分已成为其中的研究热点之一^[4-6].在 DGNSS 系统中,首先且最重要的工作就是伪距改正数的产生.在结合北斗和 GPS 系统的双模组合伪距差分改正数生成方面,目前主要是在 RBN/DCNSS 台站进行研究的.他们研究将现有 RBN/DGPS 台站建设成可同时播发 GPS 和北斗差分修正信息的 RBN/DGNSS 台站,实现 GPS 差分修正信息和北斗差分修正信息同时播发^[7-9].

由于 RBN/DGNSS 系统是面向海洋用户的,其应用范围有限且满足不了陆上用户的需求.同时由于其系统组成复杂,成本高,在陆上组网不易实现.本文提出一种组网简单,成本较低的北斗/GPS 组合伪距差分系统方案.

2 伪距差分定位的数学模型

设基准站 B 的伪距观测方程为:

$$\rho_B^i = R_B^i + d\rho_B + c(dT - dt) + d_{\text{Bion}} + d_{\text{Btrop}} + d_{\text{tgd}} + \epsilon_p \quad (1)$$

式中, ρ_B^i 为基准站接收机对卫星 i 的伪距观测值; R_B^i 为基准站到卫星的几何距离, $d\rho_B$ 为以米为单位的轨道误差, c 为光速; dT 为卫星钟差; dt 为接收机钟差; d_{Bion} 为电离层延迟误差; d_{Btrop} 为对流层延迟误差; d_{tgd} 为群延迟误差; ϵ_p 为接收机噪声和多路径效应等误差的影响.

在伪距的观测方程中,接收机钟差、卫星钟差已及群延迟误差可以直接消除掉.

基准站是固定于某个已知精确坐标的高精度接收机,其坐标为 (X_o, Y_o, Z_o) ,它接收全部卫星的伪距和星历,利用星历算出卫星在某一时刻的瞬时位置 (X_s^i, Y_s^i, Z_s^i) ,由于基准站坐标 (X_o, Y_o, Z_o) 已知,利用卫星和基准站的坐标可以计算出卫星到基准站的真实距离 R_B^i :

$$R_B^i = \sqrt{(X_s^i - X_o)^2 + (Y_s^i - Y_o)^2 + (Z_s^i - Z_o)^2} \quad (2)$$

实际距离和伪距观测值两者求差得到伪距改正数:

$$\Delta\rho^i = R_B^i - \rho^i = -d\rho_B - d_{\text{Bion}} - d_{\text{Btrop}} \quad (3)$$

伪距改正数变化率为:

$$\hat{\rho}^i = \frac{\Delta\rho^i}{\Delta t} \quad (4)$$

基准站将 $\Delta\rho^i$ 和 $\hat{\rho}^i$ 传递给用户.用户接收机得到修正的伪距为:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{corr}}^i &= \rho^i + \Delta\rho^i + \hat{\rho}^i(t - t_0) \\ &= R_u^i + c(dT - dt) + (d\rho_u - d\rho_B) \\ &\quad + (d_{\text{uion}} - d_{\text{Bion}}) + (d_{\text{utrop}} - d_{\text{Btrop}}) \\ &\quad + \hat{\rho}^i(t - t_0) + \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

当用户与基准站距离较近时,误差的空间相关性较强,此时可认为基准站与用户的对流层延迟、电离层延迟、卫星星历所引起的距离偏差近似相等,即 $d\rho_u \approx d\rho_B$, $d\rho_{\text{uion}} \approx d\rho_{\text{Bion}}$, $d\rho_{\text{utrop}} \approx d\rho_{\text{Btrop}}$. 因此

$$\rho_{\text{corr}}^i = R_u^i + c(dT - dt) + \hat{\rho}^i(t - t_0) + \epsilon \quad (6)$$

由式(6)可以看出,伪距差分已经基本上消除了卫星星历误差、电离层误差和对流层误差.用户接收机利用改正后的伪距进行定位解算,能大幅度提高定位精度.

3 关键技术

3.1 载波相位平滑伪距

由于载波相位观测值的精度要比伪距观测值差不多高两个数量级,且相位观测量所受的多路径误差更小,于是本文使用载波相位观测值来平滑伪距,以提高伪距的测距精度,提高差分数据的准确度.

最早且应用最广的相位平滑伪距方法是 Hatch 滤波方法, Hatch 滤波法方法如下:

$$\rho_{s,k} = \frac{1}{M}\rho_s + \frac{M-1}{M}[\rho_{s,k-1} + \lambda(\Phi_k - \Phi_{k-1})] \quad (7)$$

式中, $\rho_{s,k}$ 表示平滑后的伪距, Φ_k 表示载波相位观测值, M 表示平滑时间常数.

Hatch 滤波的性能与它的平滑时间密切相关,原理上来说,随着平滑时间的增长,平滑后的伪距精度将会越来越高.因为越多的观测历元参与平滑,平滑后的伪距精度越高,并且越接近载波相位的精度.但是在实际情况中, Hatch 滤波存在着一个不可忽视问题,那就是如果平滑时间超过某一特定值,滤波器就会有发散效应,因为电离层对伪距和载波的延迟是大小相等方向相反的,这一效应称为电离层发散.

本文在 Hatch 滤波的基础上使用滑动窗口的 Hatch 滤波,把窗口的大小设为 100 s. 实验结果表明,滑动窗口的 Hatch 滤波能得到很好的平滑效果.

3.2 基于北斗系统的 RTCM 编码

在实际应用中基准站产生的伪距改正数数据需要进行特定编码后才能发给流动站用户使用.在伪距差分定位中一般使用 RTCM SC-104 发布的 V2.3 版本的编码方式.因为 RTCM SC-104 开始主要是面向 GPS 和 GLONASS 的,暂时还没有定义北斗差分的电文,所以我们需要在 RTCM SC-104 的基础上自定义北斗差分电文.

整个北斗二代系统卫星总共具有 35 颗,而 RTCM 的类型 1 的卫星 ID 只有 5 bit,如果完全照搬类型 1 的格式不能满足北斗系统的要求,因此需要对类型 1 的格式进行改进.

在定义北斗差分的电文时,尽量使得自定义的

北斗差分的电文和 GPS 伪距差分电文较大幅度上保持一致性. 本文选择 RTCM2. 3 格式中的保留类型 41 作为北斗伪距差分的电文类型, 电文具体定义如表 1 所示.

表 1 北斗伪距差分电文类型 41 内容

参数	比特数	范围说明
比例因子	1	表 2
用户差分距离误差 (UDRE)	1	表 3
卫星 ID	6	1~37(有效)
伪距改正数 (PRC)	16	(-654. 34 m~654. 34 m)或(-10485. 44 m~10485. 44 m)
伪距改正数变化率 (RRC)	8	(-0. 254 m/s~0. 254 m/s)或(-4. 064 m/s~4. 064 m/s)
数据龄期 (IOD)	8	--
总计	40×N	--
填充字段	8×(N mod 3)	0, 8 或 16
校验	6×N	奇偶校验

注: N 为可见卫星数.

表 2 电文类型 41 的比例因子

代码	PRC/m	RRC/(m/s)
0	0. 02	0. 002
1	0. 32	0. 032

表 3 电文类型 41 的 UDRE

代码	十进制数值	UDRE 范围/m
0	0	≤4
1	1	>4

用户计算 UDRE 时应使用表 3 的上限乘以电文头中参考站健康状态标志中的 UDRE 比例因子.

自定义的北斗伪距差分格式是在类型 1 的基础上, 将 UDRE 由 2 bit 改为 1 bit, 将多出来的 1 bit 重新分配给卫星 ID, 是卫星 ID 由 5 bit 变为 6 bit, 可编号的卫星数为 64, 这样就符合了要求. 将 UDRE 由 2 bit 改为 1 bit 主要是基于用户距离误差是由 UDRE 的上限乘以比例因子得到的, 其主要是一个参考值, 改变了之后其变化不大, 只是其范围稍微缩小了点而已, 同时由于 S/A 政策取消之后, 误差范围大大缩小了, 因此此方法对用户的定位精度影响不大.

此方案不仅保留了伪距差分的所有信息, 且主要信息和格式不需要进行大的改动. 在综合考虑之后, 此方案可行且实用.

3. 3 时空系统统一

时间系统: GPS 采用的时间系统为 GPS 时 (GPST), BDS 采用的时间系统为北斗时 (BDT), GPST 和 BDT 均采用国际单位制 (SI) 秒为基本单位, 但时间起算点不同. GPST 起算原点为 1980 年 1 月 1 日 UTC 0 时 0 分 0 秒, BDT 起算历元原点为 2006 年 1 月 1 日 UTC 0 时 0 分 0 秒.

在北斗系统的轨道计算以及定位计算时, 所有的时间都是以 BDT 为基准的. 而本文中, 由于基准站接收机从串口输出的数据都是以 GPST 为基准, 所以在设计北斗系统的计算时需要将 GPST 转换为 BDT.

任一时刻, 由 UTC 跳秒所引起的 GPST 和 BDT 差异为 14 s, 转换公式如下:

$$\begin{cases} \text{BDT_Week} = \text{GPST_Week} - 1356 \\ \text{BDT_Second} = \text{GPST_Second} - 14 \end{cases} \quad (8)$$

坐标系: 北斗导航系统采用的是我国 CG-SC2000 坐标系统, 而 GPS 采用的 WGS-84 坐标系, 对北斗导航系统来说就需要采用 CGSC2000 坐标系下的坐标来描述基准站坐标. 北斗坐标与 GPS 坐标的差异保持在 5 厘米左右. 本文中, 由于伪距差分的定位精度为亚米级别的, 所以在实际运用中, 这么微小差异量不会对定位精度有太大的影响, 所以暂时不考虑坐标的转换问题.

3. 4 北斗三种类型卫星位置计算

北斗星座具有三种轨道卫星, 分别为 MEO、IG-SO 和 GEO 卫星. 虽然这三种卫星的轨道特征存在差异, 北斗系统仍然选用 GPS 卫星广播星历参数形式作为其各导航卫星的广播星历参数. MEO、IGSO 的轨道都是中轨道, 所以其计算方法和 GPS 一致, 但是 GEO 轨道是同步轨道, 所以它和中轨道的计算是有差别的. 在计算 GEO 卫星轨道时需要将 GEO 卫星坐标旋转 5°.

4 软件设计与应用

4. 1 系统整体设计

BDS/GPS 联合伪距差分系统包括三个部分: BDS/GPS 双模接收机、伪距差分数据处理器、差分数据发送链路. 如图 1 所示.

4. 2 北斗/GPS 双模差分数据生成软件设计

差分基准站软件架构图如图 2 所示, 软件是在

VS2008 平台下使用 C/C++ 语言编写的。

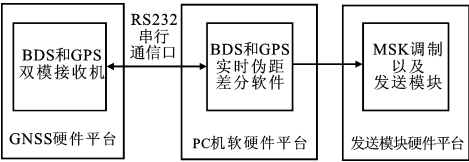


图 1 BDS/GPS 伪距差分数据处理系统框图

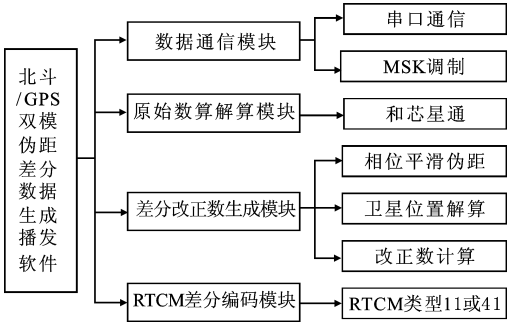


图 2 差分基准站软件架构图

如图 2 所示, GNSS 基准站使用的是和芯星通的 UR240—CORS II 接收机,它接收可见的 BDS 和 GPS 卫星的星历数据、伪距、多普勒频率以及载波相位等信息后,通过 RS232 串口接收响应的指令,把相关数据送入伪距差分数据处理器;伪距差分数据处理器由原始数据解算模块和差分改正数生成模块组成,原始数据解算模块解算所有观测到的卫星的星历、伪距以及载波相位数据,差分改正数生成模块根据 GNSS 基准站的准确位置数据计算卫星位置,得到站星距,通过站星距与伪距相比较,得到伪距改正数等信息,并将其送入 RTCM 差分数据编码模块,将其进行 RTCM 差分编码. 编码后的信息发送到 MSK 调制模块进行调制,调制后的高频信号由数据发送模块发送给周边的 GNSS 用户.

基准站差分处理软件主程序流程图如图 3 所示. 差分处理软件实时监听接收数据的 RS232 串行通信口,当串口有数据的时候会产生一个 WM_COMM_RXCHAR 消息,然后相应函数对数据进行接收. 接收的数据经过判断是否是可用数据,如果是可用数据,就把它存储下来并送到解码模块进行解码,不可用的就删除清和空缓冲区. 对数据解码之后判断是否足够进行下一步伪距改正数的计算和 RTCM 编码.

伪距改正数的计算是由单独的线程实现的,线程流程图如图 4 所示. 伪距改正数线程单独计算各颗卫星的伪距改正数. 对 GPS 卫星和北斗卫星轮询一遍,计算出所有可用卫星的伪距改正数之后对它

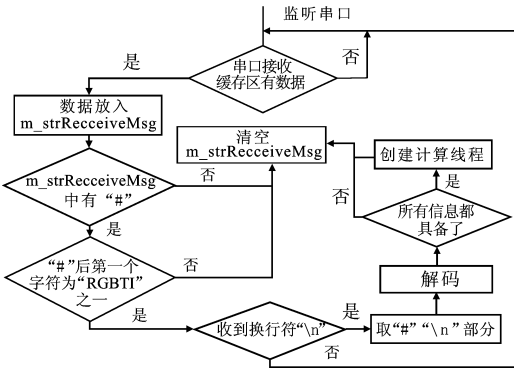


图 3 基准站差分处理软件主程序流程图

们进行 RTCM 编码.

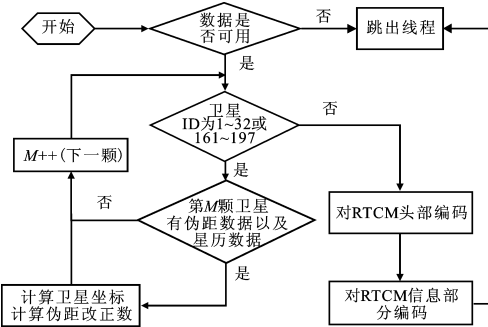


图 4 伪距改正数计算线程流程图

5 实验结果分析

在本次实验中,基准站精确坐标为($x = -2\ 005\ 191.546\ 831$, $y = 5\ 411\ 088.065\ 640$, $z = 2\ 707\ 881.020\ 321$),在基准站上使用自编的差分软件同时产生并保存北斗/GPS 的差分电文并对它们进行 RTCM 编码和广播. 用户部分精确坐标($x = -2\ 004\ 079.252\ 2$, $y = 541\ 018\ 9.061\ 2$, $z = 2\ 706\ 763.955\ 6$),在软件中同时进行单点定位和差分定位测试. 经 2 小时连续测量后对其三维距离误差进行对比,并对数据做统计分析. 伪距改正数和定位结果如下所示.

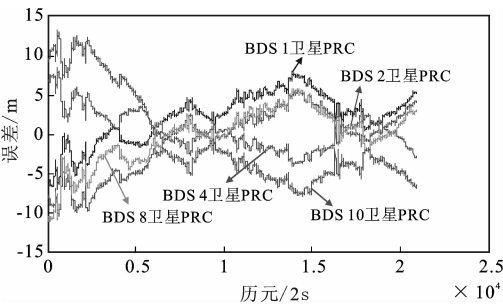


图 5 北斗部分卫星的伪距改正数

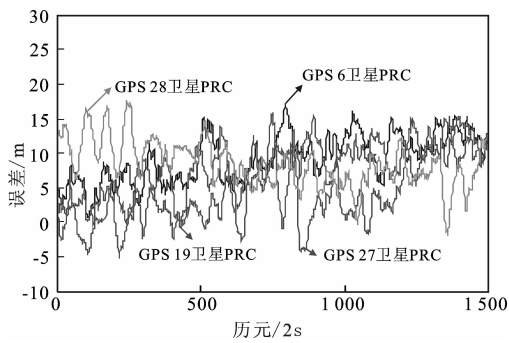


图 6 GPS 部分卫星的伪距改正数

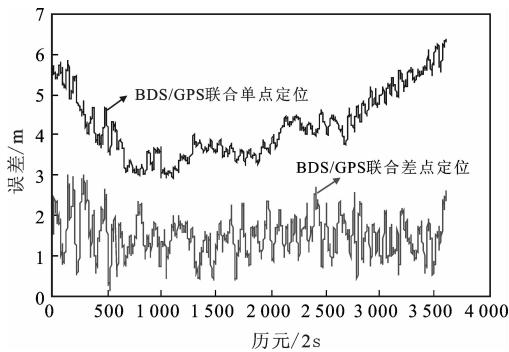


图 7 定位误差比较

从图 5 和 6 可以看出,本文所产生的伪距改正数可靠,不会发生大的跳变,从而能为用户提供差分改正服务.从对比图 7 中可以看出北斗/GPS 组合伪距差分定位的结果明显优于北斗/GPS 组合的单点定位,组合伪距差分定位的精度均值为 1.5 米左右.对比表 4 定位误差最大值、最小值以及均值,可以看出组合差分定位精度从组合单点定位的 2.92 至 6.38 m 提高到了 0.15 至 3 m;另外组合单点定位误差方差大于组合差分定位误差方差,也证明了差分定位比单点定位更加稳定.

表 4 三维定位误差比较

类型	最大误差	最小误差	标准差	均值
联合单点定位	6.380 6	2.924 5	0.826 3	4.243 7
联合差分定位	2.997 8	0.151 2	0.482 0	1.485 5

6 结束语

本文产生的伪距改正数能正确的应用在实际场景中,它能为用户提供高精度的定位服务.通过实验

得到了平均误差为 1.485 5 米的定位精度,大幅度提高了用户的定位精度.同时系统具有组网便捷、成本较低效率高的特点.

参考文献:

[1] Luo H Y, Wang Q, Li Q, et al. Research on the positioning algorithm of BD/GPS integrated navigation system[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013 (385-386): 1231-1236.

[2] Wang M, Cai H, Pan Z. BDS/GPS relative positioning for long baseline with undifferenced observations[J]. Advances in Space Research, 2015, 55(1):113-124.

[3] Man X, Sun F, Liu S, et al. Analysis of positioning performance on combined BDS/GPS/GLONASS[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume II. Heidelberg, Springer, Berlin, 2015:399-409.

[4] 李鹤峰. BDS/GPS/GLONASS 高精度差分定位与 RAIM 算法研究[D]. 山东:山东科技大学, 2014.

[5] 李昕,史俊波,郭际明. BeiDou/GPS 组合定位算法研究及初步结果[C]// 中国卫星导航学术年会. 中国,南京,2014.

[6] 刘琳. 北斗/GPS 双模差分定位技术的研究及实现[D]. 北京:北京交通大学,2013.

[7] 刘嘉华,俞毅. 无线电指向标-差分北斗卫星导航系统研究与应用[J]. 中国海事, 2015,10(2):28-32.

[8] 吴功栋,王玉林,王成,等. 航海无线电指向标差分北斗系统研究[J]. 中国航海, 2013,48(6):69-71.

[9] 王成. 北斗沿海差分播发研究[J]. 中国航海,2014,49 (4):50-53.

作者简介:

蒙聚杰 男,(1989-),硕士研究生.研究方向为导航技术与应用. E-mail:jjmeng104@163.com.

符杰林 男,(1975-),副教授,硕士生导师.研究方向为导航技术与应用、无线通信、宽带无线通信网络.

王 玫 女,(1963-),教授,博士生导师.研究方向为扩频通信、混沌通信和超宽带通信.

王俊义 男,(1977-),副教授,硕士生导师.研究方向为网络算法研究.

杨 飞 男,(1989-),硕士研究生.研究方向为导航技术与应用.