

# 罗兰-C 脉冲水下传播特性 高精度预测理论算法研究

周丽丽<sup>1,2</sup>, 穆中林<sup>3</sup>, 蒲玉蓉<sup>2</sup>, 席晓莉<sup>2</sup>, 何立风<sup>1</sup>

(1. 陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西西安 710021; 2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西西安 710048;  
3. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安 710038)

**摘 要:** 对罗兰-C 脉冲水下传播特性预测模型算法进行推导研究, 综合考虑了信号先沿陆海表面、再由空气入水传播时的路径损耗、相位延迟、色散效应及空气海水界面两侧场量的约束条件。分析了 0~10m 不同海水深度罗兰-C 电场幅度与相位的变化, 并与无畸变的标准场信号进行比较。结果显示: 随着入水深度增加, 色散效应导致脉冲前沿展宽, 跟踪点相位超前。该结果去除了由参比场量近似引入的误差, 精度更高。

**关键词:** 罗兰-C; 水下接收; 色散效应

**中图分类号:** TN011

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2017)05-1206-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.05.025

## Study on the Prediction Theory and Algorithm of Loran-C Signals Propagation Characteristics Under Water

ZHOU Li-li<sup>1,2</sup>, MU Zhong-lin<sup>3</sup>, PU Yu-rong<sup>2</sup>, XI Xiao-li<sup>2</sup>, HE Li-feng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China;  
2. College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;  
3. College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract:** The prediction theory and algorithm of Loran-C signals propagation characteristics under water are studied. The path loss, phase delay, dispersion effect, as well as boundary condition are all taken into account as the pulse signals propagation along the earth surface and then into the water. The amplitude and phase of the Loran-C signals in different depths (0~10m) of water are discussed. The predicted results by the proposed algorithm are compared to the standard ones with no waveform distortion. It is shown that due to dispersion effect, the envelope of the waveform would broaden and the phase of the tracking point would advance as the depth of water increases. Because the error introduced by the reference fields' approximation is deleted, the result should be more accurate.

**Key words:** Loran-C; underwater receiving; dispersion effects

## 1 引言

罗兰-C 系统工作于低频段, 信号具有一定的穿透能力。对长波信号沿地球表面传播, 再由空气向地/水下透射传播时的特性进行研究, 可以提高长波信号在地球浅层物理特性探测<sup>[1]</sup>、水下通讯<sup>[2]</sup>及协同导航定位<sup>[3]</sup>等新领域应用时的精度。

罗兰-C 系统采用 100kHz 的脉冲相位调制信号, 系

统的包络提取、天地波识别、相位跟踪、周期识别等信号处理环节均需在预知罗兰-C 电波传播特性的基础上展开, 而在对罗兰-C 电波传播特性进行高精度预测时, 除了要确定地球表面不规则<sup>[4,5]</sup>、天地波干扰<sup>[6,7]</sup>、天线辐射环境<sup>[8]</sup>等因素的影响, 还必须分析其在有耗媒质表面或有耗媒质中传播时的色散效应及交界面损耗。文献[9]对罗兰-C 信号在空气中沿不同电参数地表面传播时的色散效应与传播距离的关系进行了研究, 未考

考虑再入水传播情况;文献[10]则研究了罗兰-C 信号在纯水下传播时的色散效应对信号半峰值比的影响,研究结果中未计及地表面波传播色散与边界对不同场分量的影响,且参比的标准场信号采用“电流形式”,将辐射电场与发射电流波形的差异亦归至色散效应的影响。

文中对罗兰-C 信号先沿陆海表面、再由空气入水传播时的特性进行了理论推导,时、频域处理过程中综合考虑了各频率分量在整个传播路径上及边界处的幅度衰减与相位延迟,再现了入水后罗兰-C 信号的时域形式。其间给出了由电流信号推得理想条件下辐射电场信号,再由此电场信号获取水下接收参比标准场信号(非直接采用电流信号近似,更符合测量实际)的环节,并将两者计算结果相比较,从而得出色散效应影响。文中时谐因子取  $e^{-j\omega t}$ 。

## 2 理论预测模型算法

### 2.1 地面垂直电偶极子产生的场

根据文献[11,12],当垂直电偶极子在均匀光滑球地面上,取球坐标系,令地心位于坐标原点,垂直电偶极子位于极轴  $\theta = 0^\circ$  上,地球半径记为  $a$  (约为 6371.12km)。当观察点  $P$  位于地面以上且与场源均离开地面不太远,则  $P$  处电磁场分量可表示为

$$E_r = \frac{-j120\pi Il}{\lambda a \sqrt{\theta \sin \theta}} e^{jk_0 a \theta} W_g \quad (1)$$

$$H_\varphi = \frac{-jIl}{\lambda a \sqrt{\theta \sin \theta}} e^{jk_0 a \theta} W_g \quad (2)$$

$$E_\theta = \frac{j120\pi Il}{\lambda a \sqrt{\theta \sin \theta}} \left( \frac{2}{k_0 a} \right)^{\frac{1}{3}} e^{jk_0 a \theta} W'_g \quad (3)$$

其中  $I$  为电流幅度,  $l$  为天线长度,  $\lambda$  为波长,  $k_0$  为空气中的波数,  $\theta$  为观察点至场源的大圆角距离,  $W_g$  为地波衰减因子,它可表示为

$$W_g = e^{\frac{j\pi}{4}} \sqrt{\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{e^{jx t_s}}{t_s - q^2} \frac{w_2(t_s - y_1) w_2(t_s - y_2)}{w_2(t_s) w_2(t_s)} \quad (4)$$

此处

$$x = \left( \frac{k_0 a}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \theta \quad (5)$$

$$y_1 = \left( \frac{2}{k_0 a} \right)^{\frac{1}{3}} k_0 h \quad (6)$$

$$y_2 = \left( \frac{2}{k_0 a} \right)^{\frac{1}{3}} k_0 z \quad (7)$$

$h$  和  $z$  分别为发射点和接收点离地面高度,  $w_2(t)$  是第二类 Airy 函数,  $W'_g$  是衰减因子关于  $y_2$  的一阶导数。式中参数  $q$  可表示为

$$q = j \left( \frac{k_0 a}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \Delta_g = j \left( \frac{k_0 a}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\sqrt{\varepsilon_r - 1 + j60\lambda\sigma}}{\varepsilon_r + j60\lambda\sigma} \quad (8)$$

其中  $\Delta_g$  为归一化地表面阻抗,  $t_s$  是方程  $w_2'(t) - qw_2(t) = 0$  的第  $s$  个根。

在地球与空气分界面上电场切向分量与法向分量满足近似边界条件

$$E_r = -\Delta_g E_\theta \quad (9)$$

垂直偶极子在地下  $d_s$  处产生的电场为<sup>[11,12]</sup>

$$E_r = \Delta_g^2 e^{jk_s d_s} E_{r0} \quad (10)$$

$$E_\theta = -\Delta_g e^{jk_s d_s} E_{r0} \quad (11)$$

其中  $E_{r0}$  代表空气与地球分界面处  $d_s = 0$  的  $E_r$  分量。因此均匀光滑地面上垂直偶极子在地下  $d_s$  处的电场可写为

$$E_r = \Delta_g^2 e^{jk_s d_s} \frac{-j120\pi Il}{\lambda a \sqrt{\theta \sin \theta}} e^{jk_0 a \theta} W_g \quad (12)$$

式(12)中给出的衰减因子算法为均匀光滑地面时的求解方法,对于沿复杂路径传播情况,只要将  $W_g$  转换为相应路径算法结果即可,如分段不均匀光滑路径的波模转换法、Millington 算法;不均匀不光滑路径的积分方程方法、抛物方程方法<sup>[13]</sup>等。

### 2.2 陆海传播路径模型下水下罗兰-C 信号预测

对于罗兰-C 信号先沿陆海地球表面传播、再由空气入水传播的模型示意如图 1 所示。其中接收点距离发射天线的大圆距离为  $d$ , 陆地传播距离为  $d_1$ , 陆地表面归一化阻抗为  $\Delta_{g1}$ , 海水传播距离为  $d_2$ , 海水表面归一化阻抗为  $\Delta_{g2}$ , 信号入水深度为  $d_s$ 。

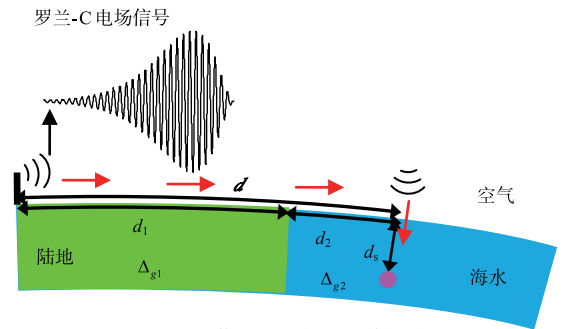


图1 罗兰-C信号由空气入水传播模型

正相位编码的罗兰-C 信号电流波形格式如下

$$i(t) = A(t - \tau)^2 e^{-\frac{2(t-\tau)}{6.5 \times 10^{-3}}} \sin(2\pi \cdot 10^5 t) \quad (13)$$

其中  $A$  是与天线峰值电流幅度有关的常数;  $\tau$  是包周差。罗兰-C 信号用于导航定位时,为避开天波干扰,将电场幅度采样点和相位跟踪点分别选在信号第三载波周期的负峰值和其末端正向过零点处。要求通过周期识别技术识别此载波周期,以此来判断接收信号状态和进行导航定位解算。采用传统标准半峰值比技术进行周期识别时,参与对比的波形是标准罗兰-C 电场波形。当地波传播表面为理想导体平面时,远区垂直电场时域波形可由下面公式近似得到

$$e_0(t) = \frac{\mu_0 l}{2\pi d} \frac{d}{dt} (i(t - d/c)) \quad (14)$$

其中  $\mu_0$  为真空磁导率,  $c$  为光速,  $d \approx a \sqrt{\theta \sin \theta}$  为传播距离. 若不考虑不规则路径的散反射波、天地波干扰、天线辐射环境复杂、时域脉冲信号色散效应等因素的影响, 依据空气、海水两种媒质边界上场分量的约束条件, 水下电场法向分量时域波形可直接用下式得到

$$e_r(t) = |\Delta_{g2}^2 e^{jk_{g2}d} W_g| e_0(t - \Delta t_s) \quad (15)$$

其中,  $k_{g2}$  为海水中的传播波数,  $\Delta t_s$  为  $\Delta_{g2}^2 e^{jk_{g2}d} W_g$  的相位,  $\Delta_{g2}$ 、 $k_{g2}$  以及  $W_g$  均是 100kHz 的频域计算结果.

当罗兰-C 信号用于实际环境下的导航定位时, 受上述众多因素的影响, 信号波形会发生畸变, 各周期脉冲幅度约束关系将发生改变. 下面重点研究水下应用时, 罗兰-C 信号色散效应的分析方法.

将罗兰-C 电流信号  $i(t)$  作傅里叶变换, 得到其频域表达式  $I(\omega)$

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt \quad (16)$$

代入式(12), 即可得到每个正频率电流元分量水下电场法向分量

$$E_r(\omega) = \Delta_{g2}^2(\omega) e^{jk_{g2}(\omega)d_s} \frac{-j120\pi I^*(\omega)l}{\lambda(\omega)a\sqrt{\theta \sin \theta}} e^{jk_{g2}(\omega)a\theta} W_g(\omega) \quad (17)$$

其中  $I^*(\omega)$  是  $I(\omega)$  的共轭. 所包含的负频率电流元分量的辐射场量亦可由傅里叶变换共轭对称特性得到. 式中  $W_g(\omega)$  采用波模转换法<sup>[11]</sup> 得到. 由傅里叶逆变换可得到水下接收点电场法向分量时域表达式

$$e_r(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_r^*(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (18)$$

以往研究中常将水下辐射场与发射电流的约束关系仅表示为  $E_r(\omega) \sim e^{jk_{g2}(\omega)d_s} I^*(\omega)$ , 会进一步引入误差. 上述过程可采用离散傅里叶变换(DFT)方式具体实现, 设采样角频率为  $\omega_s$ , 罗兰 C 电流信号  $i(t)$  离散后  $i(n)$  的样本长度为  $N$ , 则由 DFT 变换

$$I(m) = \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} nm) \quad (19)$$

其中  $m=0, 1, 2 \cdots, N-1$ , 点  $m$  处对应的角频率为  $\frac{\omega_s}{N}m$ . 当  $\frac{\omega_s}{N}m \leq \frac{\omega}{2}$  时,

$$E_r(m) = \Delta_{g2}^2(m) e^{jk_{g2}(m)d_s} \frac{-j120\pi I^*(m)l}{\lambda(m)a\sqrt{\theta \sin \theta}} e^{jk_{g2}(m)a\theta} W_g(m) \quad (20)$$

当  $\frac{\omega_s}{N}m > \frac{\omega}{2}$  时, 每个频率电流元分量水下接收对应的辐射场由其离散傅里叶变换的共轭对称特性得到. 相应的场强时域离散形式为

$$e_r(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} E_r^*(m) \exp(j \frac{2\pi}{N} nm) \quad (21)$$

依据恢复得到的时域信号波形, 即可得到包含色散影响的罗兰-C 电场幅度及传播相位. 由式(10)、(11)可得水下电场的切向分量实际上比法向分量要大得多, 对于切向分量的再现只需将式(17)、(20)中的  $\Delta_{g2}^2$  换为  $-\Delta_{g2}$  即可.

3 计算结果与实测分析

设一罗兰-C 电流信号  $i(t)$ , 起始时刻为 0,  $\tau=0, A=1, l=1\text{m}$ , 该罗兰-C 信号沿陆海地球表面传播的大圆距离为 600km, 其中陆地距离 300km, 海水距离 300km, 入水深度为 0m~10m. 陆地的相对介电常数  $\epsilon_r$  取 13, 电导率  $\sigma$  取 0.003S/m, 海水的  $\epsilon_r$  取 80,  $\sigma$  取 5S/m. 参与积分的频率范围为 50kHz—150kHz.

图 2 给出的分别采用式(15)和(21)得到的 0m、1m、5m 和 10m 入水深度的电场法向分量信号波形. 由式(15)得到的是标准信号波形, 式(21)得到的是色散信号波形. 图 3 给出的则是包含色散效应的  $e_r$  和  $e_\theta$  不同电场分量的采样点幅度、采样点幅度与包络峰值幅度比(半峰值比)、跟踪点的相位(罗兰-C 信号到达时

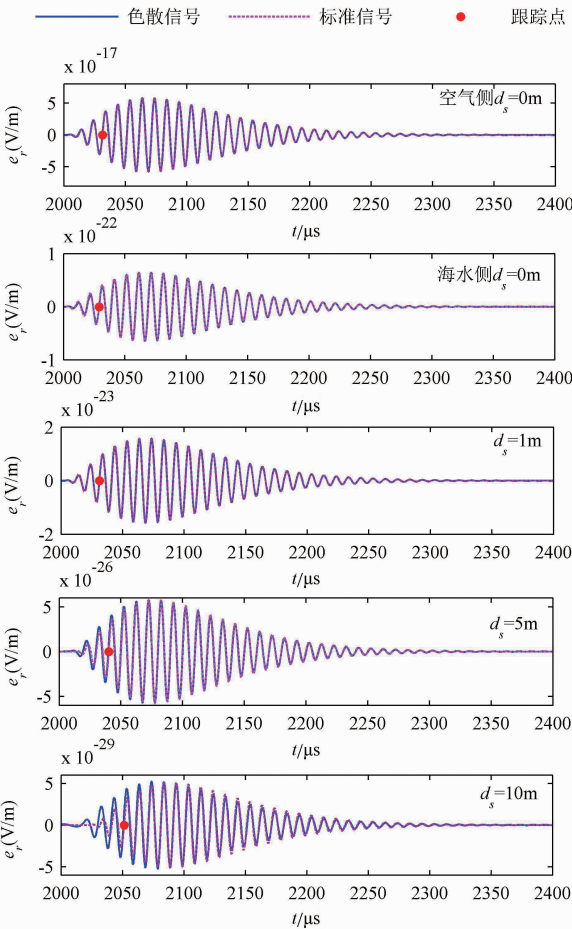


图2 不同入水深度的罗兰-C信号波形

刻) 及与标准信号的相位差  $\Delta t$ .

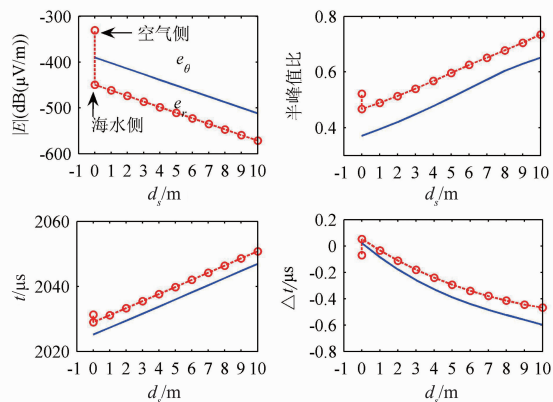


图3 不同电场分量入水特性

从图 2 和图 3 可以得到水下接收时,对于该传播路径,随着入水深度的增加,由于波在有耗媒质传播的色散影响,脉冲波形前沿展宽,第三周负峰值与包络峰值比(半峰值比)不再是简单的 1/2 关系,相位超前于标准信号. 在入水边界处,电场分量  $e_r$  幅度与相位均发生跳变,幅度急剧衰减,相位超前,  $e_\theta$  连续. 水下  $e_\theta \gg e_r$ , 且不同场分量的色散影响不同,实际电场测量中应以  $e_\theta$  为主. 由于信号的畸变,按空气中周期识别标准可能会产生超前或滞后的误差,相位跟踪点产生误判现象<sup>[10]</sup>. 由于实测中周期识别算法的判别准则及实测条件(有无风浪、电、磁天线选择等)的不一致,再加上天波、内部电路噪声及外界信号干扰的影响,水下周期识别过程要比空气中复杂得多,必须对信号水下传播特性作深入的分析.

## 4 结束语

文中对水下接收地波高精度预测模型算法进行研究,在考虑罗兰-C 信号电场时域形式、传播路径损耗、色散效应及边界条件的影响后,精度明显提高. 基于该算法,可详细分析水/地下接收时,色散对电波传播相位、场强的影响,为包络特征提取<sup>[14]</sup>、周期识别技术改进提供依据,进一步提高长波系统的精度,扩展其远程水下导航定位的应用.

## 参考文献

- [1] Feng Y, Astin I. Remote sensing of soil moisture using the propagation of Loran-C navigation signals [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12 (1): 195 – 198.
- [2] 张丰伟. 水下无线中长波通信机的设计与实现 [D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [3] 徐博, 白金磊, 郝燕玲, 等. 多 AUV 协同导航问题的研究现状与进展 [J]. 自动化学报, 2015, 41 (3): 445 – 461.

- Xu Bo, Bai Jin-Lei, Hao Yan-Lin, et al. The research status and progress of cooperative navigation for multiple AUVs [J]. Acta Automatic Sinica, 2015, 41 (3): 445 – 461. (in Chinese)
- [4] Zhou Li-li, Xi Xiao-li, Zhang Jin-sheng, 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.
- [5] Zhou L, Xi X, Liu J, et al. LF ground-wave propagation over irregular terrain [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59 (4): 1254 – 1260.
- [6] 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.
- Zhu Yin-bing, Xu Jiang-ning, Wang Hong-xing, et al. A 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. (in Chinese)
- [7] Li W, Chen B. Low complexity sparse noise reduction method for Loran-C skywave delay estimation [J]. Electronics Letters, 2013, 49 (24): 1572 – 1574.
- [8] Vincent J, Borderies P, Poirier J, Gobin V. Simulations and effects of natural environments on low frequency antennas with three-dimensional FDTD method [J]. Progress in Electromagnetic Research M, 2014, 38: 45 – 52.
- [9] 王东文. 罗兰 C 脉冲色散的理论预测 [J]. 电波科学学报, 1992, 7 (2): 47 – 58.
- Wang Dong-wen. Theoretical prediction of dispersion of Loran C pulse [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1992, 7 (2): 47 – 58. (in Chinese)
- [10] 吴绳正, 刘敬虎, 朱银兵, 李豹. 水下接收罗兰 C 信号周期识别补偿方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31 (11): 68 – 71.
- Wu Shengzheng, Liu Jinghu, Zhu yinbing, et al. Study on cycle identification compensation method for underwater receiving Loran-C signal [J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31 (11): 68 – 71. (in Chinese)
- [11] 彭怀云, 樊文生, 潘威炎, 等. 沿不规则不均匀地面传播的侧面波 [J]. 电波科学学报, 2006, 21 (4): 497 – 502.
- Peng Huai-yun, Fan Wen-sheng, Pan Wei-yan, et al. Lateral wave propagation along irregular and inhomogeneous ground [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21 (4): 497 – 502. (in Chinese)
- [12] 潘威炎. 长波超长波极长波传播 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004: 106 – 173.
- [13] 盛楠, 廖成, 张青洪, 等. 预测毫米波雾衰减的抛物方程模型研究 [J]. 电子学报, 2014, 42 (5): 958 – 962.
- Sheng Nan, Liao Cheng, Zhang Qing-hong, et al. The Par-

abolic equation model for estimating fog attenuation at millimeter wavelengths[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(5): 958–962. (in Chinese)

[14] 吴苗, 许江宁, 李方能, 等. 基于 NTFT 的 Loran C 信号包络提取技术[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(5):

637–639.

Wu Miao, Xu Jiang-ning, Li Fang-neng, et al. Loran C signal envelope extraction technology based on NTFT[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(5): 637–639. (in Chinese)

作者简介



**周丽丽** 女, 1981 年生于江苏连云港. 陕西科技大学电气与信息工程学院讲师、硕士生导师. 研究方向为电波传播理论、电磁场数值计算.  
E-mail: zhoulili@ sust. edu. cn



**穆中林** 男, 1981 年生于江苏连云港. 空军工程大学航空航天工程学院讲师. 研究方向为电波传播理论、导航与控制.  
E-mail: lin1997\_98@ 163. com