

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.007

引用格式:胡辉,方玲,刘莹莹.基于随机 Hough 变换的斜率估计多径抑制算法[J].电讯技术,2014,54(7):899-904. [HU Hui, FANG Ling, LIU Ying-ying. A Slope Estimation Multipath Mitigation Algorithm Based on Randomized Hough Transform[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7):899-904.]

基于随机 Hough 变换的斜率估计多径抑制算法*

胡 辉,方 玲**,刘莹莹

(华东交通大学 信息工程学院,南昌 330013)

摘 要:抑制多径干扰是提高 GPS 定位精度的关键。针对低载噪比、预相关带宽有限的情况下斜率估计(ELS)的多径抑制技术往往不能正常工作的问题,提出了一种基于能够鲁棒地提取直线斜率的随机 Hough 变换(RHT)的斜率估计多径抑制算法。该算法主要采用多相关器结构得到多径相关峰的采样值,然后利用 RHT 得到相关峰两边的斜率,最后结合 ELS 的基本原理构成具有补偿因子的伪码鉴相器,以达到抑制多径干扰的目的。仿真结果表明,该算法解决了 ELS 在有限的预相关带宽(4 MHz)和较低载噪比(33 dB-Hz)条件下不能有效提取直线斜率的问题,并且在相同载噪比(44 dB-Hz)条件下,该算法的多径抑制性能也优于 ELS 算法。

关键词:GPS;信号传输;多径抑制;斜率估计;随机 Hough 变换;低载噪比

中图分类号:TN967.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-0899-06

A Slope Estimation Multipath Mitigation Algorithm Based on Randomized Hough Transform

HU Hui, FANG Ling, LIU Ying-ying

(School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The multipath mitigation is the key to improve GPS positioning precision. As the early late slope (ELS) multipath mitigation can not work well under the circumstances of low carrier to noise ratio and narrow pre-correlation bandwidth, a new slope estimation multipath mitigation algorithm is proposed based on randomized Hough transform (RHT) to estimate the straight line's slope robustly. The algorithm gets the sampling values of multipath correlation peak by using multiple correlators. Then the slope on both sides of correlation peak is obtained by using RHT. Finally the phase discriminator with compensating factor is formed based on the basic principle of ELS to suppress multipath interference. Theoretical analysis and simulation results show that the algorithm solves the problem that ELS can't work well under the condition of narrow bandwidth (4 MHz) and low carrier to noise ratio (33 dB-Hz). And the algorithm also has superior capability of multipath mitigation than ELS in the same carrier to noise ratio (44 dB-Hz).

Key words: GPS; signal transmission; multipath mitigation; slope estimation; randomized Hough transform; low carrier to noise ratio

* 收稿日期:2014-01-03;修回日期:2014-04-08 Received date:2014-01-03;Revised date:2014-04-08

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ10458);江西省科技支撑计划项目(20123BBE50098)

Foundation Item: The Research Foundation of Education Bureau of Jiangxi Province (GJJ10458); The Technology Research and Development Program of the Department of Science and Technology of Jiangxi Province (20123BBE50098)

** 通讯作者:alics615@163.com **Corresponding author:**alics615@163.com

1 引言

针对多径环境下的 GPS 信号接收和处理的问题,国内外已经展开了广泛的研究。目前 GPS 多径抑制的方法大致可以分为以下两大类:第一类是通过估计多径信号幅度、延迟和相位等参数,从输入的复合信号中将多径去除,恢复出直达信号,主要包括最大似然估计^[1]、多径估计延迟锁定环(MEDLL)^[2]、扩展卡尔曼滤波算法(EKF)^[3]等;第二类技术主要通过改进接收机的相关器和码环鉴别器的性能来抑制多径,主要包括窄相关技术^[4]、边沿相关(Strobe Correlator)技术^[5]、早迟斜率多径抑制技术(Early Late Slope, ELS)^[6-7]等。文献[6]和文献[7]中最先提出利用两组早迟相关器得到相关峰两侧斜率的方法抑制多径,但是其前提条件是预相关带宽需要尽量宽,并且没有考虑噪声对相关峰的影响。由于在有限的预相关带宽以及含有噪声的条件下,构成相关峰的直线发生了畸变,这时早迟斜率多径抑制算法的性能将大大下降。

针对圆滑和歪曲的相关峰,本文考虑采用 Hough 变换,将数据空间中较为困难的全局检测问题转化为参数空间中相对容易解决的局部峰值检测问题^[8]。随机 Hough 变换(RHT)^[9]是一种概率 Hough 变换,它克服了标准 Hough 变换所面临的运算量大、计算时间长等缺点,具有参数空间大、参数精度高、时间和空间复杂度低等优点。

针对低载噪比、窄预相关带宽的情况下基于斜率估计的多径抑制技术往往不能正常工作的问题,本文基于 RHT 能够鲁棒地提取直线的特点,得到伪码自相关函数峰值两边的斜率估计,提出了一种新的斜率估计多径抑制算法,这种算法比基于两组相关器的斜率估计多径抑制技术(ELS)具有更好的抑制性能,不仅能在预相关带宽较窄的情况下得到更小的码相位跟踪误差,还能在低载噪比情况下获得更优越的性能。

2 GPS 系统中多径信号数学模型

由于 GPS 卫星信号传输到达地面时,受到地形地貌以及周围建筑物的影响产生散射和反射,从而引起了多径效应。为了讨论方便,一般考虑利用双径模型来表示 GPS 多径信号,即包括一路直达信号和接收机周围物体的一路较强反射信号的合成信号,忽略其他反射信号的影响,则接收到的中频信号的数学模型可以表示为

$$s(t) = a_0 \cdot d(t) \cdot c(t - \tau_0) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + a_1 \cdot d(t) \cdot c(t - \tau_1) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \quad (1)$$

其中, a_0 、 τ_0 、 φ_0 分别是直达信号的幅度、码相位延迟和载波初始相位, ω_0 载波频率, a_1 、 τ_1 、 φ_1 分别是多径信号的幅度,相对直达信号的码相位延迟和载波初始相位, $d(t)$ 是导航电文, $c(t)$ 是伪随机码。

2.1 多径信号对伪码相关峰的影响

假设载波频率能够被正确跟踪,接收机超前滞后相关器的相关间隔为 d ,中频信号 $s(t)$ 通过积分累加模块得到的同相支路相关值为

$$I_p = \frac{a_0}{2} R(\tau) \cos(\Delta\varphi_0) + \frac{a_1}{2} R(\tau - \tau_1) \cos(\Delta\varphi_0 + \theta_1) \quad (2)$$

$$I_E = \frac{a_0}{2} R\left(\tau + \frac{d}{2}\right) \cos(\Delta\varphi_0) + \frac{a_1}{2} R\left(\tau - \tau_1 + \frac{d}{2}\right) \cos(\Delta\varphi_0 + \theta_1) \quad (3)$$

$$I_L = \frac{a_0}{2} R\left(\tau - \frac{d}{2}\right) \cos(\Delta\varphi_0) + \frac{a_1}{2} R\left(\tau - \tau_1 - \frac{d}{2}\right) \cos(\Delta\varphi_0 + \theta_1) \quad (4)$$

其中, $\tau = \hat{\tau} - \tau_0$ 和 $\Delta\varphi_0 = \hat{\varphi}_0 - \varphi_0$ 分别为含有多径信号时跟踪环中存在的码相位误差和载波相位误差, τ_1 为多径相对直达信号的码相位延迟, θ_1 为多径相对直达信号的载波相位偏差, $R(\tau)$ 是 GPS 的伪码自相关函数:

$$R(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{|\tau|}{T_c}, & |\tau| \leq T_c \\ 0, & |\tau| > T_c \end{cases} \quad (5)$$

由于多径对载波的影响很小,相对于码环的影响可以忽略,可以认为此时载波被完全剥离,即 $\Delta\varphi_0 = 0$,并假设直达信号幅度 $a_0 = 2$,多径信号幅度 $a_1 = 2\alpha$, α 为多径信号与直达信号的幅度比,则同相支路相关值的表达式可化简为

$$I_p = R(\tau) + \alpha R(\tau - \tau_1) \cos(\theta_1) \quad (6)$$

$$I_E = R\left(\tau + \frac{d}{2}\right) + \alpha R\left(\tau - \tau_1 + \frac{d}{2}\right) \cos(\theta_1) \quad (7)$$

$$I_L = R\left(\tau - \frac{d}{2}\right) + \alpha R\left(\tau - \tau_1 - \frac{d}{2}\right) \cos(\theta_1) \quad (8)$$

多径引起的载波相位可以等同于多径幅度的变化 $\alpha \cos(\theta_1)$,如果 α 一定,则载波相位 $\theta_1 = 0$ 和 $\theta_1 = \pi$ 时取得最大绝对值,因此在分析多径信号时一般只考虑多径和直达信号同相和反相的情况,其他情况的多径载波相位带来的影响都小于这两种情况。

预相关带宽和噪声是影响接收机多径性能的两个重要因素,也是两个互斥的因素:获得良好的多径抑制性能需要预相关带宽尽量大,而在预相关带宽

较大的时候,又会引入更多的噪声,所以在选择多径抑制算法过程中需要中和考虑这两个因素。

3 基于 RHT 的斜率估计多径抑制算法

3.1 基于斜率估计的多径抑制算法

基于斜率估计的多径抑制技术主要是在相关峰两边设置两个相关器,近似得到相关峰两边的斜率,然后用该斜率计算出补偿因子,用以消除多径信号对相关峰的不对称影响^[8]。

图 1 所示为斜率估计多径抑制算法原理示意图。 R_{E1} 、 R_{E2} 是间距为 d_1 的两个超前相关值, R_{L1} 、 R_{L2} 是间距为 d_2 的两个滞后相关器,靠近相关峰的一组相关器 R_{E1} 、 R_{L1} 之间相关间隔是 d ,相关峰两侧的斜率分别为 a_1 、 a_2 。

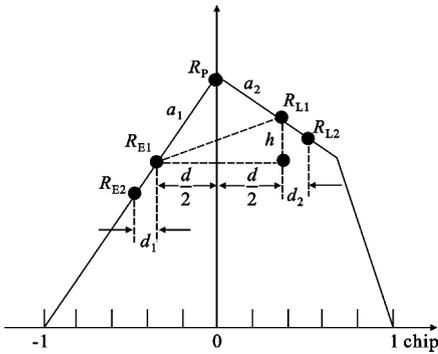


图 1 斜率估计多径抑制算法原理示意图
Fig. 1 The principle diagram of slope estimation multipath mitigation algorithm

假设相关峰 R_P 在正确位置,从图 1 中可以看出,由于多径信号的影响,相关间隔为 d 的一组相关器 R_{E1} 、 R_{L1} 之间存在偏差 h ,下面主要从几何上推导 h 和相关峰两侧斜率的关系。

由几何关系知

$$a_1 = \frac{R_P - R_{E1}}{d_1}, a_2 = -\frac{R_P - R_{L1}}{d_2} \quad (9)$$

可得

$$R_{E1} = R_P - a_1 d_1, R_{L1} = R_P + a_2 d_2 \quad (10)$$

因为 $h = R_{L1} - R_{E1}$,将式(10)代入得: $h = a_2 d_2 + a_1 d_1$,一般取 $d_1 = d_2 = \frac{d}{2}$,可得

$$h = \frac{d}{2} (a_1 + a_2) \quad (11)$$

式(11)是假设相关峰在正确位置时得到的超前、滞后相关值的差值与相关峰左右两侧斜率的关系。

基于斜率估计的多径抑制算法将式(11)作为

跟踪环中鉴相器的补偿因子,得到具有补偿因子的鉴相器公式如下:

$$D_{\text{err}} = R_{E1} - R_{L1} + h \quad (12)$$

式(12)中, R_{E1} 、 R_{L1} 是一组相关间隔为 d 的相关器。通过该鉴相器用以消除多径信号对相关峰的不对称影响。

3.2 基于 RHT 的斜率估计多径抑制算法

由 2.2 节可知,在预相关带宽有限和含有噪声的情况下,相关峰不再是标准的三角峰,而是圆滑和歪曲的曲线,如果采用两组相关器采点得斜率的方法将会造成很大的误差,基于此提出一种能够在畸变的曲线中鲁棒地提取直线的算法——随机 Hough 变换。

3.2.1 随机 Hough 变换

RHT 的理论基础是:参数空间中的一个点可以由原始图像中的 2 个、3 个或 n 个点确定,这些点可以从图像边缘上任意选取,而图像空间中的特定曲线可以由参数空间中相应的参数快速反应出来,从而达到检测图像空间中特定曲线的目的。

下面是利用 RHT 检测直线的具体过程。

对于直线方程:

$$y = ax + b \quad (13)$$

Hough 变换将数据点 (x_1, y_1) 映射为参数空间的一条直线 $y_1 = ax_1 + b$,利用两个数据点 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 通过求解方程组(14)可以确定参数空间中的一点:

$$\begin{cases} y_1 = ax_1 + b \\ y_2 = ax_2 + b \end{cases} \quad (14)$$

实现 RHT 的基本思想是:首先建立数据点集合 M ,然后从集合 M 中随机选取两个数据点 $m_1 = (x_1, y_1)$ 、 $m_2 = (x_2, y_2)$, $m_1 \neq m_2$ 。随机选取数据点的方法是:使每个数据点被抽取到的概率相等,即 M 中所有数据点以相同概率被抽取为 m_1 ,等概率地从 $M - \{m_1\}$ 中抽取数据点 m_2 。求解式(14),即可得到参数空间中的一点 $p_i = (a(i), b(i))$,并将此参数插入参数点集合 P 中。假设图像中存在一条以 (a, b) 为参数的直线,经过一定次数循环之后,会有多个 p_i 累计在参数空间中的 (a, b) 参数点,因此通过检测参数点集合 P 中的累计点就可以检测到图像中的直线。

3.2.2 基于 RHT 的斜率估计

受多径影响的相关峰上的采样点组成 RHT 中的数据空间,采用多相关器结构得到相关峰的采样

值,将相关器的输出值与其对应的码相位偏移量构成数据点集合 $M = (\delta\tau_i, R(\tau + \delta\tau_i)) (i = 1, 2, \dots, n)$,

利用 RHT 得到受多径影响的相关峰两边的斜率 a_1, a_2 。基于 RHT 的斜率估计流程图如图 2 所示。

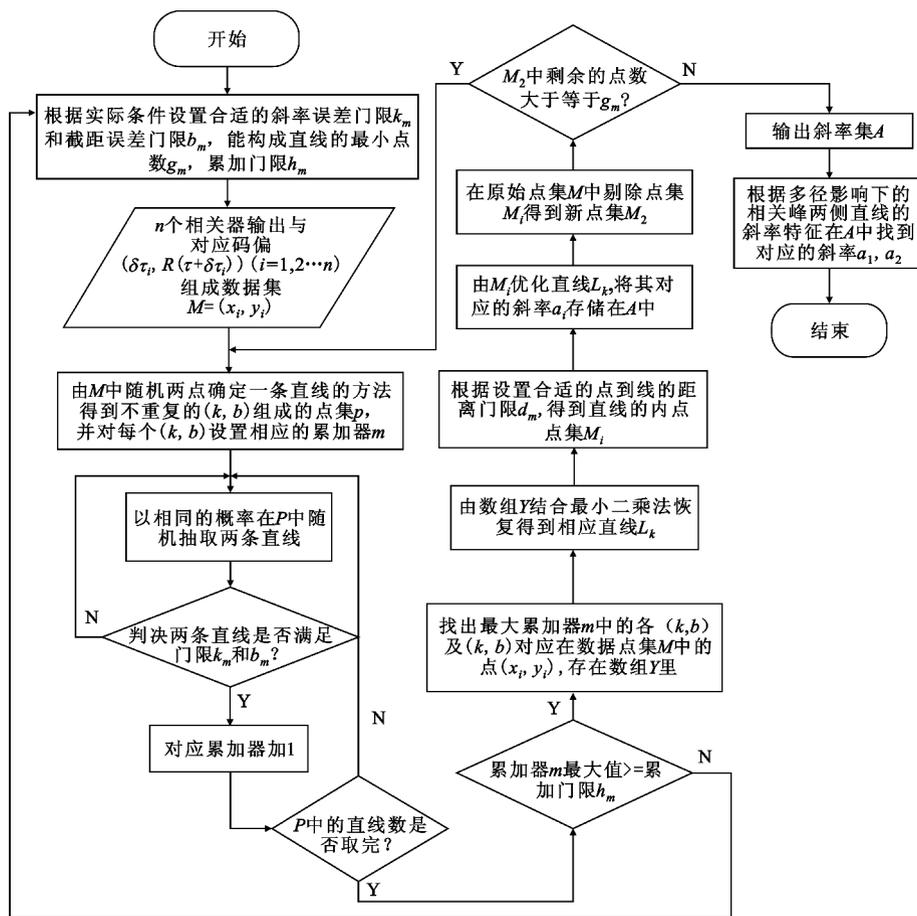


图 2 基于 RHT 的斜率估计流程图

Fig. 2 The flow chart of slope estimation based on RHT

3.2.3 基于 RHT 的斜率估计多径抑制算法实现

受多径影响的相关峰在无限带宽下是由几段斜率不同的直线组成。RHT 具有对局部畸变点不敏感、能够鲁棒地提取直线等优点,无论是预相关带宽有限条件下的相关峰,还是受噪声影响的相关峰,都可以利用 RHT 的直线检测特性来提取相关峰两侧的直线,然后结合斜率估计多径抑制算法达到抑制多径的目的。

图 3 所示为本文所提出的基于 RHT 的斜率估计多径抑制算法的伪码跟踪环路结构。在传统跟踪环路中采用多相关器结构,本地伪码发生器产生 n 路复现码,输入的中频信号进行载波剥离之后分别与本地复现码相乘,并经过积分累加模块得到各相关输出值 $R(\tau + \delta\tau_i) (i = 1, 2 \dots n)$;将相关器的输出值与其对应的码相位偏移量构成数据点集合 $M = (\delta\tau_i, R(\tau + \delta\tau_i)) (i = 1, 2 \dots, n)$,并利用 RHT 得到受

多径影响的相关峰两边的斜率 a_1, a_2 ,计算出此时的补偿因子 h ;然后选择一组相关间隔为 d 的超前滞后相关器与补偿因子一起组成新的鉴相器。

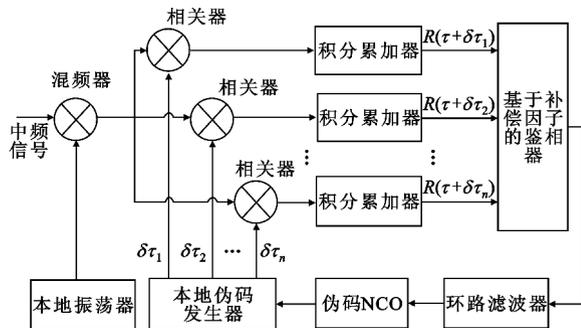


图 3 基于补偿因子鉴相器的伪码跟踪环

Fig. 3 The code tracking loop based on the phase discriminator with compensating factor

如图 3 所示,由具有补偿因子的鉴相器公式

(12) 得到鉴相误差后,将该误差通过环路滤波器,作为伪码 NCO 的控制量,产生本地码,形成完整的伪码跟踪环。

4 仿真分析验证

一般情况下, GPS 接收机的预相关带宽取 2 MHz,天线接收到的卫星信号通过射频前端得到的中频信号的载噪比一般为 44 dB-Hz。为了使 ELS 多径抑制算法能够正常工作,本文取 4 MHz 的预相关带宽,采样率为 15 MHz,超前滞后相关器的相关间隔 $d=0.5$ chip。

根据以上分析,本文首先基于 MATLAB 平台,仿真产生 13 号卫星信号,并利用双径模型产生不同延迟的多径信号,然后通过仿真对比 RHT 和 ELS 算法分别在有限预相关带宽 4 MHz 和载噪比为 44 dB-Hz 条件下的多径抑制性能。最后针对延迟为 0.6 chip 的多径信号,仿真对比 RHT 与 ELS 算法在不同载噪比下的多径抑制性能。

图 4 所示为 4 MHz 预相关带宽条件下,分别利用基于 RHT 的斜率估计和 ELS 多径抑制算法得到的多径误差包络图,由图 4 可知 RHT 多径抑制算法的性能明显比 ELS 多径抑制算法好。多径延迟在 0.8 ~ 1 chip 时,受多径影响的相关峰左侧直线比较短,这条边上的采样点非常少(15 MHz 的采样率条件下大概只有 3 个点),这时随机 Hough 变换的性能相对较差,所以针对延迟在 1 chip 周围的多径信号,该算法的性能还有待进一步改进。

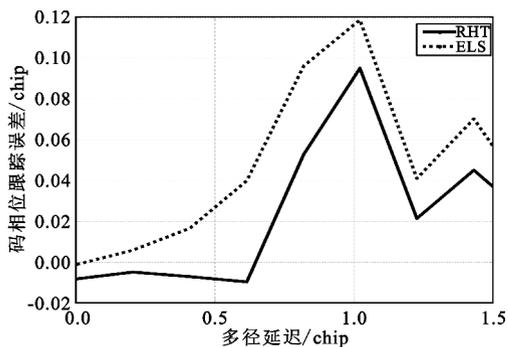


图 4 4 MHz 预相关带宽条件下多径误差包络图
Fig. 4 The multipath error envelope when the pre-correlation bandwidth is 4 MHz

在载噪比为 44 dB-Hz 情况下,相关峰变成歪曲的曲线,这时候采用 ELS 多径抑制技术不仅不能抑制多径信号对跟踪环造成的影响,甚至还会导致伪

码跟踪环无法正常工作。由于 RHT 对随机噪声的鲁棒性,对于受噪声影响的相关峰,RHT 仍然能够很好地提取出直线信息。

图 5 所示为载噪比为 44 dB-Hz 情况下的多径误差包络图,RHT 的最大误差为 0.05 chip,ELS 的最大误差达到 0.15 chip,RHT 多径抑制算法的性能明显比 ELS 多径抑制算法的性能好。

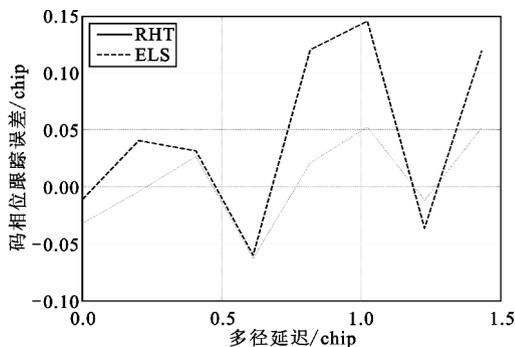


图 5 载噪比为 44 dB-Hz 情况下的多径误差包络图
Fig. 5 The multipath error envelope when the C/N_0 is 44 dB-Hz

图 6 所示为在不同载噪比条件下基于 RHT 和 ELS 多径抑制算法的性能,可以看出,在载噪比小于 33 dB-Hz 时,ELS 多径抑制算法的码相位跟踪误差已经超过 0.5 chip,这时环路已经不能正常工作;然而从图 6 中还可以看到载噪比的大小对于基于 RHT 的多径抑制算法的性能影响并不大,所以在载噪比较低的环境下,基于 RHT 斜率估计的多径抑制算法比 ELS 多径抑制技术具有更优越的性能。

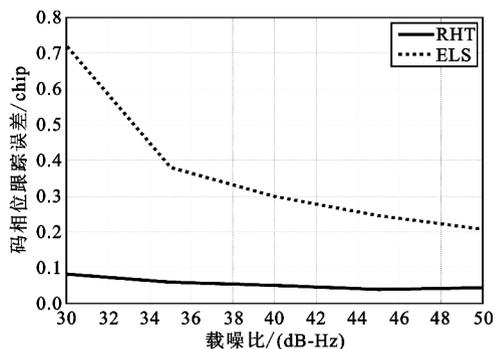


图 6 不同载噪比条件下 ELS 和 RHT 多径抑制性能比较图
Fig. 6 Comparison of multipath mitigation performance between ELS and RHT under different C/N_0

5 结论

本文主要针对 ELS 算法的多径抑制性能在预

相关带宽有限的情况下将大大下降,而增大预相关带宽又会引入更多的噪声,导致跟踪性能下降等问题,提出了一种基于随机 Hough 变换的斜率估计多径抑制算法,然后分别在预相关带宽有限和不同信噪比条件下,对比分析了该算法性能,结果表明:该算法解决了 ELS 在有限的预相关带宽(4 MHz)下不能提取直线斜率的问题,同时还解决了 ELS 不能在较低载噪比(33 dB-Hz)条件下工作的问题,并且在相同载噪比(44 dB-Hz)条件下,本文提出的算法的多径抑制性能明显优于 ELS 算法。

可以看出,本文提出的 RHT 算法具有比 ELS 算法更优越的性能,但其需要采用多相关器结构,消耗的硬件资源将大于 ELS 算法,所以针对此类斜率估计算法,如何在较低硬件资源消耗的前提下提高多径抑制性能是未来多径抑制算法的研究方向之一。

参考文献:

- [1] 刘亚欢,田宇,李国通. 基于最大似然估计的 GPS 多径估计[J]. 宇航学报,2009,30(4):1466-1471.
LIU Ya-huan, TIAN Yu, LI Guo-tong. GPS Multipath Estimation Based on Maximum Likelihood Estimation. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1466-1471. (in Chinese)
- [2] Van Nee, Richard D J, Sierveeld J, et al. The multipath estimating delay lock loop: approaching theoretical accuracy limits[C]//Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1993). Salt Lake City, UT: ION, 1993: 921-921.
- [3] Jee G I, Kim H S, Lee Y J. A GPS C/A code tracking loop based on extended Kalman filter with multipath mitigation [C]//Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2002). Portland, OR: ION, 2002: 446-451.
- [4] Van Dierendonck A J, Fenton P, Ford T. Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver [J]. Navigation, 1992, 39(3): 265-283.
- [5] Garin L, Van Diggelen F, Rousseau J. Strobe&edge correlator multipath mitigation for code [C]//Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996). Kansas City, MO: ION, 1996: 657-664.

- [6] Bryan T, Patrick F. A practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in all GPS receiver [C]//Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1994). Salt Lake City, UT: ION, 1994: 143-148.
- [7] 刘拥军,胡捍英,王大鸣. GPS 接收机多径抑制算法研究[J]. 电子对抗, 2009(3): 27-30.
LIU Yong-jun, HU Han-ying, WANG Da-ming. Study on Multipath Suppression Algorithm of GPS Receiver [J]. Electronic Warfare, 2009(3): 27-30. (in Chinese)
- [8] 王琼,张永丰,李勇,等. 一种新的基于 Hough 变换的直线识别方法[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(6): 81-83.
WANG Qiong, ZHANG Yong-feng, LI Yong, et al. A New Hough Transform Based Line Recognition Method [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2011, 8(6): 81-83. (in Chinese)
- [9] 张江鑫,沈小兰,王辉,等. 快速随机 Hough 变换多直线检测算法[J]. 浙江工业大学学报, 2013, 41(3): 346-350.
ZHANG Jiang-xin, SHEN Xiao-lan, WANG Hui, et al. Fast Multi-line Detection Algorithm Using Randomized Hough Transform [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2013, 41(3): 346-350. (in Chinese)

作者简介:



胡 辉(1970—),男,江西南昌人,2000 年于哈尔滨工程大学获水声电子工程专业博士学位,现为华东交通大学信息工程学院教授;

HU Hui was born in Nanchang, Jiangxi Province, in 1970. He received the Ph. D. degree from Harbin Engineering University in 2000. He is now a professor.

方 玲(1989—),女,安徽黄山人,华东交通大学信息工程学院硕士研究生,主要研究方向为卫星导航定位、并行算法与并行处理、机器人视觉;

FANG Ling was born in Huangshan, Anhui Province, in 1989. She is now a graduate student. Her research concerns satellite navigation position, parallel algorithm and parallel processing, robot vision.

Email: alics615@163.com

刘莹莹(1992—),女,江西赣州人,华东交通大学信息工程学院本科生。

LIU Ying-ying was born in Ganzhou, Jiangxi Province, in 1992. She is now an undergraduate student.