

中国区域定位系统的定位精度分析

纪元法^{①②*}, 孙希延^{①②}

① 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

② 桂林电子科技大学应用科技学院, 桂林 541004

* E-mail: jyuanfa@163.com

收稿日期: 2008-09-03; 接受日期: 2008-09-30

国家重点基础研究发展计划 (编号: 2007CB815500) 和国家高技术研究发展计划 (编号: 2007AA12Z343) 资助项目

摘要 中国区域定位系统(CAPS)与 GPS 都是典型直接序列伪码扩频测距系统, 此类导航信号能达到的定位精度取决于多种因素, 主要包括伪码速率、信号信噪比、跟踪环处理方法等. 详细介绍了 CAPS 链路预算、CAPS 定位解算方法, 并着重从 C/A 码信号的自相关函数特性入手, 在软件处理方法下, 研究 CAPS 信号的测量精度问题, 对其距离分辨率做了理论分析; 针对传统 DLL 环路易受噪声影响, 提出窄相关以及多相关器的环路结构及相应的鉴相方法, 使跟踪环路更加稳健, 码相位的测量分辨率也可以提高 1 倍左右, 表明改进 DLL 环路结构以及鉴相方法是提高测距分辨率的一种重要手段. 理论分析及定位实验表明利用 3 颗导航星并有高程辅助的 CAPS 接收机达到了 20 m 左右的定位精度.

关键词

卫星导航
接收机
窄相关
跟踪环

中国区域导航系统(CAPS)利用 3 颗商用同步轨道卫星作为导航星, 实现对地面主控站生成的导航电文的转发, 并借助气压高度计测高为用户接收机提供高程辅助等手段, 实现了用户的三维定位. CAPS 系统实现定位的基本思想和 GPS 是一致的, 都是采用直接序列伪码扩频信号, 测量用户到卫星的距离而实现定位, CAPS 的基带信号采用与 GPS 一致的 BPSK 伪码扩频体制: 基带电文速率为 50 bps, C/A 码速率为 1.023 MHz. 对于一般民用接收机, 测距定位主要是利用伪码信号的良好自相关特性. 理想情形下 C/A 码的相关峰是一对称三角形, 一般接收机使用三相关器的延迟锁定环测量本地码和接收信号的同步, 并配合使用不同的鉴相方法测量平衡点即码相位, 环路的分辨率决定了伪距的测量精度, 也就客观决定了定位精度, 因此提高 C/A 码的测量精度是接收机的一个重要课题. 同时定位精度又跟伪码速率、信号信噪比、定位解算原理等因素有关^[1~3]. 本文详细介绍 CAPS 链路预算、定位解算原理, 通过分析 CAPS 信号的自相关理论, 讨论其测距精度, 由环路结构以及鉴相方法入手, 提出了两种改进环路伪距测量精度的方法, 并利用软件接收机平台进行定位实验, 与理论分析结果进行对比.

1 CAPS 的信噪比和功率预算

根据 CAPS 下行信号链路计算, CAPS 接收机接收天线端 C/A 码信号功率电平估计为 $P = -165 \text{ dB} \cdot \text{W}$, 一般用圆极化天线接收信号会带来 3 dB 损失, 因此 CAPS 信号功率约为 $-168 \text{ dB} \cdot \text{W}$. 而 GPS 信号功率电平最低为 $-160 \text{ dB} \cdot \text{W}$ 左右. 接收天线噪声约 $T_a = 420 \text{ K}$, 低噪声放大器的噪声 50 K , 低噪声放大器后的噪声可忽略不计, 因此接收机输入端的等效噪声温度为 60 K . 式中, K 是波尔兹曼常数, $K = 1.38 \times 10^{-23}$. 则接收机热噪声功率为

$$\begin{aligned} N_0 &= KT = 10 \log_{10}(K \times (T_e + T_a)) \\ &= 10 \log_{10}(K \times (420 + 60)) = -201.8 \text{ dB} \cdot \text{W/Hz}, \end{aligned} \quad (1)$$

载噪比为

$$[C/N_0] = -168 - (-201.8) = 33.8 \text{ dB/Hz}. \quad (2)$$

式(2)也可以用信噪比表示为

$$[SNR] = -168 - (-201.8) - [B_n] = -29.2 \text{ dB}. \quad (3)$$

式(3)中, 信号带宽 $B_n = 2 \text{ MHz} = 63 \text{ dB}$.

对于 GPS 信号, 在 1 ms 预相关时间内, 可以观测到载噪比为 $35 \sim 55 \text{ dB/Hz}$ 的信号; 对于 CAPS 信号, 其载噪比约为 33 dB/Hz , 利用 1 ms 预相关时间来捕获信号是比较困难的, 因此, 必须将预相关时间增加才能捕获信号.

2 CAPS 定位解算

与 GPS 导航定位方程不同, 为了实现用户三维定位并改善 CAPS 卫星的 DOP 值, CAPS 接收机还使用了高程约束, 一般通过气压高度计测量并换算成当地高程. CAPS 导航定位方程如下 [4~6].

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_u, \\ \rho_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_u, \\ \rho_3 = \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_u, \\ \frac{x_u^2 + y_u^2}{(a+h)^2} + \frac{z_u^2}{(b+h)^2} = 1, \end{cases} \quad (4)$$

其中, a 和 b 分别表示地球长轴和短轴半径, h 表示用户高程; (x_u, y_u, z_u) 表示用户坐标; (x_i, y_i, z_i) ($i=1, 2, 3$) 表示卫星坐标.

式(4)的解算可以利用 GPS 定位中常用的泰勒级数展开法计算, 其中的地球椭球方程不直接参与方程组求解, 而是单独列出, 仅作为变量之间的约束条件 [5,6]. 将卫星导航方程式(4)的前 3 个方程在用户近似位置 $(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u)$ 处按泰勒级数展开, 线性化并整理为

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & 1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & 1 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ -c \Delta t_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \rho_{1u} - \cos \gamma_1 \Delta z_u \\ \Delta \rho_{2u} - \cos \gamma_2 \Delta z_u \\ \Delta \rho_{3u} - \cos \gamma_3 \Delta z_u \end{bmatrix}, \quad (5)$$

具体求解步骤如下:

- (i) 首先定义初始 $\Delta z_u = 0$, 将用户估计位置处的 $\hat{x}_u$ 和 $\hat{y}_u$ 代入地球椭球方程, 得 $\hat{z}_u$;
- (ii) 由式(5), 求得 $\Delta x_u, \Delta y_u$ 和 Δt_u ;
- (iii) 由变量迭代格式 $\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}} + \Delta \mathbf{X}$, 得 x_u, y_u 和 t_u ;
- (iv) 将 x_u 和 y_u 代入地球椭球方程, 得 z_u , 并由式 $\Delta z_u = z_u - \hat{z}_u$ 计算 z 坐标增量;
- (v) 重复上述步骤直至 $\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u$ 和 Δt_u 小于某一规定的微小量时, 迭代终止.

3 定位精度数学模型

接收机定位精度主要取决于伪距测量精度和卫星分布, 定位误差可表示为^[1]

$$\Delta \mathbf{X} = \text{GDOP} \cdot \Delta \rho, \quad (6)$$

式中, $\Delta \mathbf{X}$ 表示定位误差, $\Delta \rho$ 表示伪距误差, GDOP 为卫星几何精度因子.

对每一次定位而言, GDOP 事实上是固定的, 故定位误差主要取决于伪距测量精度的大小, 因此必须研究伪码的测距精度. 伪码的测量来自于接收机跟踪环, 传统硬件接收机的码跟踪环是延迟锁定环(DLL), 并使用 E-L 类型的鉴相器来控制码环的平衡, 跟踪环的精度即是伪距测量精度, 由于多普勒频差及环路热噪声的影响使相关值包含误差, 故我们从 DLL 的特性出发研究其测量精度及改进方法.

由于相关运算是根据采样点计算的, 同步即意味着本地信号和接收信号在采样点上是对齐的, 因此采样频率首先影响了环路精度.

如果输入信号的采样频率是 10 MHz, 即采样点间隔是 100 ns, 则相应的分辨率为 15 m ($3 \times 10^8 \times 100 \times 10^{-9} / 2$), 这个精度还是比较低的. 好在环路的分辨率并非受限于采样频率, 使用 DLL 环路鉴相的好处就是可以利用早、迟相关器的值来提高分辨率.

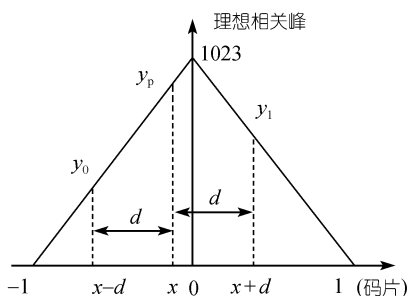


图 1 C/A 码理想相关峰示意图

C/A 码为 1023 个码片, 周期是 1 ms. 当不考虑多普勒频差等因素时, 可以归一化 C/A 相关峰的峰值为 1023, 每个码片是 977.5 ns ($1000 \mu\text{s} / 1023$), 如图 1. 可以通过分析 C/A 的理想相关峰曲线来研究 DLL 分辨率.

图 1 中, y_e 表示早相关器, y_l 表示迟相关器, y_p 表示对准相关器, d 表示早、迟相关器与对准相关器的码移量, 或称相关器间隔, 一般为 0.5 个码片, 此时称全时间相关器. x 表示本地信号和输入信号的测量误差, x 和 d 的单位是一个码片宽度(977.5 ns), 约为 300 m. 则有^[7,8]

$$\begin{cases} y_p = 1023(1 - |x|), \\ y_l = 1023(1 - x - d), \\ y_e = 1023(1 + x - d). \end{cases} \quad (7)$$

对式(7)整理, 得待求码相位公式

$$x = \frac{(1-d)(r-1)}{r+1}, \quad (8)$$

这里,

$$r = \frac{y_e}{y_l}. \quad (9)$$

4 改进 DLL 精度的方法

DLL 环路计算的相关值事实上是真实相关值和噪声的一个综合结果, 因此改进 DLL 精度就是要减轻噪声的影响. 通过上一小节分析, 有两种方法可以实现噪声消减.

首先, 越靠近相关峰顶点的相关值包含噪声的比例越小, 因此可信度越大, 减小 d 可以减弱噪声的影响, 这也称为窄相关 [9,10], 同时减小 d 也就意味着增加采样频率.

我们这里引入另一种方法, 使用多相关器的 E-P-L 结构, 就是在相关峰上配置多个早-迟相关器组 [11,12], 如图 2.

由于相关器噪声也具有某种随机特性, 因此对相关器平滑可以滤除噪声. 对多相关器结构的 DLL 环, 对各相关器组的结果进行平均, 是一种简单有效的方法. 即

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (10)$$

这里, x_i 为式(8)中的码相位, N 为相关器组的个数.

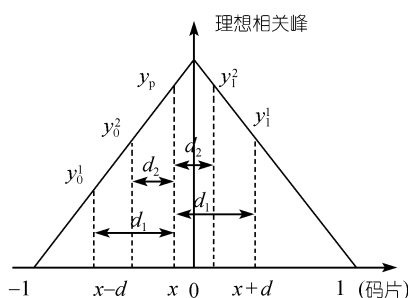


图 2 多相关器组的配置示意图

5 仿真与分析

5.1 DLL 环路改进方法仿真与分析

为验证多相关器以及窄相关的性能, 利用 CAPS 软件平台实现跟踪环路在不同采样率以及不同信噪比下仿真. 传统相关器的相关器间隔为 0.5 个码片, 窄相关器使用 0.1 个码片; 多相关器的配置为: d_1 为 0.5 个码片, d_2 为 0.2 个码片. 利用随机仿真方法分别进行 100 次仿真, 得到各种跟踪环的误差曲线如图 3. 仿真结果表明, 窄相关和多相关器结构可以减弱噪声的影响, 实现更高的分辨率, 使码相位的分辨率提高一倍左右, 达到 0.03~0.05 个码片左右, 也即伪距测量精度可达 9~15 m 左右. 通过增加积分时间等方法也可以弥补信噪比低的影响, 达到更高的测量精度. 根据公式(6), 定位误差受到卫星几何因子对伪距放大影响, GDOP 值一般为 2~5, 因此理论上 CAPS 信号粗码的定位精度可达 20 m 左右.

5.2 CAPS 软件定位实验与分析

以上分析了 CAPS 信号的测距精度, 这里给出基于 MATLAB 软件接收机平台的 CAPS 实际定位结果. MATLAB 软件接收机处理的是实际采集的中频 CAPS 数据, 信号处理流程与硬件一致, 包括信号捕获、跟踪、电文解调以及定位解算等步骤 [13~17]. 软件处理的好处是用户可以

对流程干预处理, 并方便观察计算的中间结果, 以及直观的图形及界面显示. 软件CAPS接收机可以实现普通接收机的基本功能, 而且软件CAPS接收机可以实现事后每毫秒计算一次伪距, 进行一次定位、测速等解算, 方便算法研究及各种应用.

图 4 是CAPS软件接收机定位结果. 实验中的采样率为 12 MHz, 即一个码片含 16 个采样点, 其分辨率为 $(0.001/1023 \times 12) \times 299792458/2 = 12 \text{ m}$, 使用传统DLL环路进行跟踪测距. 由于实验中CAPS卫星几何因子(GDOP)的影响, 最后得出的平均误差约为 20 m. 而且对于CAPS而言, 卫星在东西方向的DOP比南北方向的DOP值好得多, 因此经度方向的定位精度比纬度方向的定位精度高 [18].

定位实验的精度与理论分析基本一致, 实验结果表明, 利用高程约束的 CAPS 接收机, 实现了精确的定位, 并达到了与 GPS 接收机基本一致的定位精度.

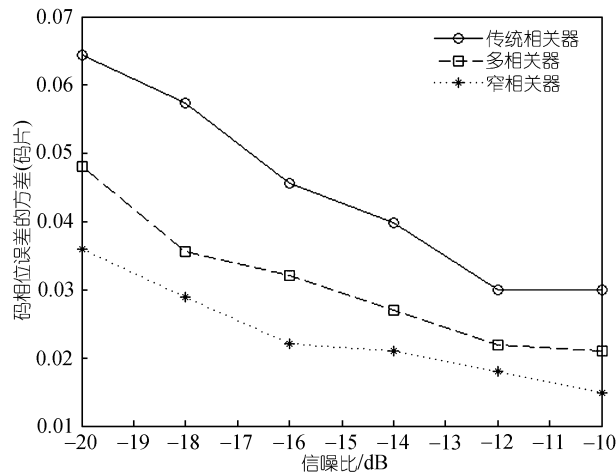


图 3 不同相关器结构的码相位测量误差

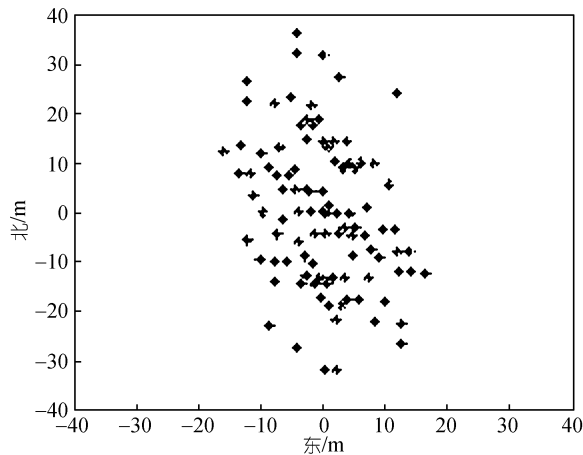


图 4 CAPS 导航定位精度

6 结论

GPS 作为当今最具代表性的卫星导航系统已广泛应用于军事和民用等各个领域, CAPS 系统吸收 GPS 系统的优点, 采用了直接序列扩频体制的 C/A 码进行测距定位. 本文从 C/A 码信号自相关特性出发, 探讨了一般接收机 DLL 环路的伪码测距精度问题. 理论分析与仿真表明, 根据接收信号的信噪比变化, DLL 环路可以实现 0.1~0.01 个码片的分辨率, 而使用窄相关以及多相关器结构的鉴相方法, 可以减弱噪声影响, 实现较高分辨率, 这表明改进环路相关器的配置结构以及相应的鉴相算法, 是提高伪距测量精度的一个有效途径. 根据定位原理, 定位精度是卫星几何分子因子和伪距测量精度的一个综合结果, 在 GDOP 为 2~5 典型值时, CAPS 信号粗码的理论定位精度可达 20 m 左右, 实测定位精度与理论分析是一致的.

参考文献

- 1 Kaplan E D. Understanding GPS, Principles and Applications. Boston: Artech House, Inc, 1996
- 2 边少锋, 李文魁. 卫星导航系统概论. 北京: 电子工业出版社, 2005
- 3 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003
- 4 艾国祥, 施浒立, 吴海涛, 等. 转发式卫星通信导航定位系统. 国家发明专利申请号: 200410046064, 2004-6-30
- 5 施浒立, 孙希延. 转发式卫星导航原理. CAPS 技术报告, 2005
- 6 施浒立, 裴军. 转发式卫星导航定位系统量测方程解. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1687—1701
- 7 Psiaki M L. Block acquisition of weak GPS signals in a software receiver. In: Proceedings of ION GNSS-2001, Salt Lake City: Institute of Navigation, 2001. 2838—2850
- 8 Tsui J B. Fundamentals of Global Positioning System receivers: A Software Approach. New York: Wiley, 2000
- 9 Van Dierendonck A J, Fenton P, Ford T. Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver. Navigation, 1992, 39(3): 265—283
- 10 Cannon M E, Lachapelle G. Performance analysis of a narrow correlator spacing receiver for precise static GPS positioning. In: Proceedings of PLANS94, IEEE, Las Vegas: Institute of Navigation, 1994. 2994—2999
- 11 Braasch M S, McGraw G. GNSS multipath mitigation using gated and high resolution correlator concepts. In: Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting, San Diego, CA: Institute of Navigation, 1999. 333—342
- 12 Garin L, Rousseau J. Enhanced strobe correlator multipath rejection for code and carrier. In: Proceedings of ION GPS-97. Kansas City: Institute of Navigation, 1997. 559—568
- 13 赵昀, 张其善. 软件 GPS 接收机架构与捕获算法实现. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1): 53—56
- 14 唐斌, 董绪荣, 刘舒蔚, 等. 动态环境下 GPS 软件接收机研究. 系统仿真学报, 2007, 19(8): 1807—1810
- 15 张勇, 林宝军, 徐志瀚. 软件 GPS 接收机信号搜索捕获的仿真实验研究. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2646—2649
- 16 金俊坤, 吴嗣亮, 李菊. 基于基 2-FFT 的伪码快速捕获实现新算法. 系统工程与电子技术, 2005, 27(11): 1957—1970
- 17 李玉红, 寇艳红, 张其善. 微弱 GPS 信号捕获算法研究. 遥测遥控, 2005, (7): 61—65
- 18 韩延本, 马利华, 乔琪源, 等. 中国区域卫星定位系统星座布局的选择. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1671—1686