

伪卫星增强系统参考站接收机的测距偏差及优化*

徐博, 孙广富, 陈华明, 欧钢

(国防科技大学电子科学学院卫星导航研发中心, 湖南长沙 410073)

摘要:伪卫星相对地面用户是静止的,因此卫星与参考站接收机之间的距离几乎是不变的。在这种情况下,采样和量化引入的误差不再服从高斯分布,从而影响接收机的测量精度。为了解决这一问题,建立了卫星导航接收机的离散数字信号模型,并在此基础上分析了采样和量化对测距偏差的影响,通过仿真验证了结论的正确性,并提出了伪卫星增强系统下参考站接收机的优化设计方法。

关键词:卫星导航;伪卫星;参考站接收机;测距偏差

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)06-177-05

Optimization on ranging deviation of reference station receivers in pseudolite augmentation system

XU Bo, SUN Guangfu, CHEN Huaming, OU Gang

(Satellite Navigation R&D Center, College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The pseudo-satellite is stationary for the reference station receiver, therefore, the distance among reference station receivers is nearly kept constant. On that condition, the error caused by sampling and quantization is not Gaussian variables, which can have impact on the measurement accuracy. In order to solve the problem, the digital signal model of satellite navigation receiver was introduced, and then the effect of sampling and quantization error on measure bias was analyzed. Simulation results are presented to support the conclusion, and the optimization of reference receiver in pseudo-satellite system is proposed in the end.

Key words: satellite navigation; pseudolite; reference station receivers; ranging deviation

卫星导航系统已经成为国家重要的战略资源,在国防、国民经济和社会生活中发挥着重要作用^[1]。由于卫星导航系统自身信号非常微弱,在某些遮挡较为严重的区域,无法提供连续可靠的定位服务。为了解决特殊环境下卫星导航系统的性能,需要对卫星导航系统进行增强。目前主要的增强手段包括差分增强系统^[2]和伪卫星增强系统两类^[3-6]。

差分增强系统的增强原理主要是在原有卫星导航系统信号基础上播发同频率类似导航信号和相关差分信息,一方面通过提高几何因子和可观测卫星数量来提高精度;另一方面利用卫星导航系统误差随时间缓变但却与距离和路径呈现强相关的特性,利用差分信息减少公共误差,增强系统的精度和完好性^[7]。伪卫星增强系统主要是在地面或空中布设伪卫星,发播独立导航信号以及差分信息,通过增加近地面“可见星”的数目以改善几何精度因子(Geometric Dilution Of Precision,

GDOP),提高导航系统的可用性及定位精度^[8]。相比于差分增强系统伪卫星,其更容易通过增加信号功率来提高系统抗干扰能力,还具有快速布设、灵活组网等特性,大大提高了系统适用性^[9]。

伪卫星增强系统虽然可以提高卫星的可见性和定位几何,但无法从根本上提高用户的定位精度。为了实现高精度定位,使用差分定位是最有效的途径,而实现差分定位最关键的设备就是参考站接收机。目前国内外伪卫星增强系统所采用的参考站接收机与真实卫星系统完全相同,并没有针对伪卫星系统的特性进行专门的设计。由于实际导航卫星在空间轨道上始终处于高速运动状态,因此即使是地面静止用户,用户与卫星之间存在较大的相对运动。相对运动会引入时变的多普勒频率,这会给信号的捕获和跟踪带来一定的难度,但同时相对运动的存在,数字信号处理中的采样量化误差会呈现类似于白噪声的特性,因此反而会提高接收机的测量精度^[10]。但是伪卫星始

* 收稿日期:2016-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403413)

作者简介:徐博(1982—),男,河南洛阳人,讲师,博士,E-mail:48193077@qq.com

终固定于地面,对于地面静止的参考站接收机,两者之间的距离始终保持不变,卫星和用户之间仅仅存在由时钟源频率差导致的多普勒频率^[11]。由于时钟源的频率通常比较稳定,虽然长时间来看存在一定的漂移,但是短时间内可以认为卫星信号频率与接收机采样率之间的相对关系几乎是恒定的。在这种情况下,数字信号处理环节中的采样量化误差不再呈现白噪声特性,有可能导致相关峰产生畸变,从而导致测距偏差。

目前尚未有公开文献分析伪卫星增强系统下全数字处理对测距偏差的影响。传统的对模数转换(Analog-to-Digital, AD)量化误差的分析均是假设量化误差仅造成测量精度的恶化,而不会导致测距偏差,因此这些结论对伪卫星增强系统下参考站接收机测距偏差的分析并不适用。

针对上述问题,本文首先介绍了卫星导航接收机的离散数字信号模型,在此基础上分析了卫星与用户相对静止的条件下采样和量化对接收机测距偏差的影响,然后通过仿真验证了结论的正确性,最后提出了伪卫星增强系统下参考站接收机的优化设计方法。

1 全数字中频接收机的信号模型

接收机接收到的模拟信号建模^[12]:

$$r(t) = \sqrt{2Cd(t - \tau_0)c(t - \tau_0) \times \cos[2\pi(f_0 + f_d)t + \theta_0]} + n_r(t) \quad (1)$$

其中: C 表示信号功率; τ_0 表示信号传输时延; $d(t)$ 表示调制的符号数据,取值为 ± 1 ; $c(t)$ 表示调制的测距码; f_0 表示标称的载波频率; f_d 表示多普勒频率; θ_0 表示载波初相; $n_r(t)$ 表示带限高斯白噪声,其单边功率谱密度为 N_0 ,因此单个信号分量的载噪比为 C/N_0 。

目前几乎所有的接收机均采用下变频至中频,然后进行全数字处理的方式。对于全数字中频接收机,信号处理环节处理离散数字信号,而非连续模拟信号。假设对模拟中频信号进行采样和量化后得到的离散数字信号为 $s_{IF}[k]$,为了便于分析,通常将使用零阶保持的离散数字信号仍表示为如下的连续模拟信号 $s'_{IF}(t)$ 的形式:

$$s'_{IF}(t) = \sum_k g(t - kT_s) s_{IF}[k] \quad (2)$$

其中, T_s 表示采样间隔, $g(t)$ 表示矩形脉冲,其表达式为:

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_s \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

假设定义 $\varepsilon_q(t)$ 为采样量化误差,其表达

式为:

$$\varepsilon_q(t) = s'_{IF}(t) - s_{IF}(t) \quad (4)$$

当考虑采样和量化的影响时,正交下变频后基带信号的表达式为:

$$\begin{aligned} s'_0(t) &= s'_{IF}(t) \exp[-j2\pi(f_{IF} + f_d)t] \\ &= s_{IF}(t) \exp[-j2\pi(f_{IF} + f_d)t] + \\ &\quad \varepsilon_q(t) \exp[-j2\pi(f_{IF} + f_d)t] \\ &\triangleq s_0(t) + n_q(t) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $n_q(t)$ 可视为由采样量化误差 $\varepsilon_q(t)$ 引入的分量。

在这种情况下,以准时支路为例,其相关值的表达式为:

$$\begin{aligned} SP'[k] &= \int_{t=(k-1)T_c}^{kT_c} s'_0(t)c(t) dt \\ &= \int_{t=(k-1)T_c}^{kT_c} s_0(t)c(t) dt + \\ &\quad \int_{t=(k-1)T_c}^{kT_c} n_q(t)c(t) dt \\ &\triangleq SP[k] + Q_p[k] \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $Q_p[k]$ 表示准时支路相关累加值中由采样量化误差引入的分量。为了叙述方便,下文将其称之为采样量化噪声。

在相关累加值 $SP'[k]$ 中,分量 $Q_p[k]$ 远远小于热噪声分量 $n_{SE}[k]$,因此对于一般的通信系统而言,并不需要考虑采样量化误差的影响。但卫星导航信号接收机不同于一般的通信接收机,更加关注相关峰的对称性。如果采样量化噪声 $Q_p[k]$ 影响了相关峰的对称性,即使幅度非常小,也会引入较大的测量偏差。因此在卫星导航系统中,只有当采样量化噪声 $Q_p[k]$ 不影响相关峰的形状时,才能忽略离散信号处理与模拟信号处理之间的差异。

2 采样处理对估计精度的影响

不同于模拟接收机,全数字接收机在进行测量时存在相位估计分辨率的限制。虽然在实际卫星导航系统中不考虑相位估计的分辨率并不影响分析的正确性,但是对于伪卫星增强系统而言,在接收机设计阶段忽略相位估计分辨率可能会严重地影响测量精度。

很显然,假设在无限长时间内伪码速率为固定值 f_c ,接收机采样率为 f_s ,则伪码相位的估计分辨率为^[10]:

$$\Delta\tau = \frac{1}{LCM(f_c, f_s)} \quad (7)$$

其中, $LCM(x, y)$ 表示取 x, y 的最小公倍数。

根据上述分析可知, 当使用无限时长的数据估计伪码相位时, 即使是整数倍伪码速率, 只要增加微小的调整量即可达到较高的分辨率。比如将采样率调整为 $2f_c + 1$ Hz, 对应的伪码相位估计分辨率也可以达到 10^{-4} ns。

实际接收机伪距输出频度通常是 1 s, 因此接收机需要在 1 s 的有限时间内估计出伪距测量值。下面首先举例说明在有限时长内, 伪码相位估计分辨率不仅仅取决于伪码多普勒和采样率。

假设两个序列的伪码速率相差 f_{dc} , 为了能够在有限时长 T_0 内, 伪码速率差异导致的伪码相位变化达到一个采样点, 必须满足如下条件:

$$f_{dc} T_0 \geq f_c / f_s \quad (8)$$

即当时长不超过 T_0 的两个连续模拟扩频信号的伪码多普勒频率差满足以下条件

$$f_{dc} \geq \frac{f_c}{f_s T_0} \quad (9)$$

时, 经过采样后的离散序列才会有差异。

根据上述结论, 可以得到在有限的时长 T_0 内, 伪码相位估计分辨率的表达式为:

$$\Delta\tau = \max_{-\frac{f_c}{f_s T_0} \leq f_{dc} \leq \frac{f_c}{f_s T_0}} \frac{1}{LCM(f_c + f_{dc}, f_s)} \quad (10)$$

因此, 当考虑有限时长的影响时, 为了保证较高的相位估计分辨率, 数字采样频率的选择有更大的约束。当选择的采样率导致接收机相位估计的分辨率较低时, 其精度必然会受到较大影响。同时考虑到接收机晶振在短时间内比较稳定, 长时间存在慢漂这一特性, 接收机的实际采样率会在一定的范围内变化。因此, 接收机选择的采样率需要在一定的范围内保证具有较高的相位估计分辨率。

3 量化处理对估计精度的影响

在全数字中频接收机中, 为了便于数字处理, 需要对采样后的数字信号进行量化。量化会产生量化噪声, 当接收信号存在动态时, 量化噪声近似服从高斯分布, 因此可以等效为白噪声。但是当接收信号不存在动态时, 量化噪声具有很强的周期性, 因此无法等效为白噪声, 从而影响接收机测量值的精度。

由于扩频码本身就是两电平, 因此有限字长效应主要体现在载波的影响。量化噪声对测距精度的影响非常复杂, 下面主要通过仿真的方法进行分析量化处理的影响。

理想情况下, 导航接收机处理可认为载波相位和伪码相位之间是相互独立的, 也就是说, 载波

相位的变化不会影响伪码相位的估计。但是当对载波作量化处理后, 载波和伪码之间的相对相位关系会影响相关累加值的包络。由于影响相关值包络的是载波与伪码的相对相位, 将每个处理周期起始时刻的载波与伪码之间的相对相位定义为载波相对相位, 具体如图 1 所示。

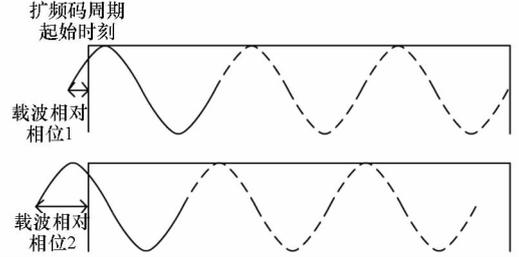


图1 载波相对相位示意图

Fig. 1 Schematic view of the carrier relative phase

假定本地复现信号的载波和伪码与接收信号均已完全同步, 则不同载波相对相位下, 提前和滞后支路相关值的包络如图 2 所示。

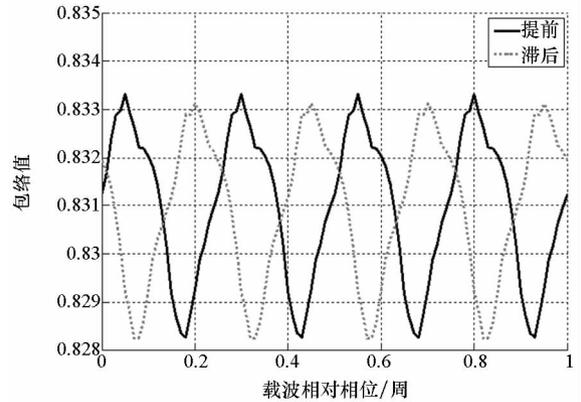


图2 本地载波使用 5 电平量化, 不同载波相对相位对应的相关累加值包络

Fig. 2 Different carriers relative phase corresponding to the correlation cumulative value envelope when local carrier using level 5 quantization

由图 2 可见, 当使用 5 电平表示载波时, 提前和滞后支路相关累加值包络会随着载波相对相位而变化, 并且变化的幅度不一致, 因此必然会导致伪码时延估计值的变化, 对应的码环和载波环鉴相结果如图 3 所示。

由图 3 可见, 量化处理会影响伪码时延估计的准确性。不同载波相对相位具有不同的伪码时延估计偏差, 当增大载波量化电平数时, 伪码时延估计偏差变小。根据仿真结果, 当本地载波由 5 电平增加到 7 电平量化时, 码环鉴相输出的波动范围由 5.2×10^{-3} 减小到 1.5×10^{-3} , 可明显减小量化处理引入的测距偏差。

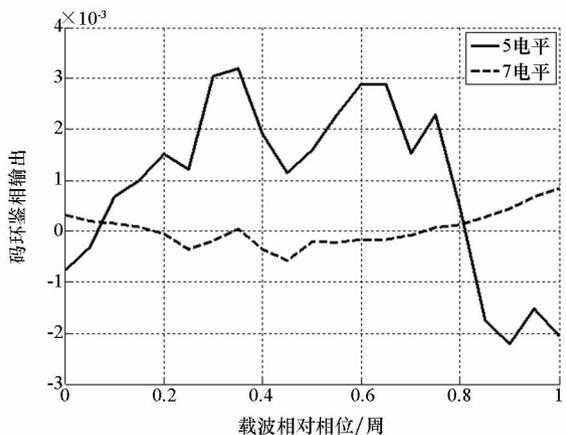


图 3 5 电平和 7 电平量化条件下, 不同载波相对相位对应的码环鉴相输出

Fig.3 Different carriers relative phase corresponding dll output under level 5 and level 7 quantization power conditions

4 仿真验证

实际接收机使用码环估计伪码相位,下面使用仿真的方法验证采样和量化处理对码环鉴相输出的影响,具体的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

仿真参数	设定值
采样率	10.23 M + 12 345 Hz
信号类型	GPS L1 C/A PRN1
码环早迟码间隔	1/4 码片
码环鉴别器	归一化非相干早减迟
码环带宽	1 Hz

仿真时设置的码率为标称频率,而载波多普勒频率为 1 Hz。仿真首先根据预设的伪码和载波频率生成理想的数字信号,然后使用环路跟踪得到伪码的相位估计值。比较伪码相位估计值与预设值之间的差异,即伪码相位估计误差。具体的仿真结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 和图 5 可见,当模拟中频频率使得不同扩频码周期的载波相对相位几乎不变时,伪码时延估计值存在较大的偏差,并且存在一定的周期性,周期与载波相对相位变化周期一致。当选择的采样率可以保证不同扩频码周期的载波相对相位快速变化时,伪码跟踪偏差呈现快变特性,且其均值几乎等于 0。因此为了保证伪码相位估计值不受载波相对相位的影响,接收机模拟中频信号的频率的选择需要保证短时间内载波相对相位初相具有较高的遍历性。

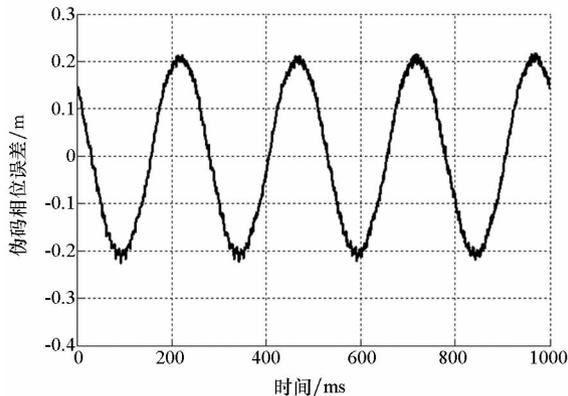


图 4 载波使用 5 电平量化,模拟中频频率为 7.5 MHz 时的伪码跟踪偏差

Fig.4 Code tracking error when carrier using level 5 quantization, analog intermediate frequency using 7.5 MHz

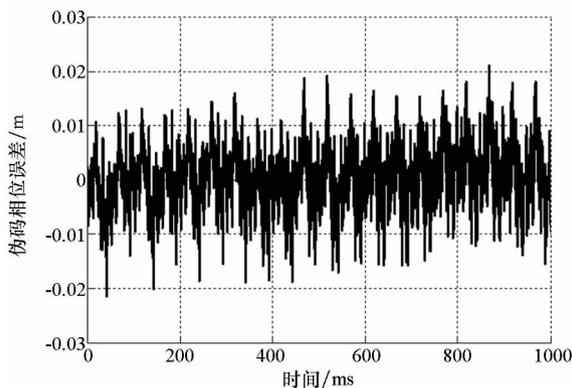


图 5 载波使用 5 电平量化,模拟中频频率为 7.523 45 MHz 时的伪码跟踪偏差

Fig.5 Code tracking error when carrier using level 5 quantization, analog intermediate frequency using 7.523 45 MHz

5 结论

根据本文所分析的离散处理和量化处理对卫星导航接收机测距偏差的影响分析可知,由于卫星与接收机之间不存在相对运动,伪卫星增强系统下静态接收机的频率规划相比普通接收机具有更多的约束:

- 1) 在考虑接收机和伪卫星频率不确定度的情况下,接收机的采样率与码率的最小公倍数应该尽可能大;
- 2) 在考虑接收机和伪卫星频率不确定度的情况下,接收机模拟中频信号的频率应该保证扩频码周期内载波周期数不是整数,并且与整数相差较大;
- 3) 当模拟中频信号的频率选择无法保证扩频码周期内的载波周期数与整数相差较大,就需要尽可能增加载波的量化位数。

参考文献 (References)

- [1] 李跃,邱致和. 导航与定位[M]. 2版. 北京:国防工业出版社, 2008.
LI Yue, QIU Zhihe. Navigation and positioning [M]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [2] Kaplan E D. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红,译. 2版. 北京:电子工业出版社, 2007.
Kaplan E D. GPS principle and application[M]. Translated by KOU Yanhong. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [3] Cobb H S. GPS pseudolite: theory, design, and applications[D]. USA: Stanford University, 1997.
- [4] 耿建平,唐先红,栾慎杰. CAPS 中伪卫星技术研究与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2012: 21.
GENG Jianping, TANG Xianhong, LUAN Shenjie. Research and implementation of pseudolites technology for CAPS[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012: 21. (in Chinese)
- [5] 王晓辉. 伪卫星增强 GPS 技术及应用研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
WANG Xiaohui. Research of pseudolite augmenting GPS technique and applications [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- [6] Cobb H S. Pseudolite concepts for deep indoor navigation[C]// Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2010: 1724 - 1738.
- [7] van Dierendonck A J. The role of pseudolites in the implementation of differential GPS [C]//Proceedings of the 1990's—A Decade of Excellence in the Navigation Sciences Position Location and Navigation Symposium, 2002: 370 - 377.
- [8] 王玮,刘宗玉,谢荣荣. 伪卫星辅助的北斗定位系统的 GDOP 研究[J]. 空间科学学报, 2005, 25(1): 57 - 62.
WANG Wei, LIU Zongyu, XIE Rongrong. The research on GDOP of PL-aided BeiDou positioning system [J]. Chinese Journal of Space Science, 2005, 25(1): 57 - 62. (in Chinese)
- [9] 孟键. 伪卫星定位技术与组网配置研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2007.
MENG Jian. Pseudo satellite positioning technology and network configuration [D]. Zhengzhou: the PLA Information Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [10] 许晓勇,王飞雪,庄钊文. 卫星导航系统信号的多普勒特性研究[C]//2003 年度导航学术年会, 2003.
XU Xiaoyong, WANG Feixue, ZHUANG Zhaowen. The research of Doppler performance of the satellite navigation signal [C]// Proceedings of China Satellite Navigation Conference, 2003. (in Chinese)
- [11] 许晓勇. 卫星导航接收机高精度建模、分析及优化设计研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2008: 15 - 19.
XU Xiaoyong. High precision modeling, analysis and optimal design of satellite navigation receiver [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 15 - 19. (in Chinese)
- [12] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
XIE Gang. GPS principle and receiver design [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009. (in Chinese)