

GNSS 多径干扰抑制的相关器技术

王凤瑛, 丁晓明

(山东科技大学 信息与电气工程学院, 青岛 山东 266590)

摘要: 相关器技术是利用相关器结构或相关函数的处理来抑制多径干扰或补偿多径误差的技术, 广泛应用于全球导航卫星系统(GNSS)接收机的干扰抑制, 主要包括窄相关技术、Strobe 相关器、Shaping 相关器、MET 技术、多径不变点技术以及 MEDLL 技术。探讨了它们抑制多径干扰的原理和实现方式, 分析了剩余跟踪误差情况, 总结了相关技术的应用和发展现状。

关键词: 全球导航卫星系统; 多径干扰; 相关器; 抑制; 补偿

中图分类号: TN850.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)01-0099-08

Review of GNSS Correlator Technique for Suppression of Multi-path Interference

WANG Fengying, DING Xiaoming

(College of Electrical and Information Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Correlator technique is utilizing the correlator structure or processing technology of correlation function to suppress the multi-path interference or compensate multi-path errors, which is one of the most widely used technology of interference suppression in the global navigation satellite system (GNSS) receiver. Correlator technology mainly contains narrow correlator technology, strobe correlator, shaping correlator, MET technology, multi-path invariant point and MEDLL technology. In this paper, the principles of all multi-path suppression methods and implementing mode were discussed and, the residual tracking error and the current status of development were also analyzed, as well as the application and development status of related techniques were summarized.

Key words: global navigation satellite system; multi-path interference; correlator; suppression; compensation

多径干扰会影响全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)地面接收机对当前的位置解算精度, 带来定位误差, 这一问题在城市和山区的应用环境中尤为突出。多径信号的数量及其相对于直达信号的时延和射频相位的偏移, 都与卫星位置及接收机天线周围的反射物有关。多径信号通常比直达信号传输的距离更长, 相对于有用信号, 它们总是有时延, 并且在反射过程中会损失一部分功率^[1]。

根据伪随机码相关特性, 如果多径信号的时延相对于直达信号超出了一个码片的时间, 只要锁相环锁定了直达信号, 与本地码互不相关, 不会对伪随机码的测距精度造成实质性的影响。但是如果多径时延相对于有用信号在时间上没有超出一个码片时长, 由于多径信号的叠加影响, E-L(early-late)鉴相器中, 通过本地码和接收到信号而算出的延迟时间就会存在偏差。对于 GPS (global positioning system) 系统的 C/A 码(coarse/acquisition code)和 Galileo 系统的 E1 码, 这是一个重要问题, 因为 C/A 码的码片时长为 $1 \mu\text{s}$, 经子载波调制的 E1 码的码片时长为 $0.5 \mu\text{s}$, 导致由多径信号与有用信号间的时延而引起的伪距离的计算精度误差分别达到 300 和 $150 \text{ m}^{[2-4]}$ 。因而, 即使由多径干扰引起的扩频码误差很小, 其后果也会非常严重。

收稿日期: 2011-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(61071087); 青岛市基础研究项目(11-2-4-4-(9)-jch)

作者简介: 王凤瑛(1966—), 女, 山东莱阳人, 副教授, 从事无线通信技术方面研究。E-mail: mxqwfyp@163.com

多径干扰抑制方法通常有几类:①空间处理技术,通过合理设计接收机天线和安装位置,采用特殊类型的天线,如扼流环天线加上一个涂有吸收射频信号材料的底板,可以有效地消除来自地面反射的多径信号;②改进相关器、跟踪环路结构来实现多径抑制,如利用窄相关技术、MEDLL(multipath estimating delay lock loop)以及 Shaping 相关器技术等,这种方法性能稳定,效果较好;③利用数据处理技术,比如小波技术、MU-SIC(multiple signal classification due to schmidt)方法、扩展卡尔曼滤波和粒子滤波方法、神经网络方法等,这些算法都比较复杂。在同一接收机中这 3 类技术可同时使用。

其中,利用相关器或 DLL(delay-locked loop)结构方法简单可靠,容易实现,因而应用较广^[5-7]。本研究主要探讨利用相关器、相关函数的处理技术来抑制多径干扰或补偿多径误差的方法,这里统称相关器技术。目前,相关器技术分为分离技术和补偿技术两类:窄相关器、Strobe 相关器和 Shaping 相关器属于分离技术, MET(multipath elimination technology)、多径不变点技术和 MEDLL 技术则属于补偿技术。

1 窄相关器

窄相关技术就是利用缩短 E-L 相关间隔来抑制多径干扰。该技术由 NovaTel 公司 Dierendonck 博士于 1991 年提出^[8]。

窄相关处理原理如图 1 所示,通过调整本地输出码时钟实现 E-L 相关器间隔的缩短,该窄相关延迟锁相环采用了可变相关长度相关器,根据分频常数 N 的选取(从 1 变化到 10),其相关长度从 1.0 个码片宽度减小到 0.1 个码片宽度。

图 2 和图 3 是多径信号延迟 0.7 码片时长,相关器间隔分别为 0.5 和 0.2 时的鉴相曲线,可以看出当相关器间隔为 0.2 码片时长时,多径信号并没有影响到鉴相曲线调整区间的线性,而当相关器间隔为 0.5 码片时,多径信号明显影响到了鉴相曲线的线性调整区间(-0.5~+0.5 码片时长),使直线变形。

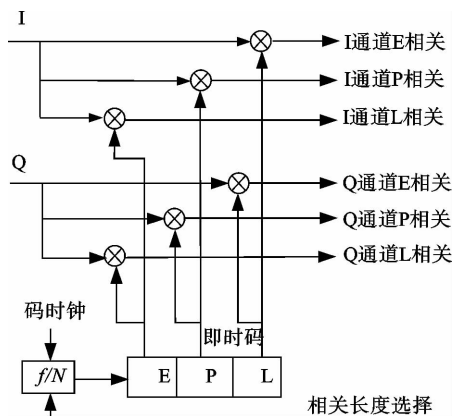


图 1 窄相关技术原理图

Fig. 1 Principle diagram of narrow correlator

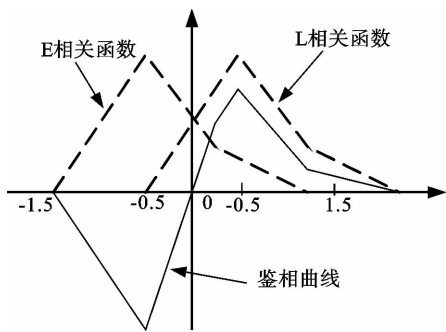


图 2 相关器间隔 0.5 码片时的鉴相曲线图

Fig. 2 Discriminator curves of 0.5 chip correlator space

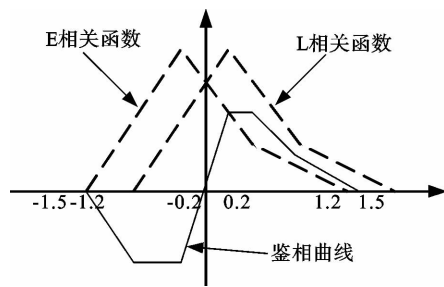


图 3 相关器间隔 0.2 码片时的鉴相曲线图

Fig. 3 Discriminator curves of 0.2 chip correlator space

图 4 是 E-L 间隔分别为 1.0 和 0.1 个码片时长(T_c)的跟踪误差包络。可以看出,缩短相关器间隔对减小多径误差的效果很明显。

对于只采用 C/A 码定位的 GPS 系统来说,缩短相关长度具有非常明显的效果,主要表现为在噪声和多径干扰的条件下,能有效降低码跟踪误差。根据多径干扰对鉴相曲线的影响分析,当多径相对时延大于 1+

$d/2$ 时(d 为 E-L 相关器间隔),采用窄相关技术的 d 值比采用常规 DLL 要小得多,在常规 DLL 处理中,相关长度为 $1.0 T_c$,时延小于 $1.5 T_c$ 的多径信号都会造成干扰,如果窄相关器的相关间隔为宽相关设计标准 1.0 个码片间隔的 $1/10$,则时延小于 1.05 个码片间隔的多径才会造成干扰,在消除多径误差性能方面将改善 10 倍。此外,窄相关的 E-L 码相距很小,它们的噪声具有相关性,而常规 DLL 的 E-L 码噪声在时域上是统计独立的,因此噪声也能被抑制,窄相关的鉴相曲线受多径影响发生扭曲的程度明显降低^[9]。

缩短相关器 E-L 间隔也有明显的缺点:

1)在进行相关处理前,要求系统具有更宽的带宽,理论上,自相关峰呈尖锐型,带宽越窄,自相关峰越平坦,对鉴相曲线的影响越大,鉴相灵敏度越低,如图 2 所示;

2)需要更高的采样速率以及更快的数字信号处理技术,增加处理器的开销。

3)窄相关技术要求更大的处理带宽,与普通的 2 MHz 带宽相比,会伴随更多的噪声混入通带信号,因而接收机更容易受到 RF(radio frequency)干扰。

窄相关技术虽占用一些接收机资源如 CPU 开销和前端带宽等,但整体来说实现成本不算太高,而且实时性较好,故应用较广,多用于中低端接收机。

Ziedan 在文献[10]中提出的利用扩展卡尔曼滤波 EKF(extended Kalman filter)实现的可变相关器间隔方法来进行码跟踪,可以根据估计的多径时延自适应地调整相关器间隔,能以较小的代价抑制多径干扰。但 EKF 算法复杂,占用大量的 CPU 开销。

2 Strobe 相关器

Strobe 相关技术是 Astech 公司提出的^[11],传统窄相关技术只改变 GNSS 接收机 E-L 两个相关器的相关间隔,Strobe 相关器则采用了 4 个相关器,分别为 E1、E2、L1、L2,鉴相器也做了相应的改变。如图 5 所示,Strobe 鉴相器有两组相关器,一组为窄相关,一组为宽相关,宽相关的 E-L 相关器间隔为窄相关的 2 倍。假设 E1-L1 相关器组的 E-L 相关间隔为 d ,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^[12-13],如

$$D_{\text{HRC}} = (E_1 - L_1) + \frac{1}{2}(E_2 - L_2) \quad (1)$$

式中, E_1, E_2, L_1, L_2 分别是相关器 E1, E2, L1, L2 的输出值, D_{HRC} 是修正的鉴相器反馈调整量。图 6 是 Strobe 相关器的鉴相输出曲线。与窄相关技术一样,Strobe 相关器间隔越窄,多径误差就越小,但受生产工艺和成本限制,相关器不可能做到无限窄,Strobe 相关器比窄相关技术具有更强的多径干扰抑制能力^[14]。

图 7 是使用 Strobe 相关器的接收机的多径跟踪误差包络曲线,可以看出 Strobe 相关器的一个特点是当相对延迟在 $f \leq \tau \leq T_c - d$ 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。

与窄相关技术一样,Strobe 相关器也具有实时性好的特点,因而主要用于对实时性要求较高的多径抑制接收机。

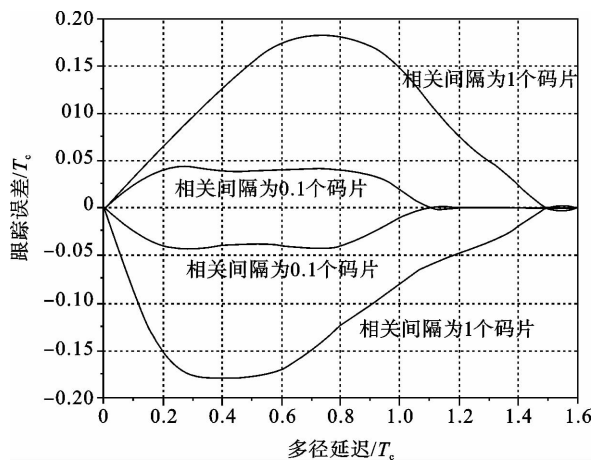


图 4 窄相关跟踪误差包络

Fig. 4 Tracking error envelope of narrow correlator

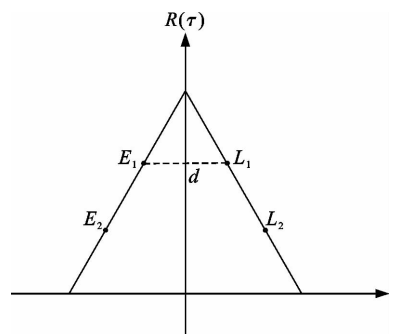


图 5 Strobe 相关技术原理图

Fig. 5 Diagram of Strobe correlator

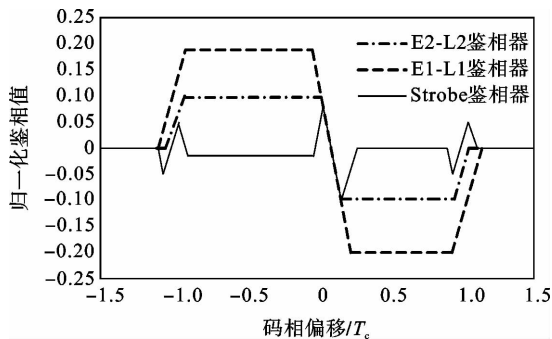


图 6 Strobe 相关器鉴相曲线 ($d=0.2 T_c$)

Fig. 6 The discriminator curves of strobe correlator ($d=0.2 T_c$)

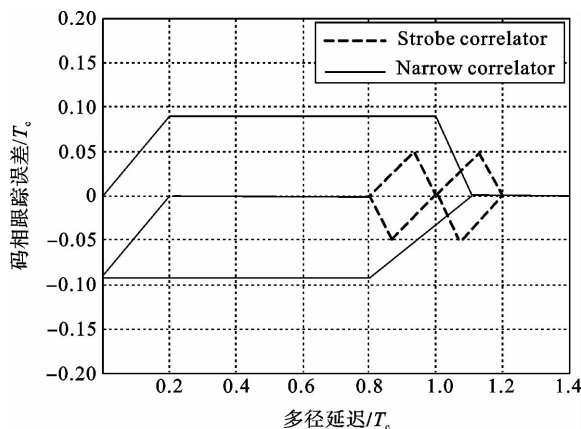


图 7 Strobe 相关器跟踪误差包络曲线

Fig. 7 The track error envelopes of strobe correlator

3 Shaping 相关器

Shaping 相关器又称 W 波形鉴相器 (图 8), 由 Lee 在 2002 年提出^[15], 工作原理与窄带 E-L 相关器相似, 它利用 E 相关器和 L 相关器的输出信号叠加后与 P 相关器的输出结果做点积运算, 如果减小 E 相关器和 L 相关器的时间间隔, 多径信号的鉴相曲线就会和直接到达信号的鉴相曲线分离, 这样就可以通过将多径鉴相曲线分离出来的方法来消除多径信号对定位精度的影响。

Shaping 鉴相器根据接收到的伪随机码的跳变生成鉴相信号。Shaping 波形有多种, 如图 9 所示。

如果伪码编码的波形的自相关函数用 $R(\tau)$ 表示:

$$R(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|/T_c, & |\tau| \leq T_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, τ 表示本地码与接收码的定时偏差, T_c 表示码片周期。那么相干 E-L 鉴相器的响应为^[16]

$$D_{E-L}(\tau) = R(\tau - \delta/2) - R(\tau + \delta/2) \quad (3)$$

而 W1 鉴相器的响应则可以通过 E-L 鉴相器的三个响应相加得到, 即:

$$R_{W1}(\tau) = [R(\tau - \delta/2) - R(\tau + \delta/2)] - [R(\tau - \epsilon/2 - x) - R(\tau + \epsilon/2 - x)] - [R(\tau - \epsilon/2 + x) - R(\tau + \epsilon/2 + x)] \quad (4)$$

其中, $x = \delta/2 + \epsilon/2$ 。生成波形如图 8 所示。

一般 Shaping 波形与接收信号的同相采样和正交采样相乘。Shaping 波形的定时与本地基准码的定时同步, 其取值和极性取决于相邻本地伪码码片间

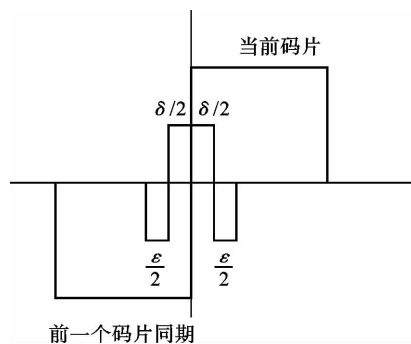


图 8 W 鉴相波形及参数图

Fig. 8 W discriminator wave and its parameters

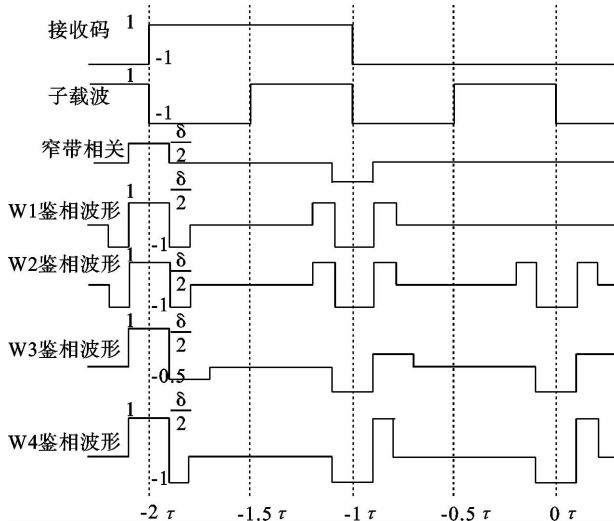


图 9 四种 Shaping 鉴相波形图

Fig. 9 Four kinds of Shaping discriminator wave

的取值和极性取决于相邻本地伪码码片间

跳转的极性。波形的取值区间位于两个相邻码片的交界处。图 9 是伽利略 BOC(1,1)信号生成的 Shaping 鉴相波形。

用 W 鉴相器波形分别与 $I(t)$, $Q(t)$ 相乘,其中, W 鉴相器波形根据本地伪随机信号的伪码码片间极性的跳转来构造。乘积信号在相应的积分区间上进行积分,估计出输入信号同相和正交信号与本地伪码时基之间的时延差。图 10 为本地构造的 W 鉴相器波形与接收信号的同相信号相关的鉴相器输出结果,可以看出,直达信号和多径信号的鉴相曲线明显地被分离了,因此可以消除多径干扰。

产生 W 鉴相器波形和点积相关运算需要调用和组合多个相关器,这不仅会使接收机成本和复杂度增加,还会使环路的跟踪噪声变大,进而导致环路变得不稳定,所以应该考虑如何在满足要求的前提下使用最少的相关器。

Shaping 相关器在处理 GPS 的 M 码和 Galileo 系统的 BOC 码等带有子载波的导航卫星信号非常有效^[17],文献[18]和[19]提出的针对 Galileo 系统 MBOC 信号的优化鉴相 S 曲线的方法,能更好地适应带宽较宽的导航卫星信号跟踪。

4 MET 技术

MET 技术全称多径消除技术,于 1994 年由 NovAtel 公司的 Townsend 和 Fenton 提出^[20],也称作 E-L 斜率技术。同 Strobe 相关器一样,该技术也是使用 4 个相关器,不同的是它利用相关器对相关函数采样,确定相关函数峰值两侧的斜率,利用两边的斜率来测量伪距^[21]。如图 11 所示,过 E_1 、 E_2 的直线与过 L_1 、 L_2 直线的交点正是相关函数的峰值点,用来确定码跟踪误差,再用此误差补偿跟踪环路的反馈量。

当 E_1 与 L_1 输出值的间距为 d , E_1 、 E_2 和 L_1 、 L_2 输出值的间距为 d_1 时, MET 的鉴相函数为

$$D(\tau) = \frac{(R_{E1} - R_{L1}) - \frac{d}{2}(S_E + S_L)}{S_L - S_E} \quad (5)$$

式中, $S_E = ((R_{E1} - R_{E2})/d_1)$, 为相关峰的左斜率, $S_L = ((R_{L2} - R_{L1})/d_1)$ 为相关峰的右斜率, $D(\tau)$ 为鉴相器反馈调整量, R_{E1} 为相关器 E_1 输出值, R_{L1} 为相关器 L_1 输出值。

MET 的跟踪误差为

$$\tau_{MET} = \frac{(\frac{d}{d_1}\tau_m - \frac{d^2}{2d_1^2} - d)a\cos(\theta_m - \theta)}{[\frac{ad}{d_1}\cos(\theta_m - \theta) - 2\cos\theta]} \quad (6)$$

式中, τ_m 和 θ_m 分别为多径延迟和多径信号的载波相位, a 为幅值, θ 为本地载波相位。

文献[22]提出用左侧直线,右侧二次曲线的非对称插值方法来确定多径跟踪峰值点和修正量,该方法虽

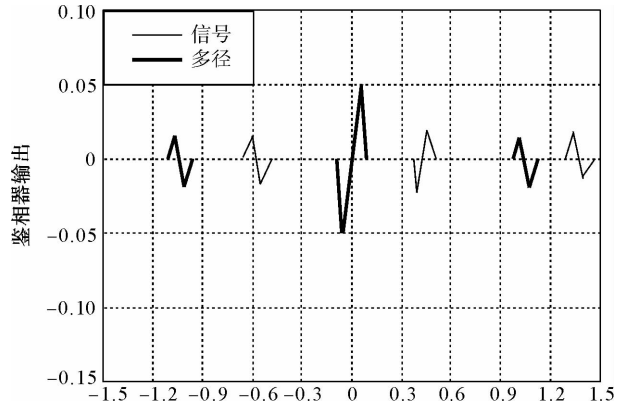


图 10 使用 Shaping 相关器得到的鉴相结果

Fig. 10 Discrimination results using Shaping correlator

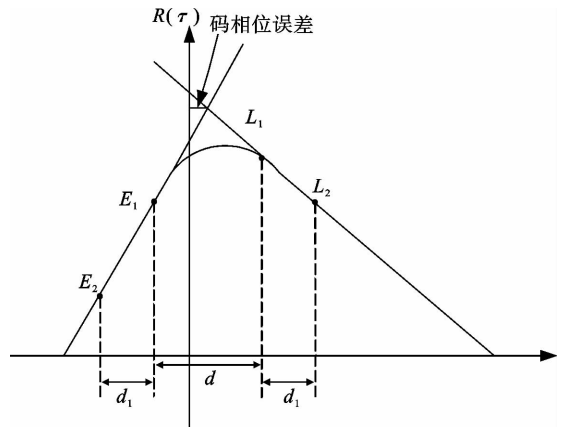


图 11 E-L 斜率技术原理图

Fig. 11 Diagram of E-L slope technique

没有大幅增加算法复杂度,但对跟踪误差的改善量也不大,文献只给出了跟踪误差改善的仿真结果,没有做相应的实验数据。

MET 技术在性能上也优于窄相关技术,并与 Strobe 相关器技术具有相似的多径误差抑制性能。但与 Strobe 相关器技术不同,MET 是一种软件实现技术,而 Strobe 相关器技术是通过硬件来实现的,所以 MET 实时性较 Strobe 相关器技术稍差,但更适用于软件 GNSS 接收机。

5 多径不变点技术

文献[23]介绍了一种利用相关函数曲线确定多径不变(multi-path invariant, MPI)点的位置进而利用多径不变点进行多径消除的方法。该方法的原理是,由于多径信号滞后于直达信号,多径信号只影响相关函数曲线的后边部分,而前边坡开始的位置不会受多径信号的干扰,因此可以看做是多径不变点,如图 12 所示。

该方法的具体步骤如下:

1)在没有多径干扰的情况下生成理想的对应每一个 PRN(pseudo random noise, 伪随机噪声)码的自相关函数,保存多径不变点到峰值点的距离到查找表;

2)一旦接收机在每一通道跟踪一颗卫星,利用保存的多径不变点与峰值点之间的理想距离确定合理的跟踪调整点;

3)在靠近峰值的区域内找出特征明显的多径不变点并优化;

4)通过测量多径不变点到 DLL 的实测距离和理想距离之差来修正跟踪精度。如图 13 所示。

图 14 是多径不变点法和窄相关法的误差曲线,多径不变点方法最大的特点就是跟踪误差与多径延迟无关。尽管如此,这种方法的应用并不广,其原因是在信噪比不理想的情况下,多径不变点的寻找就变得十分困难,相关峰的形状也会畸变,此时测量的 DLL 到 MPI 点的距离也就不很精确,所以对多径误差的修正也是有限的。

6 MEDLL 技术

MEDLL 技术是 NovAtel 公司 1992 年提出的接收机技术^[24-26],能够同时检测和消除多径效应。MEDLL 是建立在统计理论基础上的抗多径技术。它的主要原理是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^[27-28]。理论上,要确定 M 个多径信号的合成延迟,就要建立 M 个方程,就需要进行 M 次迭代计算,但在实际环境中,并不知道存在多少个多径信号,而且 M 个信号幅度有大有小,对多径误差的贡献也不一样。此外,为避免迭代计算时间过长,可以人为限定 M 值:

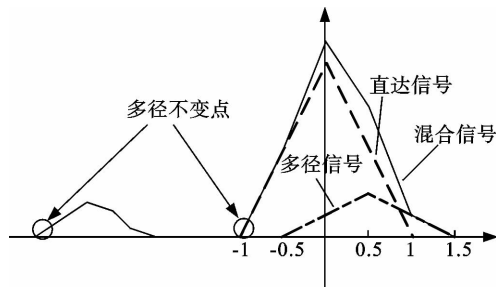


图 12 相关函数曲线的多径不变点示意图

Fig. 12 MPI points in correlation function curve

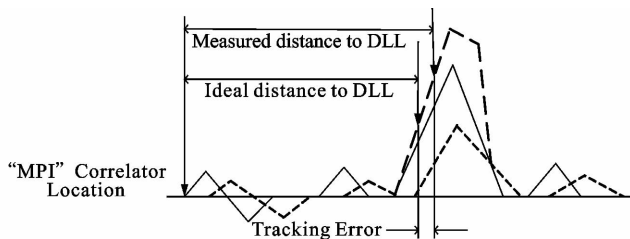


图 13 多径不变点法测量原理图

Fig. 13 Principle of MPI points method measurement

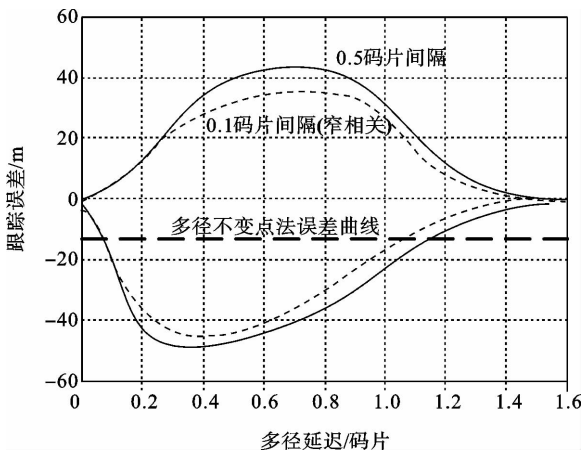


图 14 多径跟踪误差曲线(多径不变点法)

Fig. 14 Multipath track error curve (MPI method)

在实际测量环境中,尽管存在多个多径信号,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 一般取值为 3 或 4。在迭代计算过程中, 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,其他较大延迟的信号认为是多径信号分量而被消除。

Townsend 等^[26]在充分利用窄相关器优势的基础上,给出了基于相关函数形状的方法来对多径进行抑制,并在 GPS 接收机中进行了测试。结果显示,在进行差分定位时,同标准窄相关器接收机相比可以降低 20%~30% 的多径误差。但是为了得到好的结果需要很多多径模型的参数,因此计算量较大,对接收机来说计算负担重,典型的方法包括迟早斜率法和最大似然估计法。由于需要处理的信息较多, MEDLL 技术的实时性较差,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。

7 结束语

窄相关器技术实时性较好,应用较多,多用于中低端接收机, Strobe 相关器通过对相关器输出的鉴相函数进行改进,实现多径信号与载波信号的分离。由于受成本和工艺限制, Strobe 相关器间隔不可能无限窄,但其比窄相关技术有更强的多径干扰抑制能力。 Shaping 相关器对本地鉴相波形进行了变化,对处理 GPS 的 M 码和 Galileo 系统的 BOC 码等卫星信号非常有效。 MET 技术性能上优于窄相关技术,其对多径误差的抑制是通过软件实现的,实时性稍差。多径不变点技术以及 MEDLL 技术精度较高,对 CPU 的要求较高,实时性较差,主要用于多径变化缓慢的场合。窄相关器、 Strobe 相关器和 Shaping 相关器属于分离技术,对带宽要求较高; MET 技术、多径不变点技术和 MEDLL 技术算法较复杂,对 CPU 的要求较高,而对于带宽的需求相对较低。在应用中可根据实际情况选择一种或多种技术组合的方式,实现最优设计。

参考文献:

- [1]SOUBIELLE J,FIJALKOW I,DUVAUT P,et al. GPS positioning in a multipath environment[J]. IEEE Transaction on Signal Processing,2002,50(1):141-150.
- [2]KAPLAN E D. Understanding GPS principles and applications[M]. Boston:Artech House,Inc,1996.
- [3]BETZ J. The offset carrier modulation for GPS modernization[C]//Proceedings of ION Technical Meeting. Cambridge,Massachusetts,28-30,Jun.,1999:639-648.
- [4]HEIN G,IRSIGLER M,RODRIGUEZ J A,et al. Performance of Galileo L1 signal candidates[C]//Proceedings of European Navigation Conference GNSS. Tokyo,May,2004:257-275.
- [5]HEIN G,LEMKE N. Galileo/GPS receiver architecture for high sensitivity acquisition[C]//IEEE ISSSE 2004. Linz,Aug.,2004:437-442.
- [6]SCHMID A et al. Enabling location based service with a combined Galileo/GPS receiver architecture[C]//Proceedings of ION GNSS 2004. Long Beach,California,21-24,Sep.,2004:1468-1479.
- [7]DOVIS F,LO PRESTI L,PINI M,et al. A modular architecture for the real-time reconfigurability of GNSS receiver[C]//46th International Symposium on Electronics in Marine. Zadar,Croatia,18,Jun.,2004:336-341.
- [8]DIERENDONCK A J,FENTON P,FORD T. Theory and performance of narrow correlate spacing in a GPS receiver[J]. Journal of the Institute of Navigation,1992,39(3):265-283.
- [9]MARC-ANTOINE F,JEAN-CHRISTOPHE G,RENE L. Real-time low-cost multipath mitigation technique calibrated through real data repeatable testing[C]//ION GNSS 2009 Proceedings. Georgia,22-25,Sep.,2009:2316-2328.
- [10]ZIEDAN N I. GNSS receivers for weak signals[M]. Boston:Artech House,2006.
- [11]WEILL L,FISHER B. Method for mitigating multipath effects in radio systems[P]. US6370207,1996:12-27.
- [12]GARIN L,ROUSSEAU J. Enhanced strobe correlator multipath rejection for code and carrier track[C]//Proceedings of ION GPS-97. Kansas City,16-19,Sep.,1997:559-568.
- [13]GARIN L,VAN DIGGELEN F,ROUSSEAU J. Strobe and edge correlator multipath mitigation for code[C]//Proceedings of ION GPS-96. Kansas City,17-20,Sep.,1996:657-664.
- [14]IRSIGLER M,EISSFELLER B. Comparison of multipath mitigation techniques with consideration of future signal structures[C]//Proceedings of ION GPS/GNSS 2003. Oregon,7-12,Sep.,2003:2584-2592.

- [15] LEE Y C. Compatibility of the new military GPS signals with Non-Aviation receivers[C]//ION 58th Annual Meeting/CIGTF 21st Guidance Test Symposium, Albuquerque, NM, 24-26, Jun., 2002; 581-597.
- [16] GARIN L J. The “shaping” correlator, novel multipath mitigation technique applicable to Galileo BOC(1,1) modulation waveforms in high volume markets[C]//The European Navigation Conference GNSS, Munich, 19-22, July, 2005; 1-16.
- [17] SOUSA F M G, FNUNES F D, LEITAO J M N. Code correlation reference waveforms for multipath mitigation in MBOC GNSS receivers[C]//Proceedings of the European Navigation Conference on GNSS, Toulouse, 16-19, Sep., 2008; 1-10.
- [18] PANY T, IRSIGLER M, EISELLER B. S-curve shaping: A new method for optimum discriminator based code multipath Mitigation [C]//Proceeding of ION GNSS 2005, Long Beach, 13-16, Sep., 2005; 2139-2154.
- [19] MATTEO P, JOSE-ANGEL A R, THOMAS P, et al. Looking for an optimum S-curve Shaping of the different MBOC implementations[C]//Proceedings of ION GNSS 2007, Fort Worth, 25-28, Sep., 2007; 269-281.
- [20] TOWNSEND B R, FENTON P. A Practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in a L1 GPS receiver[C]//Proceedings of ION GPS-94, Salt Lake City, 20-23, Sep., 1994; 143-148.
- [21] BRAASCH M. Autocorrelation side lobe consideration in the characterization of multipath error in pseudorandom noise ranging systems[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic systems, 1997, 33(1): 290-296.
- [22] 李辉. 多星座 GNSS 接收机捕获与跟踪弱信号方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2010.
- [23] PHELTS R E, STONE J M, ENGE P K, et al. Software-based multipath mitigation: sampling for multipath invariance [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Satellite Navigation Technology and Applications, Brisbane, 20-23, July, 1999; 243-256.
- [24] NEE R V. The multipath estimating delay lock loop[C]//IEEE 2nd International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Yokohama, 29, Nov., 1992; 39-42.
- [25] NEE R V, SIEREVELD J, FENTON P, et al. The multipath estimating delay lock loop: approaching theoretical accuracy limits[C]//IEEE Position Location and Navigation Symposium, Las Vegas, July, 1994; 246-251.
- [26] TOWNSEND B R, FENTON P C, DIERENDONCK K J V, et al. L1 carrier phase multipath error reduction using MEDLL technology[C]//Proceedings of ION GPS-95, Palm Springs, California, 13-15, Sep., 1995; 1539-1544.
- [27] FABIO D, MARCO P, PAOLO M. Multiple DLL architecture for multipath recovery in navigation receivers[C]//IEEE Vehicular Technology Conference, Milan, 29, Sep., 2004; 2848-2851.
- [28] FENTON P C, JONES J. The theory and performance of NovAtel Inc’s vision correlator[C]//Proceedings of the ION GNSS 2005, Long Beach, 13-16, Sep., 2005; 2178-2186.

“机器人与智能技术”研究专栏征稿

征稿范围:

- | | |
|--------------------|-------------|
| ◇ 机器人理论与控制技术 | ◇ 智能系统建模与控制 |
| ◇ 人工智能与智能控制技术 | ◇ 机器人结构设计 |
| ◇ 移动机器人及自主导航技术 | ◇ 多机器人系统 |
| ◇ 机器人传感技术、智能传感器 | ◇ 特种机器人 |
| ◇ 机器视觉、图像处理与模式识别技术 | ◇ 机器学习 |

欢迎相关领域专家、学者和工程技术人员踊跃投稿,来稿请注明“机器人与智能技术”专栏。稿件经专家评审通过后优先发表,并实行优稿优酬。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: xbgjcl@126.com; zklwh@sdust.edu.cn

联系电话: 0532-86057826

山东科技大学学报(自然科学版)编辑部