

AIS 信号二次相位因子预测算法研究

王晓烨, 张淑芳

(大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁大连 116026)

摘 要: 本文对 AIS (Automatic Identification System) 信号海上传播二次相位因子的预测算法进行研究. 在深入研究海面参数对 AIS 信号二次相位因子影响的基础上, 给出 AIS 频段的反射系数; 在综合分析海水温度、盐度、收发天线高度和传播距离长度对 AIS 信号二次相位因子影响的结果下, 给出不同海态时 AIS 信号的二次相位因子. 研究结果将有助于 AIS 信号沿海面传播延时的高精度测量.

关键词: AIS 信号传播; 二次相位因子; 预测算法; 测距精度

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2016)09-2121-05

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.015

The Research of Prediction Algorithm for the Secondary Factor of AIS Signal

WANG Xiao-ye, ZHANG Shu-fang

(Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract: A prediction algorithm of the secondary factor for automatic identification system (AIS) signal propagation is studied. The reflection coefficient on AIS band given is derived based on the in-depth study of the effects for sea surface parameters on the secondary factor of AIS signal. The secondary factor of AIS signal in the different sea states is given under the influence of the sea temperature, salinity, the height of antennas and the length of propagation distance. The results will contribute to the high-precision measurement of the propagation delay for AIS signal along the sea.

Key words: AIS signal propagation; secondary factor; prediction algorithm; ranging precision

1 引言

船舶自动识别系统 AIS 系统是利用海上 VHF (Very High Frequency) 频段进行船-岸、船-船间航行信息交换的数字通信系统. AIS 设备之间有效的数据交换可用于改善航海安全. 目前, 多数沿海国家都建立了 AIS 岸站系统, 该系统能够实时获取沿海的过往船舶信息, 并能对船舶进行管理. 当前, 作者所在的研究所正在开展基于 AIS 岸站的陆基定位系统研究, 主要采用测距和测距差定位方法^[1], 所依据的是对 AIS 信号无线电波传播延时的测量. 一般而言, 海上 VHF 频段主要用于海上通信, 并且功率较大, 因此很少有传播延时的研究. 但本研究的目标是利用 VHF 信号进行高精度定位, 因此在传播延时测量中必须考虑各种传播媒质的影响. 无线电波两点之间的传播延时 TOA (Time Of Arrival) 可表示为一次相位因子、二次相位因子和附加二次相位因子^[2], 即 $TOA = PF + SF + ASF$ ^[2]. 一次相位 PF 是信号在大气中传播时从发射机到接收机天线的净传播时间总和^[3], 二次相位 SF 是信号在海面传播产生的附加延

迟^[3], 附加二次相位 ASF 是信号传播时由于地面电导率不同产生的附加延迟^[3]. 对 AIS 信号而言, 目前还没有可用的二次相位和附加二次相位精确预测方法. 由于二次相位和附加二次相位均不能通过理论模型直接得到, 所以本文将二次相位与附加二次相位一并考虑统称为二次相位, 即凡是不同于大气传播媒质所引起的附加相位延迟的总和. AIS 频段的电磁波在海上传播主要依靠视距传播, 受到传播媒质等复杂条件的影响较大, 所以对 AIS 信号二次相位因子预测方法的研究具有很大的挑战性. 目前国际上现存的陆基定位系统是罗兰 C 系统, 因此关于二次相位因子的研究也就多见于与该系统有关的研究, 例如参考文献[2, 4]等. 罗兰 C 信号是通过地波传播的, 由于 AIS 频段和罗兰 C 频段的频率不同, 受传播媒质影响的因素种类和每个因素的影响程度皆不相同, 不能照搬用于 AIS 超短波信号二次相位因子预测方法的研究. 本文针对 AIS 信号超短波视距传播的特点, 提出了一套适用于该频段信号传播的二次相位因子预测算法.

本文首先从影响 AIS 信号在海上传播的传播媒质

着手,分析海面传播媒质对 AIS 信号视距传播特性的影响,再利用主要影响因素判定海面媒质对 AIS 信号反射系数相位延时的作用,并推导出 AIS 信号海面反射系数预测公式及其相位特性,最后根据接收点场强表达式得出造成信号延时的因素,从而推导出 AIS 信号在不同海面条件下传播时的二次相位因子算法,并在理论推导的基础上利用数值仿真的实验方法给出验证结果。

2 影响二次相位因子的海面参数

AIS 信号在光滑海面传播时,会出现镜面反射; AIS 信号在粗糙海面传播时,会产生漫反射. 本节将针对产生这两种反射情况的条件进行讨论,给出不同情况下, AIS 信号的二次相位影响因子的变化趋势,为下一节推导 AIS 信号二次相位因子奠定基础。

AIS 信号沿海面传播时,首先将海面特性以光滑和粗糙表示,所以首先要判断海面是否光滑,这里采用的判断依据是 Rayleigh 准则^[5],即

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \sin \psi} \quad (1)$$

式中, Δh 为浪高, λ 为 AIS 信号波长, ψ 为掠射角. 所以当海浪起伏高度小于 $\lambda/(8 \sin \psi)$ 时,认为海水表面是光滑的,反之认为海水表面是粗糙的. 式(1)表明,判断海面光滑条件与 AIS 信号波长和掠射角有关. AIS 信号频率是固定的,那么海面光滑条件只受掠射角影响. 在海面视距传播的条件下,掠射角的取值为:

$$\psi = \arctan\left(\frac{H_i + H_r}{d}\right) \quad (2)$$

其中, H_i 为发射天线高度, H_r 为接收天线高度, d 为 AIS 信号在海面上的传播距离. 一般认为 AIS 信号的视距传播距离最大 35 海里左右^[6], AIS 信号发射天线的架设高度为百米左右,船载接收天线高度一般几十米,因此, H_i 和 H_r 的值都要远小于 d , 所以,当 AIS 信号在海上传播时,其掠射角的取值通常小于 1° . 故当掠射角 $\psi < 1^\circ$ 时,则 $\Delta h > 13.2286\text{m}$,即海浪起伏高度高于 13.2286m 时,海面是粗糙的,反之则认为海面是光滑海面。

在 AIS 信号海面视距传播的条件下,根据场强叠加原理,接收点的场强应是直射波与反射波的叠加,即^[5]

$$E = E_d + E_r = E_d(1 + \Gamma e^{-j(2\pi/\lambda)\Delta r}) \quad (3)$$

是接收点场强, E_d 是直射波场强, E_r 是反射波场强, Γ

为海面反射系数, λ 为 AIS 信号波长, Δr 为 AIS 信号反射波传播路径与直射波传播路径之间的距离差. 该公式表明接收点场强信号与海面反射系数和两条路径之间的距离差有关. 下面将对式(3)中的 Δr 和 Γ 进行具体研究,为后面二次相位因子的推导奠定基础。

2.1 反射路径与直射路径之间的距离差 Δr

本节将对式(3)中影响接收点场强相位的因素之一,距离差 Δr 进行研究. 假设 r_1 为从发射天线到接收天线直射波射线路径长度, r_2 为从发射天线经海面反射后到达接收天线的反射波射线路径长度,所以距离差 $\Delta r = r_2 - r_1$. 因为 $d \gg H_i, H_r$, 所以距离差^[5]可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta r &= r_2 - r_1 = \sqrt{(H_i + H_r)^2 + d^2} - \sqrt{(H_i + H_r)^2 - d^2} \\ &\approx \frac{2H_i H_r}{d} \end{aligned} \quad (4)$$

该式所得距离差 Δr 与收发天线高度和传播距离长度有关,因此收发天线高度和传播距离长度亦为影响 AIS 信号二次相位因子的因素。

2.2 海面反射系数

反射系数 Γ 是另一个影响接收点场强相位的因素,而且在光滑海面和粗糙海面上反射系数 Γ 的计算方法不同,本节就将针对这两种不同的海面情况对 Γ 进行分析研究。

2.2.1 光滑海面反射系数

前文 Rayleigh 准则给出,当海浪起伏高度小于 $\lambda/(8 \sin \psi)$ 时,认为海水表面是光滑的,此时反射系数可使用 Fresnel 反射系数^[7],现有的 Fresnel 反射系数公式^[5]为:

$$\Gamma_H = \frac{\sin \psi - \sqrt{(\varepsilon_r - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{(\varepsilon_r - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \psi}} \quad (5)$$

$$\Gamma_V = \frac{(\varepsilon_r - j60\lambda\sigma) \sin \psi - \sqrt{(\varepsilon_r - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \psi}}{(\varepsilon_r - j60\lambda\sigma) \sin \psi + \sqrt{(\varepsilon_r - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \psi}} \quad (6)$$

式中, Γ_H 为水平极化时的 Fresnel 反射系数, Γ_V 为垂直极化时的 Fresnel 反射系数, ψ 为掠射角, ε_r 为海水相对介电常数, σ 为海水电导率,单位是 S/m, λ 为 AIS 信号波长. 这里的 Γ_H 和 Γ_V 均是复数形式,为方便进行二次相位因子推导,现将 Γ_H 、 Γ_V 分解成幅度和相位角的形式,所以式(5)和(6)分解推导成以下形式:

$$\Gamma_H = \frac{1}{(\sin \psi + m)^2 + n^2} \times (\sin^2 \psi - m^2 - n^2 - j2n \sin \psi) = \frac{\sqrt{(\sin^2 \psi - m^2 + n^2)^2 + 4m^2 n^2}}{(\sin \psi + m)^2 + n^2} \times e^{-j \arctan(2n \sin \psi / (\sin^2 \psi - m^2 + n^2))} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_V &= \frac{1}{(\varepsilon_r \sin \psi + m)^2 + (n - 60\lambda\sigma \sin \psi)^2} \times [(\varepsilon_r^2 + 3600\lambda^2 \sigma^2) \sin^2 \psi - (m^2 + n^2) - j2 \sin \psi (n \varepsilon_r + 60\lambda\sigma m)] \\ &= \frac{1}{(\varepsilon_r \sin \psi + m)^2 + (n - 60\lambda\sigma \sin \psi)^2} \times e^{-j \arctan[2 \sin \psi (n \varepsilon_r + 60\lambda\sigma m) / ((\varepsilon_r^2 + 3600\lambda^2 \sigma^2) \sin^2 \psi - (m^2 + n^2))]} \\ &\quad \times \sqrt{(\varepsilon_r^2 + 3600\lambda^2 \sigma^2)^2 \sin^4 \psi + (m^2 + n^2)^2 - 2 \sin^2 \psi (\varepsilon_r^2 - 3600\lambda^2 \sigma^2)(m^2 - n^2) + 480(\sin^2 \psi) \varepsilon_r m n \lambda \sigma} \end{aligned} \quad (8)$$

上两式中的 m 和 n 的表达式如下:

$$m = \sqrt{\frac{\varepsilon_r - \cos^2 \psi + \sqrt{(\varepsilon_r - \cos^2 \psi)^2 + 3600 \lambda^2 \sigma^2}}{2}}$$

$$n = -\frac{30 \sqrt{2} \lambda \sigma}{\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \psi + \sqrt{(\varepsilon_r - \cos^2 \psi)^2 + 3600 \lambda^2 \sigma^2}}} \quad (9)$$

将 Fresnel 反射系数写成式(7)、(8)形式的好处是可以将式(3)中的接收点场强直接表示成幅度和相位角的形式,这样就可以从接收点场强的相位延时中得到 AIS 信号的二次相位因子. 下面就对光滑海面反射系数的影响因素进行研究.

通过式(7)、(8)得到,光滑海面的反射系数与 AIS 信号波长、掠射角、海水相对介电常数和电导率有关. 由于 AIS 信号的波长是固定的,所以影响光滑海面反射系数的因素只有掠射角、海水相对介电常数和电导率. 掠射角用式(2)计算. 海水相对介电常数和电导率的计算参照 Debye 公式^[8].

Debye 公式中给出的海水相对介电常数和电导率与海水温度和盐度有关. 下面从温度和盐度这两个参数入手对海水相对介电常数和电导率进行分析. 由于 AIS 信号两个频率非常接近,所以本节仅对 161.975MHz 这一个频率进行讨论. 图 1 是当盐度为全球平均海水盐度 32.54‰^[8]时,温度在 0℃ 到 40℃ 之间,海水相对介电常数和电导率的变化;当温度取值为全球平均温度 28℃^[8]时,盐度在 30‰~40‰ 之间,海水相对介电常数和电导率的变化如图 2 所示.

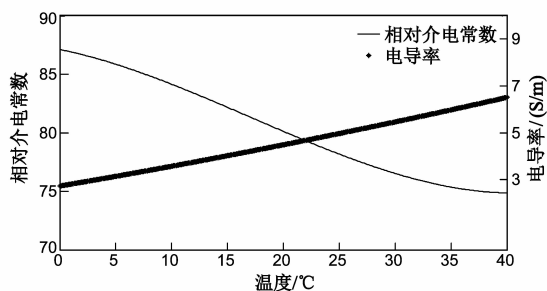


图1 海水相对介电常数和电导率随温度的变化曲线 ($f=161.975\text{MHz}$)

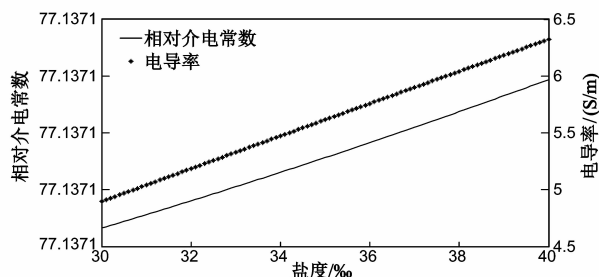


图2 海水相对介电常数和电导率随盐度的变化曲线 ($f=161.975\text{MHz}$)

图 1 和图 2 中的数据总结见表 1 所示.

表 1 海水相对介电常数和电导率的变化数据

图序	温度(℃)	盐度(‰)	相对介电常数	电导率(S/m)
图 1	0 ~ 40	32.54	87.134 ~ 74.862	2.728 ~ 6.511
图 2	28	30 ~ 40	77.137 ~ 77.1372	4.897 ~ 6.324

由此可得到结论,海水温度和盐度对海水电导率有一定影响,而对相对介电常数来说,海水盐度对其基本没有影响,但是海水温度对其影响较为显著. 可见,为了达到高精度定位的目的,在后续的推导中,还是需要考虑温度和盐度这两个因素的.

2.2.2 粗糙海面反射系数

上文提到当海浪起伏高度高于 13.2286m 时,认为海面是粗糙的. 此时光滑海面的 Fresnel 反射系数不能满足粗糙海面反射的需求,我们需要对 Fresnel 反射系数进行修正,定义粗糙海面的反射系数为有效反射系数,有效反射系数的计算可参照文献[9]中的计算方法,故有效反射系数为:

$$\Gamma_e = \rho * \Gamma \quad (10)$$

其中, Γ 为 Fresnel 反射系数, ρ 为粗糙度修正因子. 用 Miller-Brown 模型近似^[9]:

$$\rho = \exp(-0.5(2kh_e \sin \psi)^2) I_0(0.5(2kh_e \sin \psi)^2) \quad (11)$$

这里 I_0 是零阶第一类修正贝塞尔方程, h_e 是海浪高度均方差, k 是波数, ψ 是掠射角. 对于 Phillip 谱分布, h_e 可表示^[9]为:

$$h_e = 0.051 U_{10}^2 \quad (12)$$

其中, U_{10} 是海面 10m 处的风速^[9], 将中国气象局发布的《风力等级划分》^[10]中海面 10m 处的风速代入式(12)得到海浪高度均方差值,之后将海浪高度均方差值代入式(11)得到粗糙度修正因子,这样得到的粗糙度修正因子是一个实数,故而粗糙海面的有效反射系数只改变 Fresnel 反射系数中的幅度而不改变其相位,因此不论海面光滑或是粗糙,反射系数中的相位均是 Fresnel 反射系数相位. 那么在 AIS 信号频率一定的情况下,影响海面反射系数的因素只是海水的温度、盐度和掠射角.

3 二次相位因子的推导

在讨论分析了影响接收点场强相位的两个参数-距离差和反射系数之后,本节将根据前面的理论基础和数值分析进行 AIS 信号二次相位因子的推导. 由于前文为方便研究 AIS 信号二次相位因子,将反射系数 Γ 改写成了幅度和相位角的形式,本节也将利用此方法进行 AIS 信号二次相位因子的推导,故将式(3)中的参数全部转化为幅度和相位角的形式,即

$$E = E_d + E_r = |E_d| e^{j\omega t} (1 + |\Gamma| e^{-j(2\pi/\lambda)\Delta r + \varphi}) \quad (13)$$

式中, ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, t 为传播时间, Δr 为距离差, λ 为波长, φ 为传播过程中反射系数产生的相位角. 参照罗兰 C 对二次相位的研究方法并结合式(13)可知, $e^{-j\omega t}$ 为一次相位, $\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r + \varphi$ 为二次相位. 令 $\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r$ 并将式(4)代入 $\Delta\beta$, 得:

$$\Delta\beta = \frac{4\pi H_t H_r}{\lambda d} \quad (14)$$

令 $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r + \varphi$ 并将式(14)代入, 得 AIS 信号二次相位因子:

$$\alpha = \frac{4\pi H_t H_r}{\lambda d} + \varphi \quad (15)$$

依据前文给出的结论, 光滑海面 and 粗糙海面反射系数的相位均是 Fresnel 反射系数的相位, 式(15)即是 AIS 信号在海面传播时的二次相位因子, 将式(7)和式(8)分别代入式(15)得到不同极化方式的二次相位因子 α :

$$\alpha = \frac{4\pi H_t H_r}{\lambda d} - \arctan\left(\frac{2n\sin\psi}{\sin^2\psi - m^2 - n^2}\right) \quad (\text{水平极化时}) \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{4\pi H_t H_r}{\lambda d} - \arctan\left(\frac{2\sin\psi(n\varepsilon_r + 60\lambda\sigma m)}{(\varepsilon_r^2 + 3600\lambda^2\sigma^2)\sin^2\psi - (m^2 + n^2)}\right) \quad (\text{垂直极化时}) \quad (17)$$

因此 AIS 信号二次相位因子与收发天线高度、信号传播距离、信号掠射角、海水相对介电常数和电导率有关. 根据式(2), 可将掠射角对 AIS 信号二次相位因子的影响转化为传播距离和收发天线高度对 AIS 信号二次相位因子的影响. 所以本文针对海水温度、盐度、收发天线高度和传播距离这 5 个因素讨论 AIS 信号的二次相位因子. 对实验条件的描述及所对应的结果参见表 2, 本文利用 161.975MHz AIS 信号频率作为参考完成实验.

根据表 2 的实验条件, 利用推导出的式(16)和式(17)进行计算, 得到的结果见表 3 所示.

表 2 实验条件描述

	实验条件 1: 温度变化, 其它条件 不变	实验条件 2: 盐度变化, 其它条件 不变	实验条件 3: 传播距离变化, 其它 条件不变	实验条件 4: 发射天线高度变化, 其它条件不变	实验条件 5: 接收天线高度变化, 其它条件不变
温度(℃)	0 ~ 40	28	28	28	28
盐度(‰)	32.54	30 ~ 40	32.54	32.54	32.54
传播距离(nmile)	5	5	5 ~ 35	5	5
发射天线高度(m)	50	50	50	50 ~ 150	50
接收天线高度(m)	20	20	20	20	10 ~ 20

表 3 对应数据变化表

		实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5
二次相位因子(rad)	水平极化	1.07 π	1.07 π	1.04 π ~ 1.35 π	1.035 π ~ 1.105 π	1.047 π ~ 1.093 π
	垂直极化	-0.913 π ~ -0.901 π	-0.906 π ~ -0.902 π	-0.932 π ~ -0.519 π	-0.951 π ~ -0.859 π	-0.929 π ~ -0.88 π
二次相位因子引起的时间延时(ns)	水平极化	3.303	3.303	3.21 ~ 4.167	3.195 ~ 3.411	3.232 ~ 3.374
	垂直极化	2.781 ~ 2.818	2.784 ~ 2.797	1.602 ~ 2.878	2.652 ~ 2.936	2.716 ~ 2.868
时间延时引起的测距误差(m)	水平极化	0.991	0.991	0.963 ~ 1.25	0.959 ~ 1.023	0.97 ~ 1.012
	垂直极化	0.834 ~ 0.845	0.835 ~ 0.839	0.481 ~ 0.863	0.796 ~ 0.881	0.815 ~ 0.86

实验结果分析:

(1) 实验 1 中只海水温度在 0℃ 到 40℃ 之间变化, 此时对水平极化的 AIS 信号来说, 二次相位因子是个常数值 1.07 π , 由二次相位绝对值引起的测距误差为 0.991m, 其不随温度的变化而变化, 故而在进行二次相位修正时只需对此常数值进行修正即可; 对垂直极化的 AIS 信号来说, 二次相位因子随海水温度的增加而增加, 由其绝对值引起的测距误差为 0.834m ~ 0.845m, 可根据预测值对测距误差进行修正.

(2) 实验 2 中只海水盐度在 30‰ 到 40‰ 之间变化, 此时对于水平极化的 AIS 信号来说, 二次相位因子是个常数值 1.07 π , 由二次相位绝对值引起的测距误差为 0.991m, 其不随盐度的变化而变化, 故而在进行二次相位修正时只需对此常数值进行修正即可; 对垂直极化的 AIS 信号来说, 二次相位因子随海水盐度的增加而增加, 由其绝对值引起的测距误差为 0.63m ~ 0.641m.

(3) 实验 3 中只传播距离在 5nmile 到 35nmile 之间变化, 此时不论水平极化的 AIS 信号还是垂直极化的

AIS 信号,二次相位因子均随传播距离的增加而减小,由其绝对值引起的测距误差分别为 0.963m ~ 1.25m 和 0.481m ~ 0.863m.

(4) 实验 4 只发射天线高度在 50m ~ 150m 之间变化,水平极化和垂直极化的 AIS 信号其二次相位因子均随发射天线高度的增加而增加,由二次相位因子绝对值引起的测距误差分别为 0.959m ~ 1.023m 和 0.796m ~ 0.881m.

(5) 实验 5 只接收天线高度在 10m ~ 20m 之间变化,水平极化和垂直极化的 AIS 信号其二次相位因子均随接收天线高度的增加而增加,由二次相位因子绝对值引起的测距误差分别为 0.97m ~ 1.012m 和 0.815m ~ 0.86m.

综上,对于水平极化的 AIS 信号,在其实验条件均取边界值的情况下,测距误差最大值可以达到 1.573m,最小值为 0.941m. 同理,对于垂直极化的 AIS 信号,测距误差最大值达到 0.905m,最小值为 0.042m.

4 结论

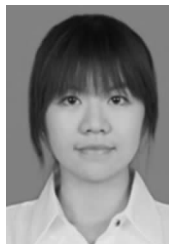
本文主要研究了 AIS 信号二次相位因子的影响因素,推导出在海水温度、海水盐度、电路传播距离和收发天线高度等影响因素的作用下 AIS 信号二次相位因子的变化情况,得出以下结论:水平极化的 AIS 信号,其二次相位因子主要受信号传播距离和收发天线高度的影响,其变化范围是 0.941m ~ 1.573m,而海水温度和盐度对二次相位因子的影响为常数 1.07π ;垂直极化的 AIS 信号,其二次相位因子受海水温度、盐度、传播距离和收发天线高度的影响,其变化范围是 0.042m ~ 0.905m.

由于目前尚未见到 VHF 信号二次相位因子的研究,本文的研究成果对于利用 VHF 信号进行高精度定位测量的研究具有一定的指导意义. 本文研究的二次相位因子仅限于海面传播路径,对于包括陆地、岛屿等复杂的传播路径产生的二次相位因子一般应以实测数据为基础.

参考文献

- [1] 张淑芳,胡青. 一种基于船舶自动识别系统 AIS 的船舶自动定位系统[P]. 中国专利: ZL. 201110133252. H, 2013-07-17.
- [2] 李海奇,马松涛,王仕成. 罗兰-C ASF 修正方法研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2005, 18(4): 46-51.
Li Haiqi, Ma Songtao, Wang Shicheng. Study on rectifying error method to Loran-C ASF[J]. Journal of Qingdao University(Natural Science Edition), 2005, 18(4): 46-51. (in Chinese)
- [3] Durk van Willigen, René Kellenbach, Cees Dekker, Wim van Buuren. eDLoran: The Next-Gen Lora[EB/OL]. <http://gpsworld.com/edloran-the-next-gen-loran.html>, 2014-06-28.
- [4] 黄欣欣,杨东凯,林洪文. Loran-C 系统的 ASF 修正方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(专刊): 144-146.
Huang Xinxin, Yang Dongkai, Lin Hongwen. Methods of ASF correction in Loran-C system[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(special): 144-146. (in Chinese)
- [5] 谢益溪. 无线电波传播-原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [6] ITU-R M. 1371-4 建议书, 在 VHF 水上移动频带内使用时分多址的自动识别系统的技术特性[S].
- [7] 董玫,赵永波,张守宏. 米波段下海面多径模型研究[J]. 电子学报, 2009, 36(6): 1373-1377.
Dong Mei, Zhao Yongbo, Zhang Shouhong. The analysis of the multipath model under the VHF band at sea[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 36(6): 1373-1377. (in Chinese)
- [8] F Daout, A Khenchaf, J Saillard. The effect of salinity and temperature on the electromagnetic field scattered by sea water[A]. OCEANS 94. Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation Proceedings[C]. Brest: IEEE, 1994. 110-115.
- [9] 郭建炎,王剑莹,龙云亮. 基于抛物方程法的粗糙海面电波传播分析[J]. 通信学报, 2009, 30(6): 47-52.
Guo Jianyan, Wang Jianying, Long Yunliang. Analysis of radio propagation over rough sea surface with parabolic equation[J]. Journal on Communications, 2009, 30(6): 47-52. (in Chinese)
- [10] 中国气象局. 风力的等级划分[EB/OL]. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/20120816/2012081601/201208160101/201407/t20140717_252607.html, 2014-07-17.

作者简介



王晓辉(通信作者) 女, 1987 年生于辽宁省. 2010 年获大连海事大学学士学位, 2012 年获大连海事大学硕士学位, 现为大连海事大学博士研究生, 主要研究方向为 AIS 系统的高精度定位方法.

E-mail: xywang1987@dlmu.edu.cn



张淑芳 女, 1955 年 2 月出生于辽宁省大连市, 博士学位, 现为大连海事大学信息科学技术学院教授, 博士生导师. 研究领域主要包括无线电导航、卫星导航和船舶通信导航的理论与技术研究.

E-mail: shfzhang@dlmu.edu.cn