

文章编号: 1001-893X(2011)01-0114-06

GPS 接收机抗多径技术研究现状与趋势^{*}

王尔申¹, 张淑芳², 张芝贤¹

(1. 沈阳航空航天大学 电子信息工程学院, 沈阳 110136; 2. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 多径在 GPS 接收机设计中是最显著的误差源, 它能引起接收机定位精度的恶化, 导致系统性能的下降。首先介绍了多径的影响及多径误差模型; 然后, 对国内外抑制多径的技术研究进行了综述, 归纳为基于空域处理和基于时域处理两大类抑制技术, 并对基于 Rake 分集思想提高卫星导航接收机性能的新颖方法进行了讨论, 给出了各种技术的优缺点; 最后, 讨论了抗多径技术的研究方向。

关键词: GPS 接收机; 多径效应; 空域处理; 时域处理; Rake 分集

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.01.023

Research Status and Trend of Mitigating Multipath Effects Technology for GPS Receiver

WANG Er-shen¹, ZHANG Shu-fang², ZHANG Zhi-xian¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: As the most prominent error source of GPS receiver, multipath causes the deterioration of the positioning precision and results in the impairment of the GPS system performance. First, the influence of multipath effects and the model of multipath error are analysed. Then, the existing methods of mitigating multipath effects are summarized and assorted two categories, including the time-domain processing and frequency-domain processing technology. And then, several novel methods for improving the performance of GPS receiver are discussed by means of employing a modified “Rake” receiver structure in GPS receiver. Their merits and demerits are respectively shown. Finally, further research directions in this area are also pointed out.

Key words: GPS receiver; multipath effect; spatial-domain processing; time-domain processing; Rake diversity

1 引言

多径在基于卫星的精确导航定位系统中是显著的误差源, 它使得 GPS 定位系统的码环路和载波环路鉴相特性产生畸变, 严重时会导致信号失锁, 造成测量精度降级。从 20 世纪 70 年代早期围绕如何抑制和消除多径对 GPS 接收机定位精度的影响就已

经开始了^[1]。在已有算法中, 研究比较多的是窄相关技术、多径估计技术(MET)、多径估计延时锁相环(MEDLL)、PAC(Pulse Aperture Correlator)以及 Vision 相关器^[2-6], 这些算法对短延时多径信号抑制效果不是很理想。最近几年, 已经提出超前减滞后相位技术(EPL), 用于解决直达路径信号和反射信号之间的载波相位误差; 提出的差分超前减滞后相位技术(DELP)用于探测产生严重多普勒偏移的多径信

^{*} 收稿日期: 2010-09-27; 修回日期: 2011-01-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA12Z312); 辽宁省博士启动基金资助项目(20101081)

Foundation Item: The National High-Tech Research & Development Program(863 Program) of China(No. 2009AA12Z312); The Research Foundation for Docotors of Liaoning Province(No. 20101081)

号^[7]。另一类方法是基于 Code Correlation Reference Waveforms(CCRW),包括 Strobe 相关器、Shaping 相关器以及 S-Curve Shaping 相关器,这些方法在计算二进制副载波调制(BOC)中应用较多^[8-10]。目前,Variable Spacing Correlator(VSC)方法已经应用于多径抑制,可以实现实时多径抑制,适合集成到商用接收机中^[11]。文献[12]从天线和时域基带信号处理方面对抗多径方法进行了分析。本文将对多径信号的特性、多径误差模型进行详细分析,对抗多径干扰的技术从时域和频域两大方面进行系统的综述和分析,分析空时结合抗多径技术,给出利用多径信号提高接收机性能的新颖方法的研究情况,并讨论抗多径技术的研究方向。

2 多径信号特性

由于建筑物、树木以及其它障碍物的影响,信号在从卫星到达接收机的传播途中受到衰减、反射以及相位偏转等作用。这将导致到达接收机天线的信号为多个传播路径信号的叠加,这些叠加在期望的直达路径信号上的反射信号总是具有更长的传播时延,对直接到达的信号造成幅度和相位的较大扰动,从而使直达信号变形,相关峰发生偏移,产生码环和载波环测量误差,进而对接收机的定位精度产生严重影响。GPS 接收机接收的信号包括直达信号和反射的多径信号^[13],为了方便讨论,这里用连续信号来表示。于是,接收的复合信号可表示为

$$s(t) = \sum_{i=0}^N A_i \times D(t - \tau_i) \times C(t - \tau_i) \times \cos(\omega t + \varphi_i) \tag{1}$$

式中, A_i 、 τ_i 、 φ_i 分别是第 i 路延时信号的幅度、时延和载波相位, $D(t)$ 是导航数据, $C(t)$ 是扩频序列, ω 是载波频率。其中, $i=0$ 表示直达信号, $i=1,2,3,\cdots,N$,为反射的多径信号。

3 多径对 GPS 接收机的影响

3.1 多径对 GPS 接收机码相位和载波相位的影响

由于卫星多径信号的延时一般是从 0 到 1.5 个 C/A 码,因此真正对直达信号有影响的多径信号是在 $1.5T_c$ 范围内。当延时 $\tau \geq 1.5T_c$ 时,信号之间的相关性将消失,多径信号将不会产生码跟踪误差和载波相位误差。另外,多径信号与直达信号相对

幅度增加时,多径信号的功率将增加,码相跟踪误差和载波相位误差也将增大。

3.2 多径干扰信号对接收机相关峰的影响

在理想情况下,扩频信号的自相关特性如图 1 所示,当接收机本地产生的码序列与接收信号的码序列完全匹配时得到最大的相关值。传统的卫星导航接收机都是使用一个延迟锁定跟踪环路(DLL)来跟踪直接到达的卫星信号: DLL 环路产生超前和滞后于本地码序列半个码片的两个序列,并分别与接收信号进行相关运算,用超前支路与滞后支路的相关值之差来调整本地的码序列,最终使超前和滞后两路的相关值相等或近似相等,根据图 1 上半部分所示的相关特性可以判断,此时本地码与接收信号的码序列完全匹配。

但是,在多径信号的干扰作用下,扩频码序列的相关特性产生了畸变,如图 1 下半部分所示。使用 DLL 环路进行跟踪,恢复的本地码序列将滞后接收信号的码序列时延 Δt ,伪距误差可以表示为 $\Delta r = c \cdot \Delta t$ (c 表示光速)。可见,多径信号干扰带来的定位误差是非常严重的。

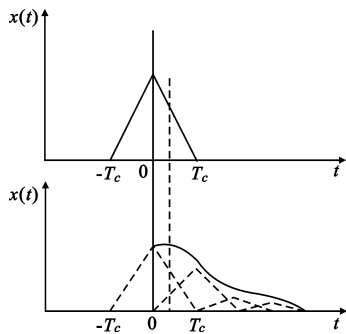


图 1 扩频信号的自相关特性
Fig.1 Autocorrelation characteristic of spread signal

4 GPS 接收机的多径抑制技术

目前,抗多径干扰的技术主要有空域处理、时域处理以及空时联合处理。空域处理主要是利用天线阵列来抑制多径信号的接收,而时域处理主要是在接收机中进行抑制多径信号的方法。

前面介绍的是关于抑制多径最早的研究,为后来人们对多径进行深入研究奠定了一定基础。下面详细介绍近年来在抑制多径方面的研究。

4.1 空域处理技术

空域处理最通用的方法就是使用抑径板来屏蔽

地面的反射信号,也可使用扼流圈抑制水平的反射波。Tranquilla 等研究了扼流圈抑制 GPS 多径效应的性能,Mckizine 等研究了采用磁体的方法^[14]。另外,通过天线阵列形成具有强方向性的天线方向图,在直接信号的到达方向有高增益,而在其它的方向衰减多径信号也是较理想的方法。但考虑到 GPS 信号特性,强方向性天线这种方法在实际中很少使用,但其与自适应信号处理技术相结合形成空时天线阵可对多径进行有效抑制,Counselman 在这方面进行了深入研究^[15]。

4.2 时域处理技术

空域处理要求已知或部分已知信号的传播路径特性以分离直接信号,具有很大的局限性。下面详细介绍多径抑制的时域处理技术,主要有:基于内插 FFT 的方法、窄相关器技术、“前沿”技术、基于相关函数形状的方法、修正相关器参考波形、称为 MMT (Multipath Mitigation Technology) 的最新的多径抑制技术、多径参数估计延时锁相环 (Multipath Estimation Delay Lock Loop, MEDLL)、现代信号处理的小波技术、空时处理技术、MUSIC 方法、非线性估计理论、锁频环辅助码环跟踪方法、扩展卡尔曼滤波和粒子滤波方法、神经网络,以及同时利用这些技术再结合空间滤波技术以适用于不同多径情况的抑制处理^[16-18]。下面着重介绍研究和应用较多的几种处理方法。

4.2.1 窄相关器技术

在时域上采用大量相关器 (Novatel 公司专利) 对多径的探测和消除是有效的,该技术于 1991 年被提出,它被认为是第一个基于 GPS 接收机硬件结构的多径抑制方法,并于 1992 年成功应用在新型的 Novatel GPSCardtm 接收机中。这种方法在多径和噪声存在的情况下可以有效地降低跟踪误差,减少定位误差。J.VAN Dierendonck 研究得出对于 0.1 个码片相关器间隔的 C/A 码接收机的性能可以和 P 码接收机性能相当,如果器件的性能和资源允许,还可以提高接收机的性能。但是,其缺点是占用的资源会很大,对处理器的运算和处理能力要求较高。目前的相关器间隔一般为 0.05 ~ 0.2 个 PN 码的 chip。在多相关器的基础上,Ridha Chaggara 进行了深入研究,提出了利用最小二乘方法对多相关器的输出进行处理来估计多径的参数^[19]。

4.2.2 基于相关函数形状的方法

尽管窄相关器已经大大降低了多径误差和测量

噪声引起的伪距误差,但是由多径引起的误差在定位解中仍然是严重的。Bryan Townsend 和 Patrick C. Fenton 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的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。

4.2.3 Strobe&Edge 相关器技术

Ashtedch 最先提出 Strobe 相关器技术,并且申请了专利。Edge 相关器是 Ashtech 公司已经证明的对 Super C/A 码技术的增强,主要用于减少码上的多径。而 Strobe 相关器从总体上来说是一个新颖的、具有创新性的思想,它是用一个非常简单的硬件结构且仅需要一个额外的相关器就可以获得较好的码跟踪。增强型的 Strobe 相关器将额外的一个相关器调整为 3 个相关器,此时,可以同时消除码和载波的多径误差。Strobe 相关器技术证明可以总体消除多径的影响并且能够充分减少较近多径的影响。有学者对 Strobe 相关器技术从接收机鉴相函数出发,分析了多径信号相关器模型,详细推导了基于窄相关的 Strobe 相关器中多径效应引起的码相跟踪误差解析式^[20],仿真结果证明与窄相关方法相比较,Strobe 相关器的多径误差更小,具有更强的抗多径干扰能力。

4.2.4 MMT 技术

MMT 技术是多径抑制的较新技术,由 Larry Weill 提出的 MMT 技术,无论是对码还是对载波相位测距来说都达到了理论极限,并随着观测时间的增加性能也随之提高。但是,这种方法复杂度极高,对工作的电磁环境也有较高要求。2005 年,NovAtel 公司在 MMT 的基础上,提出了一种 Vision Correlator 技术,并申请了专利^[21]。该技术比以前的多径抑制技术在检测和消除多径信号方面都有明显的改进。另外,有些学者利用扩展卡尔曼滤波对多径进行抑制^[22],其中扩展卡尔曼滤波是针对 GPS 精密静态定位中短延迟多径信号,它利用小范围多天线系统中多径对各天线之间伪距测量值影响的相关性采用扩展卡尔曼滤波技术得到多径信号各参数,然后从接收信号中消去多径信号,以抑制多径信号影响。

4.2.5 粒子滤波和神经网络

尽管上面提到的各种方法在多径引起的时延偏

差上获得了较好的性能,但仍然不能完全消除,尤其是相关多径的情况(比 1 个 chip 周期时间要小的相对时延)。为此,一种顺序蒙特卡罗算法试图对直达信号和多路的多径信号形成的合成信号进行迭代估计,利用粒子滤波理论标识这些参数的后验概率密度函数^[23]。它利用关于时延的先验信息对直达信号和多路的多径信号进行时延估计。利用这种方法在存在相关多径的情况下可以改善 DLL 的跟踪性能。新颖的神经网络算法不但在信号处理阶段使用而且在观测电平也即是在位置计算之前的 GNSS 测量阶段也通过算法来抑制不利的多径环境影响。在由欧空局启动的项目中一部分得到了实现和验证,并将全功能神经网络嵌入到 GNSS 导航接收机样机中以抑制多径^[24]。

4.2.6 空时联合处理技术

上面提到的多径抑制方法都是在时域和空域进行处理的,它们都有其自身的优势和缺陷,将两者结合形成空时处理技术会发挥各自的优势对多径的抑制有明显的改善,定位精度可以改善十几米。空时处理技术是将码滤波与空时信号处理进行级联。Nikhil Bhatia joined Center for Remote Sensing(CRS)遥感中心小组提出了一个利用空间和多尺度时间处理的级联方法,充分发挥时间和空间处理的互补特性,可以实现对多径的估计具有完好性和鲁棒性。另外,通过空时盲参数估计计算直达信号和多径信号的时延和角度向量,再由空时处理单元调整加权系数,形成直接信号方向的主瓣和多径信号方向的零陷^[25],经过这样的迭代处理,得到精确的直接信号的时延估计,结果表明,可以将误差降低到原来的 35%。原理框图如图 2 所示。

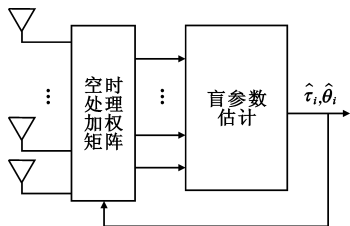


图 2 空时盲参数处理
Fig.2 Spatial - time blind parameters processing

5 基于 Rake 思想的多径技术

在当前的导航系统像美国的 GPS 和俄罗斯的

GLONASS 中,接收机只是估计直达信号路径,而把到达接收机天线的反射路径的信号作为干扰而进行抑制。与前面介绍的抑制多径方法完全不同,Renke Bischoff 等提出了通过修改接收机的架构以便将多径信号通过不同的延时并对其进行叠加求和来增强导航的精度。这种思想是源于通信系统中的 Rake 分集接收^[26],这种 Rake 分集接收的导航接收机架构尤其对码速率较高的 Galileo 系统和 GPS II/IIF 更为有效。

为了更好地建立 Rake 导航接收机的架构,研究多径信号的特性显得尤其重要^[27]。因此,首先要估计卫星通道模型,通道模型如图 3 所示,这里对电离层和对流层的模型用 $h(t) \cdot e^{j \cdot \theta(t)}$ 来描述,卫星发射信号用 $s(t)$ 来表示。由于周围环境的影响产生多路具有不同衰减的多径信号, $a_i(t)$ 、 $\varphi_i(t)$ 、 $i \cdot T_c + T_{di}$ 分别代表不同路径的衰减因子、相位偏移和信号相对延时,用 $N+1$ ($i=0,1,2,\cdots,N$) 表示多径信号的路径数, $i=0$ 表示直达信号。接收机天线采集到的信号可以表示为

$$s_d(t) = h(t) \cdot e^{j \cdot \theta(t)} \sum_{i=0}^N a_i(t) \cdot s(t - i \cdot T_c - T_{di(t)}) e^{-j \varphi_i(t)} + n(t) \quad (2)$$

式中, T_c 为码片周期; T_{di} 为随机时延,范围为 $[-T_c/2, T_c/2]$; $n(t)$ 表示加到接收机中的高斯白噪声^[28]。

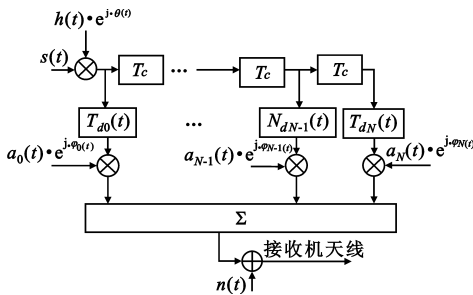


图 3 卫星通道模型
Fig.3 Channel model for a satellite channel

通过对卫星信道的模型建立,修正后的 Rake 导航接收机的结构可以表示为图 4 所示。需要注意的是:一般来说,先到达接收机的多径信号要比后到达的多径信号的功率大,因此,为了避免具有较小时延的多径信号对较大时延的多径信号的干扰,在对各个支路进行处理时,要把与之相邻的前一支路的信号去掉,故在结构图中出现了 $\hat{s}_i(t)$ ($i=0,1,2,\cdots,N$) 表示的就是前一路信号的估计值。其中:

$$\hat{s}_i(t) = \begin{cases} 0, & m = 0 \\ \sum_{k=0}^{m-1} a_k(t) \cdot \exp(j\varphi_k(t) \cdot \text{sgn}[d_k(i)] \cdot c(t - kT_c - \hat{T}_{dk})), & m \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

求和后的输出为

$$D(i) = \text{sgn}[\sum_{m=0}^N d_m(i)] \quad (4)$$

式中, N 表示多径信号的路径数目, i 表示导航数据位的第 i 位。

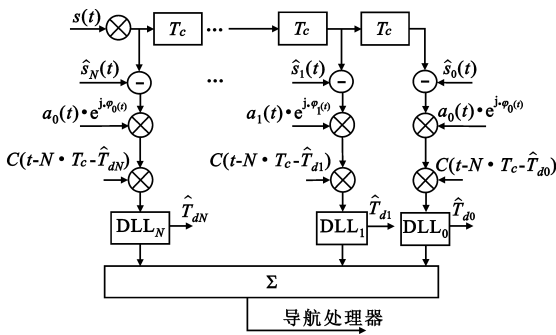


图 4 修正的 Rake 接收机框架
Fig. 4 Modified Rake receiver structure

Bischoff 等的仿真结果表明,修改后的结构不但可以减少计算的伪距误差的均值,还可以降低误差的方差。但是,这种结构对反射信号的相对时延估计要求要尽可能地精确。

目前,这种基于“Rake”思想的框架是进行 GPS 接收机设计的一种新的思路,暂时处于理论研究和仿真阶段。但是,随着移动技术的发展以及对高性能 GPS 接收机的需求,Rake 接收技术如果能够成功地应用于 GPS 接收机的设计中必将提高接收机的信噪比,进而提高捕获速度、定位精度以及接收机的灵敏度等性能,为卫星导航接收机技术的发展起到巨大的推动作用。

6 结 论

本文详细介绍了国内外各种抑制多径效应的技术,分析了各自的优缺点,并对 Rake 分集接收技术在导航系统中的应用进行了详细讨论,为 GPS 接收机性能的改善提供了新的思路,希望对 GPS 接收机多径效应的理论研究以及 GPS 接收机的工程设计有一定的参考价值。

随着技术的进步,GPS 接收机抗多径技术尚有诸多问题需要研究,包括:多径模型的建立,全面掌

握多径效应并建立自适应环境的信道模型;有效地将各种抑制多径技术相结合并应用于 GPS 接收机设计中等。不断改进抑制多径技术,对提高 GPS 接收机在复杂电磁环境下的抗干扰能力,确保定位的准确度和可靠性,适应现代战争的电子信息战需要都将具有重要的意义。

参考文献:

[1] Parkinson B W, Spilker J J. Global Positioning System: Theory and Applications[M]. Washington, DC, American: AIAA, 1966:547 – 568.

[2] Van Dierendonck A J, Fenton P, Ford T. Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver[J]. Journal of Navigation, 1992, 39(3): 265 – 284.

[3] Townsend B, Fenton P. Practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in a L1 GPS receiver[C]//Proceedings of ION GPS – 94. Salt Lake City, UT, USA: ION, 1994: 143 – 148.

[4] Van Nee R, Fenton P, Townsend B R. The Multipath Estimating Delay Lock Loop Approaching Theoretical Accuracy Limits[C]//Proceedings of IEEE Position, Location and Navigation Symposium. Las Vegas, Nevada: IEEE, 1994: 246 – 251.

[5] Jones J, Fenton B, Smith B. Theory and Performance of the Pulse Aperture Correlator[R]//NovAtel Technical Report. Calgary, Alberta, Canada: NovAtel Inc, 2004.

[6] Fenton P C, Jones J. The theory and performance of NovAtel Inc. 's Vision Correlator[C]//Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. CA, US: IEEE, 2005: 2178 – 2186.

[7] Mubara O M, Andrew G. Dempster. Performance Comparison of ELP and DELP for Multipath Detection[C]//Proceedings of ION GNSS. Georgia, USA: IEEE, 2009: 1 – 8.

[8] 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 ION ENC GNSS 2008. Toulouse, France: IEEE, 2008: 1 – 10.

[9] 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 ION ENC GNSS 2005. Munich, Germany: IEEE, 2005.

[10] Paonni M, Avila – Rodriguez J A, Pany T, et al. Looking for an optimum S – Curve shaping of the different MBOC implementations[C]//Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. TX, US: ION, 2007: 269 – 281.

[11] Marc – Antoine F, Jean – Christophe G, Rene L. Real – Time Low – Cost Multipath Mitigation Technique Calibrated through Real Data Repeatable Testing [C]//Proceedings of

- ION GNSS 2009. Georgia, USA: IEEE, 2009: 1 – 13.
- [12] 冯晓超, 程晓滨, 赵珂. GNSS 接收机抗多径技术[J]. 电讯技术, 2010, 50(8): 180 – 184.
FENG Xiao – chao, CHENG Xiao – bin, ZHAO Ke. Anti – multipath Technology for GNSS Receivers[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(8): 180 – 184. (in Chinese)
- [13] 狄旻珉, 张尔扬, 赵东阳. GPS 接收机抗多径效应技术综述[J]. 航天电子对抗, 2005(5): 17 – 19.
DI Min – min, ZHANG Er – yang, ZHAO Dong – yang. The summarization of GPS technologies in mitigating multipath effects[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2005(5): 17 – 19. (in Chinese)
- [14] Mckizine W E, Hurtado R B, Klimczak B K, et al. Mitigation of multipath through the use of an artificial magnetic conductor for precision GPS surveying antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002(4): 640 – 643.
- [15] Charless C. Counselman. Multipath – rejecting GPS antennas [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(1): 86 – 91.
- [16] Nunes F, Sousa F, Leitao J. Nonlinear Least – Squares Algorithm for Close – in Multipath Mitigation in GNSS Receivers [C]//Proceedings of 20th International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth, TX: ION, 2007: 1683 – 1691.
- [17] Goto Y, Iwata T. Estimation of High Precision Carrier – Phase by Accumulated – Delta – Range(ADR) Data for Reduction of the Multipath Problem and Evaluation by 2D – MUSIC[C]// Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland, OR: [s. n.], 2003: 1908 – 1913.
- [18] Dejian LU, Mengcheng CAO. Structural Deformation/Vibration Monitoring: A Multipath Mitigation Algorithm Based on Wavelet Denoise[C]//Proceedings of ION GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth, TX: ION, 2007: 1706 – 1711.
- [19] Karl Kaindl, Norbert Niklasch. Improving Path Separation in a Multipath Environment by Applying Nonlinear Estimation Theory[C]//Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting. Portland, OR: [s. n.], 2002: 472 – 476.
- [20] Patrick C Fenton, Jason Jones. The Theory and Performance of NovAtel Inc. 's Vision Correlator[C]// Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Long Beach, Calif, USA: [s. n.], 2005: 2178 – 2186.
- [21] 纪元法, 施浒立, 孙希延. 一种 Strobe 相关器及其多径抑制性能研究[J]. 宇航学报, 2007(5): 1094 – 1099.
JI Yuan – fa, SHI Hu – li, SUN Xi – yan. Study on Multipath Mitigation Performance of Strobe Correlator[J]. Journal of Astronautics, 2007(5): 1094 – 1099. (in Chinese)
- [22] 张文明, 周一宇, 姜文莉. 基于扩展卡尔曼滤波的 GPS 多径抑制技术[J]. 宇航学报, 2003(1): 53 – 56.
ZHANG Wen – ming, ZHOU Yi – yu, JIANG Wen – li. GPS multipath rejection through EKF[J]. Journal of Astronautics, 2003(1): 53 – 56. (in Chinese)
- [23] Pau Closas, Carles Fern'andez Prades. Multipath Mitigation Using Particle Filtering[C]// Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth, TX: [s. n.], 2006: 1733 – 1740.
- [24] Vigneau W, Nouvel O. Neural Networks Algorithms Prototyping to Mitigate GNSS Multipath for LEO Positioning Applications[C]//Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth, TX: [s. n.], 2005: 1752 – 1762.
- [25] Ganguly S, Bhatia N, Lee Y J. Multipath Detection, Characterization and Mitigation in a Real – Time Receiver [C]//Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division. Long Beach, CA: [s. n.], 2005: 2614 – 2625.
- [26] 吴志军, 王剑. IS – 95 CDMA 系统 RAKE 接收机仿真 [J]. 中国民航学院学报, 2003, 21(3): 18 – 22.
WU Zhi – jun, WANG Jian. RAKE Receiver Simulation of IS – 95 CDMA System[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2003, 21(3): 18 – 22. (in Chinese)
- [27] Steingass A, Lehner A. A Model for the Suburban Multipath Channel[C]//Proceedings of 20th International Technical Meeting of the ION GNSS Satellite Division. Fort Worth, TX: ION, 2007: 1699 – 1705.
- [28] Bischoff R, Namokel M, Schulz W, et al. Using Diversity of Satellite Channels for Navigation Systems[C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference. Rhodes, Greece: IEEE, 2001: 3011 – 3015.

作者简介:

王尔申(1980 –),男,辽宁辽阳人,博士,讲师,主要从事 GPS 接收机信号处理算法研究与开发;

WANG Er – shen was born in Liaoyang, Liaoning Province, in 1980. He is now a lecturer with the Ph. D. degree. His research concerns GPS receiver signal processing algorithm and its application.

Email: wes2016@126. com

张淑芳(1955 –),女,辽宁大连人,教授,主要从事全球定位系统的理论与应用等领域的研究;

ZHANG Shu – fang was born in Dalian, Liaoning Province, in 1955. She is now a professor. Her research concerns GPS theory and application.

张芝贤(1959 –),男,辽宁沈阳人,教授,主要从事航空电子系统研究。

ZHANG Zhi – xian was born in Shenyang, Liaoning Province, in 1959. He is now a professor. His research concerns avionics system.