

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003174

复杂地形下罗兰-C信号模拟器软件设计*

原艳宁 孙瑾颖 席晓莉

(西安理工大学 自动化与信息工程学院 西安 710048)

摘要:针对罗兰-C信号幅度、二次相位延迟和形变等重要参数与地面电参数和地形起伏密切相关,设计开发了基于复杂地形下的罗兰-C信号模拟器。通过采用积分方程方法计算出不同频点下的地波衰减因子,与标准信号在频域内相乘,经离散傅里叶逆变换(IDFT)、电文编码和脉冲调制后,生成了包含地面电参数、地形信息和时间信息的实际接收信号。实验以贺县(发射台)至西安(观测点)为例,相对于均匀光滑路径,结果为实际信号的幅度降低了1.47 dB,二次时延增加了0.407 μs ,信号展宽了约1.5 μs 。实验结果表明,基于复杂地形的罗兰-C信号模拟器可为罗兰-C接收设备的研制、调试、检测和维修提供更接近实际传输路径的导航信号。

关键词:罗兰-C信号;模拟器;复杂地形;地波衰减因子

中图分类号: TN98; TM938 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510;410

Software design of Loran-C signal simulator under complex terrain

Yuan Yanning Sun Jinying Xi Xiaoli

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Due to the important parameters of Loran-C signal amplitude, secondary phase delay and deformation are closely related to the ground electrical parameters and terrain fluctuations, the Loran-C signal simulator based on complex terrain is designed. The groundwave attenuation factor at different frequencies is calculated using the integral equation method, which multiplied by the standard signal in the frequency domain, and after IDFT, encoding and modulation, an actual signal containing ground electrical parameters, terrain features, and time information are generated. Taking Hexian County (transmitting station) to Xi'an (observation point) as an example, the actual signal amplitude is reduced by 1.47 dB, the secondary time delay is increased by 0.407 μs , and the signal is widened by about 1.5 μs relative to the uniform and smooth path. The experimental results show that the Loran-C signal simulator based on complex terrain can provide a navigation signal closer to the actual transmission path for the development, debugging, testing and maintenance of Loran-C receiving equipment.

Keywords: Loran-C signal; simulator; complex terrain; groundwave attenuation factor

0 引言

罗兰-C远程无线电导航系统是美国在二战期间研发的远程陆基无线电导航系统,因其具有抗遮挡、抗干扰能力强等优点,被认为是卫星导航系统的重要备份系统^[1],可广泛用于舰艇、渔船、远洋测量船、飞机导航定位等方面^[2-3]。

由于无线电导航系统覆盖面积广,其工作场景又具有多样性和复杂性,为了考察其接收设备的准确度和环境适应性等,则需要开展大量的外场验证试验,耗费大量的人力、物力和财力,且试验不可重复,而导航系统模拟器为解决该类问题提供了技术手段^[4-7]。罗兰-C信号模拟器通过模拟地面台站发射的罗兰-C信号,为研制、调试、检测和维修罗兰-C接收设备提供了信号源;同时,还可通过模拟带内、带外等干扰信号测试接收设备的抗干

收稿日期: 2020-05-26 Received Date: 2020-05-26

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61771389)资助

扰性能^[8-10]。文献[8]利用 MATLAB 工具生成标准的罗兰-C 采样数据,存入 FPGA 内部 ROM 中,通过硬件语言编程的方式,完成信号源的设计。借助于 FPGA+DSP 和 MATLAB 相结合的方法,文献[9]采用直接数字频率合成技术设计并实现了标准的长河二号导航脉冲信号。文献[10]以单片机为主体,利用查表方式输出数字量,经过 DA 转换模拟产生罗兰-C 导航系统标准信号。这几类模拟器均围绕标准的罗兰-C 信号开展,仅考虑了一次相位因子(phase factor, PF)或一次相位因子和二次相位因子(secondary phase factor, SF)对信号时延和场强的变化,而没有考虑到传输路径上的地面参数变化和地形起伏产生的附加二次相位因子(additional secondary phase factor, ASF)对接收信号场强(与接收机灵敏度相关)、时延(与接收机定位/授时精度相关)和形变(与信号周期特性相关)等参数的影响。同样的,时延的准确预测对接收机和授时系统的研制也非常重要^[11-12]。

本文首先简述了罗兰-C 信号的产生原理;其次通过将积分方程方法计算的复杂路径上的地波衰减因子与标准信号在频域内相乘,经逆离散傅里叶变换(IDFT)后恢复出实际信号,从而使实际信号包含了复杂地形对地波场强、二次时延和形变的影响;最后,根据给出的系统设计,采用恢复的实际信号完成了混合台站信号的调制和编码,并进行了解码验证。与经典模拟器相比,本文在设计中考虑了复杂地形对信号幅度、二次时延和形变的影响,使的模拟的信号更接近于实际信号,从而保证实验验证更充分,试验结果更有效。通过对不同台站的信号进行了电文编码与调制,模拟了不同台站在同一接收点同一接收时刻的实际罗兰-C 信号,并对模拟的信号进行了解码,验证了设计方法的正确性和可行性。

1 信号产生原理

1.1 信号格式

罗兰-C 信号的单个脉冲是通过 100 kHz 载波对高斯脉冲进行调制而产生的,高斯脉冲的前沿需要经过严格控制,并具有陡峭上升的特征,脉冲峰值点时间约在 65 μs ,脉冲的总宽度大约为 260 μs 。这样的信号设计目的在于提高抗天波干扰能力与测量精度。根据发射天线的电流形式单个脉冲可定义为式(1)^[10]。

$$i(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau_d \\ A(t - \tau_d)^2 e^{-2(t - \tau_d)/65} \sin(0.2\pi t + P_c), & \tau_d \leq t \leq 65 + \tau_d \\ \text{未定义}, & t > 65 + \tau_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为天线电流峰值幅度的归一化值; t 为时间; τ_d

为包周差; P_c 是相位编码,等于 0 或 π 。

罗兰-C 信号是以 8 个脉冲为一个脉冲组(副台),多脉冲组形式进行发射的,脉冲间隔为 1 ms,主台标识脉冲(第 9 个脉冲)主要用于识别主副台及同步超时告警,与前一个脉冲间隔为 2 ms。不同台站脉冲组之间的间隔不同,不同台链同一台站的脉冲组间隔也不同,如蒲城授时台为 60 ms,宣城为 83.9 ms(8 390 台链)或 74.3 ms(7 430 台链)。脉冲组间的时间间隔定义为脉冲组重复周期(group repetition interval, GRI)。

对信号的每个脉冲组中单个脉冲的载波起始相位采取一定的相位编码,既便于信号的自动搜索,又可以抑制天波干扰。规定每两个 GRI 重复一次,重复间隔称为相位编码重复周期(phase code interval, PCI),其中两个 GRI 之间的相位编码不同,主副台的相位编码也不同。

罗兰-C 信号通过授时电文传送信息,电文包括信息码、循环冗余码校验编码(CRC 码)和里德所罗门编码(RS 码)三部分。信息码根据已知授时电文格式,通过二进制码来表示系统状态、时间信息、发播偏差和台标识等信息。CRC 码和 RS 码主要用于检错纠错,以及电文帧同步。每组电文包含 30 个 GRI,每个 GRI 携带 7-bit 信息,前 10 个 GRI 用来表示数据,后 20 个 GRI 表示 RS 奇偶校验。授时电文分为两种子类型,发送时以 1 个 I 型和 4 个 I 型为一组进行无间连续发送。

1.2 复杂路径衰减因子计算

罗兰-C 信号单脉冲中心频率为 100 kHz,99%以上能量集中在 90~110 kHz。信号在传播过程中会遇到高山、湖水等复杂地形,模拟信号的精度取决于地波衰减模型的准确性,因而有关信道模型建立和衰减因子的计算也有很多的研究成果^[13-14]。与其他经典计算方法相比,抛物线方程(parabolic equation, PE)^[15]、积分方程(integral equation, IE)^[16]、时域有限差分(finite-difference time-domain, FDTD)^[17]以及 IE-FDTD^[18]、FDTD-PE^[19]求解方法在计算不规则地形时,具有明显的优势。根据本文选取的 3 条路径,兼顾求解精度和求解时长,采用积分方程求解地波衰减因子。

复杂路径上任意接收点的地波场强 E_z 与地波衰减因子 W_g 有关:

$$E_z = j \frac{3 \times 10^5 \sqrt{P_1}}{d} e^{ik_0 d} W_g \quad (2)$$

式中: P_1 为发射台的辐射功率; d 为收发点的大圆距离; k_0 为空气的波数。

若记发射点的位置为 O ,观察点的位置为 P ,地面上动点的位置为 Q ,当地面参数(如大地电导率和相对介电常数)和地形起伏不是非常剧烈时,则地波衰减因子可表示为^[16]:

$$W_g(P) = A \left\{ 1 - e^{-\frac{j\pi}{4} \sqrt{\frac{k_0}{2\pi}} \int_0^x W_g(Q) \cdot \sqrt{\frac{r_0^2}{r_1 r_2 (r_1 + r_2)}} e^{jk_0(r_1+r_2-r_0)} \cdot \left[\Delta_g + (1 + (z')^2)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{j}{k_0 r_2} \right) \frac{\partial r_2}{\partial n} \right] dl \right\} \quad (3)$$

式中： r_0 表示从源点 O 到观察点 P 的直线距离； r_1 和 r_2 分别表示地面上动点 Q 到源点 O 和观察点 P 之间的直线距离； n 为地表面外法线方向； $\frac{\partial r_2}{\partial n}$ 表示 r_2 在地表面的法向导数； dl 为电偶极距。当观察点 P 在地表面时， $A = 1$ ；当观察点 P 在地面上空时， $A = 1/2$ 。

z 为地形高度函数，在直角坐标系下可表示为：

$$x = [a + h(d)] \sin\theta \quad (4)$$

$$z(x) = [a + h(d)] \cos\theta - [a + h_0] \quad (5)$$

$$\theta = \frac{d}{a} \quad (6)$$

式中： θ 为角距离； h_0 为源点 O 的海拔高度； a 为等效地球半径。

那么，复杂传输路径上的二次时延 t_w 可表示为：

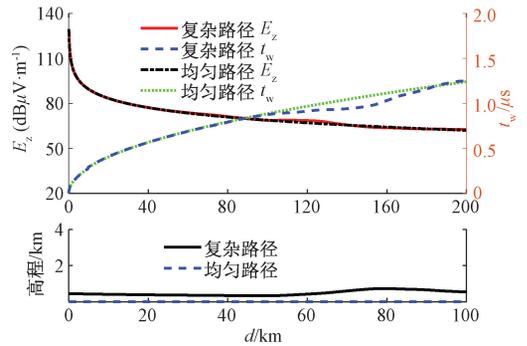
$$t_w = t_{SF} + t_{ASF} = \frac{\varphi(W_g) \times 10^6}{2\pi f} \quad (7)$$

式中： t_{SF} 为信号在海水中传播相对于在空气中传播产生的时延增量； t_{ASF} 为由复杂地形引入的附加二次时延； f 为信号工作频率。

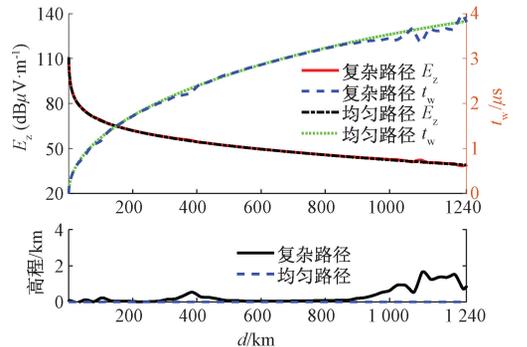
以蒲城、荣成和贺县为发射台，根据式(2)和(7)可计算出信号从发射台至接收点西安(N34.1241, E109.1019)路径上的地波场强及衰减因子相位，计算中均匀路径选取陆地，电参数为 $\epsilon_r = 13$, $\sigma = 3 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ ，复杂路径(平滑后)中电参数根据不同的地形和大地电参数将路径进行分段计算，具体参数的选择参考我国1988年向国际无线电咨询委员会提交的我国地表大地电导率地图^[20]。西安到荣成台(相距约1240 km)的沿线路径划分为陆地、河流、湖泊、平原湿土等几种地形；西安到贺县台(相距约1154 km)的沿线路径划分为平原、山地、河流、干燥地面等几种地形，计算结果如图1所示。

为了量化分析影响的程度，表1对比了均匀路径和复杂路径的发射台到观测点的二次时延和场强，计算中发射台功率均为1 kW。

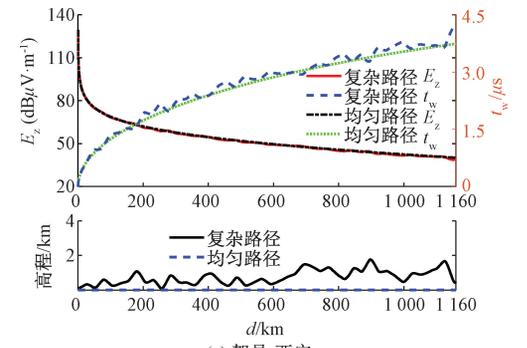
从图1可看出，均匀路径中随着距离增加，二次时延呈上升趋势；考虑地形变化和大地电参数时，在海拔高的地方二次时延会有所减小；同时，接收场强整体呈下降趋势，随着距离增加，场强逐渐减小，在海拔高的地方场强会有所增大。图1的结果表明信号在传播过程中地形的变化和大地电参数对信号时延和接收点场强具有一定的影响。



(a) 蒲城-西安
(a) Pucheng-Xi'an



(b) 荣成-西安
(b) Rongcheng-Xi'an



(c) 贺县-西安
(c) Hexian -Xi'an

图 1 场强与二次时延随地形变化情况

Fig. 1 Electric field strength and secondary delay change with terrain

表 1 西安观测点的信号幅度和二次时延

Table 1 Signal amplitude and secondary phase factor at Xi'an observation point

| 台站 | 均匀 $E_z /$ ($\text{dB}\mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$) | 复杂 $E_z /$ ($\text{dB}\mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$) | 均匀 $t_w / \mu\text{s}$ | 复杂 $t_w / \mu\text{s}$ |
|-------|--|--|------------------------|------------------------|
| 蒲城-西安 | 68.74 | 68.72 | 1.240 | 1.250 |
| 荣成-西安 | 39.01 | 39.09 | 3.831 | 3.823 |
| 贺县-西安 | 40.18 | 38.71 | 3.733 | 4.140 |

场强的变化与接收设备的灵敏度相关，通过提高发射台的功率、天线的增益等手段较容易解决。而时延计

算的准确程度决定了模拟的信号准确度,进而影响接收设备定位精度的考核。从表 1 可以看出,蒲城距离西安较近,地形均为陆地,复杂地形下衰减因子的变化仅需考虑高程,产生的时延差约为 $0.01 \mu\text{s}$ 。相对于荣成发射台,尽管贺县与其距离相近,但因为两者传输的路径完全不同,且贺县至西安的地形和高程起伏变化较大,因而复杂地形对信号的场强和时延影响更大,相对于均匀陆地,场强减小了 1.47 dB ,二次时延增加了 $0.407 \mu\text{s}$ 。

1.3 信号恢复

由于罗兰-C 信号脉冲在频域内能量主要集中在 $90 \sim 110 \text{ kHz}$,考虑到信号的完整性,本文计算时信号频率选取范围为 $75 \sim 125 \text{ kHz}$ 。

首先,发射台播发信号如式(1)所示,对其进行离散傅里叶变换后记为 $I(f)$ [21]:

$$I(f) = \text{DFT}[i(t)] \quad (8)$$

其次,根据已知的收发点的经纬度,计算传播路径对应的地波衰减因子。地波衰减因子的计算是复杂路径下模拟器设计的主要环节,计算的准确度决定了模拟信号的精度。本文采用小波分析方法提取并处理地形函数,获得海拔高度信息,采用积分方程方法,根据求得的距离、高程及电参数计算出衰减因子。以 1 kHz 为步进,利用扫频的方法计算 $75 \sim 125 \text{ kHz}$ 各频率采样点分别对应的衰减因子,从而获得不同距离不同频率下的衰减因子 $W_g(f)$ 。

然后,在 $75 \sim 125 \text{ kHz}$ 频域内完成发射信号 $I(f)$ 与衰减因子 $W_g(f)$ 的相乘,即可解算出接收点的信号 $S_r(f)$:

$$S_r(f) = I(f) \cdot W_g(f) \quad (9)$$

则观测点的时域信号即为:

$$S_r(t) = \text{IDFT}[S_r(f)] \quad (10)$$

以西安为观测点,蒲城、荣成和贺县发射的台站信号经 1.2 节提取的复杂路径,考虑地形变化和大地电率对接收信号的影响,单个脉冲信号计算结果如图 2 所示。为了方便观察,对信号进行了归一化处理,并将各个台站的脉冲信号的第 3 个载波从负到正的零点与标准信号的第 3 载波零点对齐。

从图 2 可以看出,相比于标准信号,经复杂路径传播后,信号被展宽,包络形状也发生了改变,即脉冲发生了形变,这主要是因为复杂地形对不同频率的信号产生了色散效应。从峰值位置,相对于标准信号,蒲城发射台信号展宽很小,约为 $0.05 \mu\text{s}$,荣成和贺县发射台信号的展宽比较明显,约为 $1.5 \mu\text{s}$,对应至空气中传播距离约为 45 m ,这个误差对增强型罗兰接收机性能指标的评价影响较大。因而,在模拟器设计时考虑复杂地形及大地电参数对信号幅度、时延、形变的影响,提高模拟信号的精

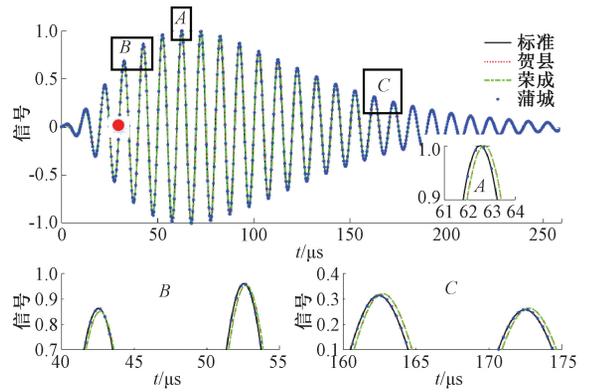


图 2 经复杂地形后的罗兰-C 信号
Fig. 2 Loran-C signal after complex terrain

细化程度,使得测试验证试验与外场试验更接近,更真实地反映了待测设备的工作状态。

2 模拟器软件设计

2.1 系统方案设计

基于复杂地形下的罗兰-C 信号模拟器软件设计流程如图 3 所示。

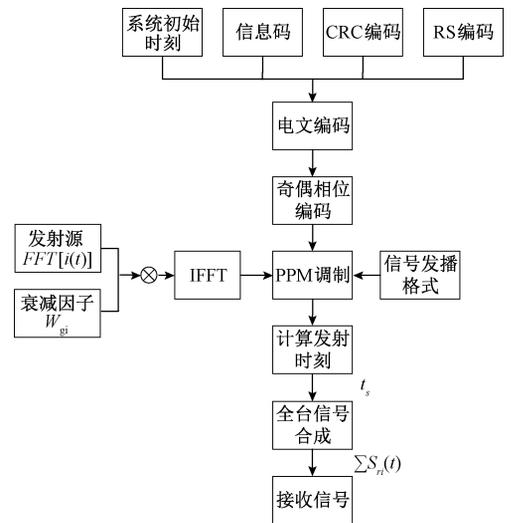


图 3 复杂地形下罗兰-C 信号模拟器软件设计流程
Fig. 3 Design process of Loran-C signal simulator software under complex terrain

系统处理流程如下:1) 给定接收时刻,根据需要传输的信息码、系统状态和台标识等信息进行电文编码和奇偶相位编码;2) 计算提取复杂地形的衰减因子,并与发射台的罗兰-C 信号在频域内相乘,然后经 IDFT 变换后生成携带复杂地形信息的实际信号波形;3) 对罗兰-C 脉冲组信号进行三态脉冲位置调制(3 s-PPM 调

制),结合信号发播格式,生成一帧完整的信号;4) 计算不同台站在同一接收时刻对应的发射时刻,可以确定台站是从何时起发送怎样的信号,之后依次生成若干帧信号;5) 将所有台站信号生成后在时域内混叠,模拟生成最终的在同一接收时刻更接近实际的混合台站信号。

2.2 设计实现

1) 信号发射时刻计算

已知发射台站和观测点的经纬度信息,可计算出收发台站之间的大圆距离,若给定某一接收时刻,根据收发点间距离可计算出对应的信号发射时刻:

$$t_s = t_r - t_{PF} - t_{SF} - t_{ASF} \quad (11)$$

$$t_{PF} = \frac{d}{c/ns} \quad (12)$$

式中: t_s 为信号发射时刻; t_r 为信号接收时刻; t_{PF} 为信号在空气中传播产生的时延; d 为收发台之间的大圆距离; c 为光速; ns 为空气的折射率,本文取 1.000 338。

此外,由于台站在发射信号时为了方便区别主副台,规定了发送时间间隔,即先发送主台信号,间隔一定时间继而发射副台信号,因此在信号模拟过程中还需要根据不同台站不同的发送时延,将该时延记为 t_d , 信号发射时刻进一步表示为:

$$t_s = t_r - t_{PF} - t_{SF} - t_{ASF} - t_d \quad (13)$$

2) 信号调制和编码

罗兰-C 信号主要采用的调制方式为 3 s-PPM^[22], 调制量为 $\pm 1 \mu\text{s}$, 调制精度为 $\sigma \leq 30\text{ns}$, $\Delta \leq 15\text{ns}$, 调制的原理如图 4 所示。

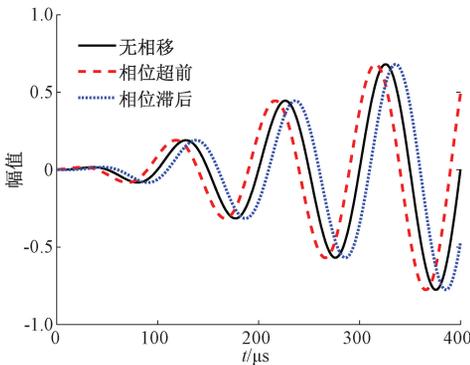


图4 3 s-PPM 调制原理

Fig. 4 3 s-PPM modulation principle

罗兰-C 信号调制的基本原理是对信号每个脉冲组的第 3 ~ 8 个脉冲在时延上进行平衡调制,对标准罗兰-C 信号进行左移或右移,即将单个脉冲进行 $1 \mu\text{s}$ 的发射超前、滞后调制。根据调制方式和编码方式,共产生 128 个调制图样,每一个调制图样对应一个国际五号字母表 (CCITT N0.5) 中的特定字符,将电文编码序

列转换为十进制数据,再对应规定的调制图样对信号的第 3 ~ 8 个脉冲进行调制,通过调制后的信号便携带有时间信息。

2.3 仿真分析

1) 仿真结果及分析

仿真时,系统起始时刻为 2019 年 9 月 1 日 00:00:00, 给定接收时刻为 2019 年 9 月 1 日 00:00:30, 包周差为 $0 \mu\text{s}$, 采样频率为 1 kHz, 光速为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 空气中的折射率为 1.000 338, 采用 1.2 和 1.3 节恢复的实际信号。蒲城台 GRI 为 6000, 距离取 100 000. 869 944 357 m, 贺县台 GRI 为 6780, 距离取 1 154 081. 630 128 129 m, 荣成台 GRI 为 7430, 距离取 1 240 650. 756 451 421 m。

以西安为观测点,分别对蒲城、荣成和贺县的信号进行奇偶相位编码,根据授时电文格式对应调制图样编写信息码,将时间信息融入到信息码中,对信息码依次进行 CRC 和 RS 编码后得到一帧完整的授时电文,且信号生成时使用考虑地形起伏和大地电参数后的实际波形,分别模拟出不同台站在同一接收时刻的发射台信号,再将 3 个台站信号混合叠加在一起,即为西安观测点在同一接收时刻接收到的混合台站信号。为了更逼近实际的罗兰-C 台站信号,可同时在该合成信号上混叠噪声信号,本文处理中,重点在于分析复杂地形的大地电参数对罗兰-C 信号的影响下,故未增加噪声。

根据 2.2 节计算出信号在西安接收时刻为 30 s 时对应的蒲城台发射时刻为 29.999 665 526 s, 每 5 帧为 1 组,每帧含 30 个 GRI 并且时间为 1.8 s, 这里计算出发射时刻处在第 4 组的 5 帧中,进而定位到该组中第 2 帧信号里的第 20 个 GRI 中,通过计算得到具体位置在该帧中的 1.199 665 526 s 处,从该位置为起始点,开始向后按照电文的类型及发播顺序继续发送,根据需求自行调节接收时长,从而模拟出接收点实际接收到的信号。同理,可求得荣成台的发射时刻为 29.995 862 072 s, 贺县台的发射时刻为 29.996 150 222 s, 3 个台站的信号合成结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,蒲城两个脉冲组间隔 60 ms, 为 6 000 授时台, 含有 8 个脉冲; 贺县两个脉冲组间隔是 67.80 ms, 为 6 780 发射台, 含有 9 个脉冲, 为 6 780 台链主台; 荣成两个脉冲组间隔是 74.30 ms, 为 7 430 发射台, 含有 8 个脉冲, 为 7 430 台链副台, 与实际播发信号时间间隔一致。

2) 解码验证

对于模拟生成的混合台站信号进行解码验证,可以判断电文信息是否模拟正确。给定某一接收时刻,模拟蒲城发射台在该接收时刻对应的发送信号,通过对信号进行 CRC 与 RS 纠错解码,验证解算结果如表 2 所示。

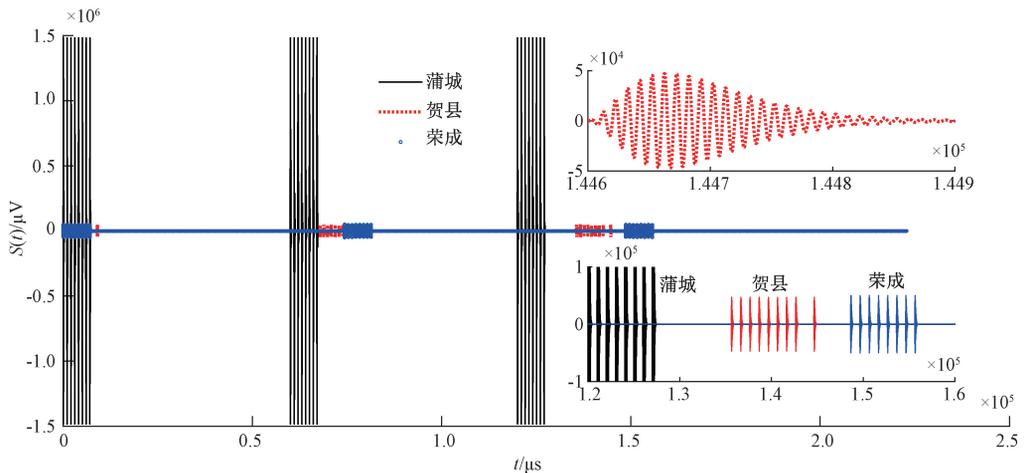


图 5 西安观测点接收到的混合实际信号

Fig. 5 Mixed actual signals received at Xi'an observation point

表 2 解码验证结果

Table 2 Decode verification result

| 帧号 | 电文类型 | 电文字类型 | 系统状态 | 时间/h | 时间/min | 时间/s | 时间/ms(年) | 时间/μs(月) | 时间/10 ns(日) | 台标识 |
|----|------|-------|------|------|--------|------|----------|----------|-------------|-----|
| 1 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 27 | 2019 | 9 | 1 | 0 |
| 2 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 28 | 800 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 30 | 600 | 0 | 0 | 1 |
| 4 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 32 | 400 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 34 | 200 | 0 | 0 | 1 |
| 6 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 36 | 2019 | 9 | 1 | 0 |
| ⋮ | | | | | | | | | | |

从表 2 可以看出,任意两帧之间的差值为 1 800 ms,即 1.8 s,正好为 1 帧 30 个 GRI 的时间差,进一步说明信号帧发送的时间信息的正确性;同时解码信号电文以 1 个 I 型和 4 个 II 型为 1 组无间连续传播,与电文编码格式一致,帧头为 27 s,依次往后每帧之间间隔 1.8 s,第 2 组帧的帧头为 36 s,第 3 组帧头为 45 s,依次类推。I 型电文提供年月日信息,II 型提供毫秒和台标识等信息,系统状态为 01,对应十进制为 1,代表状态正常,蒲城台标识为 0001,对应十进制为 1,年月日设定为 2019 年 9 月 1 日。

3 结 论

本文设计的罗兰-C 信号模拟器的主要特点在于信号模拟过程中考虑了复杂地形对信号的影响。首先,重点分析了地形起伏和大地电参数对罗兰-C 信号的场强、二次时延及信号形变的影响,从而提高了模拟信号的准确度,使模拟信号更接近设备实际接收信号;其次,对同一观测点同一接收时刻的多个发射台站的混合信号进行了编码和调制,并对模拟结果进行了解码验证。复杂路

径下罗兰-C 信号模拟器的研制将会为其接收设备的研制提供更逼真的试验环境,且试验可重复,节省了外场试验所需的人力、物力和财力成本,更重要的是节省了时间,加快了研发和生产进度,具有非常重要的理论研究价值和工程应用意义。

参 考 文 献

[1] 胡安平, 龚涛. 增强罗兰导航技术的研究现状和进展[J]. 现代导航, 2016 (1): 74-78.
 HU AN P, GONG T. Research status and progress on the enhance Loran-C navigation technology [J]. Modern Navigation, 2016 (1): 74-78.

[2] 高万明. E 罗兰系统研究现状和进展[J]. 信息通信, 2019 (7): 166-170.
 GAO W M. Research status and progress on e-Loran system [J]. Information & Communication, 2019 (7): 166-170.

[3] LEBEKWE C K, YAHYA A, ASTIN I. An improved accuracy model employing an e-navigation system [C]. 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), 2018: 152-158.

- [4] 张继海, 武文俊, 广伟, 等. 基于北斗共视的国际时间比对研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 96-103.
ZHANG J H, WU W J, GAUNG W, et al. Study of international common view time comparison by Beidou[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 96-103.
- [5] 眭晨阳, 宋茂忠. Galileo/GPS 卫星导航模拟源的 FPGA 算法设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(5): 23-28.
SUI CH Y, SONG M ZH. Design and implementation of FPGA algorithm for Galileo/GPS satellite navigation signal simulator [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(5): 23-28.
- [6] GHERM V E, ZERNOV N N. Strong scintillation of GNSS signals in the inhomogeneous ionosphere: Simulator of transionospheric channel [J]. Radio Science, 2015, 50(2): 168-176.
- [7] 杨雪梅, 肖鹏, 余晓曦, 等. 精密伏秒发生器的研制 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 9-15.
YANG X M, XIAO P, YU X X, et al. Development of precision volt-second generator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 9-15.
- [8] 朱道山. 基于 FPGA 的罗兰 C 信号源设计 [J]. 暨南大学学报(自然科学类), 2012, 33(1): 59-64.
ZHU D SH. FPGA-based signal source design for Loran-C [J]. Journal of Jinan University (Natural Science), 2012, 33(1), 59-64.
- [9] 皇甫江. 长河二号导航信号模拟技术研究 [D]. 西安: 中国科学院大学, 2013.
HUANG P J. Research on simulation technology for Changhe II navigation signal [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [10] 乔永严, 周爱军. 基于 FPGA 的罗兰 C 导航系统信号发生器设计 [J]. 舰船电子工程, 2014, 34(8): 175-177, 184.
QIAO Y Y, ZHOU AI J. A signal generator design of the Loran-C navigation system based on signal chip microcomputer [J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(8): 175-177, 184.
- [11] 雷文华, 李勇, 胡海冰. 罗兰 C 信号 TOA 高精度估计算法 [J]. 电子设计工程, 2020, 28(11): 132-136, 141.
LEI W H, LI Y, HU H B. High precision TOA estimation method for Loran-C signal [J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(11): 132-136, 141.
- [12] 李云, 华宇, 燕保荣, 等. BPL 长波授时信号传输时延的时间变化分析 [J]. 宇航计测技术, 2019, 39(1): 15-19.
LI Y, HUA Y, YAN B R. Analysis on time variation analysis of BPL long wave time service signal transmission delay [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2019, 39(1): 15-19.
- [13] PU Y R, YANG H J, WANG L L, et al. Analysis and modeling of temporal variation properties for LF ground-wave propagation delay [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(4): 641-645.
- [14] 李浩, 朱秋明, 陈应兵, 等. 非平稳信道衰落高效模拟方法及硬件实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1): 159-165.
LI H, ZHU Q M, CHEN Y B, et al. Efficient simulation method and hardware implement for non-stationary channel fading [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1): 159-165.
- [15] WANG D D, XI X L, ZHOU L L, et al. Pulse parabolic equation method for Loran-C ASF prediction over irregular terrain [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(1): 168-171.
- [16] 周丽丽, 穆中林, 蒲玉蓉, 等. 不规则地形地波传播衰减因子的改进算法及结果一致性研究 [J]. 电子与信息学报, 2015, 37(9): 2254-2259.
ZHOU L L, MU ZH L, PU Y R, et al. Improved algorithm for ground-wave attenuation factor prediction over irregular terrain and results consistency study [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(9): 2254-2259.
- [17] ZHOU L L, XI X L, ZHANG J S, et al. A new method for Loran-C ASF calculation over irregular terrain [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(3): 1738-1744.
- [18] XI X L, ZHOU L L, ZHANG J S, et al. Combined IE-FDTD algorithm for long-range Loran-C ground-wave propagation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(8): 3802-3808.
- [19] WANG D D, PU Y R, XI X L, et al. Hybrid FDTD-PE method for Loran-C ASF prediction with near-source complex topography [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2019, 14(5).
- [20] World atlas of ground conductivity [R]. ITU Radio Communication Assembly, Op. ITU-R 91-2, 2007.
- [21] 傅中君, 王建宇, 欧云, 等. 基于最小二乘的准同步 DFT 幅值线性修正方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 72-78.
FU ZH J, WANG J Y, OU Y, et al. Linear correcting algorithm for quasi-synchronous DFT' s harmonic amplitude based on the least squares theory [J]. Journal

of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(7): 72-78.

- [22] LIANG Q, XIONG W, LI Y. Research on modulation technique of high speed Loran-C data channel [C]. International Conference on Wireless Communications, Networking & Mobile Computing, 2012: 1-3.

作者简介



原艳宁, 2004 年于辽宁石油化工大学获得学士学位, 2007 年于西安理工大学获得硕士学位, 现为陕西凌云科技有限责任公司项目经理, 西安理工大学专职科研人员和博士研究生, 主要研究方向为天线及射频电路、导航接收机和模拟器、干扰器的设计与实现。

实现。

E-mail: yyn1982@126.com

Yuan Yanning received B. Sc. from Liaoning Shihua University in 2004, M. Sc. degrees from Xi'an University of Technology in 2007. She is currently a project manager in Shaanxi Lingyun science and Technology Co., Ltd. and a full-time research worker and a Ph. D. candidate at Xi'an University of Technology. Her main research interests include the design and implementation of antennas and radio frequency circuits, navigation receivers and simulators, and jammers.



孙瑾颖, 2018 年于西安理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为导航信号模拟器设计、FPGA 硬件设计。

E-mail: 18309294268@163.com

Sun Jinying received B. Sc. from Xi'an University of Technology in 2018. She is currently a M. Sc. at Xi'an University of Technology. Her main research interests include the navigation signal simulators and FPGA hardware design.



席晓莉, 1990 年于国防科技大学获得学士学位, 1998 年于第四军医大学获得硕士学位, 2004 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安理工大学自动化学院教授, 主要研究方向为电波传播, 天线设计和信号处理。

E-mail: xixiaoli@xaut.edu.com

Xi Xiaoli received B. Sc. from the University of Defense Technology in 1990, M. Sc. degree from the Fourth Military Medical University in 1998, and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2004. She is currently a professor at Xi'an University of Technology. Her main research interests include wave propagation, antenna design, and communication signal processing.