

DOI: 10.7652/xjtub201310016

# 罗兰-C 信号的抗干扰快速检测方法

李实锋<sup>1,2,3</sup>, 王玉林<sup>1</sup>, 华宇<sup>1,3</sup>, 高媛媛<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院国家授时中心, 710600, 西安; 2. 中国科学院大学, 100039, 北京;

3. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室, 710600, 西安)

**摘要:** 针对罗兰-C 导航定时接收机传统信号检测时间长、抗干扰性能差的缺点,提出了一种罗兰-C 信号抗干扰快速检测方法。该方法首先将经过 AD 采样的罗兰-C 信号与本地产生的载波信号进行混频得到同向/正交两个支路信号,通过低通滤波器滤除高频成分后进行平方相加消除本地载波与罗兰-C 信号载波之间的相位差,然后将得到的罗兰-C 信号包络进行延迟相乘累积得到相关累积峰,基于相关峰的分析判决即可实现罗兰-C 信号的检测。理论分析与实验结果表明:该方法的信号检测时间少于 200 ms,比传统方法提高了数千倍;抗窄带干扰性能优于 -20 dB,比传统方法提高了 10 dB,解决了强窄带干扰环境下罗兰-C 信号的快速检测问题。

**关键词:** 罗兰-C;信号检测;窄带干扰;抗干扰

**中图分类号:** TN966.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)10-0091-06

## A Fast Anti-Interference Detection Method for Loran-C Signal

LI Shifeng<sup>1,2,3</sup>, WANG Yulin<sup>1</sup>, HUA Yu<sup>1,3</sup>, GAO Yuanyuan<sup>1,3</sup>

(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:** A fast anti-interference detection method for Loran-C signal is proposed to improve the disadvantages of Loran-C navigation and timing receiver, such as long time in signal detection and poor performance in anti-interference. The method obtains two in-phase/quadrature(I/Q) branch signals through mixing the Loran-C signal that has been AD sampled and the local carrier signal. Then the phase difference between the local carrier and the Loran-C signal is eliminated by filtering out the high frequency components when the I/Q signals pass through a low-pass filter and calculating the sum of squares. Finally, delay multiplications on the signal envelopes of the obtained Loran-C signals are performed and accumulated to get the correlation accumulation peak. The detection of the Loran-C signal is then realized based on the analysis and judgment on the correlation peak. The theoretical analysis and experiment results show that the detection time of the proposed method is less than 200 ms, which is thousands of times shorter than the traditional method is, and the performance of anti-narrow band interference is superior to -20 dB, improving 10 dB compared with the traditional method. It seems that the fast detection problem of Loran-C signal in the intensive narrow-band interference environment is solved.

**Keywords:** Loran-C; signal detection; narrow-band interference; anti-interference

收稿日期: 2012-12-20。 作者简介: 李实锋(1983—),男,博士生,助理研究员;王玉林(通信作者),男,研究员,博士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61127901)。

网络出版时间: 2013-08-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130823.1008.003.html>

罗兰-C 系统(包括 BPL 长波授时系统和“长河二号”导航系统)是一种远程高精度大型陆基无线电导航授时系统,具有作用距离远、稳定性好、可靠性强、通信抗干扰能力强等优点<sup>[1]</sup>。罗兰-C 系统作为星基导航授时系统最好的备份,可以与北斗二代卫星导航系统——中国定位、导航与授时系统(Position Navigation Timing, PNT)的核心<sup>[2]</sup>相结合形成我国比较完善的高精度组合导航授时系统,构成我国相对较为完善的 PNT 体系。国际研究普遍认为,罗兰-C 系统与全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)相结合,可以降低 PNT 服务风险,因而各国相继将罗兰-C 系统进行现代化技术升级改造以提升系统精度、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 信号检测是接收机基带信号处理中的关键部分,特别是在强干扰环境下,罗兰-C 接收机如何快速准确的检测到信号是接收机设计中首先需要解决的问题。文献[3-7]均是基准脉冲与罗兰-C 信号进行滑动相关,根据相位编码识别实现信号检测,其信号检测速度依赖于滑动步进,而罗兰-C 信号的低频特性导致较小的滑动步进致使信号检测时间达数百秒,同时在强窄带干扰环境下相位编码识别可靠性降低势必导致传统信号检测方法失效。针对上述问题,本文提出一种基于包络延迟相关技术的信号检测方法,理论分析和实验结果均表明,本文方法不仅具有较快的信号检测速度,而且具有良好的抗干扰性能。

## 1 罗兰-C 信号与传统检测方法

### 1.1 罗兰-C 信号模型

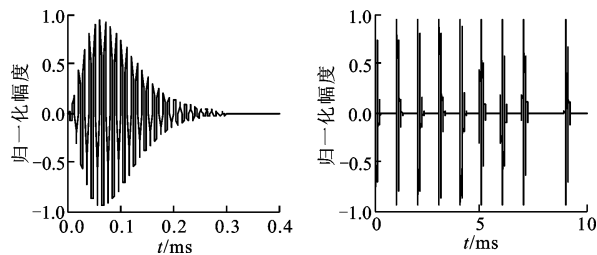
罗兰-C 信号是载频为 100 kHz 的相位调制脉冲,发射天线底部的标准电流波形定义为<sup>[8-10]</sup>

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

式中: $A$  为与峰值电流有关的常数; $t$  为发射信号时间( $\mu\text{s}$ ); $\tau$  为包周差( $\mu\text{s}$ ); $65$  ( $\mu\text{s}$ )为包络的上升时间; $\omega_0 = 0.2\pi$  rad/ $\mu\text{s}$ ;  $p_c(m)$  为相位编码,值为 0 或  $\pi$ 。

罗兰-C 脉冲组的间隔称为组重复周期(Group Repetition Interval, GRI),以此区分不同发射台站

信号。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 个脉冲间隔 2 ms;副台发射前 8 个脉冲<sup>[8-9]</sup>。罗兰-C 信号特征如图 1 所示。



(a) 罗兰-C 单脉冲信号

(b) 罗兰-C 脉冲组信号

图 1 罗兰-C 信号特征

### 1.2 传统检测方法与仿真

罗兰-C 信号传统检测方法主要包括以下 2 个步骤<sup>[3-7]</sup>。

(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基准脉冲。

(2)相位检测: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,此时完成信号检测。

仿真流程:

(1)仿真产生具有相位编码的罗兰-C 脉冲组信号,采样间隔设为 0.025  $\mu\text{s}$ ;

(2)对罗兰-C 信号进行整形,形成宽度为 5  $\mu\text{s}$ 、周期为 10  $\mu\text{s}$ 、幅度为 1 的方波信号;

(3)仿真产生宽度为 0.25  $\mu\text{s}$ 、间隔为 2.5  $\mu\text{s}$ 、幅度为 1 的正交脉冲对,脉冲对间隔为 125  $\mu\text{s}$ ,每 1 ms 设置 8 对,每 10 ms 设置 80 对形成一个基准脉冲群,脉冲群间隔为脉冲组重复周期;

(4)将基准脉冲群与整形后的罗兰-C 信号进行逻辑相乘,得到 1 或 0;

(5)将 9 个码元内得到的相乘结果分别进行积累 20 个 GRI 周期,主台共积累 180 次,;

(6)对积累结果进行逻辑判断,当累积值小于 180 时,控制基准脉冲群进行滑动跳步,如此循环直到检测到罗兰-C 信号。

### 1.3 传统检测方法性能分析

根据罗兰-C 信号传统检测过程,在每个 GRI 周期内仅能进行一次相位累积计算,由于滑动的步进

通常最大设置为  $10\text{ }\mu\text{s}$ ,即每个 GRI 周期仅能实现基准脉冲跳步  $10\text{ }\mu\text{s}$ ,因此罗兰-C 信号的 GRI 周期按最大值小于  $100\text{ ms}$  计算,当基准脉冲与罗兰-C 信号相差约一个 GRI 时,利用传统方法容易计算实现信号检测需要的时间  $T_{\text{old}} < 1\text{ }000\text{ s}$ 。

为了验证传统检测方法的抗干扰性能,分别选取信干比为  $0$ 、 $-10$ 、 $-20$  和  $-30\text{ dB}$ ,窄带干扰频率为  $85\text{ kHz}$  的罗兰-C 信号进行仿真分析,其检测概率与信干比的关系如表 1 所示。

表 1 检测概率与信干比的关系

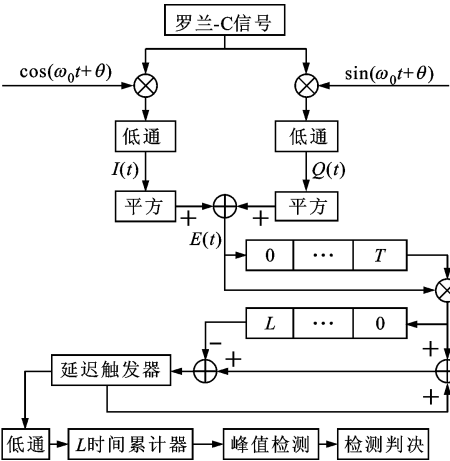
| $R_{\text{SI}}/\text{dB}$ | 0   | -10 | -20 | -30 |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 检测概率/%                    | 100 | 100 | 90  | 57  |

根据表 1 可知,罗兰-C 信号传统检测方法在信干比为  $-10\text{ dB}$  时,可实现准确的信号检测。

2 延迟相关检测方法

2.1 延迟相关检测方法原理

由于罗兰-C 信号具有 GRI 周期重复性,且不同发射台的组重复周期不同,因此采用延迟相关检测方法即可实现罗兰-C 信号的搜索检测,且根据预设的 GRI 值可实现指定台链的搜索检测,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 台站信号的检测。罗兰-C 信号的延迟相关检测方法原理如图 2 所示。



$T$  为设定的 GRI 周期; $L$  为累计时间

图 2 罗兰-C 信号的延迟相关检测原理

设罗兰-C 信号为  $A(t)\sin(\omega_0 t)$ ,其中  $A(t)$  为罗兰-C 信号包络, $\sin(\omega_0 t)$  为信号载波,则有

$$A(t)\sin(\omega_0 t)\sin(\omega_0 t + \theta) =$$
$$0.5A(t)[\cos\theta - \cos(2\omega_0 t + \theta)] \quad (2)$$
$$A(t)\sin(\omega_0 t)\cos(\omega_0 t + \theta) =$$

$$0.5A(t)[\sin\theta + \sin(2\omega_0 t + \theta)] \quad (3)$$

对式(2)和式(3)分别进行低通滤波,得到同向支路信号和正交支路信号分别为

$$I(t) = 0.5A(t)\cos\theta$$
$$Q(t) = -0.5A(t)\sin\theta \quad (4)$$

则有

$$E(t) = I^2(t) + Q^2(t) = 0.25A^2(t) \quad (5)$$

式中: $E(t)$  为与包络平方相关的运算结果。

根据罗兰-C 信号重复周期的特点可以得到

$$\sum_L R_E(t) = \sum_L E(t)E(t + T) =$$
$$\sum_L E^2(t) = \frac{1}{16} \sum_L A^2(t) \quad (6)$$

式(6)的计算结果即为相关峰,由此可知延迟相关检测方法消除了罗兰-C 相位编码的影响,相关运算均得到正的相关累积峰,然后进行峰值检测和判决即可实现罗兰-C 信号检测。

2.2 累积长度的选择

罗兰-C 延迟相关检测方法中,累积时间  $L$  的选择非常关键,选取合适的  $L$  可以得到较为理想的相关累积峰(简称相关峰),进而提高罗兰-C 信号的检测准确性和检测精度。下面选取  $L=16,32,64,96,160,192\text{ }\mu\text{s}$  共 6 种情况来进行仿真比较分析,从而选择合适的  $L$ ,仿真结果如图 3 所示。

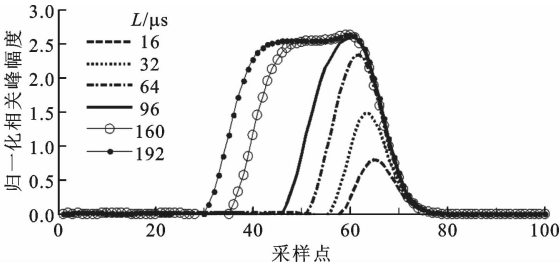


图 3 累积时间  $L$  取值不同时相关峰特性

仿真结果表明:

- (1) 当  $L < 64\text{ }\mu\text{s}$  时,相关峰值较小,不利于峰值的检测;

(2) 随着  $L$  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  $L > 96\text{ }\mu\text{s}$  时,相关峰呈现出多值性,无法实现准确的峰值检测。

综上所述, $L$  取  $96\text{ }\mu\text{s}$  同时保证了相关峰值的幅度和尖锐特性,有利于保证峰值检测灵敏度和检测精度,因此本文建议取  $L=96\text{ }\mu\text{s}$ 。

3 延迟相关检测时间分析

为了验证该方法的快速检测特性,同时为了便

于仿真,首先产生组重复周期为 20 ms 的罗兰-C 脉冲组信号,通过混频滤波等处理消除罗兰-C 信号的载波,然后采用延迟相关方法进行运算,最后通过累积得到相关峰,结果如图 4 所示。

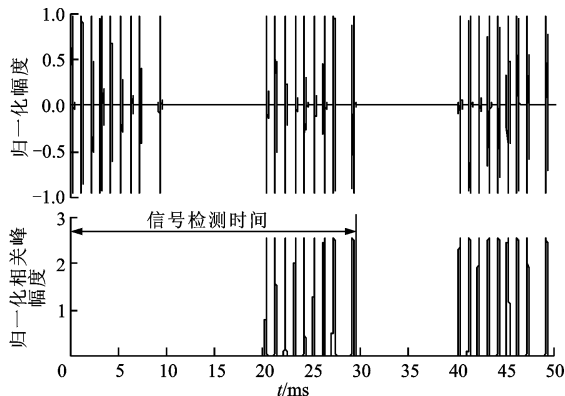


图 4 延迟相关检测仿真结果

仿真结果表明:

(1) 采用延迟相关检测方法,最多只需要 2 个 GRI 周期即可实现峰值检测,进而实现罗兰-C 信号检测,容易计算检测时间  $T_{\text{new}} < 200$  ms,比传统信号检测方法的检测速度提高了数千倍;

(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 台链的自动识别;

(3) 利用每组 GRI 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。

## 4 强窄带干扰下的信号检测仿真分析

### 4.1 理论分析

设  $y(t) = A(t) \sin(\omega_0 t) + B \sin(\omega_1 t)$ , 其中  $A(t) \sin(\omega_0 t)$  为罗兰-C 信号,  $B \sin(\omega_1 t)$  为窄带干扰 (Narrow-Band Interference, NBI), 令 NBI 频率与罗兰-C 信号频率差为  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0$ , 则有

$$y(t) \sin(\omega_0 t + \theta) = [s(t) + B \sin(\omega_1 t)] \sin(\omega_0 t + \theta) \quad (7)$$

$$y(t) \cos(\omega_0 t + \theta) = [s(t) + B \sin(\omega_1 t)] \cos(\omega_0 t + \theta) \quad (8)$$

对式(6)和式(7)分别进行低通滤波,得到同向支路信号和正交支路信号分别为

$$I(t) = 0.5[A(t) \cos\theta + B \cos(\Delta\omega t - \theta)] \quad (9)$$

$$Q(t) = -0.5[A(t) \sin\theta - B \sin(\Delta\omega t - \theta)] \quad (10)$$

则由式(8)和式(9)可以得到

$$E(t) = I^2(t) + Q^2(t) =$$

$$\frac{1}{4}[A^2(t) + B^2] + \frac{1}{2}BA(t) \cos(\Delta\omega t) \quad (11)$$

对  $E(t)$  进行延迟相关计算可以得到

$$R_E(t) = E(t)E(t+T) = \frac{1}{16}[A^2(t) + B^2]^2 + \frac{1}{4}BA(t)[A^2(t) + B^2] \cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \cos\left(\omega_\Delta t + \frac{\Delta\theta}{2}\right) + \frac{1}{8}B^2 A^2(t) \cos\left(2\omega_\Delta t + \frac{\Delta\theta}{2}\right) + \frac{1}{8}B^2 A^2(t) \cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (12)$$

式中:  $R_E$  为延迟相关值;  $\Delta\theta$  为罗兰-C 信号与窄带干扰的载波相位差;  $B$  为 NBI 的幅度。

$R_E(t)$  经过低通滤波累积后为相关峰,由此可知在窄带干扰下,延迟相关检测方法的有效性主要取决于 NBI 频率和滤波器截止频率的关系:

(1) 当  $\Delta\omega \leq F_{\text{stop}}$  时,低通滤波器无法滤除  $R_E(t)$  中与 NBI 频率有关的项,不能得到较好的相关峰,其中  $F_{\text{stop}}$  为低通滤波器截止频率;

(2) 当  $\Delta\omega > F_{\text{stop}}$  时,  $R_E(t)$  经过低通滤波后与 NBI 频率无关,可以得到较好的相关峰以实现有效的信号检测。

### 4.2 滤波器截止频率的选择

根据上述分析可知,罗兰-C 延迟相关检测方法抗 NBI 的性能与低通滤波器的截止频率  $F_{\text{stop}}$  相关,  $F_{\text{stop}}$  越小, NBI 抑制性能越好。下面分别取  $F_{\text{stop}} = 2, 3, 4, 5$  kHz, 通过仿真不同  $F_{\text{stop}}$  对相关峰特性的影响,从而选择合适的  $F_{\text{stop}}$  以便后续的抗 NBI 性能仿真,仿真结果如图 5 所示。

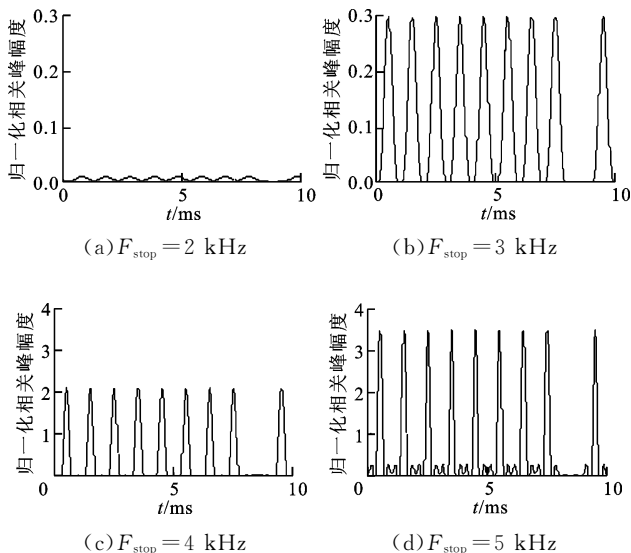


图 5 不同截止频率的相关峰特性

仿真结果表明:当  $F_{\text{stop}}=2,3\text{ kHz}$  时,相关峰值较小,且前后 2 个相关峰有重叠;当  $F_{\text{stop}}=5\text{ kHz}$  时,相关峰值较大,但同时噪底也比较大;当  $F_{\text{stop}}=4\text{ kHz}$  时,相关峰值大,且噪底小,相对较为理想,因此后续的仿真分析取  $F_{\text{stop}}=4\text{ kHz}$ 。

4.3 不同信干比下的相关峰特性

GB/T-12752-1991《船用罗兰-C 接收设备通用技术条件》中规定罗兰-C 接收机信号接收条件要求信干比  $R_{\text{SI}}\geq-10\text{ dB}$ 。仿真取近同步窄带干扰<sup>[11]</sup>频率为  $85\text{ kHz}$ ,信干比分别为  $-20$ 、 $-30$ 、 $-40$ 、 $-50\text{ dB}$  的罗兰-C 信号,通过对其进行延迟相关运算得到相关累积峰,根据相关峰特性判决其是否能够实现罗兰-C 信号的有效检测,其仿真结果如图 6 所示。

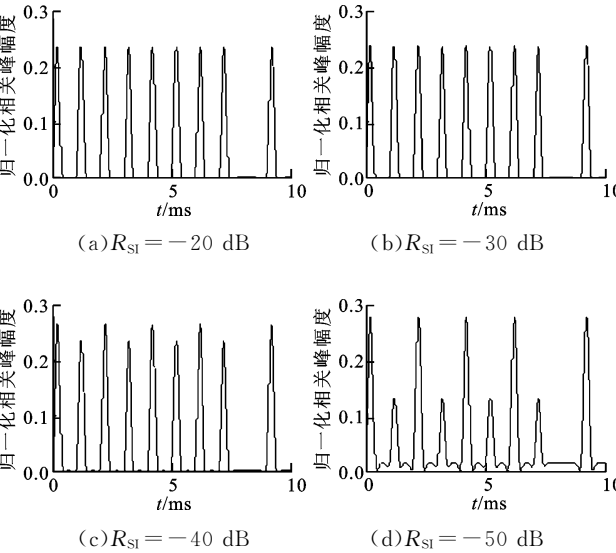


图 6 不同信干比的相关峰特性

仿真结果表明:当  $R_{\text{SI}}>-40\text{ dB}$  时,延迟相关运算可以得到良好的相关累积峰,容易实现相关峰的识别,进而实现罗兰-C 信号的准确检测;当  $R_{\text{SI}}=-50\text{ dB}$  时,相关峰特性变差,噪底增大,但仍然可以实现相关峰的识别,进而完成信号检测,比传统检测方法至少提高了  $30\text{ dB}$ 。

5 罗兰-C 信号快速检测的实验验证

5.1 实验验证系统设计

利用上述罗兰-C 信号延迟相关快速检测方法的相关研究成果,搭建基于罗兰-C 信号模拟源+AD+FPGA+SRAM+DSP 的罗兰-C 信号检测实验验证系统,其中罗兰-C 信号模拟源主要为实验验证提供模拟的激励信号,AD 完成对罗兰-C 信号的模/数转换,FPGA 主要完成罗兰-C 信号包络的提

取以及相关累积运算,SRAM 主要用于信号的延迟,DSP 主要完成峰值检测与判决,系统详细组成结构如图 7 所示。

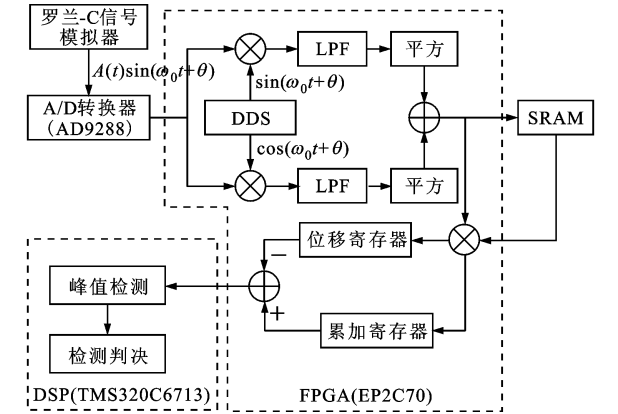


图 7 实验验证系统结构

5.2 功能测试

在实验室利用设计的实验验证系统对罗兰-C 信号模拟源产生的罗兰-C 信号进行信号检测实验,测试验证延迟相关检测方法的有效性,其测试界面如图 8 所示。

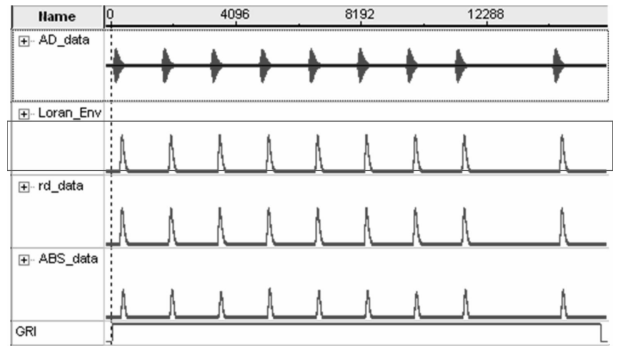


图 8 罗兰-C 信号检测功能测试界面

图 8 中,AD\_data 为 AD 采样数据,Loran\_Env 为去载波后的罗兰-C 信号包络的平方,rd\_data 为经过一个 GRI 周期延迟后的 Loran\_Env,ABS\_data 为延迟相关累积峰。根据相关峰进行峰值检测判决检测到信号时,产生 GRI 标识信号,由此而验证了罗兰-C 信号延迟相关检测方法的可行性。

5.3 性能测试

在实验室利用设计的实验验证平台,对罗兰-C 信号模拟源输出的罗兰-C 信号进行检测性能测试与验证,分析延迟相关检测方法在不同信干比条件下的检测时间与检测概率。罗兰-C 信号模拟源输出的测试信号 GRI 周期为  $60\text{ ms}$ ,NBI 频率为  $85\text{ kHz}$ ,信干比分别为  $-10$ 、 $-20$ 、 $-30$  和  $-40\text{ dB}$ 。

检测时间测试方法:FPGA 设计一个计数器,开

机复位以及自动增益控制完成后开始计数,当检测到罗兰-C 信号产生 GRI 标识的同时停止计数,该计数器的值乘以采样间隔即为延迟相关检测时间。

检测概率测试方法:检测测试次数为 200 次,通过统计成功次数来计算检测概率,检测时间与检测概率的测试结果如表 2 所示。

表 2 检测时间与检测概率测试结果

| $R_{\text{SI}}/\text{dB}$ | 检测时间/ms | 检测概率/% |
|---------------------------|---------|--------|
| -10                       | 109.375 | 100    |
| -20                       | 109.375 | 100    |
| -30                       | 109.375 | 76     |
| -40                       | 109.375 | 27     |

实验结果表明:

(1)本文方法的平均检测时间为 109.375 ms, 优于 2 个 GRI 周期;

(2)当  $R_{\text{SI}} \geq -20$  dB 时,本文方法能够准确无误的检测到罗兰-C 信号;

(3)当  $R_{\text{SI}} \leq -30$  dB 时,该方法的检测概率下降,直至无法检测到罗兰-C 信号。

实验结果与仿真结果相比的抗窄带干扰能力下降了 10~20 dB,主要源于实际情况中包含了电路噪声以及信号处理等多方面的影响,但运用延迟相关检测方法在信干比为-20 dB 的情况下仍能准确无误地检测到罗兰-C 信号,与《船用罗兰-C 接收设备通用技术条件》中关于信号接收条件的信干比要求相比至少提高了 10 dB,如果结合使用 GNGD 算法<sup>[12]</sup>等窄带干扰抑制技术进一步提高信干比,罗兰-C 信号的延迟相关检测方法将具有更大的实际应用价值。

参考文献:

[1] 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 Shifeng, WANG Yulin, HUA Yu. Research of Loran-C data demodulation and decode technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1407-1413.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 贾玉涛. 无线电导航 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 68-69.

[5] 陆文兴. 航海仪器 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2001: 26-27.

[6] 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 Rongyu. Loran-C phase coding technology and application [J]. Fishery Machinery and Instrument, 1990, 17(86).

[7] LAST D, BIAN Y. Carrier wave interference and Loran-C receiver performance [J]. IEE Proceedings F: Radar and Signal Processing, 1993, 140(5): 273-283.

[8] 周隽,崔国恒,许江宁. 罗兰 C 数据链交叉干扰抑制方法 [J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(4): 173-175.  
ZHOU Jun, CUI Guoheng, XU Jiangning. A new CRI suppression method in Loran-C datelink [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(4): 173-175.

[9] 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 Hongwen, ZHOU Hongqing, LIU Futai. 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.

[10] 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 Hongwen, ZHANG Qishan, YANG Dongkai. Phase coding identification of Loran-C signal based on apFFT [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(3): 257-260.

[11] BECKMANN M. Interference detection and suppression in Loran-C receivers [J]. IEE Proceedings: F Radar and Signal Processing, 1989, 136(6): 255-261.

[12] MANDIC D P. A generalized normalized gradi-ent descent algorithm [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 115-118.

(编辑 刘杨)