

文章编号: 1673-1522 (2012) 05-0545-04

粗糙衰减因子在电磁波 蒸发波导传播中的应用

芮国胜, 郭彦, 田文飏

(海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了研究电磁波在蒸发波导中的传播问题, 结合我国海域蒸发波导实际情况, 推算出其最大陷获角, 仿真分析了 Miller-Brown 粗糙衰减因子随风速和电磁波传播方向与海面夹角的变化关系。运用射线描述法进行仿真实验, 结果表明: 只要已知蒸发波导高度, 就可得到海面粗糙衰减因子与风速的直接关系。采用高斯拟合模型, 给出粗糙衰减因子的简化表达式, 解决了模型中 Bessel 函数展开形式复杂、求解困难的问题, 有利于快速获得海面粗糙状况, 对分析粗糙海面对电磁波传输衰减影响有借鉴意义。

关键词: 粗糙衰减因子; 蒸发波导; 最大陷获角; 射线描述; 高斯拟合

中图分类号: TN011.4

文献标志码: A

蒸发波导是一种特殊的表面波导, 在我国东海和南海各海区是多发区, 年出现概率为 85%, 且不同季节变化不明显^[1-3]。电磁波可以被陷获在蒸发波导内, 改变其传播轨迹实现超视距传播。这种反常传播现象容易对海上和海岸运作的微波雷达、通信和侦测等无线系统造成影响, 已经引起中外学者的研究重视^[4-5]。海面粗糙程度是引起电磁波传输衰减损耗的因素之一^[6], 相关学者对 Miller-Brown 近似模型进行了数值评估^[7], 并结合粗糙海面的阴影效应分析了其对电磁波传播损耗的影响^[8-9]。这些研究主要侧重于应用影响评估, 对于模型中 Bessel 函数的物理描述困难、级数展开形式复杂、需用数值模拟方法求解等问题, 并未提出相关处理方案。本文结合我国实际海况数据, 计算出蒸发波导最大陷获角, 仿真分析了 Miller-Brown 近似模型中粗糙衰减因子与海面风速和电波传播方向与海面夹角的关系。并通过射线描述法仿真实验, 得出蒸发波导高度确定时海面风速与粗糙衰减因子具有直接关系的结论。在假定条件下, 运用高斯模型拟合得出 Miller-Brown 模型的简化形式。高斯函数为初等函数, 具有良好的统计分析特性, 求解简单快速, 该简化形式对快速掌握海面粗糙情况、分析进行其对

电波传播衰减的影响有参考借鉴价值。

1 陷获角与粗糙衰减因子

大气波导的陷获角 θ_c 是指在一定大气参数条件下, 电磁波能够被大气波导捕获形成大气波导陷获传播的最大仰角。其表达式为^[10]

$$\theta_c = \sqrt{2 \left(\frac{\Delta N}{n_T dh} \times 10^{-6} - \frac{1}{r_e + h_T} \right) dh} \quad (1)$$

式(1)中: n_T 、 r_e 和 h_T 分别为天线位置处的折射率、地球半径和天线高度; dh 为波导层厚度; ΔN 为波导层的折射率变化量。 θ_c 可以由波导强度 $|M_d|$ 近似表示

$$\theta_c \approx \sqrt{2 \times |M_d|} \times 10^{-3} \quad (2)$$

利用 1982 ~ 1999 年 18 a 的海洋观测资料进行统计分析, 参照世界气象组织 WMO 的海域划分方法, 得出各海区蒸发波导强度一般在 35 M 左右^[11], 由此计算出最大陷获角 $\theta_{c \max} \approx 0.506^\circ$ 。

根据 Miller-Brown 粗糙表面近似模型, 可得到粗糙衰减因子表达式^[12]:

$$\rho = \exp \left[-\frac{1}{2} (2kh \sin \gamma)^2 \right] I_0 \left[\frac{1}{2} (2kh \sin \gamma)^2 \right] \quad (3)$$

收稿日期: 2012-04-07; 修回日期: 2012-07-18

基金项目: “泰山学者”建设工程专项经费资助项目

作者简介: 芮国胜 (1968-), 男, 教授, 博导, 博士。

式(3)中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为自由空间波数; I_0 为第一类修正 0 阶 Bessel 函数; h 为海面均方根高度偏差, 它与风速 f 的关系为 $h = 0.0051f^2$; γ 为电波传播方向与水平面的夹角。

2 射线描述法

射线描述法是分析模拟电磁波在大气波导中传播路径的常用方法, 是基于几何光学理论根据球面分层大气中的 Snell 定律^[2]推导得出。海拔高度分别为 h_1 和 h_2 处的修正折射指数 m_1 和 m_2 以及水平仰角 θ_1 和 θ_2 满足下式:

$$m_1 \cos \theta_1 = m_2 \cos \theta_2. \quad (4)$$

运用二阶泰勒级数展开并近似, 得

$$m_1 - m_2 = \Delta m \approx \frac{\theta_2^2 - \theta_1^2}{2}, \quad (5)$$

即

$$\theta_2 = \sqrt{\theta_1^2 + 2\Delta m}. \quad (6)$$

假设大气修正折射指数在 h_1 和 h_2 处是随高度呈线性变化的, 且变化率为 g , 那么,

$$m_2 - m_1 = g(h_2 - h_1), \quad (7)$$

则由式(5)可得:

$$h_2 = h_1 + \frac{\theta_2^2 - \theta_1^2}{2g}. \quad (8)$$

将式(8)写成微分形式 $dh = \theta \frac{d\theta}{g}$, 地面水平距离增量 dx 与高度增量 dh 的关系为 $\frac{dh}{dx} = \tan \theta \approx \theta$, 则

$$dx = \frac{d\theta}{g}, \quad (9)$$

即

$$x_2 = x_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{g}. \quad (10)$$

则式(6)、(8)、(10)为低仰角射线描述方程。其射线轨迹示意图如图 1 所示。

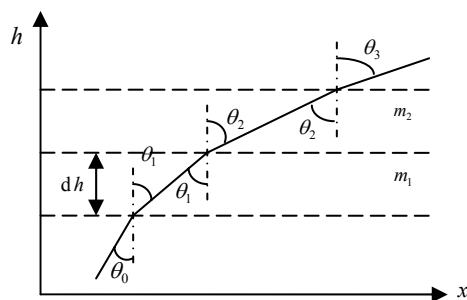


图 1 射线轨迹示意图

3 仿真分析

通过 matlab 仿真, 分析风速和电磁波传播方向与海平面夹角对粗糙衰减因子的影响。本例中, 选取实际应用的 GPS 信号 L1 波段。从图 2 中可以看出: 在海表面处, 粗糙衰减因子随风速的增大而减小, 在风速一定的情况下, 电磁波传播方向与海平面夹角越大, 减小得越快; 且粗糙衰减因子随电磁波传播方向与海平面夹角的增大而减小, 在夹角一定的情况下, 风速越大减小得越快。

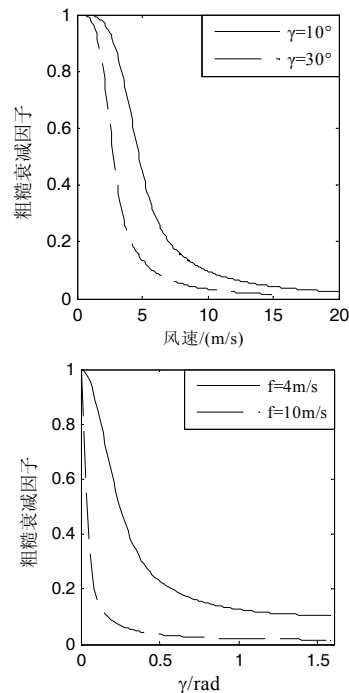


图 2 风速和电磁波传播方向与海平面夹角 γ 对粗糙衰减因子的影响

由于我国西沙海域夏季蒸发波导的平均高度在 20~25 m 左右^[13]。为此, 设定蒸发波导高度为 25 m, 接收天线高度为 5 m, 运用射线描述法, 仿真分析 GPS 信号在蒸发波导中的电波传播路径。

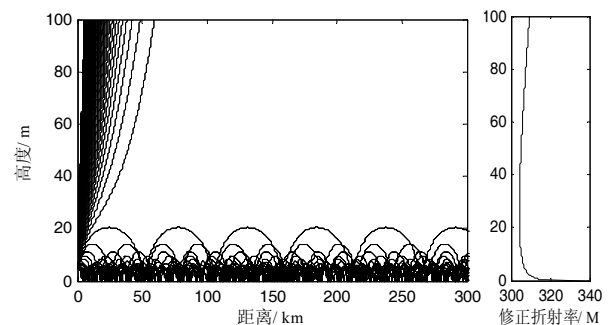


图 3 蒸发波导修正折射率剖面下的射线追踪

仿真实验表明:当蒸发波导高度为 25 m, 天线高度在 5~20 m 变化时, 海面处电波传播方向与海平面的夹角 γ 在 $89.51^\circ \sim 89.53^\circ$ 范围内变化。此时, 可以得到海平面处风速对粗糙衰减因子的影响曲线如图 4 所示。

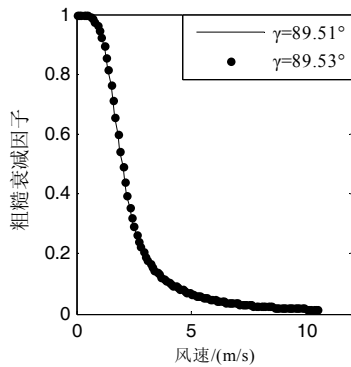


图 4 风速对粗糙衰减因子的影响

从图 4 可以看出, 当角度变化范围很小时, 海面风速对粗糙衰减因子的影响几乎不变。由此可知: 在我国海域范围内, 只要已知蒸发波导高度, 就可得到海面粗糙衰减因子与风速的直接关系。有利于快速获得海面粗糙状况, 对分析电波的粗糙海面衰减有直接意义。

4 模型简化

第一类 α 阶 Bessel 函数 $J_\alpha(x)$ 是 Bessel 方程当 α 为整数或 α 非负时的解, 须满足在 $x=0$ 时有限, 可定义为:

$$J_\alpha(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m+\alpha+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m+\alpha}, \quad (11)$$

式中, $\Gamma(z)$ 为 Γ 函数, 可视作阶乘函数向非整型自变量的推广。

Bessel 函数当变量 x 为复数时同样成立, 当 x 为纯虚数时能得到第一类修正 Bessel 函数:

$$I_\alpha(x) = i^{-\alpha} J_\alpha(ix). \quad (12)$$

从上述公式中可以看出, Bessel 函数的级数展开形式复杂, 特别是复宗 Bessel 函数, 往往要用数值模拟方法求解。为了简便实验研究过程, 有必要在一定条件下对 Miller-Brown 近似模型中这一复杂函数进行适当改进。为此, 基于上文得到的结论, 结合我国南海海域实际数据, 进而对式(3)进行简化分析。

高斯函数属于初等函数, 在统计学、光学、微波系统等学科领域都有广泛的应用, 具有良好的数

学分析特性, 计算方便快捷。为此, 选取高斯模型为目标函数并按如下步骤进行拟合:

1) 将目标函数写成高斯函数系形式:

$$G(f) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \exp\left[-\left(\frac{f-B_i}{C_i}\right)^2\right], \text{ 并明确未知参数}$$

A_i 、 B_i 、 C_i ;

2) 运用最小二乘逼近法寻找最佳拟合曲线^[14];

3) 综合考虑拟合精度及函数复杂度, 最终确定拟合函数。

由此得到拟合函数表达式为:

$$G(f) = 5.2 \cdot \exp\left[-\left(\frac{f+7.85}{5.7}\right)^2\right] + 0.44 \cdot \exp\left[-\left(\frac{f-1.0}{1.1}\right)^2\right] + 0.036 \cdot \exp\left[-\left(\frac{f-2.9}{8.2}\right)^2\right]. \quad (13)$$

从图 5 可以看出, 拟合后的曲线与理论曲线有良好的-致性。通过运算时间统计可以看出, 简化后的模型在运算速度上相对于原模型提高了一个数量级, 有效验证了该模型的计算简便特性。

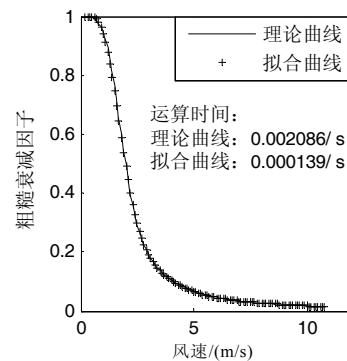


图 5 高斯拟合曲线

5 结论

本文结合我国海洋蒸发波导实际数据, 推算出其最大陷获角, 对影响粗糙衰减因子的变量关系进行了仿真分析。利用射线描迹法, 在假定蒸发波导高度的情况下, 得出粗糙衰减因子与海面风速的直接关系, 并针对 Miller-Brown 近似模型中 Bessel 函数求解复杂的问题运用高斯拟合模型对其进行了简化。该简化模型可分析性好, 求解速度快、物理实现简便, 有助于快速获得粗糙海面衰减因子数据, 对研究分析粗糙海面对电磁波的衰减影响具有重要

的参考价值。但本文的仿真分析还只局限于理论研究, 下一步的主要工作是进行海上实地试验, 利用实测数据来验证仿真结果并完善相关结论。

参考文献:

- [1] 王喆, 王振会, 张玉生. 利用 WRF 模式对海上蒸发波导的数值模拟研究[J]. 海洋技术, 2010,29(3):93-97.
- [2] 王波. 基于雷达杂波和 GNSS 的大气波导反演方法与实验[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009:14-16.
- [3] 成印河. 海上低空大气波导的遥感反演及数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009:12-14.
- [4] CAGLAR YARDIM. Statistical estimation and tracking of refractivity from radar clutter[D]. San Diego: University of California, 2007:2-8.
- [5] 刘成国. 蒸发波导环境特性和传播特征及其应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003:14-18.
- [6] 饶亲江, 龚中麟. 粗糙海面对高频雷达地波空间场分量传播损耗的影响[J]. 电子科学学刊, 2000,22(2): 341-345
- [7] DAVID E FREUND, NANCY E WOODS, HWA-CHING KU, et al. Forward radar propagation over a rough sea surface: a numerical assessment of the Miller-brown approximation using a horizontally polarized 3GHz line source[J]. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, 2006,54(4):1292-1304.
- [8] 潘越, 杨坤德, 马远良. 粗糙海面对微波蒸发波导超视距传播影响研究[J]. 计算机仿真, 2008,25(5): 324-328.
- [9] 刘勇, 周新力, 金慧琴, 等. 粗糙海面对电波传播的影响研究[J]. 电磁场与微波, 2012,42(3):38-46.
- [10] 刘成国, 潘中伟. 中国低空大气波导的极限频率和穿透角[J]. 通信学报, 1998,19(10):90-95.
- [11] 蔺发军, 刘成国, 成思, 等. 海上大气波导的统计分析[J]. 电波科学学报, 2005,20(1):64-68.
- [12] MILLER A R, BROWN R M, VEGH E. New derivation for the rough surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations[C]// IEEE Proc.. 1984:131, 114-116.
- [13] 姚展予, 赵伯林, 李万彪, 等. 大气波导特征分析及其对电磁波传播的影响[J]. 气象学报, 2009,58(5): 605-616.
- [14] 陈明逵, 凌永祥. 计算方法教程: 工程类[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992:107-118.

Roughness Attenuation Factor in the Use of Electromagnetic Wave Propagation in Evaporation Duct Environment

RUI Guo-sheng, GUO Yan, TIAN Wen-biao

(Department of Electronic and Information Engineering, NAAU, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: In order to study the electromagnetic wave in the evaporation duct propagation better, the maximum trapped angle for electromagnetic wave was derived in this paper, combined with the actual situation of China Sea area. The influence of Miller-Brown roughness attenuation factor of wind speed and the angle between electromagnetic wave propagation direction and the sea surface, and the change relations between them were analyzed by simulation. Using ray tracing method for simulation experiment and the results showed that wind speed had direct relationship with roughness attenuation factor since the height of the evaporation duct was certain. Then the gauss fitting was used to simplify the result. The simplified expression solves the problems of Bessel function expansion form complex and solving difficult. It helps us to get the rough sea condition quickly and the further researchers can draw lessons from it.

Key words: roughness attenuation factor; evaporation duct; maximum trapped angle; ray tracing; gauss fitting