

海战场复杂电磁环境预测方法

郭淑霞¹, 胡占涛¹, 王凤华², 高颖²

- (1. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 陕西 西安 710065;
2. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 海战场复杂电磁环境预测可真实地反映战场电磁环境态势情况, 对指挥员的科学决策具有重要意义。针对海战场电磁环境复杂、受自然及人为因素影响多等特点, 该文综合考虑海战场辐射源模型及电波传播影响因素, 基于电波传播的抛物方程模型, 提出了一种海战场电磁环境预测方法, 基于该预测方法在给定的海战场电磁环境中进行了仿真。仿真结果表明: 预测结果与基于 Longley-Rice 模型的预测结果十分接近, 能够有效地反映海战场特定位置处的电磁环境强度, 该系统可为海战场作战指挥、决策提供指导。

关键词: 电磁环境; 预测; 抛物方程模型; 仿真

中图分类号: TN011 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)08-2431-06

Sea war-field electromagnetic environment forecasting method

Guo Shuxia¹, Hu Zhantao¹, Wang Fenghua², Gao Ying²

- (1. Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China;
2. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: It is all well known that war-field electromagnetic environment forecasting is important and necessary for the electromagnetic environment reflection of modern warfare vividly, which is significant for commanders' science decision. And we all know sea war-field electromagnetic environment that affected by natural and human factors is complex and dynamic. In this article, the prediction technology and the forecasting method of sea war-field electromagnetic environment were mainly discussed. What's more, that the forecasts system for sea war-field electromagnetic environment analysis was proposed based on the parabolic wave propagation model, after combining radiation models and factors which were affected wave propagation. Then, under the given sea battlefield electromagnetic environment a lot of simulation was done. The simulation results is closely to the results based on the model of Longley-Rice, and show that the electromagnetic environment forecasting method can effectively reflect the strength of electromagnetic environment of the specific location in the sea war-field, and provide guidance for commander.

Key words: electromagnetic environment; forecast; parabolic equation model; simulation

收稿日期: 2013-12-14; 修订日期: 2014-01-09

基金项目: 武器装备部预研基金(9140A04020212HK03010); 西北工业大学科技创新基金

作者简介: 郭淑霞(1965-), 女, 副教授, 博士, 主要从事复杂电磁环境模拟、无人机数据链等方面的研究。Email: 564639805@qq.com

0 引言

海战场是现代战场中的一类重要战场,并且海面自然环境^[1]及电磁环境非常复杂,海战场复杂电磁环境条件下,各类武器平台面临着复杂的电磁环境^[2],特别是敌对有意电磁辐射,直接影响武器装备作战效能的正常发挥,甚至失效。为保证海战场复杂电磁环境中各类武器平台作战效能的正常发挥,使指挥员及时、全面、动态地掌握战场电磁环境,以便科学决策、优化调配战场力量,对海战场电磁环境进行准确、定量的预测,变得十分急切。

目前针对场强预测模型的研究主要有两种基本方法:一是在各种典型传播环境中进行发射和接收试验,记录接收信号的各种数据,用计算机对大量数据进行统计分析,寻找出反映传输特性的各种参数的统计特性。再根据数据分析的结果,建立传播信道的统计模型。二是基于无线电磁波传播机理的分析方法,根据反射、绕射、散射等现象直接找出可能的主要传播路线,并计算出路径损耗及其他反映信道特性的参数,忽略次要因素,突出主要因素,建立简化的确定性模型。

由于战场环境的特殊性,决定了对其电磁环境进行预测只能基于确定性模型进行。

抛物方程法^[3](Parabolic Equation, PE)是目前应用广泛的一类确定性模型。该模型通过对电磁波波动方程的近似可以精确地模拟电磁波在复杂环境中的传播过程,不仅可以计算不规则地形特征和不同电磁参数的地(海)表结构对电波传播的影响,还可以同时计算出复杂大气结构对电波传播所产生的折射效应,从而方便地计算传播区域内的场强分布特性。

基于抛物方程法,参考文献[4-7]针对海上电波传播,分别分析了蒸发波导、粗糙海面、湍流环境及不同大气折射率等环境条件下,海上电波的传播损耗及特性,对于海面电磁环境预测有很好的借鉴作用;参考文献[8]利用抛物方程模型,提出了一种基于计算机架构的数字化战场电磁环境构建方法,但研究重点在并行处理算法上,对影响战场电磁环境的因素考虑不够全面。

文中针对复杂的海战场电磁环境,考虑海战场辐射源及电波传播影响环境因素,基于抛物方程法

提出了一种海战场电磁环境预测方法,利用抛物方程模型计算电波传播过程,对多个辐射源在特定战场位置处的电磁场强进行叠加,从而实现对海战场复杂电磁环境的预测。

1 海战场复杂电磁环境

1.1 海战场电磁环境

海战场电磁环境^[9]是指在海洋战场空间中对作战有影响的电磁活动、现象、及其相关条件的总和。海战场电磁环境直接表现为在特定的作战时间和空间内,为完成特定的作战任务,在自然电磁辐射影响的基础上,由各种电子设备产生的电磁辐射和信号密度的总体状态。

对海战场电磁环境进行预测,笔者重点关注各类电磁辐射干扰源在特定地理位置处的电磁强度,因此,文中只关注电磁波的辐射,而不涉及电磁波的传导影响。

1.2 海战场复杂电磁环境的特点

在海战场,众多电子信息装备和系统广泛应用于各种作战平台,交战双方的平台上电磁信号密集,电磁频谱的争夺激烈且贯穿始终,交战空间中不同方位、不同类型、不同功率的辐射源辐射的电磁信号在特定接收位置处叠加,形成密集、多样、时变的电磁信号,再加上繁杂的民用电磁频谱和自然电磁现象,各类电磁信号混杂且相互干扰,使得海战场电磁环境复杂多变,直接影响了作战装备效能的正常发挥。海战场复杂电磁环境是在以特定海域及其周围空域为主要作战区域的战场上形成的复杂电磁环境。

海战场复杂电磁环境的特点主要体现在以下几方面:

(1) 信号方向多重性

海战场空间中,除了常规的海、陆、空各种载体平台电子设备发出的电磁信号外,还有来自太空中各种同步卫星、非同步卫星和飞行器的电磁信号,因此海战场电磁信号在空间上具有立体空间特点。

(2) 信号密度极高

在海湾战争后,军事专家评估海战场电磁信号环境密度已超过 100 万脉冲/s,随着参战兵力增加,信息化装备的广泛运用,战场信号环境密度将可能达到 500 万脉冲/s 以上。

(3) 信号复杂度大幅提升

近年来雷达、通信、电子对抗等设备新体制新技术不断涌现,并已广泛应用到装备中,战场环境信号具有形式多样快速多变,无规律,军用民用信号混杂,信号强度高低参差不齐等多重特点,导致海战场信号复杂度大幅度提升。

(4) 高能武器投入使用加剧电磁环境恶化

微波激光武器及脉冲炸弹等高能武器技术日趋成熟,并将投入作战使用,造成海战场电磁环境的严重恶化,全面而激烈的信息战和电子战造成电磁频谱混杂重叠,敌我双方人为制造的各种欺骗干扰,伪信号等导致真假信号混淆难分,对敌、我、友信号的区分和识别尤其困难。

海战场电磁环境的复杂度等级由 $\sqrt[3]{F_0 T_0 S_0}$ 确定,其中 F_0 为频谱占有度, T_0 为时间占有度, S_0 为空间覆盖率,计算方法分别为:

$$F_0 = \frac{\int_{f_1}^{f_2} U \left[\frac{1}{(f_2 - f_1)} \int_{t_1}^{t_2} S(r, t, f) dt - S_0 \right] df}{(f_2 - f_1)} \quad (1)$$

$$T_0 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} U \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{f_1}^{f_2} S(r, t, f) df - S_0 \right] dt}{(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

$$S_0 = \frac{\int_{\Omega} U \left[\frac{1}{(f_2 - f_1)} \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \int_{f_1}^{f_2} S(r, t, f) df dt - S_0 \right] d\tau}{V_{\Omega}} \quad (3)$$

式中: U 为单位阶跃函数; $S(r, t, f)$ 为功率谱密度; r 为空间位置坐标; V_{Ω} 为作战空间体积; S_0 为电磁环境门限; t 为作战时间。

2 基于 PE 的海战场电磁环境预测方法

海战场环境下,对特定位置处的电磁环境进行预测,除了考虑辐射源的发射功率、发射频率、天线增益、极化特性等辐射源的指标因素外,还需要重点考虑无线电波受传播环境的影响,建立电波的传播模型。此外,由于海战场环境中电磁信号密度密集程度高,在特定位置处的电磁环境强度是多个电磁信号在该位置信号强度的叠加。

2.1 辐射源模型

各类军用电磁辐射源是构成海战场电磁环境复杂的主要因素,这些辐射源主要包括雷达、通信、导航、敌我识别、电子干扰辐射源等。对海战场复杂电磁环境进行预测,首先要分析特定时间段存在于海战场范围内的各类辐射源,并建立辐射源模型。海战

场上不同类型的辐射源模型可以理解为确定性模型电波初始场问题,其初始场可根据天线近/远场变换原理,由各自的天线方向图获得。

天线远场与天线方向图函数之间满足:

$$\psi(x, z) = A(\alpha) e^{jk_A/r} \quad (4)$$

式中: $\psi(x, z)$ 为天线的远场; $A(\alpha)$ 为天线方向图。将无界空间中的初始场分布转换成海表面以上半空间中的场分布^[10],则有:

$$u(0, z) = j e^{j\pi/4} \sqrt{2k/\pi} \cdot$$

$$\int_0^{+\infty} \frac{[A(\alpha) e^{-j\mu H} + R_{\parallel\alpha\perp} A(\alpha) e^{j\mu H}] \sin(pz)}{(k^2 - p^2)} dp \quad (5)$$

式中: H 为天线高度; α 为电波传播仰角; $R_{\parallel\alpha\perp}$ 为天线水平或垂直极化方式时海平面对电波的反射系数。

2.2 电波传播环境影响因素

海上电波传播的特点主要体现在两方面:一是,海水蒸发造成海面上垂直大气折射率的显著变化,进而影响大气对电波的折射方式,即蒸发波导现象;二是,海水表面边界对电波的反射和散射,造成直射波、反射波及散射波的干涉,进而影响电波场强的空间分布。

(1) 大气折射率

海战场低空大气环境中,温、湿度和气压往往会发生急剧变化,从而改变大气中折射率的垂向梯度。各类辐射源的电磁信号传播的过程中,会因为折射发生不同程度的弯曲;当折射率变化剧烈时,点此信号被陷获于一定厚度的大气层内,紧贴海面在波导内向前传播,形成大气波导传播现象。

大气折射率由温度、湿度和压强表示如下:

$$N = 77.6 \left(\frac{p}{T} \right) - 5.6 \left(\frac{e}{T} \right) + 3.75 \left(10^5 \frac{e}{T^2} \right) \quad (6)$$

式中: p 为压强,单位为 mbar; T 为温度,单位为 K; e 为水汽因素反映的温度,单位为 mbar。

若电波传播距离很近,则可以认为地球表面近似为平面,但电波传播距离较远时,需要考虑地球曲率的影响,在这种情况下,为了将地球表面等效近似为平面,引入大气修正折射率:

$$M = N + \frac{z}{r} \times 10^6 = N + 0.175z \quad (7)$$

式中: z 为高度, r 为地球半径。修正大气折射率和波导高度之间的关系为:

$$M(z) = M_0 + 0.125 \left[z - h_0 \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \right] \quad (8)$$

式中： $M_0=330M$ 单位； $z_0=0.000 15 m$ ； h_d 为蒸发波导高度，当蒸发波导高度为 $0 m$ 时，为标准大气情况。图 1 为标准大气条件以及波导高度变化时的大气修正折射率的变化曲线。

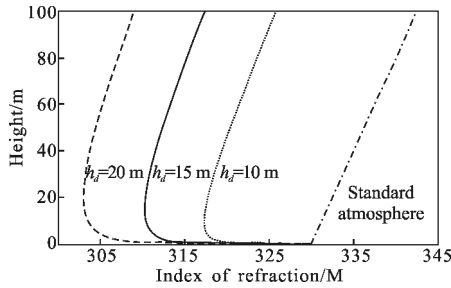


图 1 标准大气及波导高度变化时大气折射率的变化曲线

Fig.1 Refraction index versus height of atmospheric duct

(2) 电波反射

电波在海面上的反射假定为光滑球面对电波的反射。当辐射源及接收点收发天线高度 h_1, h_2 及收发距离 d 确定之后，反射点距离一端的距离为 $d_1(km)$ ，设收发天线的等效高度分别为 h_1', h_2' ，则收发天线等效高度分别可以表示为：

$$h_1' = h_1 - \frac{d_1^2}{2Ka} \tag{9}$$

$$h_2' = h_2 - \frac{d_2^2}{2Ka} \tag{10}$$

式中： K 为等效地球半径系数； a 为地球半径。则在海面环境由于反射引起的反射衰减损耗^[11]为：

$$L_r = 10 \lg \frac{(4\pi d/\lambda)^2}{1 + D - 2D \cos\left(\frac{4\pi h_1' h_2'}{d\lambda}\right)} \tag{11}$$

式中： D 为等效反射系数，当掠射角很小时， $D=1$ 。图 2 为海面环境， $h_1=30 m, h_2=20 m$ ，等效地球半径系数 $K=4/3$ ，电波频率 $f=4 GHz$ 时反射损耗与收发天线间距离的曲线关系。

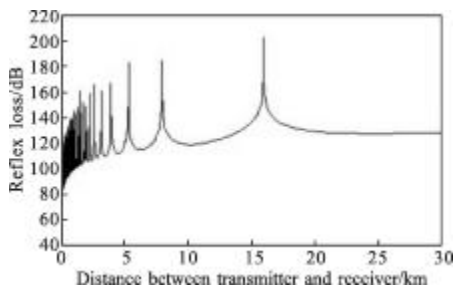


图 2 海上电波传播反射损耗与传播距离曲线

Fig.2 Reflex loss versus propagation range

2.3 抛物方程法电波传播模型

假设电磁场时谐因子为 e^{-ikx} ，传播介质为无源，由电场和磁场的 Maxwell 旋度方程合并得到二维标量波动方程^[8]：

$$\frac{\partial^2 \varphi(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, z)}{\partial z^2} + k^2 m^2 \varphi(x, z) = 0 \tag{12}$$

式中：标量 φ 表示电磁场分量； $k=2\pi f/c$ 为真空中传播常数； f 为电波频率； c 为真空中光速； $m=n+z/a$ 为修正大气折射指数； n 为折射指数； a 为地球半径。

设电磁波的主要能量在沿 x 轴正方向的锥形区域内传播，定义传播衰减函数为：

$$u(x, z) = e^{-ikx} \varphi(x, z) \tag{13}$$

定义伪微分算子 $Q = \sqrt{k^2 \partial_z^2 + m^2}$ ，海战场环境中，仅考虑电波前向传播情况，波动方程化简为：

$$\frac{\partial u(x, z)}{\partial x} = -ik(1-Q)u(x, z) \tag{14}$$

用 Taylor 近似法对伪微分算子作近似处理，并带入公式(14)，可得：

$$\frac{\partial^2 u(x, z)}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial u(x, z)}{\partial x} + k^2(m^2 - 1)u(x, z) = 0 \tag{15}$$

公式(15)称为标准抛物方程(Standard Parabolic Equation, SPE)。

公式(15)可利用分步傅里叶法(Split-step Fourier Transform, SSFT)进行求解，SSFT 算法定义傅里叶变换对如下：

$$\begin{cases} \bar{u}(x, p) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x, z) e^{-ipz} dz \\ u(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{u}(x, p) e^{ipz} dp \end{cases} \tag{16}$$

利用傅里叶变换的微分性质，可得：

$$\bar{u}(x + \Delta x) = e^{i\left(\frac{k}{2}\right)(m^2 - 1)\Delta x} e^{-\left(\frac{i}{2k}\right)p^2 \Delta x} \bar{u} \tag{17}$$

上式两个指数项分别表示电波传播折射项与绕射项，对其做傅里叶逆变换，可得：

$$u(x + \Delta x, z) = e^{\frac{ik(m^2 - 1)\Delta x}{2}} F^{-1} \left[e^{-\frac{ip^2 \Delta x}{2k}} F(u(x, z)) \right] \tag{18}$$

式中： F, F^{-1} 分别表示傅里叶变换及逆变换； $p = k \sin \theta$ 为 z 的变换量， θ 为每一步进 $x + \Delta x$ 的传播仰角； $u(x, z)$ 为利用格林函数法计算的初始场分布； $\bar{u}(x, p) = F(u(x, z))$ 。电波初始场通过天线方向图函数计算获得，利用公式(18)则可以步进迭代出各距离和高度的电波场强大小。

根据抛物方程法模型计算海战场电波传播损耗既要考虑初始和边界条件,又要确定辐射源的天线方向图函数。在空间直角坐标系中,通过位置点 (x, y, z) 来确定传播因子 $F(x, z)$, 传播因子反映了海表面反射、大气折射、散射等因素对电波传播的影响,传播因子表示为:

$$F(x, z) = |u(x, z)| \sqrt{x} \quad (19)$$

利用初始场条件(13)确定的海战场空间某位置处的电磁强度,通过前向递推计算出空间各点的场量 $u(x, z)$,则可利用上式计算各点的传播因子 $F(x, z)$,利用传播损耗公式计算海战场电磁环境中空间各点的单程传播损耗可以表示为^[12]:

$$L_b = L_f - 20 \lg F \quad (20)$$

式中: L_f 为自由空间路径损耗。

由公式(13)确定海战场特定位置处的电磁环境强度后,对于特定时刻和空间范围内 (x, y, z, t) ,假定存在 L 个辐射源,则该位置处的电磁环境强度大小可以综合表示为:

$$E_{(x, y, z, t)} = \sum_{n=1}^L u_n(x, y, z, t) \quad (21)$$

式中: $u_n(x, y, z, t)$ 表示第 n 个辐射源在时刻 t , 特定战场空间位置 (x, y, z) 处的电场强度。

3 海战场复杂电磁环境预测仿真

基于上述的抛物方程电磁环境预测方法,对海战场电磁环境进行预测。设置海战场电磁环境仿真参数如下,辐射源发射功率为 100 dBm;发射增益为 20 dBi;频率为 1 200 MHz;天线高度为 25 m;天线类型:高斯天线;极化方式:水平极化;天线仰角为 15° ;介电常数为 70;电导率为 5 S/m;最大传播距离为 200 km;距离步长为 1 000 m。

图 3 给出了在仿真条件下,电磁信号传播水平

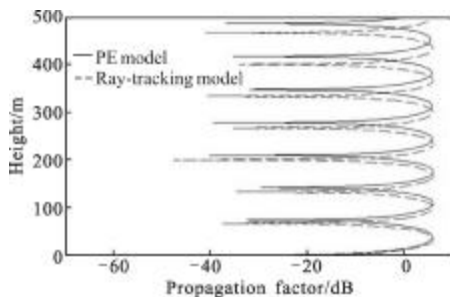


图 3 PE 模型与射线追踪模型的对比

Fig.3 Comparison between PE model and Ray-tracking model

距离为 10 km 时,基于 PE 方程和几何射线追踪模型的电磁信号衰减特性的仿真结果。由仿真结果可见,两种模型的传播因子吻合的比较好,说明了基于 PE 模型的准确性。

图 4 给出了在仿真条件下,电磁信号传播水平距离分别为 10 km、50 km、100 km 和 150 km 时,电磁信号在垂直方向上的衰减特性。

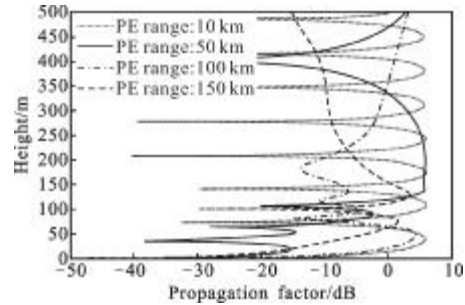


图 4 基于 PE 模型的电磁信号衰减特性

Fig.4 Propagation factor versus range

图 5 给出了在仿真条件下,电磁信号传播随水平距离及高度变化时的传播损耗。彩图中,图的下方的色带显示了不同衰减值所对应的颜色。从图中可知,电波传播损耗随距离增大而增加。

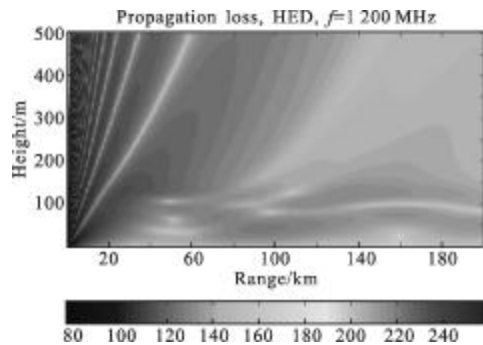


图 5 水平极化条件下不同距离、高度下的电磁信号传播损耗

Fig.5 Propagation loss versus range and height

图 6 给出了在仿真条件下,辐射源电磁信号场

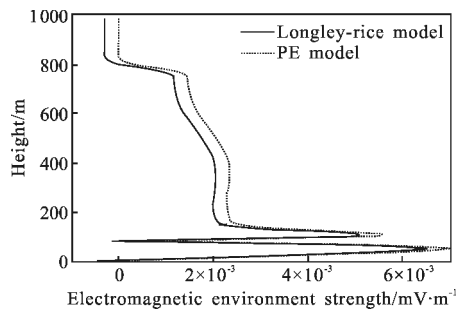


图 6 预测模型与基于 Longley-Rice 模型场强计算对比

Fig.6 Result comparison between PE model and Longley-Rice model

强在基于抛物方程的预测模型以及基于 Longley-Rice^[5]预测模型的对比结果。

由仿真结果可见, 预测结果与 Longley-Rice 模型预测结果十分接近, 能够较好地反映了战场环境的电磁环境强度。在计算单一辐射源在特定位置处的电磁强度后, 综合多个辐射源在该位置处的电磁强度, 即可确定该处的电磁环境。

4 结 论

文中在介绍海战场复杂电磁环境特点的基础上, 结合辐射源模型、电波传播环境影响因素, 基于抛物方程法, 提出了海战场复杂电磁环境预测方法, 利用抛物方程模型计算电波传播过程, 实现对海战场特定地理位置处的电磁环境强度的预测。与 Longley-Rice 模型预测结果的对比表明, 该预测方法结合了辐射源、环境等因素的影响, 能较好地实现对海战场复杂电磁环境的预测, 为战场指挥人员迅速进行部署提供依据。

参 考 文 献:

- [1] Wu Hanping. Study on environment engineering reliability technology for complex optoelectronic system used for warship [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1997, 26(6): 34-39. (in Chinese)
吴晗平. 舰用复杂光电系统可靠性的环境工程技术研究[J]. *红外与激光工程*, 1997, 26(6): 34-39.
- [2] Xing Suxia, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Design of electromagnetic shielding for photoelectric reconnaissance platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2045-2049. (in Chinese)
邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 光电侦察平台电磁屏蔽设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2045-2049.
- [3] Wu Yingnian, Zhang Lin, Zhang Lifang, et al. Survey on electromagnetic environment simulation and visualization [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 20(21): 6332-6338. (in Chinese)
吴迎年, 张霖, 张利芳, 等. 电磁环境仿真与可视化研究综述[J]. *系统仿真学报*, 2009, 20(21): 6332-6338.
- [4] Guo Jianyan, Wang Jianying, Long Yunliang. Analysis of radio propagation over rough sea surface with parabolic equation[J]. *Journal on Communication*, 2009, 30(6): 47-52. (in Chinese)
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.
- [5] Huang Linshu, Cha Hao, Li Hongke, et al. Ducting propagation and near-grazing incident scattering on rough sea surface [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(3): 482-486. (in Chinese)
黄麟舒, 蔡豪, 李洪科, 等. 粗糙海面蒸发波导传播和近掠入射散射分析[J]. *电波科学学报*, 2012, 27(3): 482-486.
- [6] Wang Zuliang, Fan Wensheng, Zheng Linhua. Study and simulation on sea-surface propagation prediction model [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(6): 1095-1099. (in Chinese)
王祖良, 樊文生, 郑林华. 海面电波传播损耗模型研究与仿真[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(6): 1095-1099.
- [7] Shao Xuan, Chu Xiaoliang, Wang Jian. Application of two dimensionnal atmosphere model for oversea propagation of electromagnetic waves [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(9): 110-113. (in Chinese)
邵轩, 楚晓亮, 王剑. 二维大气模型在海上电波传播中的应用[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(9): 110-113.
- [8] Lai Jiazhe, Fang Guangyou, Liu Shuai. Research on constructing war-field electromagnetic environment using parabolic equation[J]. *Journal of Radars*, 2012, 3(1): 63-68. (in Chinese)
来嘉哲, 方广有, 刘帅. 战场电磁环境构建中的抛物方程应用研究[J]. *雷达学报*, 2012, 3(1): 63-68.
- [9] Shao Guopei, Liu Yaqi, He Jun, et al. Quantitative description and complexity evaluation of battlefield electromagnetic environment [J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2007, 21(4): 17-20. (in Chinese)
邵国培, 刘雅奇, 何俊, 等. 战场电磁环境的定量描述与模拟构建及复杂性评估 [J]. *军事运筹与系统工程*, 2007, 21(4): 17-20.
- [10] Hu Huibin. Method for forecasting the characteristic of radio propagation in complex environment [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 23-28. (in Chinese)
胡绘斌. 预测复杂环境下电波传播特性的算法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006: 23-28.
- [11] Donohue Denis J, Kuttler J R. Propagation modeling over terrain using the parabolic wave equation [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(2): 260-277.
- [12] Craig K H, Levy M F. Parabolic equation modeling in the effects of multipath and ducting on radar systems [J]. *IEEE Proceedings*, 1991, 138(2): 53-162.