

一种基于改进的 Rake 模型的 GNSS 接收机抗多径新技术

孙晓文, 张淑芳, 胡 青, 姜 毅, 张晶泊

(大连海事大学信息科学与技术学院, 辽宁大连 116026)

摘 要: 传统的 GNSS 接收机只跟踪一路信号, 它是直达和多径成分的合成信号, 利用该信号进行定位运算必然会产生多径误差. 本文提出了一种用于 GNSS 接收机的抗多径新技术, 它基于改进的 Rake 模型, 将合成信号中的直达和多径成分分离, 并对它们分别保持跟踪, 在跟踪直达信号的指峰(Finger)中, 将其他指峰所跟踪的多径成分从合成信号中减去, 从而减小多径误差. 文章介绍了改进的 Rake 模型的原理, 通过仿真验证了该模型的功能, 将其在基于 FPGA 的 GPS 接收机中实现. 测试结果表明, 存在多径信号的情况下, 使用该技术能够提高接收机的定位精度.

关键词: GNSS 接收机; 改进的 Rake; 抗多径; FPGA

中图分类号: TN965 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2422-05

A New Anti-Multipath Technique Based on Modified Rake Model for GNSS Receiver

SUN Xiao-wen, ZHANG Shu-fang, HU Qing, JIANG Yi, ZHANG Jing-bo

(Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract: Traditional GNSS (Global Navigation Satellite System) receiver tracks only one signal, which is the composite of direct path and multipath components. Multipath error can be generated if the signal is used for navigation processing. This paper presents a new anti-multipath technique for GNSS receiver. It is based on MRake (Modified Rake) model that separate the direct path and multipath components, and keep tracking with them. In the Finger that track direct path component, multipath components tracked by other Fingers are subtracted from the composite signal, so multipath error can be reduced. MRake model's principle is introduced, and then its function is verified by simulation. It is implemented in an FPGA based GPS receiver, and test results show that receiver using the new technique can improve its positioning accuracy in presence of multipath propagation.

Key words: GNSS receiver; modified Rake (MRake); anti-multipath; FPGA

1 引言

定位精度是 GNSS (Global Navigation Satellite System) 接收机非常重要的性能, 随着 GNSS 的发展, 影响定位精度的很多误差源都已大幅减小, 多径误差逐渐成为接收机最主要的误差源^[1]. 传统的接收机只用一个 DLL (Delay-Locked Loop) 和一个 PLL (Phase-Locked Loop) 分别对接收信号中的扩频码和载波进行跟踪^[2]. DLL 环路通过调整码发生器, 使超前和滞后两路相关值相等, 来实现即时信号与接收信号的码相位同步. 但是, 存在多径的情况下, 超前和滞后两路相关值相等时, 即时支路与接收的直达信号的码相位不等, 从而导致 DLL 环路中的码跟踪误差. 此外, 直达与多径的合成信号, 与直达信号的载波相位不同, 导致跟踪合成信号的 PLL 环路中存在载波跟踪误差^[3,4]. 因此, 减少接收机的多径误差, 就是同时减少多径造成的码和载波跟踪误差.

所有的 GNSS 接收机都为提高其定位精度而或多或少地采用一些抗多径技术^[1]. 其中, 最简单的是窄相关技术, 它通过减小 DLL 环路中相关器的间隔来减小码跟踪误差^[5]. 但是, PLL 环路中的载波误差并没有减小, 且 DLL 环路仍残留较大的码跟踪误差^[6]. 此外, 减小相关器的间隔, 会导致环路的动态性能变差^[7]. 在现有抗多径技术中, 性能最好的是 MEDLL (Multipath Estimating Delay Lock Loop), 它能同时减少多径对码和载波跟踪的影响, 性能接近于不存在多径的测量精度理论值^[8]. 但是, MEDLL 需要大量的相关器和其他硬件资源, 而且估计算法的实现也非常复杂^[1,9].

针对上述抗多径技术存在的问题, 本文提出了一种基于 MRake (Modified Rake) 模型的新技术, 它能同时减小多径造成的码和载波跟踪误差, 而且消耗的资源少, 易于实现. MRake 模型有多个 DLL 和 PLL 环路, 能将直达和多径成分从接收信号中分离, 并保持对它们的跟

踪.在跟踪直达信号的指峰中,将其他指峰跟踪的多径成分从合成信号中减去,从而减小多径误差,提高定位精度.

2 MRake 模型的原理

2.1 传统接收机产生多径误差的原理

通常 GNSS 接收机接收的信号是由直达和多径信号构成的合成信号,不考虑噪声影响,可将其表示为:

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

其中, i 表示第 i 径信号, $i=0$ 表示直达信号. 为了便于讨论,假设 $N=1$, 则接收信号为:

$$r(t) = A_0 c(t - \tau_0) \cos(\omega t + \theta_0) + A_1 c(t - \tau_1) \cos(\omega t + \theta_1) \quad (2)$$

传统的 GNSS 接收机只有一个 DLL 和一个 PLL 环路,且 DLL 环路中相关器间隔为半个码片(后面将这种接收机简称为传统的 GNSS/GPS 接收机),它产生的信号与接收信号进行相关运算,得到的相关函数为:

$$R(\hat{\tau}) = R_0(\hat{\tau}) + R_1(\hat{\tau}) \quad (3)$$

其中, $R_0(\hat{\tau})$ 和 $R_1(\hat{\tau})$ 分别为:

$$R_0(\hat{\tau}) = \begin{cases} [1 - \frac{|\hat{\tau} - \tau_0|}{T_c}] [\cos(\hat{\theta} - \theta_0)], & |\hat{\tau} - \tau_0| \leq T_c \\ 0, & |\hat{\tau} - \tau_0| > T_c \end{cases} \quad (4)$$

$$R_1(\hat{\tau}) = \begin{cases} \frac{A_1}{A_0} [1 - \frac{|\hat{\tau} - \tau_1|}{T_c}] [\cos(\hat{\theta} - \theta_1)], & |\hat{\tau} - \tau_1| \leq T_c \\ 0, & |\hat{\tau} - \tau_1| > T_c \end{cases} \quad (5)$$

相关值随着 $\hat{\tau} - \tau$ 的变化情况如图 1(c) 所示,它是将图 1(a) 所示的 $R_0(\hat{\tau})$ 与图 1(b) 所示的 $R_1(\hat{\tau})$ 叠加得到的. 传统 GNSS 接收机的 DLL 环路, 将把 $\hat{\tau} - \tau$ 调整到 O' 处,

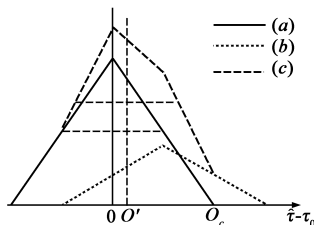


图1 GNSS信号的相关曲线

此时产生的即时支路的码延迟 $\hat{\tau}$ 不等于接收信号中的 τ , 从而产生码跟踪误差; 用正弦函数替换式(4)和式(5)中的余弦函数, 再代入式(3), 得到接收机的正交支路与接收信号的相关值, PLL 环路调整使其为 0, 在 $\theta_0 \neq \theta_1$ 时, 本地载波相位 $\hat{\theta}$ 不等于接收直达信号载波相位的 θ_0 , 从而产生载波跟踪误差. 因此, 存在多径信号的情况下, 传统的 GNSS 接收机必然存在码和载波跟踪误差.

2.2 MRake 接收机减小多径误差的原理

在对式(1)所示的含多径信号的接收信号进行跟踪时, 若接收机产生式(6)所示信号, 再将式(1)和式(6)

代入式(7), 等式成立时, 则 $\hat{\tau}_0 = \tau_0, \hat{\theta}_0 = \theta_0$, 即码和载波跟踪误差为 0.

$$s(t) = \sum_{i=0}^N \hat{A}_i c(t - \hat{\tau}_i) \cos(\omega t + \hat{\theta}_i) \quad (6)$$

$$\int_{t-\tau}^t [r(t) - s(t)]^2 dt = 0 \quad (7)$$

在实际应用中, 利用图 2 给出的 MRake 模型, 接收机能够产生式(6)所示信号. 每个 MRake 的指峰需要首先从式(1)所示的接收信号中减去如式(8)所示的所有其他路径的信号. 该指峰将产生如式(9)所示的信号, 用于对该指峰所对应的某一路接收信号进行跟踪. 在 0 指峰中, 所有的多径信号都已从接收信号中减去, 所以 DLL₀ 和 PLL₀ 中的多径误差相应减少.

$$\bar{s}_i(t) = \sum_{\substack{0 \leq j \leq N \\ j \neq i}} \hat{A}_j c(t - \hat{\tau}_j) \cos(\omega t + \hat{\theta}_j) \quad (8)$$

$$\hat{s}_i(t) = \hat{A}_i c(t - \hat{\tau}_i) \cos(\omega t + \hat{\theta}_i) \quad (9)$$

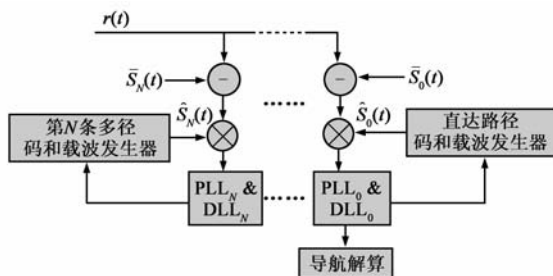


图2 MRake模型框图

这种用于 GNSS 接收机的 MRake 模型与传统的用于通信接收机的 Rake 模型相比, 在功能和实现上都有很大区别. 在功能方面, MRake 接收机不仅要像传统 Rake 接收机一样对延迟超过一个码片的多径信号进行跟踪, 而且还要跟踪延迟小于一个码片的多径信号, 并将其分离, 因为这种多径信号会造成多径误差. 在实现方面主要有两点不同: 首先, MRake 结构中, 接收信号进入每个指峰时, 都要先减去其他指峰产生的信号; 而传统的 Rake 电路则不需要, 因为各指峰跟踪的信号不相关. 其次, 接收信号进入 MRake 的各指峰之前, 不需要像传统 Rake 接收机那样进行整数倍码片周期的延迟, 而是完全通过指峰中的 DLL 和 PLL 环路来调整信号的延迟. 这样不仅能实现对延迟小于一个码片的多径信号的跟踪, 而且更适合在 FPGA 中实现, 因为实现信号的延迟功能, 需要大量的 FPGA 资源来储存数据.

3 MRake 模型的功能仿真

将 MRake 模型应用于 GPS 接收机, 并对其功能进行仿真. 利用 Matlab 软件模拟产生含有直达和一条多径的 GPS 数字中频信号, 采样速率为 16.368MHz. 多径信号相对于直达信号延迟半个码片, 其能量占总信号能量的 28.6%. 一个 C/A 码周期是 1ms, 有 1023 个码

片,共 16368 个采样点,用 $x = 1 \sim 16368$ 来表示,每个码片有 16 个采样点.

图 3(a)给出的是传统 GPS 接收机产生的信号与接收信号的相关值,图 3(b)是用 MRake 接收机,在 0 指峰中先将其他指峰跟踪的信号从接收信号中减去,然后与 0 指峰产生的信号进行相关运算的结果.图中,将接收机处于跟踪状态时产生信号的码相位设置为 $x = 50$,而此时接收信号中直达成分的码相位分别为 $x = 47$ 和 $x = 49$,即两种接收机的码跟踪误差分别是 $3/16$ 和 $1/16$ 码片,MRake 接收机的码跟踪误差明显小于传统 GPS 接收机.

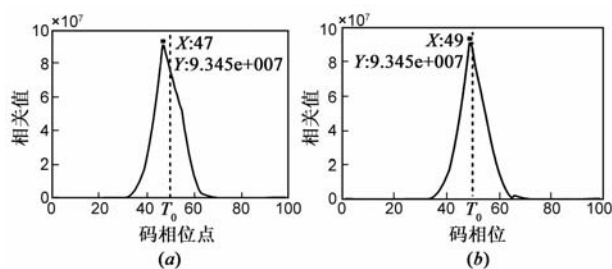


图3 两种接收机的相关运算结果

4 基于 FPGA 的实现

根据文献[6]和[8]可知,GPS 信号中的第一多径是产生多径误差的最主要因素,处理更多的多径信号,并不能提高接收机的性能.此外,处理的信号越多,需要的 DLL 和 PLL 环路就越多,这样不仅增加硬件资源,还提高系统的复杂度.因此,使用双指峰的 MRake 结构能够在不影响接收机性能的情况下,最大限度地减少资源,降低系统的复杂度.

图 4 给出了使用双指峰 MRake 模型的 GPS 接收机的结构,它是基于 FPGA 的 12 通道接收机,每个通道能够对一颗卫星的直达和第一多径信号同时进行跟踪.接收机由射频电路和基于 FPGA 的基带电路构成^[10].射频电路是基于 Nemerix 公司的 NJ1006A 芯片设计的,天线接收的 GPS 信号在射频芯片中经过下变频和模数转换,变成数字中频信号.基带电路使用的 FPGA 是 Xilinx

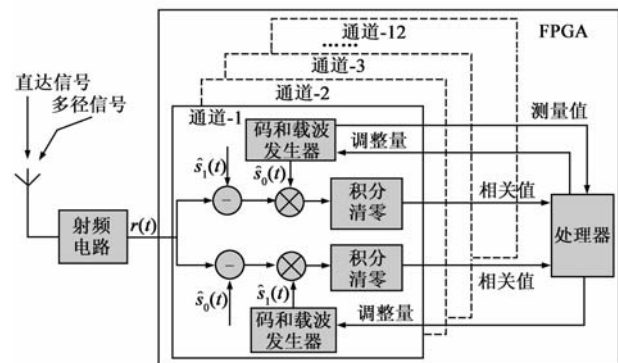


图4 双指峰MRake模型的GPS接收机

公司的 Spartan3A-DSP,该系列产品具有高性能的数字信号处理能力,满足设计需求.

每个 GPS 通道都由硬件和基于处理器的软件构成.硬件主要实现以下功能:首先,在某一指峰中将其其他指峰产生的信号从接收信号中减去;然后通过 DLL 和 PLL 环路的调整,产生相应的载波和码信号;最后,将该指峰产生的信号与相减后剩余的信号进行相关运算.实现这些功能主要用到减法器,乘法器,相乘累加器,C/A 码发生器,载波发生器以及历元计数器等功能模块.

硬件中各指峰的相关值,以及从 0 指峰得到的直达信号的原始测量值都被送到基于处理器的软件.软件的主要功能包括:根据硬件给出的相关值调整各指峰中的 C/A 码和载波发生器;根据直达信号的原始测量值进行定位解算;控制接收机通道的工作流程.

每个接收机通道工作在如图 5 所示的 8 种不同的状态.首先,接收机需要对直达信号进行捕获,确认,微调以及跟踪处理,这个过程与传统接收机相同.当 0 指峰产生的信号 $\hat{s}_0(t)$ 跟踪上接收的直达信号后,启动 1 指峰,先从 $r(t)$ 中减去 $\hat{s}_0(t)$,并在剩余的信号中搜索第一多径.在捕获到第一多径后,通过确认和微调等处理,使 1 指峰产生的 $\hat{s}_1(t)$ 保持对第一条多径的跟踪.



图5 接收机通道的工作流程

然后,在 0 指峰中,将 $\hat{s}_1(t)$ 从 $r(t)$ 中减去,减小第一多径的影响,此时 0 指峰将产生更加准确的 $\hat{s}_0(t)$.不断重复上述过程,两个指峰将分别产生准确的 $\hat{s}_0(t)$ 和 $\hat{s}_1(t)$,对接收信号中的直达和第一多径保持跟踪.用 $\hat{s}_0(t)$ 的原始测量值进行定位解算,获得较高的定位精度.

5 测试和分析

GSS6700 是思博伦公司的 Multi-GNSS 开发、集成和验证测试平台,它可被配置成单星座或多星座的最多 12 个通道.使用 GSS6700 模拟器,在多种仿真场景下对 MRake 接收机的性能测试,表 1 给出了其中一个静态场景下模拟器产生的 GPS 信号的信息.其中, N_{m1} 表示 N 号卫星的第一多径信号.模拟器的 12 个通道中的 3 个分别用来产生 18, 30 和 16 号卫星的第一多径信号.18 号卫星的第一多径与直达信号相比有 5dB 的能量衰减,和 $1/2$ 码片的码相位延迟,30 号卫星有 3dB 衰减和

1/6 码片延迟,16 号卫星有 4dB 衰减和 1/3 码片延迟.

在表 1 给出的场景下对传统 GPS 接收机和 MRake 接收机同时进行测试,结果如图 6 所示.经统计,传统 GPS 接收机的定位精度是 9.8 米(CEP 95),而 MRake 接收机是 4.1 米(CEP 95).可以看出,使用 MRake 模型可以显著提高接收机的定位精度.

表 1 模拟器产生的 GPS 信号

卫星	强度(dB)	仰角	距离(m)	伪距(m)
18	11.14	0.6143	22612203	22591908.31
30	10.786	0.4081	23552870	23480542.79
16	10.949	0.4777	23114932	23136091.89
18 _{ml}	6.14	0.6143	22612203	22592058.31
30 _{ml}	7.786	0.4081	23552870	23480592.79
16 _{ml}	6.949	0.4777	23114932	23136191.89
3	10.491	0.1723	24365685	24199858.57
14	10.763	0.3425	23615772	23602336.59
31	11.907	1.1285	20701307	20712452.39
21	10.82	0.47	23460380	23478101.65
24	11.575	0.8142	21517088	21431319.94
6	10.621	0.3059	24004644	23811948.06

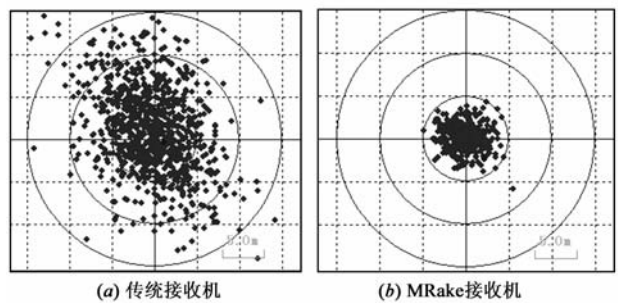


图6 接收机定位精度的对比测试

为了进一步研究不同延迟的多径信号对定位精度的影响,将 GSS6700 的 2 个通道分别设置为 18 号卫星的直达和第一多径信号,该多径信号有 5dB 的衰减.模拟器的其他 10 个通道设置为另外 10 颗卫星的直达信号.在对传统接收机和 MRake 接收机同时进行定位精度测试时,改变 18 号卫星的第一多径相对于直达信号的延迟,测试结果如图 7 所示.

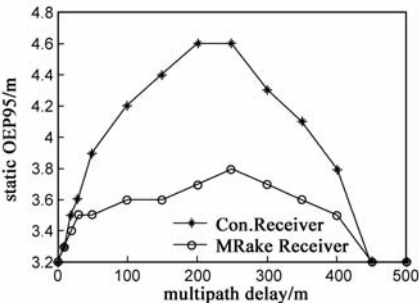


图7 定位精度随多径延迟的变化

从图 7 给出的测试结果可以看出,当多径信号延迟为 0 或大于 3/2 码片时,两个接收机的定位精度都没有受多径信号的影响;当多径信号延迟小于 1/15 码片时,与传统接收机相比,MRake 接收机并没有提高精度,这是由于延迟较小的多径误差很难去除,甚至根本不可能去除^[6];当多径信号延迟在 1/15 和 3/2 码片之间时,传统接收机的多径误差最多造成 1.4 米的精度下降,而 MRake 接收机的精度最多只降低了 0.6 米.因此,使用 MRake 接收机可以有效地减小较大延迟的多径信号造成的多径误差.

6 结论

本文提出了一种新的抗多径技术,它使用 MRake 模型,将 GNSS 接收机所接收的信号中的直达和多径成分分离,并分别进行跟踪,在跟踪直达成分时,能够将接收信号中的多径成分减去,从而减小多径误差.在仿真验证了该模型的功能之后,将其应用在基于 FPGA 的 GPS 接收机中,然后对 MRake 和传统接收机的性能进行对比测试.结果表明,在多径延迟大于 1/15,小于 3/2 码片时,MRake 接收机的多径误差小于传统接收机的 43%;多径延迟大于 3/2 码片时,两种接收机中都不存在多径误差;而多径延迟小于 1/15 码片时,MRake 接收机的性能并没有提高.希望未来对 MRake 模型的进一步研究,能够减小这种延迟较小的多径误差.

参考文献

[1] 谢钢.GPS 原理与接收机设计[M].北京:电子工业出版社,2009.333-341.
Xie Gang. Principles of GPS and Receiver Design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2009.333-341. (in Chinese)
[2] Jiang Yi,Zhang Shu-fang,Zhang Jing-bo,Hu Qing,Sun Xiao-wen.Multipath effects on the performance of DLL in a GNSS receiver[J].Chinese Journal of Electronics,2010,19(3):543-547.
[3] 姜毅,张淑芳,胡青,孙晓文,张晶泊.一种低复杂度 GPS 载波跟踪环路设计[J].电子学报,2010,38(12):2823-2826.
Jiang Yi,Zhang Shu-fang,Hu Qing,Sun Xiao-wen,Zhang Jing-bo.A low complexity design of GPS carrier tracking loop [J]. Acta Electronica Sinica,2010,38(12):2823-2826. (in Chinese)
[4] B R Townsend,P C Fenton,K J Van Dierendonck.L1 carrier phase multipath error reduction using MEDLL technology[A]. Proceedings of the 8th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation[C]. California,

USA: ION GPS, 1995. 1539 – 1544.

- [5] A J Van Dierendonck, P Fenton, T Ford. Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1992, 39(3): 265 – 283.
- [6] R DJ Van Nee, J Siereveld, P C Fenton, B R Townsend. The multipath estimating delay lock loop approaching theoretical accuracy limits[A]. Position Location and Navigation Symposium [C]. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE, 1994. 246 – 251.
- [7] M Irsigler, B Eissfeller. Comparison of multipath mitigation techniques with consideration of future signal structures[A]. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation[C]. Portland, Oregon, USA: ION GPS/GNSS, 2003. 2584 – 2592.
- [8] R DJ Van Nee. The multipath estimating delay lock loop[A]. Proceedings of the IEEE Second International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications[C]. Yokohama, Japan: IEEE, 1992. 39 – 42.
- [9] Yang Dong-kai, Yao Yan-xin, Guo Jia. GPS multipath signal estimation based on all phase DFT[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(2): 369 – 372.
- [10] Sun Xiao-wen, Hu Qing, Zhang Shu-fang, Zhang Jing-bo,

Jiang Yi. Fast acquisition of GPS signal using extended multiple correlator based on FPGA[A]. International Conference on Computer Application and System Modeling[C]. Taiyuan, China: IEEE, 2010. 208 – 211.

作者简介



孙晓文 女, 1984 年 2 月出生于江苏连云港. 2005 年于大连海事大学获得学士学位, 2007 年于大连海事大学获得硕士学位, 现为大连海事大学博士研究生, 从事高性能 GNSS 接收机设计的相关工作.

E-mail: sunny@dlmu.edu.cn



张淑芳 女, 教授, 博士生导师. 1955 年 2 月出生于辽宁大连. 1982 年于大连海运学院获得学士学位, 1988 年于大连海运学院获得硕士学位, 1997 年于大连海事大学获得博士学位, 主要从事全球定位系统的原理与应用, 无线通信技术等研究工作.