

Research on Signal Synthesized Method of Loran C Omni-Directional H-Field Antenna Based on Amplitude Superposition

Guoheng Cui, Jun Zhou, Jiangning Xu, Kejin Cao

Department of Navigation Engineering, Wuhan
Email: cgh3899@sina.com

Received: Mar. 26th, 2012; revised: Apr. 14th, 2012; accepted: Apr. 27th, 2012

Abstract: The single stick H-field antenna induce reversed phase as the waves directions are different in receiving Loran C signal. The signal synthesized algorithm based on amplitude superposition is designed, which actualize the synthesization of Loran C signal. This algorithm which process fast, can easily realized in FPGA, and has been applied in Loran C omni-directional H-field antenna.

Keywords: H-Field Antenna; Loran-C; Signal Synthesized

基于幅度叠加的罗兰 C 全向磁天线信号合成方法研究

崔国恒, 周 隽, 许江宁, 曹可劲

海军工程大学, 武汉
Email: cgh3899@sina.com

收稿日期: 2012 年 3 月 26 日; 修回日期: 2012 年 4 月 14 日; 录用日期: 2012 年 4 月 27 日

摘 要: 本文针对单棒磁天线在接收罗兰 C 信号时, 会因来波方向的不同而产生相位翻转的特性, 设计了基于幅度叠加的信号合成算法, 并实现了罗兰 C 信号的合成处理。该算法在 FPGA 中实现简单, 处理过程快速, 具有较强的使用价值, 已经在所研制的全向磁天线中得到了使用。

关键词: 磁天线; 罗兰 C; 信号合成

1. 引言

罗兰 C 导航系统是一种中远程低频无线电导航系统, 属于陆基、脉冲相位调制导航方式^[1]。导航台发射的电磁波是垂直极化波, 可分为垂直电场信号和水平磁场信号两部分, 二者正交传播。在空气中, 垂直电场信号要强于水平磁场信号, 所以传统方法都采用 3 米鞭状直立天线来接收垂直电场信号进行定位导航。实际上, 采用磁天线接收水平磁场信号进行定位导航具有较为显著的优点, 主要体现在以下几点: 第一, 磁天线具有更长的天线有效高度, 相对于信号的波长来说, 传统的鞭状天线属于电小天线, 接收信号效

果并不理想, 而采用磁棒上绕制线圈的磁天线可以接收电磁信号中的磁场信号, 在天线体积保持在使用条件下, 天线的有效长度可以设计得很长, 接收效果可以强于电天线; 第二, 罗兰 C 磁天线体积小、不需要良好的接地, 是与北斗天线和 GPS 天线组合收信的最佳选择, 也是罗兰 C 成为北斗二代卫星导航系统战略备份的发展趋势^[2,3]; 第三, 磁天线抗静电沉积效应强, 在雷、雨、雾、雪等恶劣天气条件下具有稳定的接收性能, 具有更强的环境适应能力^[4]。因此, 研究全向磁天线具有广泛的应用领域和参考价值。

我国关于罗兰 C 磁天线的研究尚处于起步阶段,

而国外关于磁天线的研究显著早于我国。以早在上世纪七十年代，美国就在其拖曳天线上采用了磁天线技术^[5]，最近十年又将磁天线技术往罗兰 C 接收机上移植。目前国际上新型罗兰 C 接收机已普遍采用高灵敏小型化磁天线，尤其是将磁天线与 GPS 天线组合，结合授时、测向以及 ASF 修正等功能，构建天地一体化的无线电导航系统，极大增加了用户设备导航定位的冗余能力^[6]。

单棒磁天线具有方向性，要想实现全向收信，必须采用多根磁棒同时接收信号并进行信号合成处理。而单棒磁天线在接收信号时，对立波瓣信号具有相位相反的特性，这就给信号合成带来了麻烦。本文主要针对全向磁天线设计环节中的信号合成部分展开研究。

2. 全向磁天线简介

2.1. 全向磁天线结构设计

全向磁天线原理结构如图 1 所示。

两根正交放置的单棒磁天线感应到的信号经前置低噪声放大器放大、模拟带通滤波器滤波、自动增益放大器放大等信号调理过程后，对两个通道的模拟信号进行模数转换，完成双通道信号的数字量化；数字化后的两路数字信号由高性能可编程逻辑器件 FPGA 进行处理，分别完成信号的数字滤波、数字陷

波、数字移相等过程，完成两路信号的数字调理过程；通过 FPGA 器件的控制和处理，对两路信号进行搜索和识别，针对信号的相位变化特点，采用文中设计的信号合成方法进行信号合成；最后将合成后的信号进行数模转换，输出的模拟合成信号提供给罗兰 C 接收机进行定位解算。对于罗兰 C 数字接收机来说，合成信号可以直接供给接收机进行定位解算，不需进行数模转换。

2.2. 罗兰 C 信号的相位编码特点

对罗兰 C 脉冲组信号中的每个脉冲载频起始相位进行严格规定，使其按照一定的格式排列，称为脉冲组相位编码。通过相位编码，可实现罗兰 C 系统全自动接收并可有效抑制天波干扰。

罗兰 C 系统脉冲组采用二相二周期互补编码方式，其中“二相”是指载频起始相位有两种，载波起始相位为 0 rad 时，为正相位编码，用“+”表示，起始相位为 π rad 时，为负相位编码，用“-”表示；“二周期”是指编码周期等于两个 GRI 长度；“互补”是指第一个周期脉冲组中偶数位脉冲的相位与第二个周期脉冲组中相应的偶数位脉冲的相位相差 π rad，而奇数位脉冲相位相同；主、副台信号的相位编码是不同的，各主台、各副台信号的相位编码是相同的。罗兰 C 脉冲群中各脉冲的相位编码如表 1 所列^[7,8]。

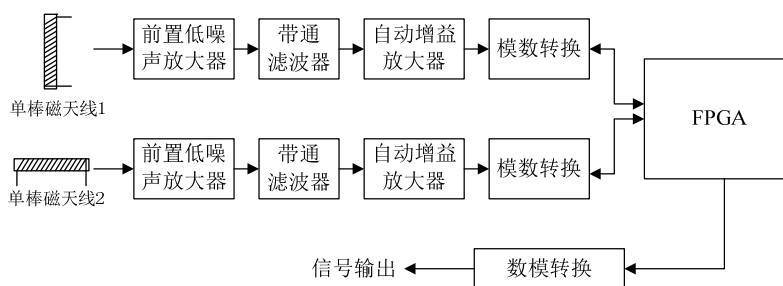


Figure 1. Function cell diagram of H-field antenna
图 1. 全向磁天线结构设计图

Table 1. Phase codes of Loran-C signal
表 1. 罗兰 C 信号相位编码

	主台编码								副台编码								
脉冲序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8
奇数周期	+	+	-	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+
偶数周期	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-

2.3. 全向磁天线象限分布

罗兰 C 信号在到达单棒磁天线对立模型波瓣时有一个 180° 的相位改变, 这种相位特性就要求在设计全向磁天线时, 必须考虑每根单棒磁天线接收信号的相位特性, 即导航台发射信号的来波方向处于单棒磁天线不同的波瓣区域时, 必须针对每根单棒磁天线接收到的信号, 选择合适的相位进行信号合成处理。

对于十字交叉环路布置的全向磁天线来说, 其接收信号的全向区域可分为四个象限, 如图 2 所示, 处于不同象限的信号在进行信号合成时, 必须进行适当的相位变换^[7]。相位变换结果如下:

$$\begin{aligned} \text{I 象限: } & A + B & \text{II 象限: } & A - B \\ \text{III 象限: } & -A - B & \text{IV 象限: } & -A + B \end{aligned}$$

3. 幅度叠加信号合成算法原理

全向磁天线两路信号合成不仅要完成信号幅度的合成, 还要完成信号的相位合成。由于单棒磁天线的方向性和相位特性, 使得两根磁棒接收相同台站发射信号的相位会发生 180° 的改变, 由此导致罗兰 C 台链信号的合成变得复杂^[9]。

针对这种情况, 本文设计了基于幅度叠加的全向磁天线信号合成方法。该方法在信号合成过程中消除了相位变化的影响, 只需简单改变接收机内部处理程序, 就能实现合成信号的搜索、跟踪、识别和定位解算。

幅度叠加信号合成算法原理如图 3 所示。

两根正交放置的单棒磁天线感应到的信号经前置低噪声放大器放大、模拟带通滤波器滤波、自动增益放大器放大等信号调理过程后, 对两个通道的模拟信号进行模数转换, 完成双通道信号的数字量化; 数字量化后的两路数字信号由高性能可编程逻辑器件 FPGA 进行处理, 分别完成信号的数字滤波、数字陷波、数字移相等过程, 完成两路信号的数字调理过程。在对信号调理的基础上, 完成信号合成的第一步, 对信号取绝对值, 完成 $|dataA|$ 和 $|dataB|$ 运算, 此举可将信号的相位特性消除; 然后完成信号合成的第二步, 幅度叠加, 完成 $|dataA| + |dataB|$ 运算, 得到幅度叠加合成信号; 合成信号输出供罗兰 C 接收机使用。

4. 算法仿真分析

假设罗兰 C 台链分布情况及磁天线的放置情况如

图 4 所示。主台信号、副台 2 信号到达磁天线时, 位于磁天线的第 I 象限; 副台 1 信号到达磁天线时, 位于磁天线的第 IV 象限。各台站发射信号的波形图和相位

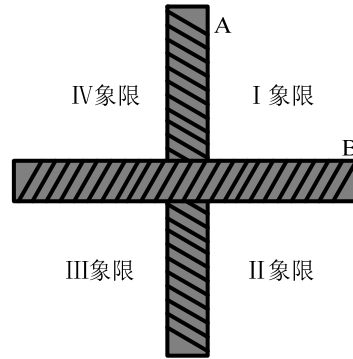


Figure 2. H-field antenna quadrant distribution
图 2. 全向磁天线象限分布

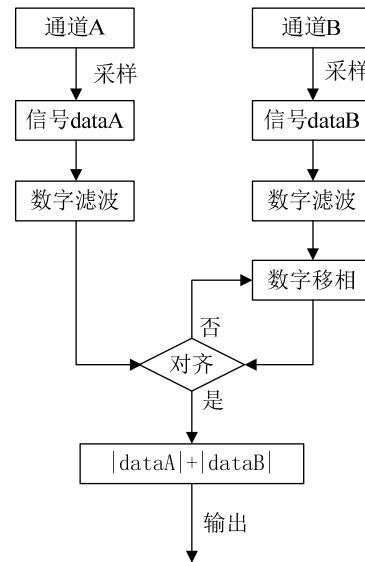


Figure 3. Superimposed signal synthesis process
图 3. 幅度叠加信号合成流程

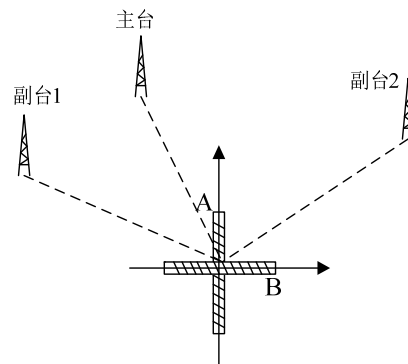


Figure 4. Station and H-field antenna placement
图 4. 台站及磁天线布置情况

编码情况如图 5 所示, 向上突起表示载波起始相位为 0 rad, 为正相位编码, 用“+”表示; 向下突起表示载波起始相位为 π rad 时, 为负相位编码, 用“-”表示。

对于 A、B 磁棒来说, 由于单棒磁天线的方向性和相位特性, 其接收三个台站的信号的幅度和相位编码都会发生改变, 其信号幅度和相位编码情况如图 6 所示。

信号合成的第一步: 对信号取绝对值。

完成|dataA|和|dataB|运算, 此举可将信号的相位特性消除, 所得的结果如图 7 中所示。

此时罗兰 C 信号的波形已经发生了改变, 信号的相位特性已经不再包含在信号波形中, 包络形状也不再是“鱼”形, 其波形如图 8 所示。对于现有接收机来说, 这种包络形状难以完成信号的搜索、跟踪和定位解算, 必须根据信号的形状设计一种新的算法, 才能使用要求。

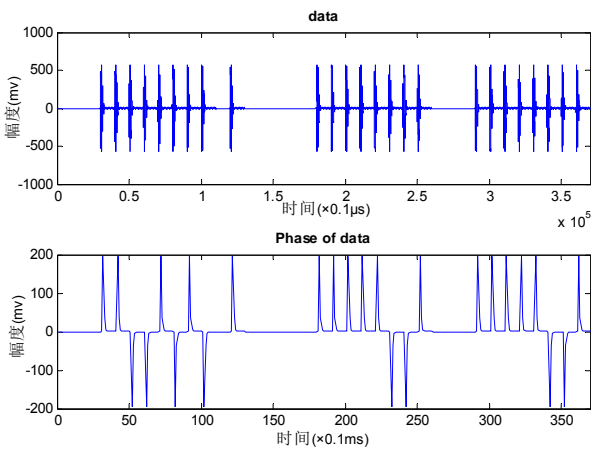


Figure 5. Emission signal waveform and phase encoding
图 5. 发射信号的波形图和相位编码情况图

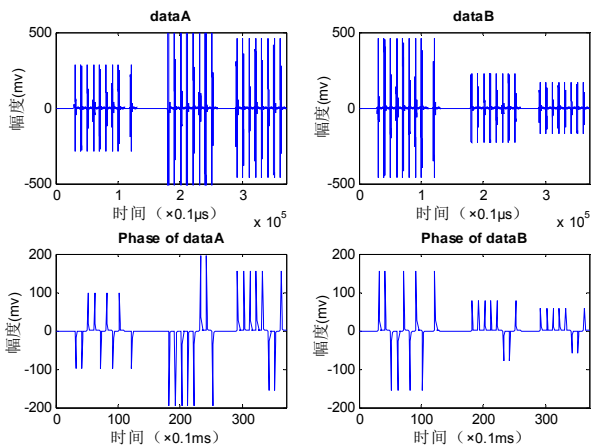


Figure 6. Signal dataA, dataB amplitude and phase
图 6. 信号 dataA, dataB 幅度和相位情况

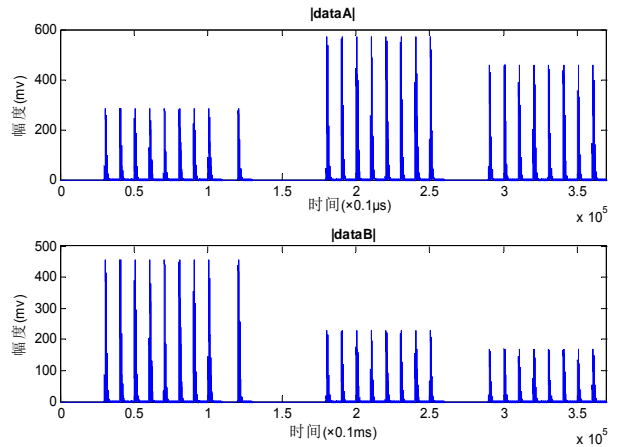


Figure 7. |dataA| and |dataB| waveform
图 7. |dataA|和|dataB|波形图

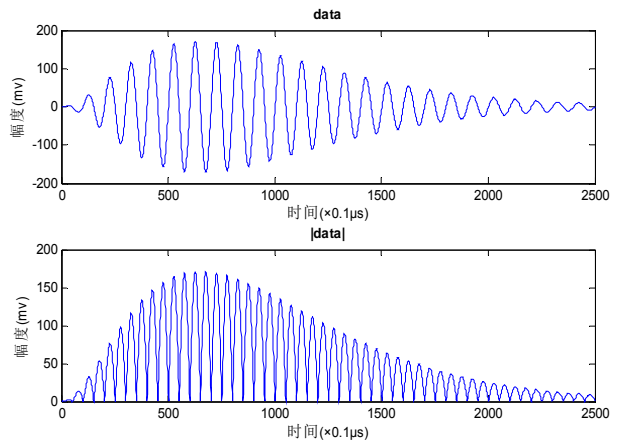


Figure 8. Compared data with |data| waveform
图 8. data 同|data|波形比较

信号合成的第二步: 幅度叠加。

完成|dataA| + |dataB|运算, 所得的结果如图 9 中所示。

5. 实测数据分析

利用自制的罗兰 C 全向磁天线接收东海台链的导航台信号, $GRI = 83900 \mu s$, 该台链的台站和接收地点的分布情况及磁天线的放置情况如图 10 所示。

由图中可以看出, 接收信号地点距离主台——宣城台最近, 距离第一副台——饶平台较远, 距离第二副台——荣成台最远; 磁天线接收信号时, 宣城台和荣成台信号位于全向磁天线的第一象限, 饶平台信号位于第二象限。

双通道采集的数据 dataA 和 dataB 的原始数据及其相位情况如图 11 所示, 采样率为 1 M, 数据长度为

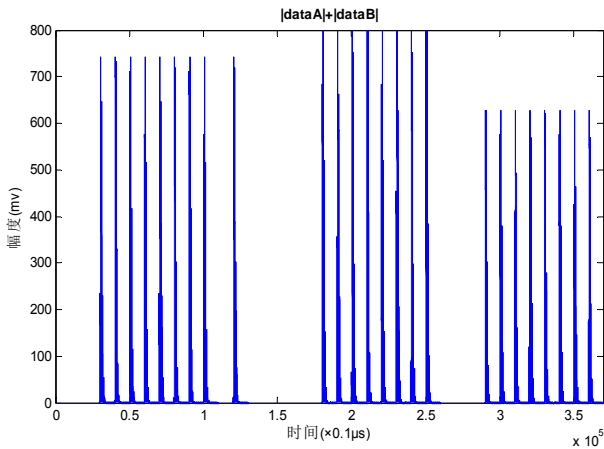


Figure 9. Amplitude superposition synthesis signal
图 9. 幅度叠加合成信号

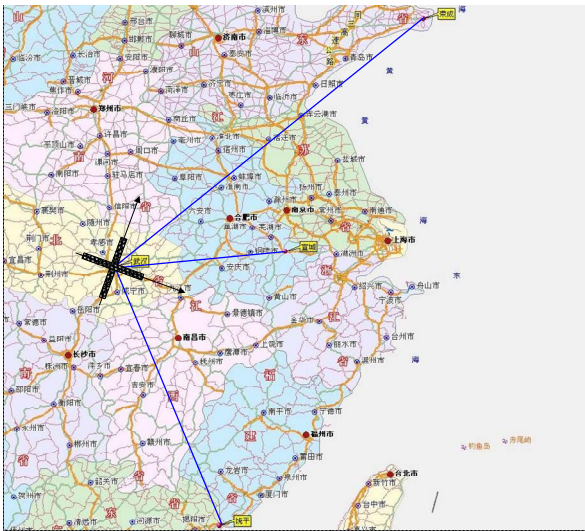


Figure 10. Stations, receive locations, and H-field antenna location map
图 10. 台站、接收地点及磁天线位置分布图

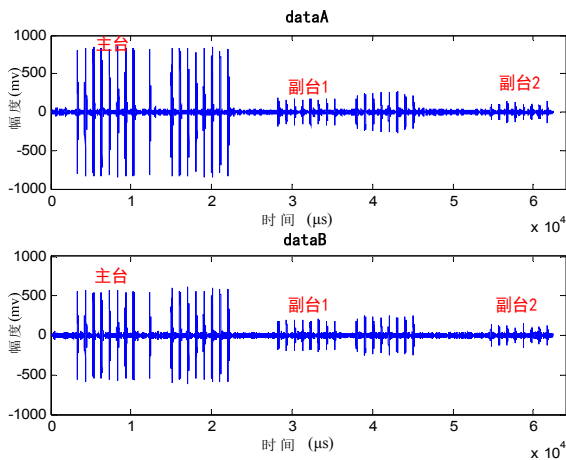


Figure 11. dataA and dataB original signal
图 11. dataA 和 dataB 原始信号

10 M, 图中显示信号只为一个 GRI 的信号。由于各台链之间信号的分布关系, 在该段 GRI 信号中, 会有其他台链导航台发射的信号, 如宣城台是一个双工台, 既发射东海台链的主台信号, 又发射北海台链的副 1 台信号。图中对东海台链的信号进行了标注, 信号合成过程中, 只是针对东海台链的信号进行处理, 其他台链的信号可以不予考虑。

信号合成的第一步: 对信号取绝对值。

完成 $|dataA|$ 和 $|dataB|$ 运算, 此举可将信号的相位特性消除, 所得的结果如图 12 中所示。

信号合成的第二步: 幅度叠加。

完成 $|dataA| + |dataB|$ 运算, 所得的结果如图 13 中所示。

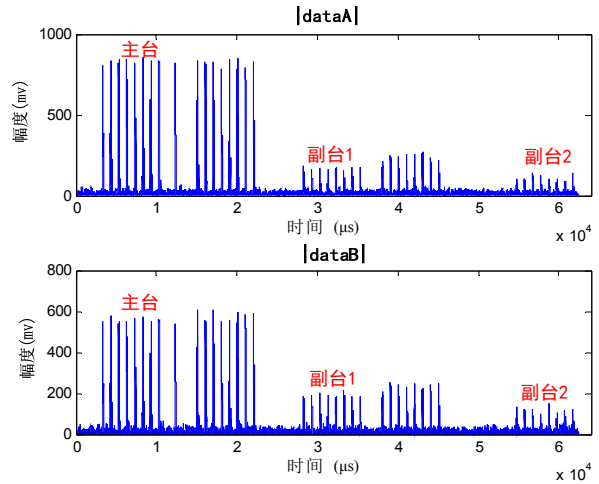


Figure 12. $|dataA| + |dataB|$ signal waveform
图 12. $|dataA| + |dataB|$ 信号波形

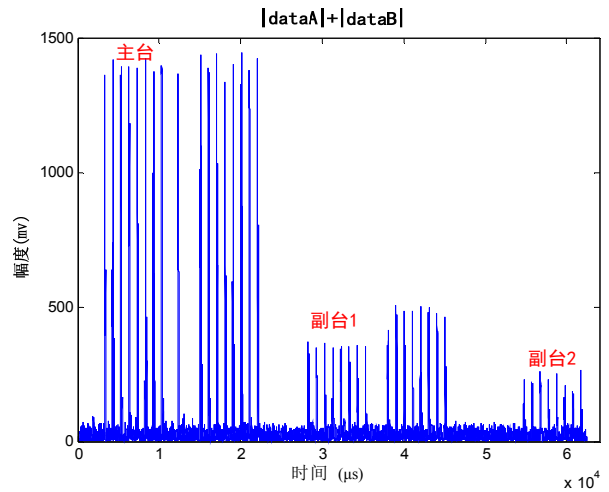


Figure 13. Overlay synthesis signal waveform
图 13. 幅度叠加合成信号波形

为了衡量合成信号定位结果的精确性,实现对幅度叠加合成信号的时差解算,本文在现有接收机时差测量程序的基础上进行修改,以满足幅度叠加合成信号的时差测量要求,采用该程序算得幅度叠加合成信号的定位时差分别为 $TD1 = 14988.559097 \mu\text{s}$ 、 $TD2 = 33426.903251 \mu\text{s}$ 。多种罗兰 C 接收机的多次试验结果表明,本地 8390 台链的实际测量时差为 $TD1 = 14988.5 \mu\text{s}$ 、 $TD2 = 33427 \mu\text{s}$,二者分别相差 $0.059097 \mu\text{s}$ 与 $-0.096749 \mu\text{s}$,充分证明基于幅度叠加的信号合成方法的正确性与有效性。

6. 结论

单棒磁天线由于其接收信号的方向性,导致其无法完成全方位接收某一台链三个导航台的信号,要实现全方位接收罗兰 C 信号,必须采用多根不同方向放置的磁棒接收信号,然后进行信号合成。由于单棒磁天线的相位特性,多根不同方向放置的磁棒在接收某一台站的信号时,相位会不同,如果采用模拟合成信号的方法,难以解决同一台站信号相位相反的问题,这就必须采用数字信号合成方法。本章提出了幅度叠加信号合成算法,在信号合成过程中消除了相位变化的影响,只需简单改变接收机内部处理程序,就能实

现合成信号的搜索、跟踪、识别和定位解算。通过仿真数据和实测数据的验证,本章提出的信号合成算法都能获得较好的效果。该算法在 FPGA 中实现简单,处理过程快速,具有较强的使用价值,已经在所研制的全向磁天线中得到了使用。

参考文献 (References)

- [1] 王孝通. 航海基础[M]. 北京: 海潮出版社, 2006: 372.
- [2] 姜弢, 郭黎利, 张朝柱等. 无线电导航系统现状与发展趋势[J]. 舰船电子工程, 2001, 126(6): 2-6.
- [3] 汪捷, 李川章, 梁尔冰等. 增强罗兰技术分析及评估[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(8): 37-41.
- [4] W. J. Pelgrum. New potential of low-frequency radio navigation in the 21st Century. Ohio University, 2006: 10-179.
- [5] P. Hannon, Z. K. Ren, P. Schick and J. Weikert. Use of a Single Analog-to-Digital (ADC) converter for dual-loop loran H-field Antenna. Chesapeake: Locus, Inc., 2000. <http://www.locusinc.com>
- [6] J. Schliem, L. Roth and P. Schick. Development and status of H-field Antenna and DSP-Loran receiver for FAA loran program. Federal Aviation Administration Broad Information Technology Services (BITS), 2001.
- [7] J. Galejs. Terrestrial propagation of long electromagnetic waves. New York: Pergamon Press, 1972: 299-336.
- [8] B. Michael. Elf communication antennas. London and Northampton: Peter Peregrines Ltd Press, 1978: 167-182.
- [9] G.-H. Cui, J. N. Xu and J. Zhou. Research on signal synthesis of Loran-C omni-directional H-field antenna with high-precision digital phase shift algorithm. 2010 Second International Conference on Future Computer and Communication, Shanghai, 2010: 113-117.