

WU Miao, LIU Lintao, BIAN Shaofeng, et al. Application of Modern Signal Processing Methods to Sky Wave Delay Estimation of Loran C Signal[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 327-332. (吴苗, 柳林涛, 边少锋, 等. 基于优化包络相关法的罗兰 C 天波延迟估计算法[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 327-332.)

基于优化包络相关法的罗兰 C 天波延迟估计算法

吴 苗^{1, 2, 3}, 柳林涛¹, 边少锋³, 苏晓庆^{1, 2}, 王国成^{1, 2}

1. 中国科学院 测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室, 湖北 武汉 430077; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 海军工程大学 导航工程系, 湖北 武汉 430033

Application of Modern Signal Processing Methods to Sky Wave Delay Estimation of Loran C Signal

WU Miao^{1, 2, 3}, LIU Lintao¹, BIAN Shaofeng³, SU Xiaoping^{1, 2}, WANG Guocheng^{1, 2}

1. Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Navigation, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: For insuring accuracy and validity of the Loran C signal sky wave delay estimation in low SNR, correlation coefficient time domain method based on optimization envelope is presented. Firstly, the characteristic of standard Loran C signal envelope is analysed. Differential and Quadratic differential of Loran C envelope signal are used respectively in order to form the steep rise-time of envelope signal. Secondly, receiving signal envelope and reference signal envelope are matched by correlation coefficient time domain method, then the matching peak results correspond the arriving time of ground wave and sky wave signals respectively. Hence, sky wave delay estimation time is got. Finally, through the simulation analysis and the measured signal test, it is proved that the method meets digital receiver's needs, and has the characteristics of higher the anti-jamming ability, estimation accuracy and automatic identification function. At the same time, the estimation result serves as auxiliary basis that judges the precision rate of phase track and cycle identification.

Key words: Loran C; sky wave delay; envelope correlation; correlation coefficient

摘 要: 针对低信噪比条件下, 罗兰 C 天波信号延迟时间估计的准确性和有效性问题, 提出基于优化包络的相关系数时域法。通过分析标准罗兰 C 信号包络的特征, 分别采用微分和二次微分方法对罗兰 C 信号包络进行优化, 形成陡峭的包络信号上升沿; 利用相关系数法对接收信号包络和参考信号包络进行匹配, 形成的匹配峰值分别对应地波和天波信号到达的时刻, 由此可获得天波信号的延迟时间; 通过仿真分析和实测信号试验验证, 证明该方法能满足数字化接收机的实际要求, 并具有更高的抗干扰能力、估计准确性和自动识别功能的特点。估计的结果还可以作为判别相位跟踪和周期识别正确率的辅助依据。

关键词: 罗兰 C; 天波延迟; 包络相关; 相关系数

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)03-0327-06

基金项目: 国家自然科学基金(47174050; 40904018)

1 引 言

罗兰 C 系统是一个工作频率为 100 kHz 的陆基双曲线无线电导航系统。罗兰 C 系统信号通过地波和天波两种路径传播至接收点, 使得实际接收的罗兰 C 信号为天波与地波的合成波^[1]。但由于电离层随着时间、季节、气候变化剧烈的特性, 容易造成天波信号产生畸变, 致使接收点的合成信号十分不稳定, 影响最终的定位结果^[2]。因此, 文献^[3]提出利用天地波识别技术的思路, 依

据识别的天波延迟时间选择天波到达之前最近的采样基准点, 以获取最高的信噪比。因此, 如何准确、有效地估计罗兰 C 信号天波相对地波的延迟时间是提高接收设备定位速率、定位精度和可靠性的最关键技术之一^[1]。

目前, 文献^[12]进行了多径条件下高分辨率的时间延迟估计研究, 通过文献^[3]对罗兰 C 信号天波延迟的覆盖范围研究得出了天波延迟的数学表达式, 并提出了采用频谱相除法得到天波延迟的数学模型, 形成了罗兰 C 信号天波延迟估计

的重要理论基础,在此基础上,形成了经典的 Fourier 反变换法——IFFT 和将频域功率谱转换到时域中的功率谱分析法。文献[4—6]研究了利用 IFFT 方法估计天波延迟时间,对其主要性能指标(如信噪比、窗口宽度、波天波强度比)进行了评估。由于接收机带宽有限和提高信噪比的要求,所得数据要加窗处理,加窗会影响信号的形状和分辨率。IFFT 算法由于加窗后可用数据被截短致使分辨率较低,在噪声干扰严重的地方要求时延值不能太小。因此,这种方法的实际应用价值不高。文献[7—8]采用平稳随机信号的 AR-MA 模型算法;文献[9—10]利用 AR 模型进行建模;文献[11—15]采用特征矢量分解法进行目标信号检测;文献[16—17]提出了 ESPRIT 算法进行研究分析。这些方法都是基于信号频域和功率谱分析的理论,通过估计相关矩阵延长可用数据长度,来减少数据截短对分辨率的影响,因此,具有较高的时间分辨率。同时,文献[18]对 IFFT 法、ARMA 和 MUSIC 等方法对罗兰 C 信号天地波延迟估计的准确度和分辨率进行了仿真比较分析。在实际应用中,当罗兰 C 信号接收信噪比较低的情况下,以上方法均易出现峰值不明显而形成多个峰值无法完成自动识别的问题。本文采取提取的罗兰 C 信号包络,并利用其相关特性的方式,提出了基于罗兰 C 信号优化包络相关系数的时域分析法,很好地解决了上述问题。

2 罗兰 C 信号改进

2.1 标准罗兰 C 信号

根据美国海岸警卫队发布的单个罗兰 C 发射信号的格式,标准罗兰 C 信号如图 1 所示,其数学表达式 $E_c(t)$ 为

$$E_c(t) = A \left(\frac{t}{t_p}\right)^2 \exp\left(2 - 2\frac{t}{t_p}\right) \cos(\omega t + PC) \quad (1)$$

式中, A 是信号脉冲的最大幅度; t 表示信号传播时间; t_p 是脉冲上升沿的时间(官方选用 $65 \mu\text{s}$); ω 表示角频率即 $200\,000\pi \text{ rad/s}$; PC 表示相位编码,通常取 0 或 π 。标准罗兰 C 信号实际包含包络和载频两部分信号,包络信号如图 2 所示。假设包络函数项 $E_v(t) = A \left(\frac{t}{t_p}\right)^2 \exp\left(2 - 2\frac{t}{t_p}\right)$, 则将式(1)简写为式(2)

$$E_c(t) = E_v(t) \cos(\omega t + PC) \quad (2)$$

载频项可以通过模拟的包络检波电路或者数

字的包络提取方法进行消除,得到包络函数项 $E_v(t)$,再依据文献[19]的罗兰 C 信号数学模型可得地波信号加上天波信号以及噪声和干扰信号的实际罗兰信号包络数学模型

$$E_c(t) = E_v(t) + \sum_{n=1}^N K_n E_v(t - \tau_n) + N(t) \quad (3)$$

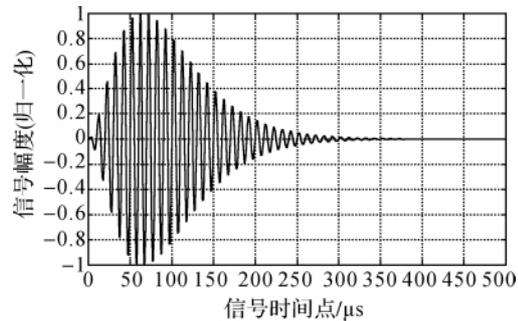


图 1 标准罗兰 C 射频信号

Fig. 1 Standard Loran C radio-frequency signal

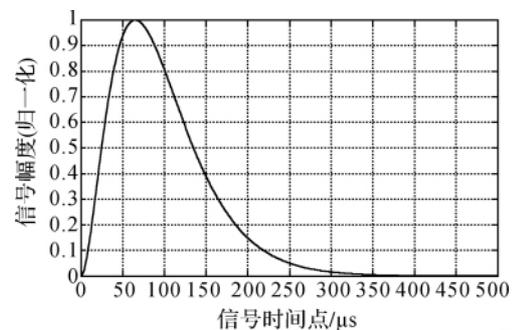


图 2 标准罗兰 C 包络信号

Fig. 2 Standard Loran C envelope signal

2.2 罗兰 C 信号优化

根据图 2,罗兰 C 信号包络的上升沿时间为 $65 \mu\text{s}$,上升时间较短。但是,由于天波的延迟为 $37.5 \sim 1500 \mu\text{s}$,最小的延迟小于信号包络上升沿,在进行时域相关时,会影响相关的结果,因此,必须通过缩短信号上升沿时间的方式,以保证相关结果的可用性。所以,利用式(4)的一次微分法和式(5)的二次微分法将罗兰 C 信号包络进行变形,变换后的罗兰 C 信号如图 3 和图 4 所示。

$$E_{1c}(t) = \text{diff}(E_c(t)) \quad (4)$$

$$E_{11c}(t) = \text{diff}(E_{1c}(t)) \quad (5)$$

由图 3、4 可以明显看出,一次微分变换后信号的上升沿时间缩短为 $19 \mu\text{s}$,最小的天波延迟相当于信号包络上升沿的 2 倍,二次微分变换后信

号的峰值出现在 $1 \mu\text{s}$ 上,上升沿变得十分陡峭,信号的相关结果的可用性将随之提高。下面通过仿真试验和实际信号测试来验证该方法是否满足罗兰 C 天地波信号延迟估计的需求。

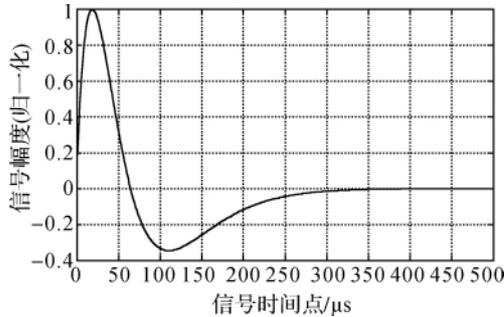


图 3 罗兰 C 包络信号的一次微分

Fig. 3 Differential of Loran C envelope signal

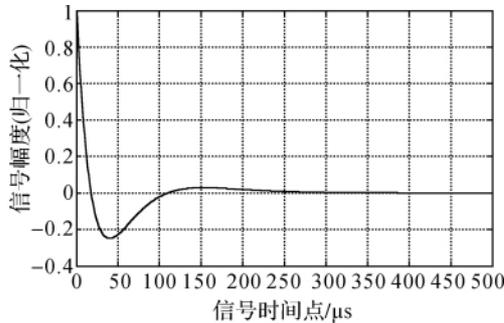


图 4 罗兰 C 包络信号的二次微分

Fig. 4 Quadratic differential of Loran C envelope signal

3 相关系数匹配法

相关系数匹配法是一种经典的匹配滤波技术,是指通过计算参考信号和被测信号的互相关系数来判别 2 个信号参数之间相似关系的过程,该相似程度可体现信号的形状和时序之间的关系^[19]。根据数学上的定义,假设接收信号 $f_1(t)$ 和参考信号 $f_2(t)$ 满足下列关系

$$f_1(t) = s(t) + w_1(t)$$

$$f_2(t) = s(t - \tau) + w_2(t)$$

式中, $s(t)$ 为无噪声的参考信号; $f_2(t)$ 为 $f_1(t)$ 的时延信号; τ 为时延差; $w_1(t)$ 和 $w_2(t)$ 分别为观测噪声,则 $f_2(t)$ 和 $f_1(t)$ 的相关系数 $\rho_{f_1 f_2}$ 为^[20]

$$\rho_{f_1 f_2} = \frac{\sum_{t=0}^T (f_1(t) - Ef_1)(f_2(t) - Ef_2)}{\sqrt{\sum_{t=0}^T (f_1(t) - Ef_1)^2 \sum_{t=0}^T (f_2(t) - Ef_2)^2}}$$

式中, Ef_1 和 Ef_2 分别代表信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 的均值,并且, $|\rho_{f_1 f_2}| \leq 1$, 在 $[-1, 1]$ 绝对尺度范围之间衡量两者的相似性。通常情况下, $\rho_{f_1 f_2}$ 越接近 1, 两者越近似的有线性关系^[20]。因此,该方法又被称为归一化相关系数法,且具有下几个特点^[19]:

(1) 其相关系数值的分布具有区域性,即在某些区域会出现相关峰。其中有 1 个特别突出的相关峰,这个峰的峰值比其他相关峰的峰值大,这个峰所在的位置就是最后的匹配点位置。

(2) 相关峰有正相关峰和负相关峰。

(3) 绝大部分的相关系数值都比较小。

这种匹配滤波技术被认为是最优和最有效的时延估计方法,能够得到最大输出信噪比,并且与输入信号的波形以及加性噪声的分布特性无关^[22]。因此,可以利用这些特性进行罗兰 C 天地波信号延迟的估计。

4 包络相关法仿真与试验

4.1 包络相关法仿真

为检验上述方法评估罗兰 C 信号天地波延迟性能的效果,利用 MATLAB 构造一个接收点处的罗兰 C 信号。根据罗兰 C 的数学模型,信号由地波、天波和干扰噪声组成,地波信号在 $100 \mu\text{s}$ 处产生,天波信号延迟地波由 $60 \mu\text{s}$,且相对地波信号强度为 0 dB,同时加载服从正态分布的白噪声,其信噪比在接收机天线端为 -10 dB(满足美国海岸警卫队定义的最小罗兰 C 接收性能标准)。

如图 5 所示,具体实现步骤如下:

- (1) 产生模拟混合信号;
- (2) 利用高阶的 FRI 数字带通滤波器对前端信号进行滤波和自适应限波处理;
- (3) 利用小波变换法或希尔伯特变换进行罗兰 C 信号包络提取,输出天地波信号包络及带内噪声;
- (4) 本地产生的理想罗兰 C 信号包络与经过处理后提取的被检测信号包络分别进行一次微分和二次微分;
- (5) 利用归一化相关系数法进行包络相关处理;
- (6) 根据相关后的峰值估计出天地波信号的时间延迟值。

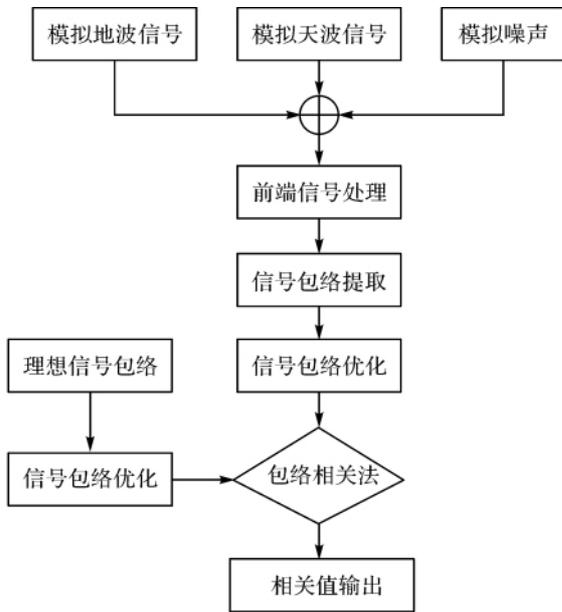


图 5 优化包络相关算法流程图

Fig. 5 Optimization envelope correlation algorithm flow diagram

按照仿真步骤,分别利用经典的加窗 IFFT 方法和上述介绍的方法进行仿真,其结果如图 6~图 8 所示,分析如下:

(1) 图 6 为利用经典的加窗 IFFT 方法将模拟的接收点罗兰 C 合成信号进行模拟仿真结果。从图中可以看出,除了在 100 μs 和 160 μs 处有两个尖峰以外,还可以看到多处有峰值的存在。主要原因是合成信号受到噪声干扰的影响,因此,无法准确地进行时间延迟估计。

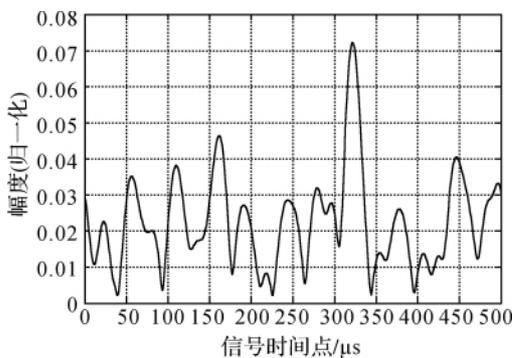


图 6 基于加窗 IFFT 的天波延迟估计

Fig. 6 Skywave delay estimate based on window IFFT

(2) 图 7 为利用二次微分优化相关方法将模拟的接收点罗兰 C 合成信号进行模拟仿真。图中可较为清晰地看出在 100 μs 和 160 μs 处有两个明显的尖峰,但尖峰处有毛刺,使尖峰识别的准

确率降低。主要原因也是由于合成信号受到噪声干扰,若噪声强度增强则无法进行识别。

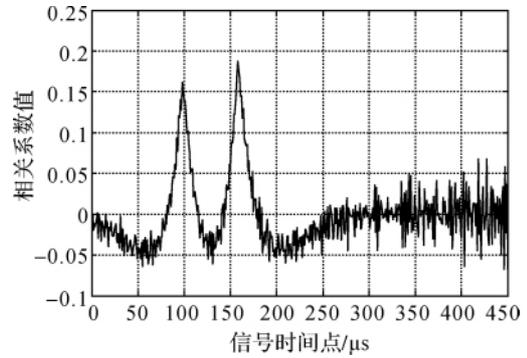


图 7 基于二次微分包络相关的天波延迟估计

Fig. 7 Skywave delay estimate based on Quadratic differential

(3) 图 8 为利用一次微分优化相关方法将模拟的接收点罗兰 C 合成信号进行模拟仿真,从图中可见在 100 μs 和 160 μs 处有两个的峰值,而且峰值区域没有明显的毛刺干扰,识别的准确率较高,相对前两种方法有明显的抗干扰能力。但是,也发现相对前 2 种方法,该方法的识别分辨率较低。

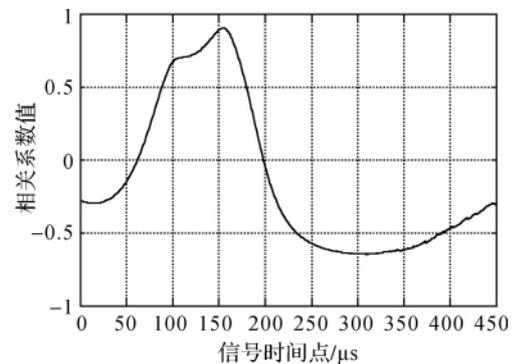


图 8 基于一次微分包络相关的天波延迟估计

Fig. 8 Skywave delay estimate based on differential

4.2 包络相关法试验验证

为了进一步验证算法的实际应用效果,利用一次微分包络相关技术对罗兰 C 信号的天波延迟进行了实际测试。2011-05-20, 15:00, 晴天天气,选择武汉一处空旷的场地,接收由安徽宣城导航台作为主台发射的罗兰 C 信号进行实测。在这种环境条件下天波变化相对平稳,测试结果稳定,易于验证测试方法的正确性。如图 9、图 10 所示,分别为实测的罗兰 C 主台脉冲群和单个的实测罗兰 C 信号;分别利用一次微分优

化包络相关技术和 IFFT 算计进行识别,如图 11、图 12 所示;再选取 10 300 μs 至 1 108 001 μs 之间的 100 个罗兰 C 信号进行统计测试验证,如图 13 所示。

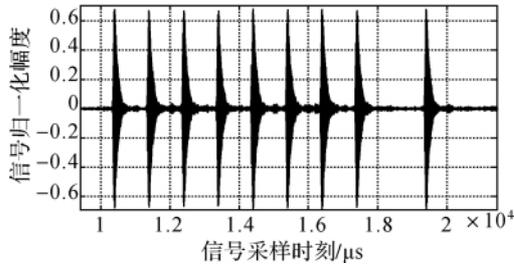


图 9 实测的罗兰 C 主台脉冲群
Fig. 9 Measured Loran C master station pulse group

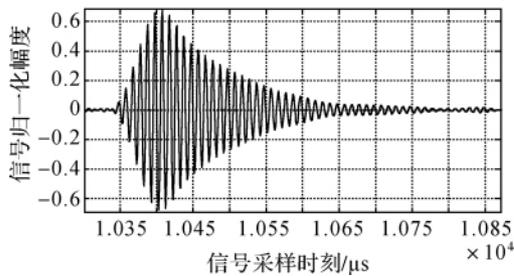


图 10 单个实测罗兰 C 信号
Fig. 10 Single measured Loran C signal

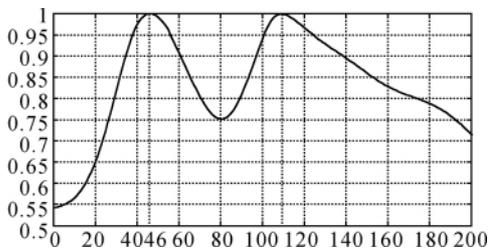


图 11 基于一次微分包络相关的实测信号估计
Fig. 11 Measured signal estimate based on differential

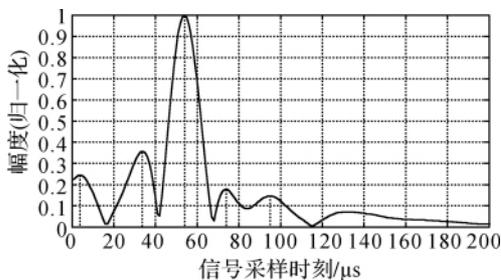


图 12 基于 IFFT 法的实测信号估计
Fig. 12 Measured signal estimate based on window IFFT

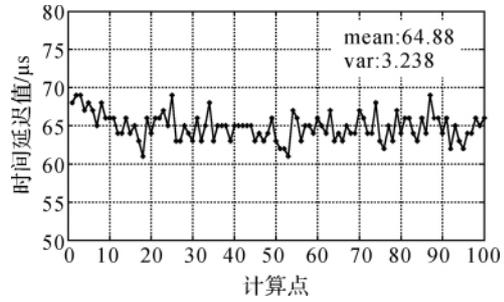


图 13 100 个罗兰 C 主台实测信号天波延迟估计统计图
Fig. 13 100 Loran C master station measured signals estimate cartogram

通过上述试验验证,可得如下结论:

(1) 如图 11 所示,利用一次微分优化包络相关技术进行测试,可在 46 μs 和 109 μs 处清晰地得到两个相关峰值,恰好对应地波信号和天波信号到达的时刻,可估算出两个峰值间的间隔,即天地波信号的延迟为 63 μs 。

(2) 如图 12 所示,经典的 IFFT 法进行实际信号处理中在 4 μs 、34 μs 、54 μs 、74 μs 等多处产生脉冲峰值,已不能清晰、准确地对峰值的具体性质作出判断,无法对天波信号的延迟进行估计。

(3) 如图 13 所示,经过 100 个实测罗兰 C 信号的时间延迟估计值的统计可知,其均值为 64.88 μs ,方差为 3.238 μs ,方差值小于信号载频周期的二分之一,因此,所得的结果不仅可以用于天波延迟的估计,还可以作为判别相位跟踪和周期识别正确率的辅助依据^[1]。

5 结 论

通过以上的仿真和试验验证可知,利用优化包络相关法可以很好地解决较低信噪比条件下,实际信号接收时出现的峰值不明显和多个峰值无法自动识别的问题。该方法具有较好的评估准确性和抗噪能力,极大地改善了峰值的识别能力,能满足现代数字化罗兰 C 接收机应用的实际需求。同时,为了解决罗兰 C 信号交叉干扰信号影响的问题,通常不使用单个信号进行分析,而是采用信号积累的方式对 10 个或者 20 个周期的信号进行累加,利用合成的信号进行时间延迟的估计,以消除交叉干扰对信号的影响。通过分析也发现,利用优化包络相关法存在分辨率不高的问题,亟待后期的研究分析和解决。

参考文献:

[1] WU Miao, ZHU Tao, LI Fangneng, et al. Principal and

- Application of Radio Navigation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 170-182. (吴苗, 朱涛, 李方能, 等. 无线电导航原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 170-182.)
- [2] YUAN Yunbin, OU Jikun. The Effects of Instrumental Bias in GPS Observations on Determining Ionospheric Delays and the Methods of Its Calibration[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 1999, 28(2): 110-114. (袁运斌, 欧吉坤. GPS 观测数据中的仪器偏差对确定电离层延迟的影响及处理方法[J]. 测绘学报, 1999, 28(2): 110-114.)
- [3] LAST J D, FARNWORTH R G, SEARLE M D. Effect of Skywave Interference on the Coverage of Loran-C[J]. IEE Proceedings-F: Radar and Signal Processing, 1992, 139(4): 306-314.
- [4] MOHAMMED A F. Effect of Loran-C Signal Parameters on Skywave Delay Estimation of IFFT Technique [J]. Electronics Letters, 2003, 39(14): 1091-1092.
- [5] MOHAMMED A F, LAST J D. IFFT Technique for Skywave Detection in Loran-C Receivers[J]. Electronics Letters, 2001, 37(6): 398-400.
- [6] ZHU Yinbing, XU Jiangning, WANG Hongxing, et al. New Loran C Sky-wave and Ground-wave Identification Algorithm Based on IFFT Spectral Division[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(5): 1153-1156. (朱银兵, 许江宁, 王红星, 等. 基于 IFFT 频谱相除的罗兰 C 天地波识别新算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1153-1156.)
- [7] MOHAMMED A F, LAST J D. Loran-C Skywave Detection Using Rational Modeling Techniques[C]//6th International Conference on Radio Receivers and Associated Systems. Bath: IEEE, 1995: 100-104.
- [8] MOHAMMED A F, LAST J D. Loran-C Skywave Delay Detection Using ARMA Algorithm [J]. Electronics Letters, 1998, 34(17): 1654-1655.
- [9] MOHAMMED A F, LAST J D. Loran-C Skywave Delay Estimation Using the AR Algorithm [J]. Electronics Letters, 1998, 34(23): 2217-2219.
- [10] WU Fumei, YANG Yuanxi. Gyroscope Random Drift Model Based on the Higher-order AR Mode[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2007, 36(4): 389-394. (吴富梅, 杨元喜. 基于高阶 AR 模型的陀螺随机漂移模型[J]. 测绘学报, 2007, 36(4): 389-394.)
- [11] YI Bian. Eigen-decomposition Techniques for Loran-C Sky-wave Estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 1997, 33(1): 117-125.
- [12] YI B, LAST J D. Loran-C Skywave Estimation Using Eigen-decomposition Techniques[J]. Electronics Letters, 1995, 31(2): 133-134.
- [13] MOHAMMED A F, LAST J D. High Resolution Techniques for Loran-C Skywave Delay Estimation[J]. Electronics Letters, 1999, 35(18): 1516-1517.
- [14] HU Dongliang, YANG Yingchun, FAN Juhong. Loran-C receiver Sky-wave Detection Based on MUSIC Algorithms [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2006, 18(3): 7-9. (胡东亮, 杨迎春, 范菊红. 基于 MUSIC 算法的罗兰 C 接收机天地波自动识别方法研究[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(3): 7-9.)
- [15] HUAN Ruohong, YANG Ruliang. A Target Detection Method for SAR Image Based on Feature Classification Discrimination [J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2009, 38(4): 324-329. (宦若虹, 杨汝良. 一种基于特征分类辨识的 SAR 图像目标检测方法 [J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 324-329.)
- [16] ROY R, KAILATH T. ESPRIT—Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1989, 37(7): 984-995.
- [17] TAN Lulu, YANG Libo, YANG Ruliang. Investigation of Tree Height Retrieval with Polarimetric SAR Interferometry Based on ESPRIT Algorithm [J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2011, 40(3): 296-300. (谈璐璐, 杨立波, 杨汝良. 基于 ESPRIT 算法的极化干涉 SAR 植被高度反演研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(3): 296-300.)
- [18] WU Miao, XU Jiangning, CHEN Zhiyong, et al. Skywave Delay Estimation of Loran C Based on Modern Signal Processing Methods[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2011, 31(2): 49-51. (吴苗, 许江宁, 陈志勇, 等. 基于现代信号处理的罗兰 C 天波延迟估计研究[J]. 海洋测绘, 2011, 31(2): 49-51.)
- [19] ZHU Yongsong, GUO Chengming. The Research of Correlation Matching Algorithm Based on Correlation Coefficient[J]. Signal Processing, 2003, 19(6): 531-534. (朱永松, 国澄明. 基于相关系数的相关匹配算法的研究[J]. 信号处理, 2003, 19(6): 531-534.)
- [20] WEI Jihua, FU Sihua. Real-time Matching Algorithm Based on the Property of Correlation Coefficients [J]. Optical Technique, 2008, 34(sup): 100-102. (魏继华, 伏思华. 基于相关系数特性的实时匹配算法[J]. 光学技术, 2008, 34(增刊): 100-102.)
- [21] LI Xuemei, TAO Ran, WANG Yue. Summary of the Time Delay Estimation [J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(4): 362-371. (李雪梅, 陶然, 王越. 时延估计技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(4): 362-371.)

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2011-07-15

修回日期: 2011-12-07

第一作者简介: 吴苗(1978—), 男, 博士生, 讲师, 研究方向为大地测量、时频分析、无线电导航信号处理。

First author: WU Miao(1978—), male, PhD candidate, lecture, majors in geodesy, timefrequency analysis, radionavigation signal processing.

E-mail: wumiao9387@163.com