

罗兰-C 信号快速捕获方法及其性能分析

李实锋^{*①②③} 王玉林^① 华宇^{①③} 袁江斌^{①②}

^①(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

^②(中国科学院大学 北京 100039)

^③(中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室 西安 710600)

摘要: 罗兰-C 系统与全球导航定位系统(GNSS)相结合已成为新的应用模式, 为用户提供可靠的定位、导航和授时服务。针对传统罗兰-C 接收机信号捕获时间长、抗噪性能差等缺点, 该文提出一种基于延迟相关技术的罗兰-C 信号抗噪快速捕获方法, 并从理论分析和仿真实验两个方面验证了该方法的有效性, 解决了强噪声背景下罗兰-C 信号的快速捕获问题。结果表明: 罗兰-C 延迟相关捕获方法的捕获时间优于 200 ms, 抗噪性能优于 -10 dB。

关键词: 信号处理; 罗兰-C; 延迟相关; 快速捕获; 抗噪; 性能分析

中图分类号: TN966.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)09-2175-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01660

Loran-C Signal Fast Acquisition Method and Its Performance Analysis

Li Shi-feng^{*①②③} Wang Yu-lin^① Hua Yu^{①③} Yuan Jiang-bin^{①②}

^①(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

^③(Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: The combination of Loran-C and Global Navigation Satellite System (GNSS) has become a new application mode, which provides reliable positioning, navigation and timing service for users. Based on the research on Loran-C signal system, considering its long signal acquisition time and poor anti-noise performance of Loran-C receiver, this paper proposes a new method of anti-noise and fast acquisition for Loran-C signal, which is based on delay correlation; and verifies the practicality of this method by theoretical analysis and carrying out simulation test. This method solves successfully the problem of fast acquisition of Loran-C signal in heavy noise environment. The result shows that the acquisition time of this method is less than 200 ms, the anti-noise property is less than -10 dB.

Key words: Signal processing; Loran-C; Delay correlation; Fast acquisition; Anti-noise; Performance analysis

1 引言

我国的BPL长波授时系统和“长河二号”导航系统均采用国际罗兰-C信号体制^[1], 罗兰-C系统是一种远程高精度大型陆基无线电导航授时系统, 它具有作用距离远、稳定性好、可靠性强、通信的抗干扰能力强等优点^[2]。当前GNSS(Global Navigation Satellite System, GNSS)系统以其使用便捷、覆盖范围广、定位精度高等突出优点受到普遍重视, 罗兰-C系统在很多领域仍然是重要的高精度授时手段。国际研究普遍认为, 罗兰-C系统与GNSS系统相结合, 可以降低PNT(Position Navigation Timing)服

务风险, 因而各国相继将罗兰-C系统进行技术升级以提升系统精度、可用性、完善性以及连续性, 使其更好的与GNSS系统相配合, 为用户提供可靠的定位、导航与授时服务。

罗兰-C接收机是实现和完成系统功能的最终设备, 而罗兰-C信号的捕获是接收机信号基带信号处理中的关键部分, 特别是在强噪声环境下, 罗兰-C接收机如何快速准确地捕获到信号是接收机设计中首先需要解决的问题。

2 罗兰-C信号与传统捕获方法

2.1 罗兰-C信号模型

罗兰-C信号是载频为100 kHz的相位调制脉冲, 发射天线底部的标准电流波形定义为^[3,4]

2012-12-18 收到, 2013-05-27 改回

国家自然科学基金(61127901)资助课题

*通信作者: 李实锋 lishifeng@ntsc.ac.cn

$$s(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau \\ A(t-\tau)^2 \exp\left[\frac{-2(t-\tau)}{65}\right] \sin(\omega_0 t + p_c(m)), & \tau \leq t \leq 65 + \tau \end{cases} \quad (1)$$

其中 A 是与峰值电流有关的常数; t 为时间 (μs); τ 为包周差 (μs); $65 \mu\text{s}$ 为脉冲包络的上升时间; $\omega_0 = 0.2 \pi \text{ rad}/\mu\text{s}$; $p_c(m)$ 为相位编码, 为 0 或 π 。

罗兰-C 脉冲组之间的间隔称为脉冲组重复周期, 用 GRI (Group Repetition Interval) 表示, 以此区分不同台站发射的信号, GRI 周期范围为 $40000 \sim 99990 \mu\text{s}$ 。罗兰-C 主台每组发射 9 个脉冲, 前 8 个脉冲间隔 1 ms , 第 8 个脉冲和第 9 个脉冲的间隔为 2 ms ; 副台只发射前 8 个脉冲^[3,4]。罗兰-C 单脉冲信号和脉冲组信号特征如图 1 所示。

2.2 罗兰-C 相位编码

罗兰-C 脉冲组信号的 8 个脉冲逐一按照二相二周期互补码进行相位编码, 二相是指载波的初相有“0”或“ π ”两种; 二周期互补码是指在一个编码周期中, 奇数周期和偶数周期轮流发射原码和补码, 罗兰-C 信号脉冲相位编码形式如表 1 所示^[4,5]。

表 1 罗兰-C 信号脉冲相位编码

	主台	副台
奇数周期	+ + - - + - + - +	+ + + + + - - +
偶数周期	+ - - + + + + -	+ - + - + + - -

注: “+”和“-”分别表示罗兰-C 信号载波的初相为“0”和“ π ”。

基于相位编码的罗兰-C 脉冲组数学表达式为

$$s(t) = \text{REP}_{2\text{GRI}} \left[\sum_{m=1}^{16} s_0(t) \delta(t - t_m) p_c(m) \right] \quad (2)$$

2.3 传统捕获方法分析

罗兰-C 信号的捕获作为接收机设计的关键技术之一, 但文献中鲜见相关研究, 在可查的文献资料

中均采用了相同的捕获方法, 文中称之为传统捕获方法。通过对相关文献资料^[6-9]的分析总结, 将传统捕获方法概括为 3 个主要步骤: 基准脉冲产生、相位检测、搜索积累, 其具体实现如下:

(1) 基准脉冲产生: 罗兰-C 接收机分频器和编码器产生与罗兰-C 信号脉冲间隔和相位编码等方面完全相同的本机脉冲。

(2) 相位检测: 在罗兰-C 组重复周期内, 正交采样接收到的罗兰-C 信号, 并将其与基准脉冲进行滑动相关检测比较, 若接收到的罗兰-C 脉冲与基准脉冲相位相同则得相关值+1, 相位相反则得相关值-1, 当罗兰-C 信号与基准信号对准时, 得到最大相关值, 此时开启搜索积累门限。

(3) 搜索积累: 经过连续数个编码周期积累后, 基准脉冲停止滑动, 同时产生 GRI 同步信号将罗兰-C 信号套住, 从而完成罗兰-C 信号的捕获。罗兰-C 信号传统捕获算法流程概括如图 2 所示。

罗兰-C 信号传统的搜索捕获方法中, 捕获的准确性主要依赖于对罗兰-C 信号相位编码的检测与识别^[10], 而相位编码的检测需要良好的信噪比条件, 以此为前提才能得到较为准确的相关累积值进行捕获判决。然而, 由于调幅体制的罗兰-C 信号本身抗噪性能较差, 加之传统捕获方法对信噪比的敏感性等原因, 势必降低罗兰-C 接收机工作范围。

同时, 传统捕获方法在每个 GRI 周期内仅能进行一次相位相关累积计算, 而其滑动的步进通常最大设置为 1 ms ^[6-9], 即每个 GRI 周期仅能实现基准脉冲最大滑动跳步 1 ms 。罗兰-C 信号的 GRI 周期按最大值小于 100 ms 计算, 当基准脉冲与罗兰-C 信号相差约一个 GRI 时, 利用该方法实现罗兰-C 信号的搜索捕获, 不考虑累积判决, 需要的捕获时间 $T_{\text{old}} \leq \text{GRI} \times \text{GRI} < 10000 \text{ ms}$, 极大地影响罗兰-C 接收机的工作效率。

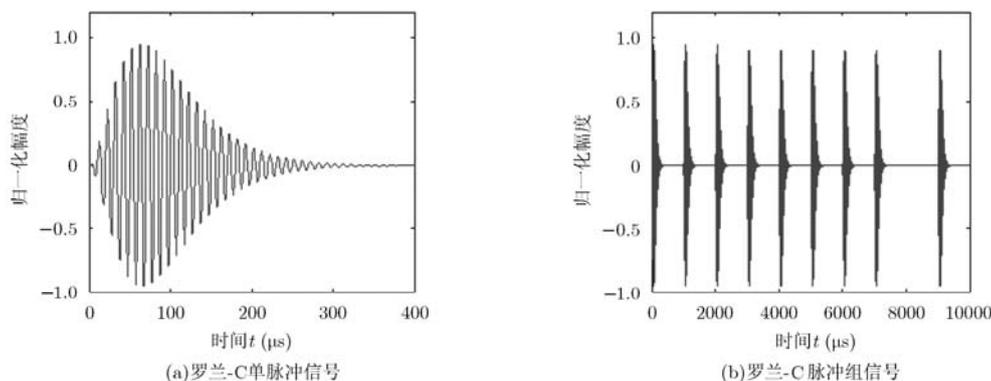


图 1 罗兰-C 信号特征

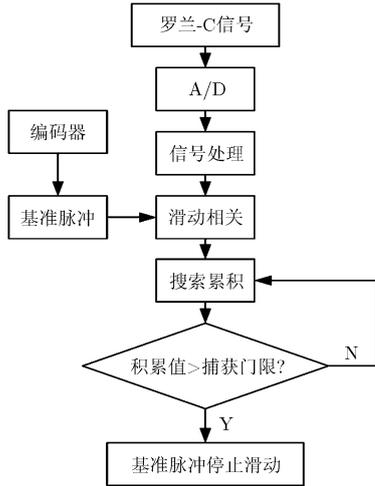


图 2 传统捕获算法流程图

3 延迟相关捕获方法

3.1 延迟相关捕获

鉴于罗兰-C 信号的周期性，且不同发射台 GRI 不同的特点，采用延迟相关捕获算法即可实现罗兰-C 信号的搜索与捕获，且根据预设的 GRI 值实现指定台链的搜索与捕获，或者从最小 GRI 值开始依次搜索实现接收范围内所有罗兰-C 信号的捕获。罗兰-C 信号延迟相关捕获原理如图 3 所示。

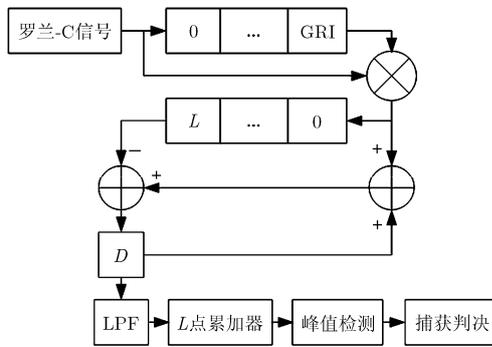


图 3 延迟相关捕获原理

设罗兰-C 脉冲组信号相位编码为“+”的脉冲为 $s_+(t) = A(t)\sin(\omega_0 t)$ ，则相位编码为“-”的脉冲为 $s_-(t) = A(t)\sin(\omega_0 t + \pi) = -A(t)\sin(\omega_0 t)$ ，即

$$s(t) = \pm A(t)\sin(\omega_0 t) \quad (3)$$

根据罗兰-C 相位编码特点，罗兰-C 信号延迟一个 GRI 与自身相关可以得到两种结果：

$$\begin{aligned} R_{1,3,5,7}(t) &= s_+(t) \cdot s_+(t) = s_-(t) \cdot s_-(t) \\ &= A^2(t)\sin^2(\omega_0 t) \\ &= \frac{1}{2}A^2(t)[1 - \cos(2\omega_0 t)] \xrightarrow{\text{LPF}} \frac{1}{2}A^2(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R_{2,4,6,8,9}(t) &= s_+(t) \cdot s_-(t) = s_-(t) \cdot s_+(t) = -A^2(t)\sin^2(\omega_0 t) \\ &= -\frac{1}{2}A^2(t)[1 - \cos(2\omega_0 t)] \xrightarrow{\text{LPF}} \frac{1}{2}A^2(t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum_L R_{1,3,5,7} = -\sum_L R_{2,4,6,8,9} = \frac{1}{2}\sum_L A^2(t) \quad (6)$$

式(6)计算结果即为相关峰，由此可知罗兰-C 脉冲信号的相位编码仅影响运算结果的正负，不影响其绝对值大小，其中第 1,3,5,7 脉冲相关运算得到正相关峰，第 2,4,6,8,9 脉冲相关运算得到负相关峰，然后进行峰值检测和捕获判决即可实现罗兰-C 信号捕获。

3.2 累积长度的选择

罗兰-C 信号延迟相关捕获方法中，累积长度 L 的选择非常关键，因为选取合适的累积长度得到较为理想的相关累积峰(简称“相关峰”)特性，可以降低峰值检测难度，提高捕获精度。下面选取 $L = 16, 64, 128, 192, 256 \mu\text{s}$ 共 5 种情况进行仿真比较分析，结果如图 4 所示。

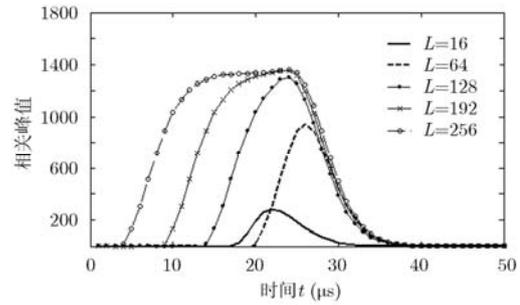


图 4 累积长度 L 取值不同的相关峰特性

仿真结果表明：

- (1) 当 $L < 128 \mu\text{s}$ 时，相关峰值不仅小而且有毛刺，其不利于峰值的检测；
- (2) 随着累积长度的增加，相关峰值逐步增大且变得相对光滑，但其尖锐程度也随即下降；
- (3) 当 $L < 128 \mu\text{s}$ 时，相关峰呈现出多值性，无法实现准确的峰值检测。

综合上述分析，累积长度 L 取 128 既保证了相关峰值较大又能兼顾相关峰的尖锐特性，既可以提高峰值检测灵敏度又可以保证峰值检测精度，因此本文建议取 $L = 128 \mu\text{s}$ 。

4 延迟相关捕获速度分析

为了验证该方法的捕获速度，首先产生一组 $\text{GRI} = 20 \text{ ms}$ 的带相位编码的罗兰-C 脉冲组信号，然后采用延迟相关捕获方法对其进行仿真分析，图 5 是延迟相关捕获仿真结果。

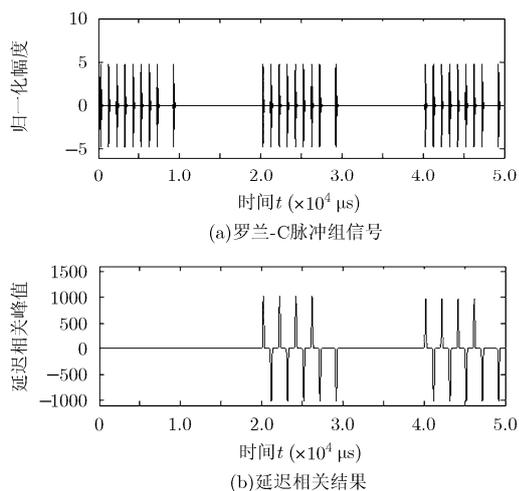


图5 延迟相关捕获仿真结果

仿真结果表明:

(1)采用延迟相关捕获方法,最多只需要两个GRI周期即可实现峰值检测,进而实现罗兰-C信号捕获,捕获时间 $T_{\text{new}} \leq 2 \times \text{GRI} < 200 \text{ ms}$,比传统信号捕获方法的捕获速度提高了50倍;

(2)利用相关峰的重复周期与GRI相同的特性,可以实现罗兰-C台链的识别;

(3)利用每组相关峰的个数与每组GRI的罗兰-C脉冲个数相同的特性,可以实现罗兰-C主、副台的自动识别。

5 延迟相关捕获抗噪分析

5.1 抗噪理论分析

设 $y(t) = s(t) + n(t)$, $s(t)$ 为罗兰-C信号, $n(t)$ 为噪声,延迟时间 $T = \text{GRI}$,考虑到罗兰-C脉冲信号以GRI为重复周期,考虑相位编码,奇数脉冲 $s(t+T) = s(t)$,偶数脉冲 $s(t+T) = -s(t)$,对 $y(t)$ 进行延迟相关计算为

$$R_y(t) = y(t) \cdot y(t+T) \\ = \pm s^2(t) + s(t)[n(t+T) + n(t)] + n(t)n(t+T) \quad (7)$$

考虑到罗兰-C信号与噪声以及噪声与噪声之间的不相关性,式(7)中第2项和第3项的累积结果近似为零,即

$$\sum_L [R_y(t)] \approx \pm \sum_L [s^2(t)] \\ = \pm \frac{1}{2} \sum_L [A^2(t) [1 - \cos(2\omega_0 t)]] \xrightarrow{\text{LPF}} \\ \pm \frac{1}{2} \sum_L A^2(t) \quad (8)$$

式(7)和式(8)中,罗兰-C脉冲组的奇数脉冲取正号,偶数脉冲取负号。根据式(6)和式(8)可知,对带噪声的罗兰-C信号进行延迟相关运算,可以近似

得到与对不带噪声的罗兰-C信号进行延迟相关运算相同的结果,即仅与罗兰-C信号包络相关的累积值,因此罗兰-C信号的延迟相关捕获方法具有良好的抗噪性能。

5.2 抗噪性能仿真

USCG (United State Coast Guard, USCG)发布的罗兰-C接收机最低性能标准要求天线输入端信噪比 $\text{SNR} \geq -10 \text{ dB}$ ^[11]。相关资料表明^[12]:现代罗兰-C接收机经过数字滤波后信噪比可达30 dB以上,一般的数字接收机能达到22 dB。为了验证该捕获方法的抗噪性能,下面分别产生信噪比 $\text{SNR} = -5 \text{ dB}, -10 \text{ dB}, -15 \text{ dB}$ 的罗兰-C信号进行仿真实验,通过得到的相关峰特性来判断该方法的抗噪性能,仿真结果如图6所示。

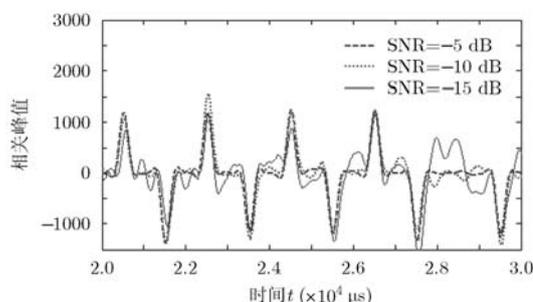


图6 不同信噪比的罗兰-C信号延迟相关结果

仿真结果表明:

(1)当 $\text{SNR} \geq -5 \text{ dB}$ 时,采用延迟相关运算可以得到较为理想的相关峰,容易实现准确的峰值检测和捕获判决;

(2)随着信噪比的降低,相关峰随之变差,当 $\text{SNR} \leq -15 \text{ dB}$ 时,相关峰特性不够明显,基本无法实现准确的峰值检测。

综上所述,延迟相关捕获方法未经滤波而优于 -10 dB 的抗噪性能具有较强的适用性。

6 算法的硬件实现与验证

6.1 实验验证系统设计

利用延迟相关捕获方法的相关研究成果,搭建基于信号模拟源+AD+SRAM+FPGA+DSP的罗兰-C信号捕获实现验证系统,其中罗兰-C信号模拟源主要提供模拟的激励信号,AD完成信号的模/数转换,SRAM主要用于信号的延迟,FPGA主要完成信号的相关累积运算,DSP主要完成峰值检测与判决,其详细结构组成见图7所示。

6.2 算法有效性验证

利用实验验证系统对信号模拟源产生的罗兰-C

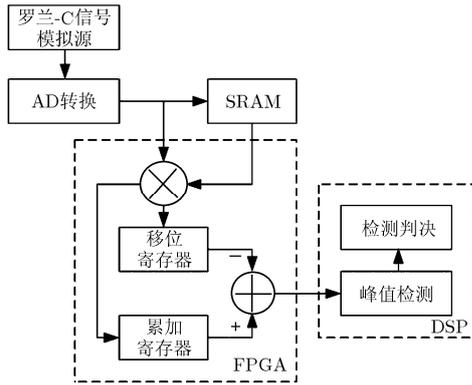


图7 实验验证系统结构

信号进行延迟相关捕获实验, 通过FPGA在线逻辑分析仪对捕获过程进行抓包测试以验证该算法的有效性, 其结果如图8所示。

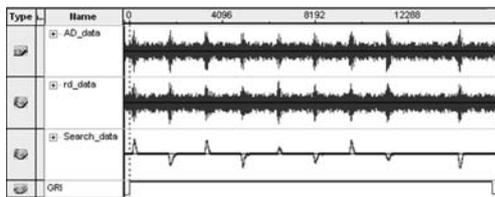


图8 罗兰-C信号捕获测试

图8中, AD_data为AD采样后的罗兰-C信号, rd_data为经过一个GRI周期延迟的罗兰-C信号, Search_data为延迟相关累积峰, GRI为捕获标识信号, 由此验证了罗兰-C信号延迟相关捕获方法的有效性。

7 结论

罗兰-C系统作为星基导航授时系统最好的备份系统, 可以与北斗二代卫星导航系统——中国导航定位授时系统的核心相结合形成我国比较完善的高精度组合导航授时系统, 构成相对较为完善的PNT体系。本文主要针对罗兰-C接收机传统捕获方法的不足, 提出了一种基于延迟相关技术的罗兰-C信号捕获新方法, 仿真结果结果表明该方法具有较快的捕获速度以及较强的抗干扰能力, 解决了高噪声背景下罗兰-C接收机的信号捕获问题, 为高性能罗兰-C接收机的设计提供了技术支持。

参考文献

- [1] 陈洪卿. 北斗系统与中国PNT应用平台[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(12): 1075-1081.
Chen H Q. Beidou satellite navigation system and the application foundation of positioning navigation & timing in China[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(12): 1075-1081.
- [2] 李实锋, 王玉林, 华宇. 罗兰-C数据解调与解码技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1407-1413.
Li Shi-feng, Wang Yu-lin, and Hua Yu. Research of Loran-C data demodulation and decode technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(6): 1407-1413.
- [3] 周隽, 崔国恒, 许江宁. 罗兰-C数据链交叉干扰抑制新方法[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(4): 173-175.
Zhou Jun, Cui Guo-heng, and Xu Jiang-ning. A new CRI suppression method in Loran C datelink[J]. *Journal of Projectiles' Rockets' Missiles and Guidance*, 2012, 32(4): 173-175.
- [4] 林洪文, 周洪庆, 刘福太. 强载波干扰条件下的罗兰-C相位编码识别研究[J]. 测试技术学报, 2012, 26(3): 252-255.
Lin Hong-wen, Zhou Hong-qing, and Liu Fu-tai. Research on phase coding identification of Loran-C signal under the background of strong CWI[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2012, 26(3): 252-255.
- [5] 林洪文, 张其善, 杨东凯. 基于apFFT的罗兰-C信号相位编码识别[J]. 天津大学学报, 2011, 44(3): 257-260.
Lin Hong-wen, Zhang Qi-shan, and Yang Dong-kai. Phase coding identification of Loran-C signal based on apFFT[J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(3): 257-260.
- [6] 洪德本. 无线电导航仪器[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1995: 44-46.
- [7] 贾玉涛. 无线电导航[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 68-69.
- [8] 陆文兴. 航海仪器[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2001: 26-27.
- [9] 谭荣煜. 罗兰-C相位编码技术及其应用[J]. 渔业机械仪器, 1990, 17(86): 18-21.
Tan Rong-yu. Loran-C phase coding technology and application[J]. *Fishery Machinery and Instrument*, 1990, 17(86): 18-21.
- [10] Last D and Bian Y. Carrier wave interference and Loran-C receiver performance[J]. *IEE Proceedings F, Radar and Signal Processing*, 1993, 140(5): 273-283.
- [11] 朱银兵, 许江宁, 崔国恒. 罗兰-C周期识别时频分析方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 732-736.
Zhu Yin-bing, Xu Jiang-ning, and Cui Guo-heng. Time-frequency methods for period identification of Loran-C[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 732-736.
- [12] 林慧贞, 罗斌凤, 胡东亮. 波形匹配法识别罗兰-C信号周期[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(5): 81-83.
Lin Hui-zhen, Luo Bin-feng, and Hu Dong-liang. Algorithm of matching wave for cycle identification of Loran-C[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(5): 81-83.

李实锋: 男, 1983年生, 博士生, 助理研究员, 研究方向为无线电导航与授时技术。

王玉林: 男, 1957年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为时间与频率。

华宇: 男, 1974年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为时间与频率。