

文章编号:1001-2486(2011)01-0072-04

一种基于误差包络的多径抑制性能评估准则*

刘荟萃^{1,2},程肖¹,倪少杰²,王飞雪²

(1. 北京航天飞行控制中心,北京 100094;2. 国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:多径误差是全球卫星导航系统性能提升的主要障碍之一,相应地多径抑制技术也成为导航领域的研究重点,但是一直缺乏定量解析的多径抑制技术性能评估准则。提出了三项基于误差包络的多径抑制技术性能评估指标;首次推导了 ELS 技术和 Double-delta 技术的码跟踪多径误差公式,并结合已有的窄相关技术误差公式,给出了以上三种多径抑制技术的性能评估指标计算公式。结果可用于指导全球卫星导航系统接收机中多径抑制技术的参数设计。

关键词:全球卫星导航系统;多径;窄相关技术;ELS 技术;Double-delta 技术;评估
中图分类号:TN914.42 **文献标识码:**A

Evaluation of Multipath Mitigation Performances Based on Error Envelope

LIU Hui-cui^{1,2}, Cheng Xiao¹, NI Shao-jie², WANG Fei-xue²

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Multipath error is one of the last obstacles for GNSS performance improvement, and accordingly multipath mitigation techniques are developed rapidly. However, there is a lack of evaluation rules for the multipath mitigation performance. Three evaluation criteria based on the multipath error envelope were proposed; the multipath error formulae for both ELS technique and Double-delta technique were derived for the first time; hence calculation expressions of the multipath mitigation performance evaluation for the above two techniques and narrow correlator technique were presented. This research can be used as a guideline for the parameter design of multipath mitigation techniques in GNSS receiver.

Key words: GNSS; multipath; narrow correlator; ELS technique; double-delta technique; evaluation

随着全球卫星导航系统(GNSS)相关技术的发展,多径信号对测距精度的影响日益凸显,成为系统的主要误差源之一^[1]。众多多径误差抑制技术^[2-8]不断地被开发出来。但与多径抑制技术本身的研发速度相比,对于多径抑制技术性能评估准则的研究要滞后得多。目前常用的多径抑制性能评估方法主要有两种:多径误差的试验测定和误差包络分析。

前一种方法常用于两种不同多径抑制技术的性能比较,采用零基线测量方法获得同样的接收信号经不同多径抑制技术处理后的多径误差^[2],从而对两种技术的多径抑制性能进行比较。但是由于多径信号与接收天线的周围环境、运动状态及方向图等有关,在不同的试验条件下多径误差所表现出来的特点也是不同的,因此这种方法得到的实验结果只具有相对的比较意义,而不能用于评估某种技术的绝对性能。

多径误差包络^[2]反映了在给定的接收条件之

下一路多径信号所能引入的最大误差和最小误差,是对一个系统的多径抑制性能最直观的描述。但是多径误差包络本质上只是两条曲线,且其特性与多径信号的参数、接收机跟踪环路的结构和参数等因素密切相关,因此必须从中提取能够反映信号与接收机参数变化的量化解析指标,才能用于实际的多径抑制性能评估。文献[9]提出了误差包络面积的概念,但是在具体使用时仍然停留在定性分析的层面;而且仅包络面积一项,尚不能对误差包络的特点进行全面描述,也无法适应不同应用背景对多径抑制性能评估的不同需求。

1 基于多径误差包络的多径抑制性能评估指标

1.1 多径误差包络的定义

多径误差包络以只有一路镜面反射多径存在的信号模型为基础。此时,GNSS 的接收信号可以

* 收稿日期:2010-03-29

基金项目:中国卫星导航学术年会青年优秀论文资助项目(CSNC2010-QY-020)

作者简介:刘荟萃(1983—),女,工程师。

表示为:

$$r(t) = Ap(t - \tau_0)\cos(\phi_0) + A\alpha_1 p(t - \tau_0 - \Delta\tau_1)\cos(\phi_0 + \Delta\phi_1) \quad (1)$$

其中 $p(t)$ 为接收信号中码片宽度为 T_c 的伪随机码信号, $\frac{A^2}{2}$ 、 τ_0 和 ϕ_0 分别表示直达信号的功率、到达接收机时的时间延迟和载波初相, 而 α_1 、 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\phi_1$ 分别是多径信号相对于直达信号的功率、时延和载波相位。

接收信号与接收机中的本地参考信号 $p(t - \hat{\tau}_0)$ 进行相关累加操作, 则得到以下形式的输出信号:

$$R_s(t) = AT[R(\epsilon)\cos(\phi_0) + \alpha_1 R(\epsilon + \Delta\tau_1)\cos(\phi_0 + \Delta\phi_1)] \quad (2)$$

其中 T 表示相关累加的时间长度; $\epsilon = \tau_0 - \hat{\tau}_0$ 为码跟踪误差; $R(\tau)$ 为 $p(t)$ 的自相关函数, 即

$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)p(t - \tau)dt$, 对于 BPSK 调制信号且忽略旁瓣的影响, $R(\tau)$ 可以表示为:

$$R(\tau) = \begin{cases} -\frac{1}{T_c}|\tau| + 1, & 0 \leq |\tau| \leq T_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$R(\tau)$ 是关于 $\tau = 0$ 左右对称的尖三角函数。利用其对称性, 传统的码跟踪环路 (DLL) 在接收机内部采用两个本地参考信号, 早码 $p(t - \hat{\tau}_0 - \frac{d}{2})$ 与迟码 $p(t - \hat{\tau}_0 + \frac{d}{2})$, 与接收信号进行相关, 其中 d 为 DLL 中的早、迟相关器的时间间隔, 称为相关间隔, 在传统 DLL 中取 $d = T_c$ 。当无多径信号存在时, 若早、迟码与接收信号的相关累加结果相等, 则 $\hat{\tau}_0 = \tau_0$, 码跟踪误差 $\epsilon = 0$ 。但是多径信号的存在使得接收信号与本地参考信号的相关函数发生形变而不再对称, 因此码跟踪误差 $\epsilon \neq 0$ 。文献 [10] 中给出了上述早迟结构 DLL 的多径误差公式

$$\epsilon(\alpha_1, \Delta\tau_1, \Delta\phi_1) = \begin{cases} \frac{\alpha_1 \Delta\tau_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{1 + \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}, & 0 < \Delta\tau_1 \leq \tau_L \\ \frac{\alpha_1 d}{2} \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c), & \tau_L < \Delta\tau_1 \leq \tau_H \\ \frac{\alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{2 - \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)} (\frac{d}{2} + T_c - \Delta\tau_1), & \tau_H < \Delta\tau_1 \leq T_c + \frac{d}{2} \\ 0, & \Delta\tau_1 > T_c + \frac{d}{2} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\tau_L = \frac{1 + \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{2} d$, $\tau_H = \frac{\alpha_1 d \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{2} + T_c - \frac{d}{2}$; ϕ_c 为接收机中载波跟踪环路 (PLL) 的载波相位。

由式 (4) 可知, 若 α_1 和 $\Delta\tau_1$ 一定, 满足 $\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c = 0$ (同相) 或 π (反相) 的多径信号所导致的码跟踪误差分别达到正的最大值和负的最大值。因此如果保持多径信号的相对功率 α_1 不变, 相对时延 $\Delta\tau_1$ 遍历所有关注的取值范围 $\Delta\tau_A \leq \Delta\tau_1 \leq \Delta\tau_B$ 时, 误差曲线 $\epsilon(\alpha_1, \Delta\tau_A \leq \Delta\tau_1 \leq \Delta\tau_B, 0)$ 和 $\epsilon(\alpha_1, \Delta\tau_A \leq \Delta\tau_1 \leq \Delta\tau_B, \pi)$ 便构成了多径误差包络。本文中取 $\Delta\tau_A = 0$, $\Delta\tau_B = 2T_c$, 如图 1 所示。

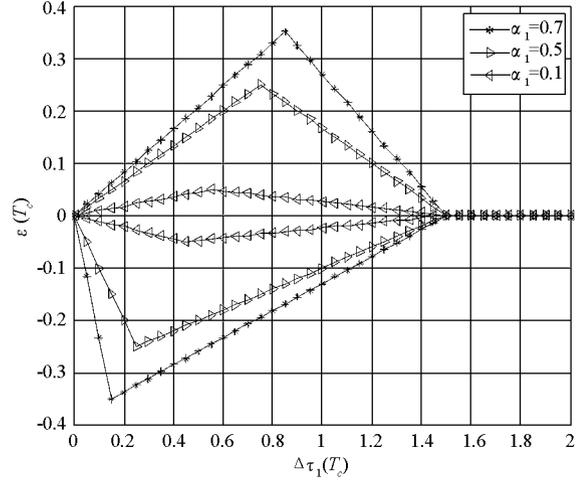


图 1 传统 DLL 的码跟踪误差包络

Fig. 1 Code-tracking-error-envelope of tradition DLL

1.2 多径抑制性能评估指标

多径误差包络反映了一种码跟踪环路对不同参数多径信号的敏感程度, 可以通过对误差包络的量化解析分析来建立对码跟踪环路多径抑制性能的评估标准。以下给出三种指标定义:

(1) 包络极值 $\text{Max}(\epsilon)$: 取多径误差包络中的最大绝对值作为评估指标。这个指标反映了固定相对功率的一路多径信号所能引入的码跟踪误差的极限值。

(2) 有效包络区间长度 $\text{Length}(\epsilon)$: 以取到非零误差时的 $\Delta\tau_1$ 的区间长度之和作为评估指标。这个指标反映了能够引入码跟踪误差的多径信号的时延范围。若特别认为绝对值小于某一固定值 $\tilde{\epsilon}$ ($\tilde{\epsilon} \geq 0$) 的多径误差可以被忽略不计, 则可以统计 $|\epsilon| \geq \tilde{\epsilon}$ 的区间长度之和, 称为以 $\tilde{\epsilon}$ 为准的有效包络区间长度。因此, 有效包络区间长度即为以 0 为准的有效包络区间长度。

需要注意的是在镜面反射多径模型中, 多径信号的时延与卫星仰角存在直接的关系^[10], 因此 $\text{Length}(\epsilon)$ 还可以反映在给定的接收条件下能够引入码跟踪误差的卫星仰角的范围。

(3) 包络面积 $\text{Area}(\epsilon)$: 以多径误差包络所包围的面积为指标。这个指标从积分的角度反映了误差包络的波形, 比包络极值和包络区间长度更

具有综合性。在实际应用中,不同时延的多径信号出现的概率可能不同,对系统性能的影响也不尽相同,因此可以将 $\Delta\tau_1$ 的取值范围划分为不同的时延区间,分别计算不同时延区间内的包络面积,再采用不同的权函数对分段包络面积进行加权求和,作为加权包络面积^[9]。包络面积是权函数恒为1的加权包络面积。

将上述定义代入式(4)即可得到早迟结构DLL的三项评估指标解析表达式:

$$\text{Max}(\varepsilon) = \frac{\alpha_1 d}{2} \quad (5)$$

$$\text{Length}(\varepsilon) = T_c + \frac{d}{2} \quad (6)$$

$$\text{Area}(\varepsilon) = \alpha_1 d \cdot \frac{4T_c - d}{4} \quad (7)$$

三项评估指标不仅从不同侧面对误差包络进行了描述,可以满足不同应用背景对多径抑制性能评估的需求,而且由式(5)~(7)可以看出,评估指标存在与接收机码跟踪环路参数之间的解析关系。因此这三项指标可以全面、定量地反映某种码跟踪环路的抑制性能。

2 三种常见多径抑制技术的多径抑制性能评估及比较

在上一节提出的三项评估指标基础上,以应用最为广泛的三种多径抑制技术(窄相关技术、ELS技术和Double-delta技术)为例,对其多径抑制性能进行评估及比较。

根据式(4),取较小的相关间隔有助于减小多径误差,基于这一特点,文献[2]提出了窄相关技术,通过将相关间隔减小到伪随机码的一个码片宽度以下来增强DLL的多径抑制性能。因此传统的DLL也被称为宽相关技术。窄相关技术并没有从本质上改变宽相关技术的DLL结构,因此其多径误差公式也可用式(4)表示。

ELS技术在窄相关技术的基础上进行了改进,又增加一对早码 $p(t - \hat{\tau}_0 - \frac{d}{2} - d_1)$ 和迟码 $p(t - \hat{\tau}_0 + \frac{d}{2} + d_2)$,4个本地参考信号的时间间隔满足 $d_1 + d_2 + d \leq T_c$ 。利用4个相关累加的结果可以获取同步时刻两侧的相关函数梯度信息,从而可以得到更为精确的对 τ_0 的估计值。根据ELS的原理,首次推导出其码跟踪多径误差公式为:

$$\varepsilon(\alpha_1, \Delta\tau_1, \Delta\phi_1) =$$

$$\begin{cases} \frac{\alpha_1 \Delta\tau_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{1 + \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}, & 0 < \Delta\tau_1 \leq \tau_A \\ \frac{\alpha_1 d(d_2 + d/2 - \Delta\tau_1) \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{2(d_2 + d/2) - (1 + \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)) d}, & \tau_A < \Delta\tau_1 \leq d_2 \\ \frac{\alpha_1 d(d_1 + d/2 - T_c + \Delta\tau_1) \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{4(d_1 + d/2) - 2d + \alpha_1 d \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}, & T_c - d_1 \leq \Delta\tau_1 \leq \tau_B \\ \frac{\alpha_1 (T_c - \Delta\tau_1) \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{2 - \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}, & \tau_B < \Delta\tau_1 \leq \tau_C \\ \frac{\alpha_1 d(-d_2 - d/2 - T_c + \Delta\tau_1) \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{4(d_2 + d/2) - 2d + \alpha_1 d \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}, & \tau_C < \Delta\tau_1 \leq T_c + d_2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\tau_A = \frac{1 + \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{2} d$, $\tau_B = \frac{\alpha_1 d \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{4} + T_c - \frac{d}{2}$, $\tau_C = -\frac{\alpha_1 d \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{4} + T_c + \frac{d}{2}$ 。

由于ELS技术的算法实现过程中存在大量的除法运算,从而限制了其在硬件中的可实现性^[11]。Double-delta技术在不改变多径抑制性能的基础上对ELS技术进行了改进^[11-14],使其易于在硬件中集成,并限制 $d_1 = d_2 = \frac{d}{2} \leq \frac{T_c}{4}$ 。在式

(8)中代入 $d_1 = d_2 = \frac{d}{2}$ 即可得到Double-delta技术的码跟踪误差:

$$\varepsilon(\alpha_1, \Delta\tau_1, \Delta\phi_1) = \hat{\tau} - \tau = \begin{cases} \frac{\alpha_1 \Delta\tau_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{1 + \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}, & 0 < \Delta\tau_1 \leq \tau_A \\ \frac{\alpha_1 (d - \Delta\tau_1) \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{1 - \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}, & \tau_A < \Delta\tau_1 \leq d \\ \frac{\alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{2 + \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)} (d - T_c + \Delta\tau_1), & T_c - d \leq \Delta\tau_1 \leq \tau_B \\ \frac{\alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{2 - \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)} (T_c - \Delta\tau_1), & \tau_B < \Delta\tau_1 \leq \tau_C \\ \frac{\alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)}{2 + \alpha_1 \cos(\phi_0 + \Delta\phi_1 - \phi_c)} (-d - T_c + \Delta\tau_1), & \tau_C < \Delta\tau_1 \leq T_c + d \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

图2给出了几组不同相关间隔取值下窄相关技术、ELS技术和Double-delta技术的码跟踪误差包络。由图中可以看出三种多径抑制技术对于不同时延的多径信号具有不同的抑制能力。结合多径抑制性能评估指标的定义容易得到窄相关技术、ELS技术以及Double-delta技术的三项多径抑制性能指标计算公式如表1所示。由表可以看出在多径相对功率固定的情况下:

(1)三种多径抑制技术包络极值的计算公式相同且与相关间隔 d 成正比例关系,因此通过减

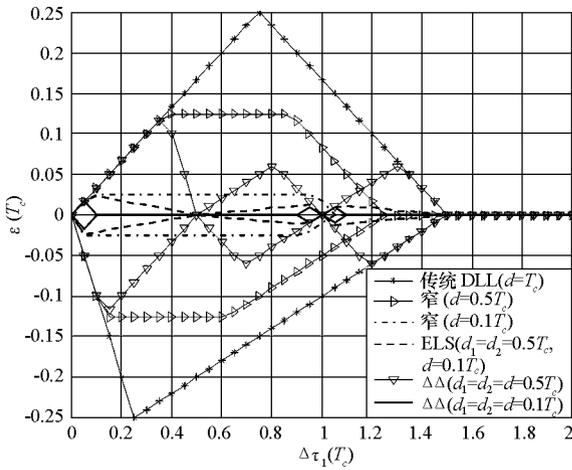


图 2 三种多径抑制技术的码跟踪误差包络比较($\alpha_1 = 0.5$)

Fig.2 Code-tracking-error-envelope comparison of three multipath mitigation techniques($\alpha_1 = 0.5$)

小相关间隔可以获得包络极值性能的提升。需要注意的是,ELS 技术的包络极值与 d_1 和 d_2 无关。

(2)对于三种多径抑制技术,当逐渐减小相关间隔(包括 d 、 d_1 和 d_2)时,有效包络区间长度都逐渐减小;窄相关技术以 T_c 为下限,但是其他两种技术理论上可以达到 0。

(3)包络面积作为包络极值和有效包络区间长度的综合表现,随着相关间隔的减小而具有平方律的下降速度,且三种技术的包络面积都以 0 为理论下限。

表 1 三种多径抑制技术的性能评估指标对比

Tab.1 Performance comparison of three multipath mitigation techniques

	窄相关技术 ($d < T_c$)	ELS 技术 ($d_1 + d_2 + d \leq T_c$)	Double-delta 技术($d_1 = d_2 = \frac{d}{2} \leq \frac{T_c}{4}$)
Max(ϵ)	$\frac{\alpha_1 d}{2}$	$\frac{\alpha_1 d}{2}$	$\frac{\alpha_1 d}{2}$
Length(ϵ)	$T_c + \frac{d}{2}$	$d_1 + 2d_2 + \frac{3d}{2}$	$3d$
Area(ϵ)	$\alpha_1 d \cdot \frac{4T_c - d}{4}$	$\alpha_1 d \cdot \frac{3d_2 + d_1 + 2d}{4}$	$\alpha_1 d \cdot d$

3 结论

新的多径抑制技术性能评估准则以多径误差包络为基础引申出了三项评估指标,根据窄相关技术、ELS 技术和 Double-delta 技术的多径误差公式给出了三种技术的评估指标计算公式。根据以上公式,码跟踪环路的结构、参数(相关间隔)与多径抑制性能之间的关系得到了直观、解析地反映,因此可以为 GNSS 接收机的多径抑制技术参数设计提供理论支持。

需要强调的是,本文的以上结论均是在假设信道带宽无限的前提下得到的。在实际的工程实现中,信道带宽不仅是有限的,而且存在非理想的幅频和相频响应。与无限带宽时相比,此时每种多径抑制技术的性能均发生变化,例如包络极值等三项指标不再随着相关间隔的减小而单调减小。在这种情况下,由于多径信号参数、相关间隔和信道参数等耦合在一起,致使难以得到以上三种评估指标的理论公式,可以通过数值计算的方法进行分析^[15]。

参考文献:

- [1] Garin L J. The “Shaping Correlator”, Novel Multipath Mitigation Technique Applicable to Galileo BOC(1,1) Modulation Waveforms in High Volume Markets [C]//Proceedings of the European Navigation Conference, 2005.
- [2] Townsend B R, Van Nee R D J, Fenton P C, et al. Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop [C]//Proceedings of the Institute of Navigation NTM, 1995:277 – 283.
- [3] Braasch M S. Multipath Effects, Global Positioning System: Theory and Applications (Volume 1) [M]. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1995: 547 – 568.
- [4] Van Dierendonck A J, Fenton P, Ford T. Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver [J]. Navigation Journal of the Institute of Navigation, 1992, 39(3): 265 – 283.
- [5] Townsend B, Fenton P. 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, 1994: 143 – 148.
- [6] Van Nee R D J. The Multipath Estimating Delay Lock Loop [C]//Proceedings of IEEE Second Internal Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 1992: 39 – 42.
- [7] Fenton P C, Jones J. The Theory and Performance of NovAtel Inc.’s Vision Correlator [C]//Proceedings of the Institute of Navigation GNSS, 2005: 2178 – 2186.
- [8] Insigler M, Eissfeller B. Comparison of Multipath Mitigation Techniques with Consideration of Future Signal Structures [C]//Proceedings of the 16th International technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2003: 2584 – 2592.
- [9] Insigler M. Criteria for GNSS Multipath Performance Assessment [C]//Proceedings of the 18th International technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, 2005: 166 – 177.
- [10] 张孟阳, 吕保雄, 宋文森. GPS 系统中的多径效应分析 [J]. 电子学报, 1998, 26(3): 10 – 14.
- [11] Jason J, Fenton P, Smith B. Theory and Performance of the Pulse Aperture Correlator [DB/CD]. <http://www.novatel.com/Documents/Papers/PAC.pdf>.
- [12] McGraw G A, Braasch M S. GNSS Multipath Mitigation Using Gated and High Resolution Correlator Concepts [C]//Proceedings of the Institute of Navigation NTM, 1999: 333 – 342.
- [13] Garin L, van Diggelen F, Rousseau J M. Strobe & Edge Correlator Multipath Mitigation for Code [C]//Proceedings of the 9th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, 1996: 657 – 664.
- [14] Hatch R R, Keegan R G. Leica’s Code and Phase Multipath Mitigation Techniques [C]//Proceedings of the Institute of Navigation NTM, 1997: 217 – 225.
- [15] 刘荟萃. 卫星导航系统中的多径误差分析及抑制技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.