

文章编号:1001-893X(2010)08-0180-05

GNSS 接收机抗多径技术*

冯晓超,程晓滨,赵 珂

(解放军 61081 部队,北京 100094)

摘 要:分析了多径信号特性及其对全球导航卫星系统(GNSS)接收机伪距测量和载波相位测量的影响,从抗多径天线和基带信号处理两方面对 GNSS 接收机的各种多径抑制方法进行了比较与分析,指出高精度 GNSS 接收机会同时采用抗多径天线和基带信号处理以达到较好的多径误差抑制效果。

关键词:GNSS 接收机;抗多径;多径误差;基带信号处理

中图分类号:TN965.5 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.038

Anti-multipath Technology for GNSS Receivers

FENG Xiao-chao, CHENG Xiao-bin, ZHAO Ke

(Unit 61081 of PLA, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper analyses the characteristics of multipath signal and the effect on GNSS(Global Navigation Satellite System) receiver pseudo range measurement and carrier phase measurement, compares the multipath suppression methods of GNSS receiver from two aspects of anti-multipath antenna and baseband signal processing, and points out that by adopting both antenna technology and baseband signal processing technology at the same time the good suppression result can be achieved for the high-precision GNSS receiver.

Key words: GNSS receiver; multipath effect; multipath error; baseline signal processing

1 引 言

多径干扰信号是影响全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收机观测数据质量的主要因素之一,不仅会使调制到导航信号上的伪码和导航数据失真,而且还会使载波相位发生畸变;多径信号直接影响 GNSS 接收机的伪码测距、载波相位和多普勒等观测数据的测量精度,导致观测数据质量降低;在最坏的情况下,多路径信号甚至会导致接收机跟踪环路的失锁。为降低多径干扰信号对观测数据的影响,GNSS 接收机需采取一定多径抑制措施。在射频端可采用扼流圈或烽火轮技术的抗多径天线抑制低仰角多径信号的入射,在基带信号处理端可采用如窄相关、MEDLL(Multipath Estimating Delay Lock Loop)、PAC(Pulse Aperture Correlator)等多

径抑制算法抑制多径误差。但是,这些技术对短延迟多径信号的抑制效果都不是很理想。

2 多径信号特性

多径信号是指 GNSS 接收机在接收卫星发射的直达导航信号的同时还接收到其它各种间接信号,间接信号对直达信号的干涉会导致接收机测量误差,这种间接信号即为多径信号。多径信号主要由地面和天线周围物体的反射、导航卫星星体反射、因大气层传播介质散射三方面形成,在这 3 种多径信号中,以地面和天线周围物体反射的多径信号为主,本文主要讨论此类多径信号。

对于伪距测量,多径信号会使相关函数发生变形,影响 GNSS 接收机的准确测量。在有多径信号影响,接收机只接收直达信号的情况下,接收机相

* 收稿日期:2010-03-25;修回日期:2010-06-25

关函数是一个典型的对称等腰三角形。当存在多径信号时,在相关函数上会产生副峰,导致早相关器和晚相关器采样点的中心可能并不是信号到达的真正时间。一般来说,多径信号对伪距测量的影响主要取决于多径信号相对直达信号的延迟、幅度和相位参数。通常情况下,多径信号是经过地面或周围物体反射后进入接收机的,因此,多径信号相对于直达信号都存在一定的时间延迟,并且信号幅度会减弱。但多径信号相对直达信号的相位关系却是随机的:同相或反相。从相位关系的角度分析,当多径信号与直达信号同相时,此多径信号就会对直达信号产生相长性干扰,使直达信号增强,多径信号造成的延迟相关峰会叠加到直接峰上;当多径信号与直达信号反相时,多径信号对直达信号产生相消性干扰,削减直达信号,则直接峰要减去多径信号造成的延迟相关峰。文献[1]表明,当天线场站环境较好时,多径信号对伪距测量造成的误差为1 m左右;当天线场站环境较差时,由于多径信号较为严重,可能会造成超过5 m的伪距测量误差。

对于载波相位测量,假设接收机仅收到两个信号:一个是直达信号,一个是相位偏移 $\Delta\Phi$ 和振幅衰减 $\alpha (\alpha < 1)$ 的多径信号。根据文献[1],由多径效应引起的载波相位测量误差可简化为

$$\delta_\phi = \arctan\left(\frac{\sin\Delta\Phi}{\alpha^{-1} + \cos\Delta\Phi}\right) \tag{1}$$

从式(1)可知,在最坏情况下载波相位测量误差 $\delta_\phi = 90^\circ$ 。因此,在多径信号幅度小于直接信号时,由多径效应引起的载波相位测量误差不会超过载波的 1/4 周期,即多径造成在载波相位测量误差最大仅为5 cm左右,小于由多径造成的伪距测量误差两个数量级,相对于多径信号对伪距测量的影响,多径对载波相位测量的影响可以忽略不计。

3 抗多径技术

为提高 GNSS 接收机的测量精度,减小多径效应对接收机观测数据的影响,接收机主要从两个方面着手:抗多径天线,通过有效设计天线提高高仰角增益,降低低仰角增益;基带信号处理,对多径误差造成的畸变相关峰进行适当修正或尽可能减少相关峰的畸变。

3.1 抗多径天线

GNSS 接收天线常用的抗多径技术主要包括扼

流圈(Choke Ring)技术和烽火轮(Pinwheel)技术。

ChokeRing 技术是专门为抑制多径干扰信号对正常信号的影响而设计的一种天线结构,要求天线与扼流圈统一设计,天线安装在扼流圈上。扼流圈是依靠入射波和反射波等幅反相来抵消多径信号的,扼流圈的深度与频率成反比。单频扼流圈仅对单频的多径信号起到最佳的抑制作用,而对相隔较远的其它频段多径信号则抑制效果较差。如:单频扼流圈在1.2 GHz频段上的抗多径能力最大可达40 dB,而在1.5 GHz频段上的最大抑制仅能达到25 dB。要在多个频率上同时获得较好的抗多径能力,需设计新型的多频扼流圈,相对较为复杂。

Pinwheel 技术是 Novtel 公司的技术专利^[4],起初应用于 GPS 接收天线设计中。Pinwheel 技术的原理是接收天线馈电点的设计上采用多馈源阵列设计方案。天线馈电点是指天线与低噪放(LNA)模块的电气连接点。普通的天线都是一个天线只有一个馈电点,此种天线相位中心稳定性差,抗多径能力较差。采用 Pinwheel 技术将天线设计为多个(如12个)馈源接收 RF 信号,通过馈源的优化排列,使得接收两个频段信号的物理相位和电气相位中心能够同轴,使接收信号的相位偏差几乎为0,达到抑制多径干扰信号的目的。同时,由于两个频段信号具有稳定的同一个相位中心,因此,采用 Pinwheel 技术的天线还具备较好的相位中心稳定性的特点。但实际上 Pinwheel 技术的抗多径能力有限,还需要与扼流圈配合使用才能保证最佳的抗多径效果。

除以上两种抗多径天线技术,在理论研究的方法中也有用多个天线组成观测阵列,通过数据后处理来实现对多径信号的抑制,但工程应用的可行性不高。

3.2 基带信号处理

1991 年,A. J. VAN Dierendonck 博士提出了窄相关技术,NovAtel 公司利用此项专利技术不仅使 GPS 接收机测距精度得到提高,也明显改善了接收机的抗多径能力。随后相继出现的多径抑制效果更好的新技术,如 MEDLL、PAC 以及 Strobe 等,都是以窄相关技术为基础改进而来的。

3.2.1 窄相关技术

传统接收机延迟锁定环路(DLL)中,迟-早相关电路的码元宽度等于伪码的码元宽度,即相关间距为1.0 chip。迟-早信号分别超前、滞后准时信号半个码元,迟-早相关的能量表明准时信号与导航

信号“对齐”程度,当两者能量差为零时,准时相关信号的时延与导航信号时延相同,获得伪距值。

相对于传统接收机 DLL 环中采用1.0 chip的相关间距,减小其间距有着明显的优点,尤其是在低速率伪码(如1.023 MHz或2.046 MHz)的码跟踪应用中,可以减小由噪声和多径所带来的误差。一般来说,相关间距 $d < 1.0$ chip称为窄相关,多径误差减小是因为窄相关的非相干 DLL 环不易受延迟的多径信号影响。图 1 给出了不同相关间距下的伪距多径误差包络曲线,可见,当减小相关间距时,多径最大误差不断减小,这说明窄相关对于码相位具有多径抑制作用。相关间距0.1 chip时,环路对延迟大于1.05 chip和小于0.1 chip的多径信号不敏感,对于延迟在 0.1 ~ 1.0 chip范围内的多径信号,最大误差不会超过某一个固定值(该值为原1.0 chip相关间距时的最大误差的 1/10)。事实上,延迟在 $1 + d/2$ 以上的多径信号对环路基本无影响。

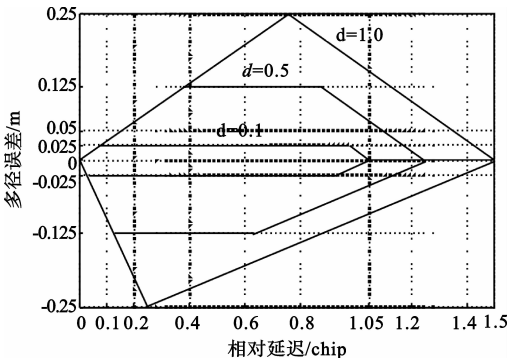


图 1 伪距多径误差包络曲线

Fig.1 Multipath error envelopes for several correlator spacing

3.2.2 MEDLL 技术

MEDLL 技术是 NovAtel 公司 1995 年提出并应用到广域增强系统(WAAS)接收机的专利技术,它是能够同时检测和消除多径的优秀算法,不仅能提供高精度的测量数据,也能用于导航信号质量的监测,给出整个相关函数的采样。

MEDLL是建立在统计理论基础上的抗多径技术。如图 2 所示,MEDLL 采用多个相关器得到相关函数的多个采样值,然后根据最大似然准则进行迭代计算。理论上,如果接收机受到 M 个多径信号的影响,就需要进行 M 次迭代计算,但在实际环境中,事实上并不知道存在多少个多径信号,而且 M 也不是一个常数。为避免处理时间过长,可以人为地限定 M 值的大小;在实际测量环境中,尽管会

存在多个多径信号,但只有其中的 1 ~ 2 路占主导作用的多径信号对测量影响较为严重,因此,实际操作过程中 M 值一般取值为 3 或 4。在迭代计算的过程中,MEDLL 将多径信号考虑在内,利用并行通道的窄相关采样,估计出直接信号和多径信号的幅度、延迟和相位,分析延迟最小的信号,认为是直接信号,其它较大延迟的信号认为是多径信号分量被消除。

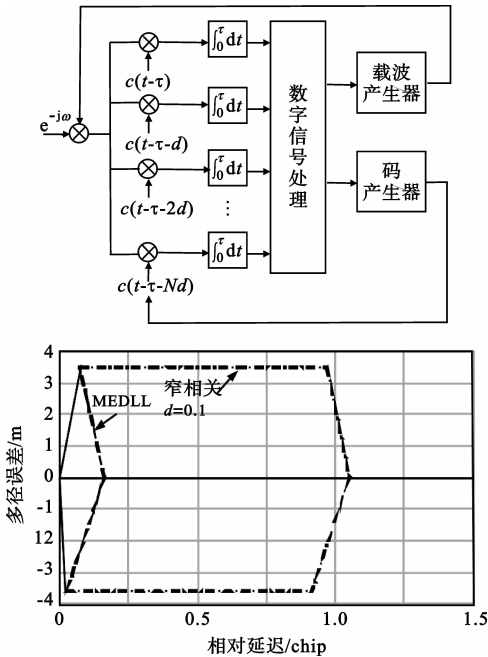


图 2 MEDLL 并行处理通道与多径误差包络曲线
Fig.2 MEDLL block diagram and error envelopes

由于需要处理的信息较多,MEDLL 技术的实时性较差,这就决定了 MEDLL 只能应用于多径变化较为缓慢的场合,如 GNSS 系统监测站中的监测接收机等。另外,MEDLL 技术也可用于监测环境中的多径情况,作为多径监测仪使用。

3.2.3 Strobe 相关技术

Strobe 相关技术是 Astech 公司提出的专利技术,相对于窄相关技术只改变传统 GNSS 接收机早 - 迟两个相关器的相关间隔,Strobe 相关器则采用了 4 个相关器,鉴相器也做了相应的改变。如图 3 所示,Strobe 鉴相器有两组相关器,其中一组为窄相关,另一组为宽相关,宽相关的早 - 迟相关器间隔为窄相关的 2 倍。假设 E1 - L1 相关器组的早 - 迟相关间隔为 d ,则 E2 - L2 相关器组的相关间隔就为 $2d$ 。相关器输出的鉴相函数可以看作是 2 组超前减滞后窄相关器的线性函数,可以通过这 2 组窄相关器的相关函数来推导 Strobe 鉴相函数。延迟大于相关函数的有效区

域多径信号不会对相关函数起作用,也就是延迟小于相关函数的有效区域多径信号才会引起鉴相误差。由于 Strobe 鉴相器是 2 组窄相关器相关函数的线性函数,可以消除更多的多径信号。

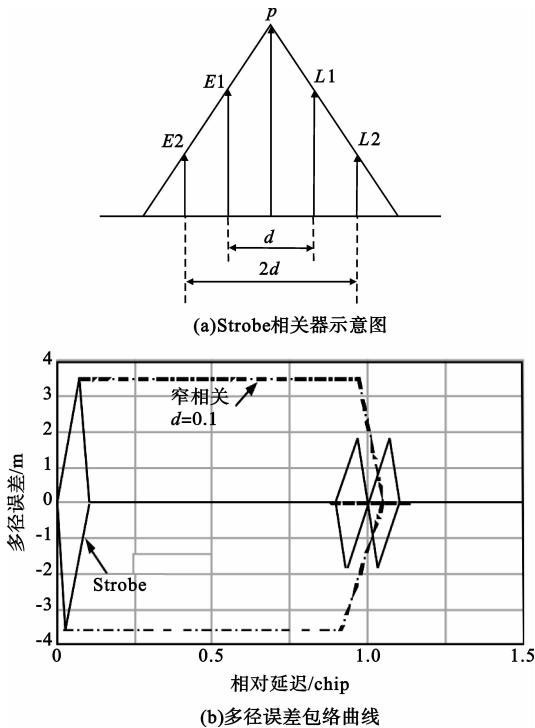


图 3 Strobe 相关器示意图与多径误差包络曲线
Fig.3 Strobe correlator diagram and error envelopes

与窄相关技术类似,对于 Strobe 相关器,多径引起的码相跟踪误差与相关器的相关间隔 d 、多径信号的延迟、相位和幅度参数有关,相关间隔 d 越小,多径误差越小,但相关间隔也不能无限地变窄;Strobe 相关器比窄相关技术有更强的多径抑制能力,其一个突出特点是当相对延迟在 $d \leq \tau \leq T_c - d$ 范围内时,多径误差为 0,而在此范围内的窄相关则具有最大的多径误差。

3.2.4 PAC 技术

PAC 技术是 NovAtel 公司的专利技术,是通过补偿相关三角形的不对称性来实现的一种窄相关技术。实际上,PAC 技术与 Strobe 相关技术的基本思想是一致的,也是利用 2 组相关器来实现的,通过 2 个超前相关器、2 个滞后相关器和 1 个即时相关器联合实现对畸变的相关峰进行补偿。其相关器示意图和多径误差包络曲线与 Strobe 相关技术相同。

3.2.5 几种技术的抗多径效果比较

从抗多径效果来看,Strobe 相关技术、PAC 技术

与 MEDLL 技术性能接近,但 MEDLL 技术能够提供更多的测量信息,这些信息对于监测接收机是非有用的。MEDLL 技术可以给出整个相关函数的采样,以判定信号是否受到干扰。通过直接信号、多径信号的估计值和残差,可以判断存在多少个多径信号、多径反射点概率位置等,这样就便于选择合适的天线安放位置。当然,MEDLL 也不能完全消除多径影响,尤其是对于那些短延迟(小于 0.1 chip,对于 2.046 MHz 码来说约为 15 m)的多径信号是很难估计的。对于短延迟的多径信号,无论是窄相关、Strobe 相关,还是 MEDLL 技术,都没有起到改善作用,而短延迟的多径信号对载波相位测量的影响恰恰较为严重,这一点是信号处理多径抑制技术的局限性。

4 结束语

高精度的 GNSS 接收机往往会同时采用抗多径天线和信号处理的方法,这样可以更好地抑制多径信号(包括短延迟多径信号),但目前还没有一种技术能够非常好地解决接收机面临的多径误差问题。

多径信号产生的根本原因是 GNSS 信号的反射,因此,解决接收机多径误差最有效和最基本的措施还是选择良好的天线安装场地,尽可能地减少多径信号。天线安装场地应远离平静的水面、高大的建筑物或其它对电磁波有较强反射的物体;相反,天线安装应选择草丛、深耕田地、稠密森林或其它高度适当的有植被的地面,可以较好地吸收电磁波,减少信号的反射形成多径。

参考文献:

[1] Pratap Misra, Per Enge. 全球定位系统——信号、测量与性能[M]. 2 版. 罗鸣, 曹冲, 肖雄兵, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 330 – 335.
Pratap Misra, Per Enge. Globe Positioning System: Signals, Measurements and Performance [M]. 2nd ed. Translated by LUO Ming, CAO Chong, XIAO Xiong – bing. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 330 – 335. (in Chinese)

[2] Elliott D Kaplan. GPS 原理与应用[M]. 邱致和, 王万义, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 208 – 219.
Elliott D Kaplan. Understanding GPS Principles and Applications [M]. Translated by QIU Zhi – he, WANG Wan – yi. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 208 – 219. (in Chinese)

[3] 刘基余, 李征航, 王跃虎, 等. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1993: 357 – 363.

LIU Ji - yu, LI Zheng - hang, WANG Yue - hu, et al. GPS Principles and Applications [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1993:357 - 363. (in Chinese)

[4] Waldemar Kunysz. High Performance GPS Pinwheel Antenna [C]//Proceedings of the Annual National Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION - NTM'2000). Salt Lake City, Utah, USA:ION, 2000: 2506 - 2512.

[5] Bryan R Townsend, Patrick C Fenton. A Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a LI GPS Receiver[C]// Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION - GPS '94). Salt Lake City, Utah, USA:ION, 1994: 143 - 148.

[6] Bryan R Townsend, Richard D J van Nee. Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop [C]// Proceedings of the Annual National Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION - NTM '95). Anaheim California, USA:ION, 1995:277 - 283.

作者简介:

冯晓超(1979 -),男,陕西大荔人,工程师,主要研究方向为卫星导航技术与应用;

FENG Xiao - chao was born in Dali, Shaanxi Province, in 1979. He is now an engineer. His research concerns application of satellite navigation technology.

Email: fengxc_bd2@sina.com

程晓滨(1964 -),男,福建福州人,高级工程师,主要研究方向卫星导航技术与应用;

CHENG Xiao - bin was born in Fuzhou, Fujian Province, in 1964. He is now a senior engineer. His research concerns satellite navigation technology and application.

赵珂(1981 -),男,河南郑州人,工程师,主要研究方向卫星导航技术与应用。

ZHAO Ke was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1981. He is now an engineer. His research concerns satellite navigation technology and application.

勘 误

本刊 2010 年第 7 期第 132 页图 2 中,原“Φ380mm”应为“380mm”,原“138mm”应为“Φ138mm”,原图和更正后的图如下所示,在此向作者和读者表示歉意。

