

探测跟踪技术

# GPS接收机中多路径干扰的研究<sup>\*</sup>

吴兴存<sup>1, 2a</sup>, 任宇飞<sup>2b</sup>, 程乃平<sup>2b</sup>

(1. 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431;

2. 装备指挥技术学院 a. 研究生管理大队; b. 光电装备系, 北京 101416)

**摘 要:**从 GPS接收机内部结构入手,给出了 GPS接收机码和载波跟踪环的功能以及多路径信号对码跟踪精度的影响;分析了在多路径干扰下,用窄相关器可以部分修正多路径对码环的跟踪误差,详细介绍了一种以窄相关为基础的新的窄相关器技术——微脉冲相关技术,通过与宽的标准相关器和窄相关器在伪距测量精度上的比较,说明了它是一种性能非常好的抗多路径技术。

**关键词:** GPS接收机;多路径干扰;延迟锁定环;微脉冲相关

中图分类号: P228.4; TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-086X(2008)-04-0123-05

## Study of Multipath Interference in GPS Receiver

WU Xing-cun<sup>1, 2a</sup>, REN Yu-fei<sup>2b</sup>, CHENG Nai-ping<sup>2b</sup>

(1. China Satellite Maritime Tracking & Controlling Department, Jiangsu Jiangyin 214431, China;

2. The Academy of Equipment Command & Technology, a Company of Postgraduate Management;

b Department of Optical & Electrical Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** From the internal structure of GPS receiver, the functions of C/A code tracking and carrier tracking in GPS receiver and the impact of multipath signal in the precision of code tracking are given. It is analyzed that the tracking error of code loop can be partially corrected by narrow correlator under the multipath interference. A new narrow correlator technique—pulse aperture correlator based on narrow correlation is introduced. Comparing with wide standard correlator and narrow correlator in the precision of pseudorange measurement, pulse aperture correlator is a very good technique in the performance of anti-multipath.

**Key words:** GPS receiver; multipath interference; delay lock loop (DLL); pulse aperture correlator (PAC)

## 0 引 言

随着近距差分 GPS和民用 GNSS系统的发展, SA误差、电离层误差、对流层误差等系统误差都可

以进一步消除,动态定位精度已可达亚米级,多路径干扰误差变成了主要误差源。对于一般的接收机来说,多路径信号对直视信号(LOS)是一种干扰。因为多路径信号比直视信号经过了更长的路径才到达

\* 收稿日期: 2007-12-23;修回日期: 2008-02-18

作者简介: 吴兴存(1982-),男,江苏高邮人。硕士生,主要研究方向为空间信息传输与处理。

通信地址: 214431 江苏江阴 103信箱 403号 电话: 15861625815 E-mail: xingcun\_wu@163.com



图 2是在标准相关器情况下对几种 DLL 鉴相器的输出响应作了比较。标准相关器也叫宽相关器,它的相关器间隔为码片一半,即  $d = 0.5 \text{ chip}$ 。这意味着 3 位移位寄存器以码发生器时钟速率的 2 倍移动。图中假设输入信号的带宽无限大,所以三角形相关峰很尖锐,实际中当带宽有限时,三角形相关峰将会变得圆滑,并且在峰的每一侧都不是理想的线性斜升或斜降。噪声存在的结果是使得斜率变平坦并且使在鉴相器的边沿变圆滑<sup>[1]</sup>。

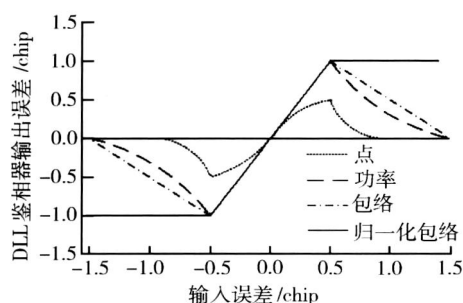


图 2 4种 DLL 鉴相器函数响应曲线

Fig 2 Four kinds of DLL discriminators

## 2 多路径干扰影响

文献 [2] 中对直视信号和多路径信号组成的复合信号进行了建模,直视信号和多路径信号组成的复合信号可以表示为

$$S(t) = AC(t) \cos(\omega_0 t + \phi) + \sum_{i=1}^M \{ A_i C(t - \tau_i) \cdot \cos[\omega_0(t - \tau_i) + \phi_i] \}, \quad (1)$$

式中:  $A$  为直视信号的幅度;  $C(t)$  为 C/A 码;  $\omega_0$  为载波频率;  $\phi$  为载波相位;  $A_i$  为多路径信号相对于直视信号幅度的比值;  $\tau_i$  为多路径信号相对于直视信号的时延。为了分析方便,下面只讨论含有一路多路径信号的情况。

$$S(t) = AC(t) \cos(\omega_0 t + \phi) + A_1 C(t - \tau_1) \cdot \cos[\omega_0(t - \tau_1) + \phi_1]. \quad (2)$$

假设相关器的积分时间为  $T$ , 载波频率已经锁定, 则相关器 I 路、Q 路输出分别为<sup>[3]</sup>

$$I_k = \sqrt{2P/N_0} TR(\tau_k) \cos(\phi_k + \phi_1) + \sqrt{2P/N_0} TR(\tau_k - \tau_1) \cos(\phi_k + \phi_1 - \phi_m), \quad (3)$$

$$Q_k = \sqrt{2P/N_0} TR(\tau_k) \sin(\phi_k + \phi_1) + \sqrt{2P/N_0} TR(\tau_k - \tau_1) \sin(\phi_k + \phi_1 - \phi_m), \quad (4)$$

式中:  $P/N_0 T$  为在  $1/T$  带宽内的信噪比;  $\phi_k$  为相位残差;  $\phi_m$  为多路径信号相对于直视信号的相位;  $\tau_k$  为码相位估计残差。  $R(\tau_k)$  为 C/A 码自相关函数。

$$R(\tau_k) = \begin{cases} 1 - |\tau_k|, & \tau_k < 1, \\ 0, & \tau_k = 1. \end{cases} \quad (5)$$

点积鉴相器输出为 (用  $\sqrt{2P/N_0} T$  归一化)

$$D(\tau_k) = [R(\tau_k - d/2) - R(\tau_k + d/2)] R(\tau_k) + \frac{1}{2} [R(\tau_k - \tau_1 - d/2) - R(\tau_k - \tau_1 + d/2)] \cdot R(\tau_k - \tau_1) + \frac{1}{2} [R(\tau_k - d/2) - R(\tau_k + d/2)] \cdot R(\tau_k - \tau_1) \cos \phi_m + \frac{1}{2} [R(\tau_k - \tau_1 - d/2) - R(\tau_k - \tau_1 + d/2)] R(\tau_k) \cos \phi_m. \quad (6)$$

令  $D(\tau_k) = 0$ , 可以求出多路径延迟造成的码相位跟踪误差, 设定  $\tau_1 = 0.5$ ,  $\phi_m = 0^\circ, 180^\circ$ , 带宽为 8 MHz, 没有噪声, 图 3 分别画出了码相关器间隔为 1.0 chip 和 0.1 chip 的跟踪误差。

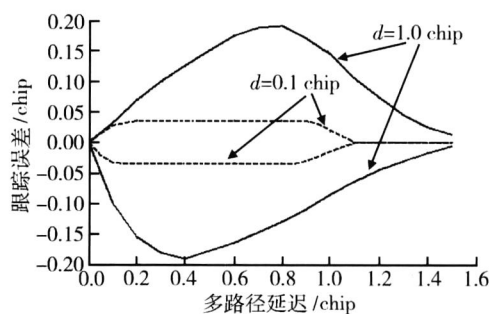


图 3 相关器间隔为 1.0 chip 和 0.1 chip 的码环跟踪误差

Fig 3 Tracking errors of code loop in spacing  
1.0 chip and 0.1 chip

图 3 中上面的曲线代表  $\phi_m = 0$  时的误差曲线, 下面代表  $\phi_m = 180$  时的曲线。从图 3 中可以清楚地看到相关器间隔为 1.0 chip 的跟踪误差很明显地大于相关器间隔为 0.1 chip 的跟踪误差, 这也说明减小相关器间隔可以减小多路径信号对跟踪的干扰, 窄相关技术是解决多路径干扰的有效手段。

## 3 微脉冲相关技术

微脉冲相关 (pulse aperture correlator, PAC) 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。

在接收机信号处理阶段消除多路径的技术方法有很多,大多都致力于改进 DLL 环的鉴相器算法,其中一类是以窄相关器为基础的技术,例如微脉冲相关技术,滤波相关器(strobe correlator)等。另一类是基于估计信号的参数(幅度、延迟、相位),比如 Van Nee 提出的多路径信号延迟锁定环(MEDLL)技术<sup>[4]</sup>,改进的 rake DLL(MRDLL)等。

接收机码跟踪时都是利用 C/A 码自相关函数是一个等腰三角形这一性质,等腰三角形 2 个等长的边是对称的,而直射信号和多路径信号组成的复合信号和本地 C/A 码的相关三角形并不具有对称性,所以使用原来的鉴相器会引入很大的误差,如图 4 所示,假定相关之前的带宽是无限的。

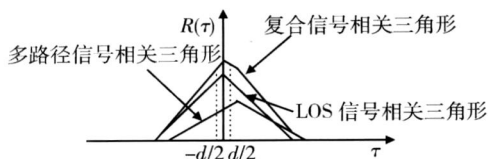


图 4 复合信号的相关特性

Fig 4 Correlative property of composite signal

从复合信号的相关三角形可以看出,由于三角形的不对称性,当即时相关器的码相位和输入信号码相位对齐时,超前和滞后相关器的输出也并不相等,这样就会认为相位没有对齐。微脉冲相关技术以窄相关器为基础,不需要估计信号参数,所以比较适合微弱信号处理,下面介绍这种方法。

码跟踪环使用 2 个超前相关器,1 个即时相关器,2 个滞后相关器,相关器之间延迟 0.05 chip。图 5 是 2 路超前和 2 路滞后相关器的示意图, $R(\tau)$  是

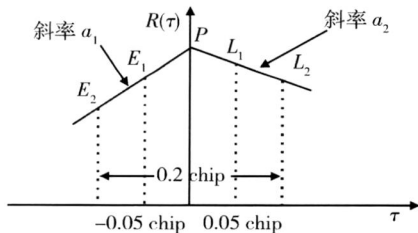


图 5 2 路超前和 2 路滞后相关器的示意图

Fig 5 Two early and late correlators

复信号和本地 C/A 码的互相关函数,假定相关之前的信号带宽是无限的。

$$a_1 = \frac{R_{E_1} - R_{E_2}}{d/2}, \quad a_2 = \frac{R_{L_2} - R_{L_1}}{d/2}, \quad (7)$$

式中: $R_{E_1}$  为相关器  $E_1$  的输出; $R_{E_2}$  为相关器  $E_2$  的输出; $R_{L_1}$  是相关器  $L_1$  的输出; $R_{L_2}$  为相关器  $L_2$  的输出; $d$  为相关器间距。引入补偿因子  $w$ :  $w = a_1 + a_2$ 。如果不存在多路径信号,即  $a_1 = -a_2$ ,  $w = 0$ , 如果存在多路径信号相关三角形不对称,则  $w \neq 0$ 。由于采用的是窄相关器,所以直线  $L_{E_1E_2}$  的斜率和  $L_{E_1P}$  的斜率应该是近似相等的,直线  $L_{PL_1}$  的斜率和  $L_{L_1L_2}$  的斜率也应该是近似相等的,正是利用这种性质,补偿因子可以用来补偿  $R_{L_1}$  的值,消除多路径信号对相关三角形的不对称影响。用补偿因子补偿后的相关值  $R_{L_1}$  可以用公式  $R_{L_1} = R_{L_1} - wd/2$  计算。

使用超前减滞后算法 DLL 鉴相器的鉴相函数变为

$$\begin{aligned} D(\tau) &= R_{E_1} - R_{L_1} = R_{E_1} - (R_{L_1} - wd/2) = \\ &= R_{E_1} - R_{L_1} + (R_{E_1} - R_{E_2} + R_{L_2} - R_{L_1}) = \\ &= 2(R_{E_1} - R_{L_1}) - (R_{E_2} - R_{L_2}). \end{aligned} \quad (8)$$

PAC 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 PAC 鉴相函数。延迟大于相关函数的有效区域多路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路径信号才会引起鉴相误差。PAC 鉴相器是 2 组窄相关器相关函数的线性函数,可以消除更多的多路径信号,图 6 是无限带宽时相关器间距分别为 0.1 chip 和 0.2 chip 的鉴相器输出(超前减滞后)。

PAC 鉴相器的归一化输出可以用图 7 表示。从图中可以看到延迟在区间  $[0.1, 0.9]$  和  $[-0.9, -0.1]$  的多路径信号将被消除,当然多路径信号的延迟只能大于 0,也就是 PAC 鉴相器只有在多路径信号延迟处于区间  $[0, 0.1]$  和  $[0.9, 1.1]$  时才会受影响,虽然 PAC 鉴相器没有消除所有的多路径干扰,但是和普通的窄相关器比较,性能还是有很大提高。使用 PAC 的跟踪环路,伪距测量精度同标准的宽相关器相比可以提高 4 倍,同窄相关器相比可以提高 2 倍,是一种性能非常好的抗多路径技术。

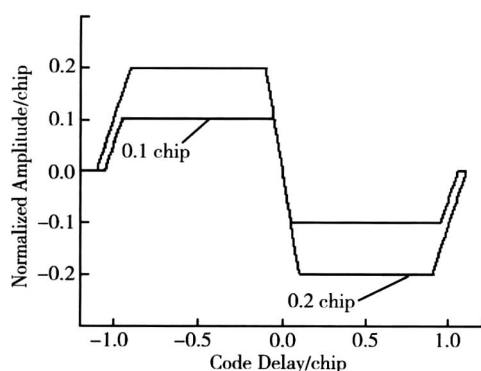


图6 相关器间距为0.1 chip和0.2 chip的超前减滞后鉴相器输出

Fig. 6 Early minus late discriminator of spacing 0.1 chip and 0.2 chip

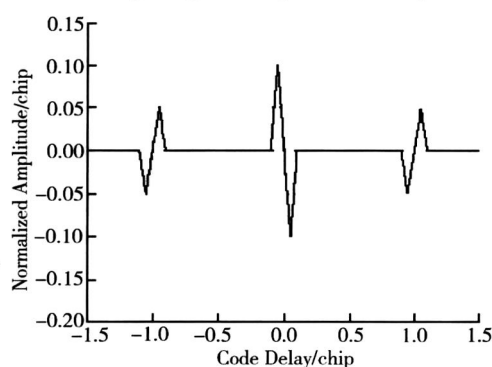


图7 PAC鉴相器的归一化输出

Fig. 7 PAC correlation in normalize

图8是在无噪声、无限带宽条件下,分别使用标准宽相关器、窄相关器和PAC相关器时,多路径信号对于跟踪引入的误差(理论上的误差)。

## 4 结 束 语

本文从GPS接收机内部结构入手,给出了GPS

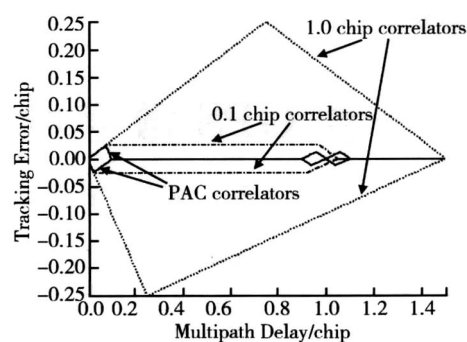


图8 多路径信号延迟对使用3种相关器的跟踪误差

Fig. 8 Tracking errors of three correlators because of the delay of multipath signal

接收机码和载波跟踪环的功能以及多路径信号对码跟踪精度的影响,详细分析了PAC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。从多路径信号延迟与跟踪误差的关系曲线上看,PAC相关器要比标准相关器和窄相关器占有明显的优势,可以有效地减弱强衰减环境中的多路径干扰。

## 参考文献:

- [1] 邱致和,王万义. GPS原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2002
- [2] Heung Choi, Deuk Jae Cho, Sang Jun Yun, *et al*. A Novel Weak Signal Acquisition Scheme for Assisted GPS[J]. *ION GPS 2002*, (24): 177-183.
- [3] BEHRENS R, SCHARF L. Signal Processing Applications of Oblique Projection Operators[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(6): 1413-1424.
- [4] TOWNSEND, VAN NEE, PREMAMADHAN I, *et al*. Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop[J]. *Journal of Navigation*, 1995, 42(3): 503-514.