

BD-2/GPS 双模组合定位性能分析

刘东升, 钟 馨, 王 松

(中国洛阳电子装备试验中心, 洛阳 471000)

摘要: 针对 BD-2/GPS 组合以及 GPS、BD-2 单独系统在济源地区的定位性能进行了评估; 分析了在不同模式下的可视卫星数量、几何精度因子、定位的稳定和准确性; 当今几大世界卫星导航定位系统的兼容性日益提高和完善, 在这种技术发展下使多系统联合定位成为可能; 为达到两种系统组合定位的目的, 将我国的 BD-2 与美国 GPS 技术相融合, 在 BD-2 单系统定位原理的基础上提出了基于 BD-2/GPS 双系统构成的组合接收系统的设计思路和 BD-2/GPS 组合导航定位系统的数学解算方法; 通过试验表明双模组合定位进一步提高了单系统模式下的定位性能。

关键词: GPS; 北斗-2 代; 组合导航; 误差因子

Performance Analysis of Location in Dual Mode BD-2/GPS System

Liu Dongsheng, Zhong Qing, Wang Song

(China luoyang electronic equipment testing center, Luoyang 471000, China)

Abstract: The positioning performance of BD-2/GPS combined with GPS and BD-2 single system in JiYuan area was evaluated. The number of visible satellites, the geometric precision factor, the stability and accuracy of positioning are analyzed in different mode. At present, it is possible to make multi system joint localization under the development of the compatibility of several satellite navigation and positioning systems in the world. In this paper propose an idea of BD-2/GPS integrated navigation system and Mathematical calculation method based on the BD-2. The test result show that integrated navigation system improve the positioning performance of the single system mode.

Keywords: GPS; beidou-2; integrated navigation system; error factor

0 引言

BD-2 卫星导航系统采用独特的三种星座混合模式。按照发展计划, 已经在 2012 年 12 月建成了覆盖我国境内及部分亚太地区的区域服务体系, 将在 2020 年左右, 建成由 5 颗地球静止轨道卫星 (GEO)、3 颗倾斜地球同步轨道卫星 (IGSO) 及 27 颗中地球轨道卫星 (MEO) 组成的北斗全球卫星导航系统, 可以在全球任何地区提供服务, 但目前的定位性能还需进一步评估^[1]。虽然美国的 GPS 系统在我国已经运行了多年, 但由于在导航定位时至少需要 4 颗以上的可视卫星, 在一些丛林峡谷或在到处高楼的街道由于信号也容易受到阻挡, GPS 系统单独定位的质量就会大大下降。然而组合定位可以提高其定位能力。组合定位不但能增加可视卫星的总数而且还可以获得更佳的卫星的几何分布图案, 从而降低定位的误差因子, 使定位精度得到进一步提高^[2]。

BD-2 系统在建筑物高耸的城市或者高大树木覆盖率高的丛林等遮挡严重的地方以及卫星信号受到不良天气等自然因素影响时, 也容易导致可见卫星数目达不到 4 颗, 此时接收机不能正常完成定位功能。目前的 BD-2 系统由于在轨运行的卫星数目还较少, 经常会出现有定位盲区的情况, 所以如何使北斗用户机持续准确提供导航和定位数据成了研究的关键。利用 GPS 系统卫星为 BD-2 进行辅助定位, 来解决不良观测条件时定位精度的问题^[3]。达到目前 BD-2 能够实时、连续以及准确使用的要求, 并且使用两个系统联合定位还可以保证接收到的卫星数较多, 卫星星座构成的几何图形最佳, 而减小误

差因子, 从而较大的提高定位精度。由于 BD-2 与 GPS 系统采用的导航定位方式以及各项指标都很相似。因此在定位的盲区达不到接收到最低定位要求的 4 颗卫星时, 便可使用双系统组合模式以保证用户持续定位的要求。BD-2/GPS 双模组合系统只需要接收到来自双系统的任意 5 颗导航卫星信号, 再通过接收机软件系统内部运用加权最小二乘法的数学方法对组合系统的伪距方程进行求解, 算出用户位置信息^[4]。

1 BD-2、GPS 组合系统定位原理

GPS 系统和北斗系统卫星信号经过射频前端从射频下变频到中频, 为了解调导航电文必须经过载波同步、伪码同步、比特同步、子帧同步等一系列信号处理过程。导航卫星距离地面大约 21 500 km, 信号发射功率只有大概 27 W 左右, 地面接收机接收到的信号大约 -126 dbm, 这么微弱的信号再加上冷启动时接收机上没有任何辅助信息, 所有卫星信号频率都是一样的。必须进行伪码比对, 才能进行信号捕获。捕获以后信号的载波频率和伪码相位就能有个粗略的估计。这里的估计和实际数据在载波上有几十到几百赫兹的误差, 而伪码相位大约有 0.5 个码片的误差。要进行导航电文解调必须稳定跟踪, 即达到载波频率差为 0, 载波相位差接近于 0, 伪码的相位差在 0.1 个码片之内^[5]。随着卫星和接收机的相对运动、本地时钟的钟漂和随机抖动都会很快失锁。而信号跟踪从其本质来说就是为了实现对信号的稳定跟踪而采取的一种对环路参数的动态调整策略, 持续不断的对载波跟踪环路和伪码跟踪环路进行动态调整, 才能稳定跟踪。

北斗卫星导航系统的时间系统和 GPS 导航系统存在 14 s 的差别, 这仅仅是从秒级的尺度上来看, 但从纳秒的级别上来看, 北斗时和 GPS 时加上 14 s 后依然存在一个未知的时差, 这个偏差很小但对于定位来说却不可忽略, 因为即使微秒

收稿日期: 2017-09-19; 修回日期: 2017-12-07。

作者简介: 刘东升(1982-), 男, 大学本科, 主要从事通信、测量技术方向的研究。

的差别, 如果不加处理就会带来 300 m 的定位误差。这里用 T_{GB} 来表示两个系统的时间差别^[6]。

$$\rho_B = c[t_r - (t_s - T_{GB})] \quad (1)$$

$$\rho_B = \sqrt{(x_u - x_s)^2 + (y_u - y_s)^2 + (z_u - z_s)^2} + c\delta t + cT_{GB} \quad (2)$$

其中: (x_s, y_s, z_s) 是卫星在 t_s 时刻的位置坐标; (x_u, y_u, z_u) 是用户的位置坐标, 为未知量; δt 是信号发射时间偏差和接收时间偏差总和, 由于卫星时钟偏差可以计算出来并扣除, 这样处理后 δt 只包含接收机本身的时间偏差。知道了卫星发射时间, (x_s, y_s, z_s) 就可以通过星历数据算出, 通过北斗卫星星历数据计算出来的北斗卫星坐标是在 CGS2000 坐标系内, 而通过 GPS 星历数据计算出来的 GPS 卫星坐标是在 WGS84 坐标系内。参考文献表明, 相同点在两个坐标系的坐标相差非常小, 所以北斗卫星和 GPS 卫星的坐标无须转换而直接混合使用。双模接收机由于北斗和 GPS 的系统偏差 T_{GB} 使得未知量又增加了一个, 现在未知量变成了 $(x_u, y_u, z_u, \delta t, T_{GB})$, 5 个未知量意味着需要 5 个方程, 所以双模接收机需要同时看到 5 颗卫星才能定位。

实际上, 伪距方程中的不确定量除了接收机时钟偏差以外, 还有星历数据自身带来的卫星位置的误差 E , 扣除卫星时钟偏差 δt_s 后依然存在一个较小的偏差 τ_s , 以及电离层和对流层的传输延迟, 分别用 I 和 T 表示。另外信号传输环境造成的多径效应产生多径噪声 MP , 表示接收机内部的热噪声 n_r 。综合以上因素, 伪距方程进一步写成:

$$\rho_G = \sqrt{(x_u - x_s)^2 + (y_u - y_s)^2 + (z_u - z_s)^2} + c\delta t + c\tau_s + E + I + T + MP + n_r \quad (3)$$

$$\rho_B = \sqrt{(x_u - x_s)^2 + (y_u - y_s)^2 + (z_u - z_s)^2} + c\delta t + cT_{GB} + c\tau_s + E + I + T + MP + n_r \quad (4)$$

用 $n_p = c\tau_s + E + I + T + MP + n_r$ 来表示伪距观测量中总的误差项。其中, 可以将误差量归结为两个类型, 一个类型是公共误差, 另一个是独有误差。公共误差的含义是在一个较小的区域内, 所有接收机都共享的误差项; 而独有误差是该接收机自己独特的误差项, 不同接收机独有误差各不相同。公共误差包括 $c\tau_s, E, I, T$, 而独有误差有 MP, n_r 。公共误差可以借助差分的方法来消除或减小。

在接收的北斗导航电文中会给出北斗时 (BDT) 和 GPS 时 (GPST) 之间的时间同步参数, 在 D1 码电文中第 5 子帧第 9 页面。BDT 和 GPST 之间的时间同步参数有两个^[7]:

A_{0GPS} : BDT 相对于 GPST 的钟差;

A_{1GPS} : BDT 相对于 GPST 的钟差速度。

BDT 和 GPST 之间的系统偏差计算公式:

$$T_{GB} = A_{0GPS} + A_{1GPS} \times t_E$$

式中, t_E 为接收机提取伪距观测量时刻的 BDT。

计算出 T_{GB} 之后, 可以将 T_{GB} 对应的项 cT_{GB} 从 BD 的伪距方程中扣除, 此时待解系统状态量为 $x = [x, y, z, \delta t]$, 则北斗和 GPS 的伪距方程转换为单模的情况, 按照前面单模伪距方程求解方法计算。

2 BD-2/GPS 组合定位系统设计

BD-2/GPS 组合导航系统是在我国研制的 BD-2 接收系统的基础上发展而成的。双模系统只需要使用一台用户接收系统便可以同时接收和解算 BD-2 和 GPS 两种系统的卫星信号,

其作用是在 BD-2 受客观条件限制不能独立完成导航定位时协助其定位, 即可在全球范围内都可以达到实时导航定位的相关功能, 并且保障其达到所需的精度。其设计思路主要是在 BD-2 系统里面进入 GPS 卫星信号来弥补可视卫星不足, 利用两个系统的信号误差来进行转换, 达到准备定位的目的。双模组合导航系统的设计结构图如图 1 所示, 这种组合系统主要由双频天线、接收系统和处理系统三大部分组成。在天线单元中由于 BD-2 和 GPS 的接收频率不同所以需要双频天线, 然后利用功分器将信号分离出来。两路信息分别进入其射频通道, 完成一系列的混频、滤波、下变频和 AD 采样等信号处理的过程, 这两路射频信号共用同一个时钟, 既能严格保证 BD-2 和 GPS 的信号时钟同步^[8], 也能两路量化后的数字信号通过数据接口传输存储为中频数据格式, 其后直接处理中频数据文件。经过处理对卫星信号进行捕获和跟踪、开始跟踪解调电文并将 BD-2 和 GPS 系统的卫星导航原始观测数据 (星历、伪距等) 同时输入数据处理器, 对这两路数据进行格式转换、时间转换、坐标转换、伪距组合, 然后统一求解, 进行 PVT 解算, 最终解算出用户单机的具体位置。

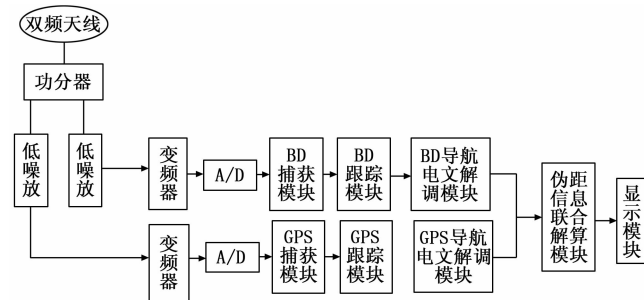


图 1 BD/GPS 双模组合导航定位系统结构图

这种双模组合接收系统设计使用分体式的方法单独处理各系统信号的方法, 可以分别接收处理一套导航卫星信息, 也能同时处理两种导航系统的组合导航信息。这与先组合参数系统然后再共同处理信号的模式相比, 解算过程中产生的误差小, 而且还减小了解算信息的工作量, 从而提高了导航精度^[9]。

3 数据采集及分析

3.1 跟踪卫星

试验选用的接收芯片为 UM220-III 型北斗/GPS 双系统模块, 该芯片能够同时接收 GPS 和北斗卫星信号, 自己加装双频天线和电源模块后利用计算机串口进行参数设置及数据解算。接收地点位于河南济源。北斗系统的五颗地球静止轨道卫星分别在东经 140° (C1)、110.5° (C2)、80° (C3)、160° (C4) 和 58.75° (C5), 而 30 颗非地球静止轨道卫星, 由 3 颗倾斜地球同步轨道卫星 (IGSO) 和 27 颗中地球轨道卫星 (ME0) 组成。其中, ME0 卫星轨道高度大约为 21 500 km, 其轨道倾斜为 55°; IGSO 卫星轨道高度大约为 36 000 km, 为倾斜同步轨道。GPS 卫星和 BD-2 卫星都采用相同的码分多址而且频段很接近, 卫星频率分别是 GPS L1 频率 1 575.42 MHz, BD-2 卫星 B1 频率 1 561.098 MHz。

3.2 可视卫星数及精度因子

可视卫星数是定位性能的一个重要指标。虽然同时接收到 4 颗卫星的信号就能定位, 但是如何选择 4 颗卫星, 这与空间位置精度因子有关。根据计算得知: 当 4 颗卫星构成的几何体

积最小时定位误差最大，而当 4 颗卫星构成的几何体积最大时定位误差最小，这种情况就是当 1 颗卫星在天顶正上方，另外 3 颗卫星趋于地平线且位置相隔 120°。因此误差放大因子 (DOP) 经常用来衡量用户位置的测量精度，所有不同的 DOP 都是卫星几何形状的函数，即卫星位置决定了 DOP 的值^[10]。

几何误差放大因子 (GDOP) 定义为：

$$GDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_w^2}$$

式中， σ 是伪距均方根测量的误差，具有零均值。

三维位置误差放大因子 (PDOP) 定义为：

$$PDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$$

二维位置误差放大因子 (HDOP) 为：

$$HDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

垂直高度误差放大因子 (VDOP) 为：

$$VDOP = \frac{\sigma_z}{\sigma}$$

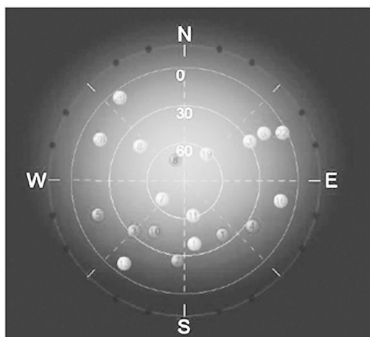


图 2 GPS、北斗在济源上空分布情况

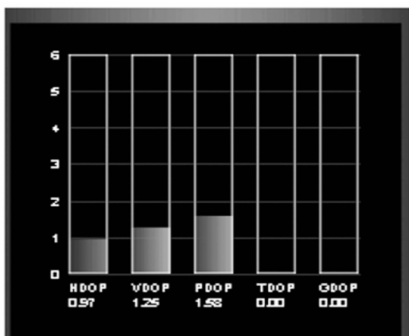


图 3 位置精度因子测试软件视图

具有最小的 DOP 意味着计算用户位置最理想的卫星几何形状，假设 4 颗卫星形成最佳的卫星几何图形，这时仰角接近于零，4 颗卫星的 3 颗构成正三角形，接收机在四面体的底部中心^[11]。这种情况下，DOP 的值为极小值：

$$GDOP = \sqrt{3} \approx 1.73$$

$$PDOP = 2 \sqrt{2/3} \approx 1.63$$

$$HDOP = VDOP = 2/\sqrt{3} \approx 1.15$$

图 4 为利用接收软件对各系统的 PDOP 进行跟踪，其中接收位置为某一较高楼顶，采样间隔为 2 分钟，其中绝大部分时间跟踪到的 GPS 和北斗卫星的总数是超过定位要求的^[12]。从图中可以看出在组合导航模式下，系统由于可视卫星的数目增

加了，所以几何分布的状况较 GPS 系统及 BD-2 定位系统要更理想一些。图 5 显示和单系统相比较，GPS 系统的 PDOP 值在大部分时间内都集中在 2.6 以下而 BD-2 系统的 PDOP 值大多都在 2.6 以上。表明 BD-2 系统的测量误差放大因子要大于 GPS 系统。还可以看出在 BD-2 系统单模情况下的 DOP 变化较慢，而同时刻的 GPS 的 DOP 变化较快^[13]，这是因为目前 BD-2 系统卫星还是由 GEO 和 IGSO 卫星组成，MEO 卫星较少，所以导致 BD-2 系统卫星的几何分布变化不如 GPS 的快^[14]；随着 BD-2 系统 MEO 卫星的数量增多，BD-2 单模情况下的 DOP 的变化趋势将和 GPS 类似。

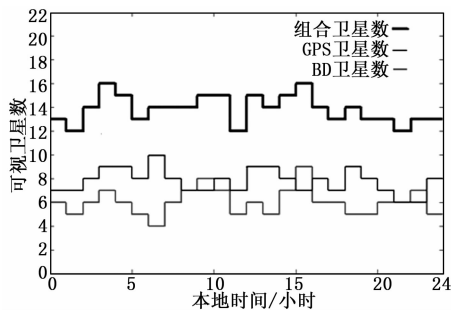


图 4 GPS、北斗-2 和组合系统的可视卫星数目

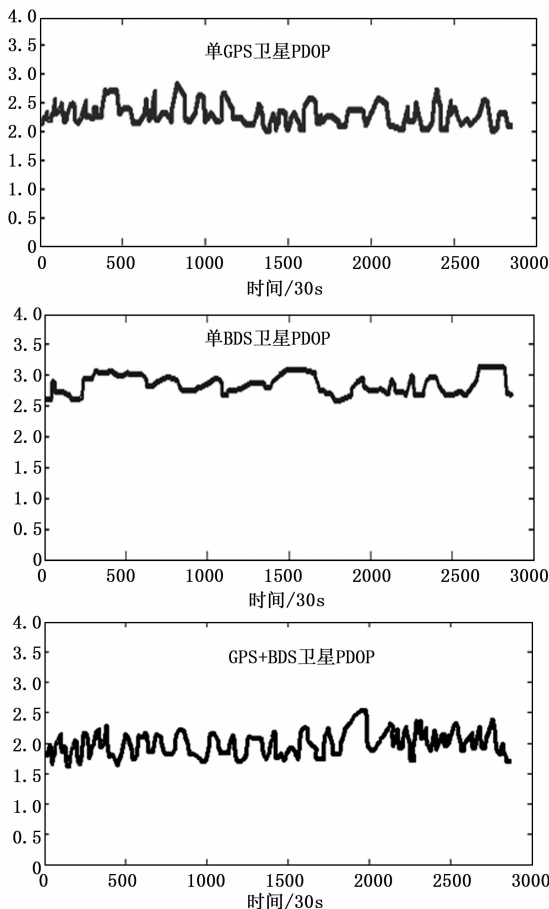


图 5 GPS、北斗-2 和组合系统的位置精度因子

4 BD-2、GPS 组合系统的定位精度分析

试验中通过测试固定点在一天中的定位数据于位置真值进
(下转第 207 页)