

# 消除 GPS 多径误差的重构相关曲线法研究

刘军民<sup>\*1</sup>, 彭世荣<sup>1</sup>, 吴振宇<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 创新实验学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 无论是单条或者多条多径信号, 都会对 GPS 测量造成主要的和难以克服的多径误差. 多径误差的直接表现就是使得 GPS 接收机输入信号与本地 C/A 码发生器复制信号的相关曲线的峰值点发生偏移. 为此, 以相关曲线峰值点偏移特征为研究对象, 提出一种消除多径效应引起的 GPS 伪距测量误差的新方法. 该方法通过重构相关曲线, 使其峰值点与直达信号的峰值点位于同一相关延迟点上, 并使二者相关码片的宽度相等, 从而消除延迟锁定环 (DLL) 的跟踪误差. 仿真结果表明, 该方法简单有效.

**关键词:** GPS; 多径误差; 相关峰值; 重构

**中图分类号:** TN927 **文献标志码:** A

## 0 引言

GPS 系统包含许多影响精度的误差因素, 主要有卫星时钟误差、星历误差、电离层误差、对流层延迟误差、接收机钟差、多径误差、热噪声等<sup>[1]</sup>. 差分技术可消除上述大部分误差, 但不能消除热噪声和多径误差. 热噪声引起的误差只有毫米级, 可忽略不计<sup>[2]</sup>. 因此, 多径误差就成为 GPS 测量中的主要误差源, GPS 定位系统的抗多径问题也成为研究热点.

GPS 系统定位测距通常采用伪码跟踪延迟锁定环 (DLL) 技术. 以往的抗多径方法都集中在 DLL 技术层面, 主要有窄相关技术<sup>[1]</sup>、最大似然求解法<sup>[3]</sup>、多径估计求解 (MEDLL) 法<sup>[4]</sup> 等, 这些方法运算量大, 精度不高. 本文以复合信号的相关峰值与直达信号的相关峰值是否在同一相关延迟点上为判断依据, 通过重构或再重构相关曲线, 提出一种消除多径误差的新方法.

## 1 多径引起的伪码跟踪误差分析

GPS 接收机收到的信号通常包括直达信号和反射信号. 反射信号来自不同路径, 所以统称为多径信号. 忽略导航数据与噪声干扰, 接收机的复

合信号可表示为<sup>[5]</sup>

$$r(t) = \sum_{i=0}^N a_i c(t - \tau_i) \cos(\omega t + \theta_i) \quad (1)$$

式中:  $c(t)$  为 GPS 扩频码,  $a_i$ 、 $\tau_i$ 、 $\theta_i$  分别为第  $i$  路信号的幅度、延迟和相位,  $N$  为信号总路数.  $i=0$  对应直达信号, 其他为反射信号.

复合信号通过接收机的 PLL 电路稳定后送入跟踪延迟锁定环, 并与接收机本地 C/A 码发生器的数字复制信号做相关运算, 经高频滤波后得到的输出信号 (不考虑 PLL 的误差) 可表示为

$$R_p(\tau) = \sum_{i=0}^N \frac{a_i}{2} R(\tau - \Delta\tau) \cos \theta_e \quad (2)$$

式中:  $\tau$  为延迟跟踪误差,  $\Delta\tau = \tau_0 - \tau_i$ ;  $\theta_e = \theta_i - \theta_0$ .  $R(\tau)$  为 GPS 扩频码的相关函数,

$$R(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{|\tau|}{T_c}; & |\tau| \leq T_c \\ 0; & |\tau| > T_c \end{cases} \quad (3)$$

其中  $T_c$  为 GPS 扩频码的码间宽度. 在延迟跟踪环中, 复合信号的早相关与迟相关输出信号为

$$R_e(\tau) = \sum_{i=0}^N \frac{a_i}{2} R(\tau - \Delta\tau + \tau_d) \cos \theta_e \quad (4a)$$

$$R_l(\tau) = \sum_{i=0}^N \frac{a_i}{2} R(\tau - \Delta\tau - \tau_d) \cos \theta_e \quad (4b)$$

式中:  $\tau_d$  为本机振荡频率产生的扩频码的提前信

收稿日期: 2006-05-19; 修回日期: 2008-03-05.  
作者简介: 刘军民\* (1957-), 男, 教授.

号时间超前量或延迟信号时间延迟量. GPS 接收机的鉴相器输出为

$$D(\tau) = \sum_{i=0}^N \frac{a_i}{2} [R(\tau - \Delta\tau + \tau_d) - R(\tau - \Delta\tau - \tau_d)] \cos \theta_e \quad (5)$$

式(4a)、(4b)和(5)表明,伪码测量中的多径误差取决于多径信号相对直达信号的幅值、延迟时间与相位. 无多径信号时,  $\tau = 0$  为鉴相器输出过零点, 对应时刻为理想相关函数的峰值点, 伪距误差为零. 存在多径信号时, 相关峰值点的偏离使鉴相器的过零点发生偏移, 即鉴相器的过零点在  $\tau \neq 0$  处, 从而造成伪距误差. 多径信号与直达信号的相对相位  $\theta_e$  分布于  $[0, 2\pi]$ , 所以相关器的输出可正可负, 并且当  $\theta_e = 0$  或  $\theta_e = \pi$  时多径信号对直达信号的影响最为严重, 其他相位时, 误差介于二者之间. 由于相关函数为负数时可以通过乘以  $-1$  使其转为正数, 对减小多径误差方法的性能研究, 通常用多径信号的相对幅值与延迟计算多径误差的最大值来衡量<sup>[6]</sup>. 本文只讨论  $\theta_e = 0$  的情况(其他情况的方法类同). 根据式(2)可得  $\theta_e = 0$  时准相关器的输出为

$$R_p(\tau) = \sum_{i=0}^N \frac{a_i}{2} R(\tau - \Delta\tau) \quad (6)$$

由以上分析可见, 多径造成伪距误差的根本原因是多径信号相关峰值的偏移导致接收机收到的复合信号的相关曲线发生畸变, 甚至使其相关峰值发生偏移<sup>[1]</sup>.

## 2 消除多径误差的重构相关曲线法

综上所述, 多径信号造成伪距跟踪误差的根源是其相关峰值点的偏移. 由于多径信号是不确定的, 其峰值点的偏移量无法预知.

### 2.1 一条多径信号时的重构相关曲线法分析

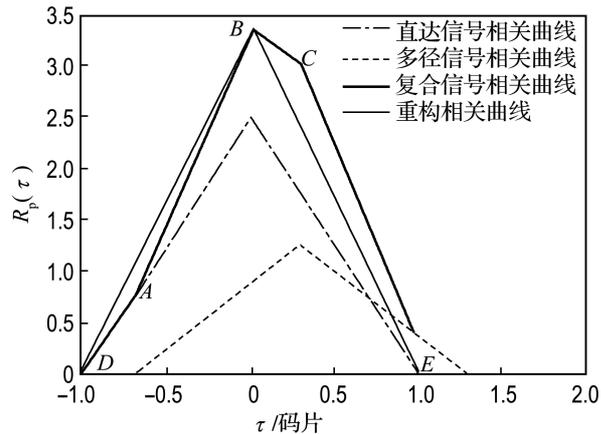
假设只有一条多径信号. 将式(3)  $\tau$  轴用基码数作单位, 由式(6)可得简化的直达信号和多径信号的相关函数分别为

$$R_0(\tau) = \begin{cases} a_0(\tau + 1); & -1 < \tau < 0 \\ -a_0(\tau - 1); & 0 < \tau < 1 \end{cases} \quad (7)$$

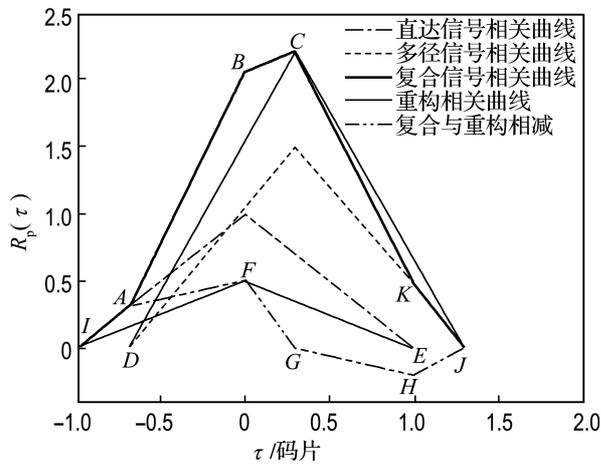
$$R_1(\tau) = \begin{cases} a_1(\tau - \tau_1 + 1); & \tau_1 - 1 \leq \tau \leq \tau_1 \\ -a_1(\tau - \tau_1 - 1); & \tau_1 \leq \tau \leq \tau_1 + 1 \end{cases} \quad (8)$$

根据式(6)~(8)得到复合信号、直达信号以及多径信号的相关函数曲线如图 1 所示, 复合信号相关曲线上 AB 与 BC 段的斜率分别为

$$\begin{cases} k_{AB} = a_0 + a_1 \\ k_{BC} = -a_0 + a_1 \end{cases} \quad (9)$$



(a)  $a_1 < a_0$



(b)  $a_1 > a_0$

图 1 一条多径信号时相关曲线的重构

Fig. 1 Reconstructing of correlation curve with one multi-path signal

由图 1(a)和式(9)可知, 当  $a_1 < a_0$  时,  $k_{AB} > 0, k_{BC} < 0$ , B点为复合信号的相关峰值点, 且该点位于  $\tau = 0$  处, 即复合信号的相关峰值与直达信号的相关峰值在同一相关延迟点上. 此时以点 B 为顶点, 以其对应的相关延迟为中心, 左右各拓宽一个码片宽度重构相关曲线, 如图 1(a)中的曲线 DBE. 该曲线与直达信号的相关曲线只是幅值不同, 而相关延迟误差  $\tau = 0$ . 由此得到的鉴相函数过零点处对应的跟踪误差为零, 有效地消除了多径干扰.

当  $a_1 > a_0$  时, 直达信号、多径信号以及复合信号的相关曲线如图 1(b)所示. 由式(9)可知, 此时  $k_{AB} > 0, k_{BC} > 0$ , C点为复合信号的相关峰值点. 此时点 C 与直达信号的相关峰值不在同一相关延迟

点上. 以峰值点 C 为顶点, 以其对应的相关延迟为中心, 向左右各拓宽一个码片, 得重构的相关曲线, 如图 1(b) 曲线 DCJ 所示, 曲线各段斜率为

$$\begin{cases} k_{DC} = a_x + a_1 \\ k_{CJ} = -a_x + a_1 \end{cases} \quad (10)$$

其中  $a_x$  为对应多径信号相关曲线峰值点时刻的直达信号相关曲线的幅值, 代入式(7)得

$$a_x = R_0(\tau) |_{\tau=\tau_1} = -a_0\tau + a_0 |_{\tau=\tau_1} = a_0(1 - \tau_1) \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得

$$\begin{cases} k_{DC} = a_0(1 - \tau_1) + a_1 \\ k_{CJ} = a_0(\tau_1 - 1) + a_1 \end{cases} \quad (12)$$

比较式(12)和(9)可知:  $k_{BC} < k_{DC} < k_{AB}$ , 即  $k_{AB} - k_{DC} > 0, k_{BC} - k_{DC} < 0$ , 所以, 将复合信号相关曲线与重构曲线相减得图 1(b) 的曲线 IAFGHJ, 该曲线峰值点 F 位于  $\tau = 0$  处. 以 F 为顶点, 以其对应的相关延迟为中心左右对称拓宽一个码片, 得到再次重构的相关曲线, 即图 1(b) 的 IFE. 再次重构的相关曲线与直达信号的相关曲线只是幅值不同, 对应的相关延迟误差均为零, 即鉴相函数的过零点处在  $\tau = 0$  点, 有效地消除了多径干扰.

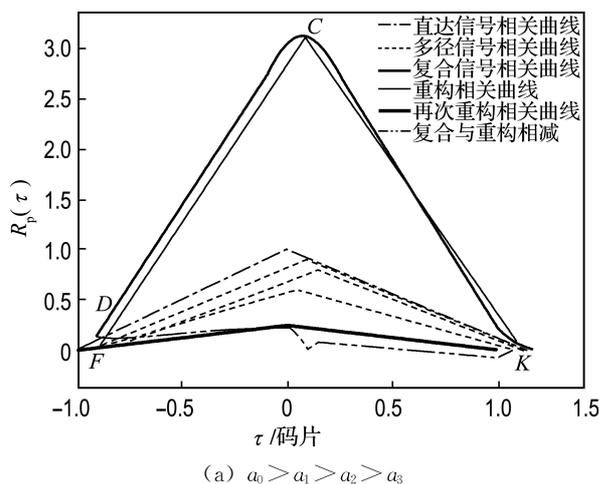
### 2.2 N 条多径信号时的重构相关曲线法分析

实际中多径信号的路数是不确定的. 当有 N 条多径信号时, 由式(7)、(8)同理可得第  $i(0 \leq i \leq N)$  条多径信号的相关函数为

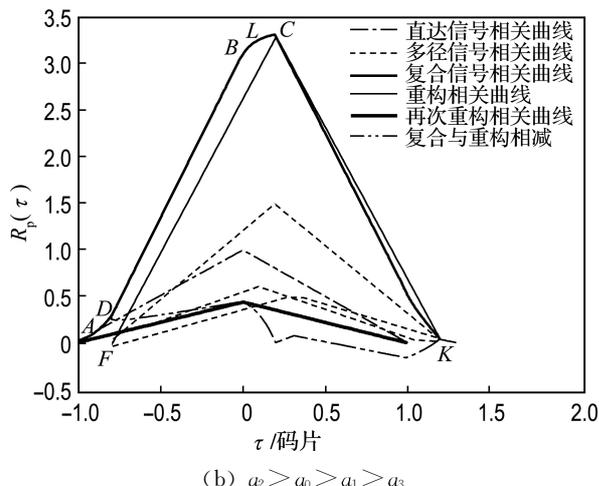
$$R_i(\tau) = \begin{cases} a_i(\tau - \tau_i + 1); & \tau_i - 1 \leq \tau \leq \tau_i \\ -a_i(\tau - \tau_i - 1); & \tau_i \leq \tau \leq 1 + \tau_i \end{cases} \quad (13)$$

仍以复合信号的相关峰值与直达信号的相关峰值是否在同一相关延迟点上为判断依据. 当二者的相关峰值在同一相关延迟点上, 即相关延迟点没有发生偏移时, 其分析处理方法与图 1(a) 相同. 但是, 无论多径信号的幅值全部小于或者部分大于直达信号的幅值, 都有可能使复合信号的相关峰值与直达信号的相关峰值在不同的相关延迟点上, 即最大相关延迟点发生偏移, 且复合信号的峰值点必定在其中某一条多径信号的相关延迟点上, 如图 2 所示.

下面仅以 3 条多径信号为例, 分析  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$  且  $a_2 > a_0 > a_1 > a_3$  时的情况. 如图 2(b) 所示, 复合信号相关曲线的峰值点 C 在  $\tau_2$  处, 此时以 C 为顶点, 以其相关延迟点为中心, 左右各拓宽一个



(a)  $a_0 > a_1 > a_2 > a_3$



(b)  $a_2 > a_0 > a_1 > a_3$

图 2 多条多径信号时相关曲线的重构

Fig. 2 Reconstructing of correlation curve with several multipath signals

码片, 得重构的相关曲线如图 2(b) 中的 FCK 曲线, 与一条多径信号时的处理方法相同, 分析得

$$k_{FC} = a_2 + R_0(\tau_2) + R_1(\tau_2) + R_3(\tau_2) = a_1 + a_2 + a_3 + a_0(1 - \tau_2) + a_1(\tau_1 - \tau_2) + a_3(\tau_2 - \tau_3) \quad (14)$$

$$\begin{cases} k_{DB} = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 \\ k_{BL} = a_1 + a_2 + a_3 - a_0 \\ k_{LC} = a_2 + a_3 - a_0 - a_1 \end{cases} \quad (15)$$

由  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$  和  $a_2 > a_0 > a_1 > a_3$  得

$$k_{LC} < k_{BL} < k_{FC} < k_{DB} \quad (16)$$

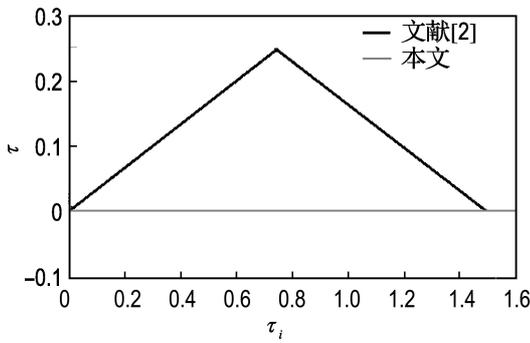
将复合信号相关曲线与重构的相关曲线相减, 可使  $\tau = 0$  处为曲线峰值点, 并以此峰值点为顶点, 以其相关延迟点为中心, 左右各拓宽一个码片, 得再次重构的相关曲线, 其与直达信号的相关曲线只是幅值不同, 而相关延迟误差  $\tau = 0$ , 即鉴相函数的过零点处跟踪误差为零, 消除了多径干扰.

### 3 跟踪误差的仿真

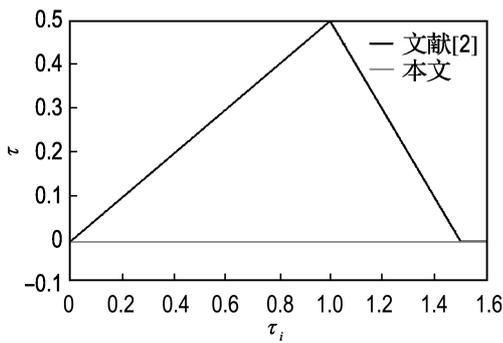
为了验证本文方法的有效性,在此以 C/A 码为例,设相关带宽为 0.5 chip 进行仿真.

#### 3.1 一条多径信号时的跟踪误差

设仅有一条多径信号,其幅值分别取为 0.5 和 1.2,相对直达信号的相位为 0.跟踪误差随多径延迟变化的仿真结果如图 3 所示.作为比较,图中同时给出了文献[2]采用传统的跟踪环时的仿真结果.图 3 表明,当多径信号相对直达信号的延迟小于  $1.5T_c$  时,传统的跟踪环有跟踪误差,而且误差在该区域内呈对称三角分布.当相对延迟等于或大于  $1.5T_c$  时,直达信号与多径信号的相关性将消失,多径信号不产生伪码跟踪误差<sup>[2]</sup>.运用本文相关峰值重构相关曲线法后,多径信号的跟踪误差始终为零,即无多径误差.



(a)  $a=0.5$



(b)  $a=1.2$

图 3 多径跟踪误差曲线

Fig. 3 Tracking error curve for one multi-path signal

#### 3.2 多条多径信号时的跟踪误差

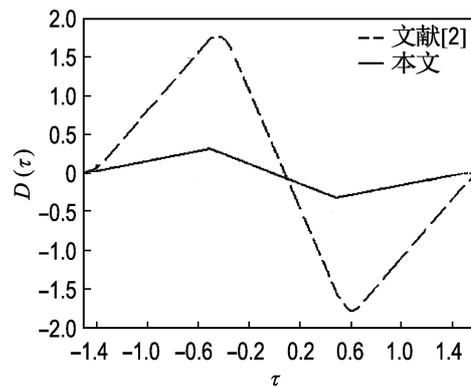
当鉴相器的输出  $D(\tau) = 0$  时对应的  $\tau$  为接收机复制信号与 GPS 信号之间的延迟跟踪误差,其值越小,说明鉴相器输出的误差越小,定位精度就越高.当  $\tau$  为零时,误差为零.下面任意选取表 1 所示的 6 种样本信号进行仿真.

表 1 样本信号的幅值与延迟时间

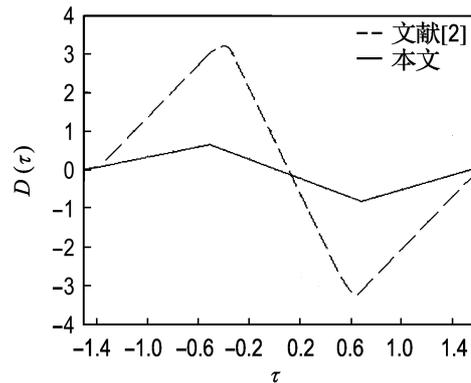
Tab. 1 Amplitude and delay time of sample signal

信号	幅值 ( $a_i$ )	延时 ( $\tau_i$ )
直达信号	1	0
多径 1	0.7	0.03
多径 2	1.2	0.04
多径 3	0.5	0.05
多径 4	0.4	0.06
多径 5	0.3	0.07
多径 6	0.2	0.08

当多径信号的幅值小于直达信号的幅值时,选取表 1 中的直达信号与多径信号 1、3、4、5、6 仿真计算的鉴相器输出如图 4(a) 所示.结果表明,传统接收机跟踪环的鉴相器输出零点对应的跟踪误差  $\tau$  约为 0.08 chip,多径效应造成了延迟锁定环(DLL)的跟踪误差<sup>[2]</sup>.采用本文方法重构相关曲线后, $D(\tau) = 0$  点位于跟踪误差  $\tau = 0$  处,即消除了多径干扰造成的误差.



(a) 直达信号及多径信号 1、3、4、5、6



(b) 所有信号

图 4 多条多径信号时鉴相器的输出误差  
Fig. 4 The output error from discrimination for several multi-path signals

当多径信号的幅值至少有一条大于直达信号的幅值时,选取表 1 列举的所有信号仿真计算的

鉴相器输出如图4(b)所示。

由图4(b)可见,传统接收机的跟踪环鉴相器输出零点对应的跟踪误差 $\tau$ 约为0.12 chip,造成了延迟锁定环(DLL)的跟踪误差,而采用本文方法后, $D(\tau)=0$ 时,跟踪误差 $\tau=0$ ,即消除了多径干扰带来的误差。

#### 4 结 语

随着GPS技术的发展,GPS系统的应用也在不断扩大,精度要求也越来越高。由于多径效应是客观存在的,而且是复杂的和难以预知的。克服多径干扰一直是国内外学术界所重视的研究问题。本文提出的方法从理论上不仅有效地消除了GPS多径造成的误差,计算量小,易于实现,重要的是这一方法只基于接收机复合信号的相关峰值,无需了解多径信号的特点,克服了预测多径信号特性的困难,同时对于其他无线通信系统克服多径效应也具有参考价值。本文仅给出了3条多径信号的详细分析,对于任意数量的多径情况,还需做进一步的分析。

#### 参考文献:

[1] VAN A J, FENTON P C, FORD T J. Theory and

performance of narrow correlate spacing in a GPS receiver [J]. *Navigation*, 1992, **39**(3):265-283

[2] 杨铁军,黄顺吉. GPS接收机跟踪环的多径误差分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2002, **24**(9):13-15

[3] SOUBIELLE J. GPS positioning in a multipath environment [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, **50**(1):141-150

[4] TOWNSEND B, VAN NEE D J R, FENTON P, *et al.* Performance evaluation of the multipath estimating delay lock loop [C] // *Proceedings of the National Technical Meeting, Institute of the Navigation*. California: Institute of the Navigation, 1995:227-283

[5] TOWNSEND R, FENTON P. A practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in a L1 GPS receiver [C] // *Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. Salt Lake City: Institute of the Navigation, 1994:143-148

[6] SLEEWAEGEN J M, BOON F. Mitigating short-delay multipath: A promising new technique [C] // *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. (ION GPS 2001). Salt Lake City: Institute of the Navigation, 2001:204-213

## Research on reconstructing correlation-function curve method to eliminate GPS multipath error

LIU Jun-min<sup>\*1</sup>, PENG Shi-rong<sup>1</sup>, WU Zhen-yu<sup>2</sup>

( 1. School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Innovation Experiment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** No matter single or multiple multi-path signals, they all can cause the crucial and insurmountable multi-path errors in the GPS measurements. The most straightforward influence produced by multi-path error is that there is an excursion of correlated curve peak points existing between the GPS receiver input signal and the local C/A code generator reproductive signal. Taking correlation-curve peak point excursion characteristics as an investigation object, a new method is proposed to eliminate the GPS pseudo-range measurement error induced by multi-path effect. Via reconstruction of the correlated curves, this method ensures that the correlation-peaks of reconstructed signal and line of sight (LOS) lie on the same delay point, and makes both signals have the same width as well, consequently get rid of the delay locked loop (DLL) tracing error. The simulation results testify that this new method is simple and efficient.

**Key words:** GPS; multi-path errors; correlation-peak; reconstructing