

大气波导中多径信道的参数研究

赵小龙^{1,2}, 黄际英¹

(1. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071;

2. 天水师范学院 物信学院, 甘肃 天水 741001)

摘要: 针对海上大气波导环境中电磁波的多径传播特性, 基于容量有限的 Markov 生灭过程得到了大气波导中到达接收站的射线径数. 根据差分时延试验数据的近似瑞利分布提出了大气波导中的三参数模型, 基于最小方差准则确定了模型参数. 利用 MUSIC 算法对多径到达角进行最佳估计, 数值仿真结果表明 MUSIC 算法极大地提高了到达角位置处的信噪比.

关键词: 大气波导; 多径信道; 径数; 差分时延; 到达角

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2008)02-0314-05

Research on multi-path channel parameters in the marine atmospheric duct

ZHAO Xiao-long^{1,2}, HUANG Ji-ying¹

(1. School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. Tianshui Normal Univ., Tianshui 741001, China)

Abstract: Based on the characteristics of EM multi-path propagation in the marine atmospheric duct and the Markov birth-and-death process in finite space, the path number in the marine atmospheric duct is presented. The excess delay three-parameter model is proposed according to the experimental data with approximate Rayleigh distribution, and the model parameters are determined by the minimum variance criteria. The angles of arrival (AOA) is estimated by the MUSIC algorithm and simulation results show that the MUSIC algorithm can significantly increase the SNR at the AOA. Finally, the multi-eigenpath channel model is proposed for contributing to the system design and performance optimization of the marine microwave communication system.

Key Words: atmospheric duct; multi-path channel; path numbers; excess delay; angles of arrival (AOA)

大气波导是海上频繁出现的一种大气异常结构,它能够陷获电磁波使之传播到视距以外很远的地方. 由于在海上恶劣电磁环境下作战通信系统要求具有较强的生存能力,各国都已积极开展了相关的理论研究和测试^[1,2]. Akbarpour^[3]在加拿大安大略湖上利用16.65 GHz电波对50 km波导环境中通信信号到达角及谱分布进行了测试,结果表明:大气波导环境中微波天线对接收信号的角分布具有明显的双峰或多峰结构,多径信道特征明显. Vilar^[4]在英吉利海峡155 km通信链路上对11.6 GHz通信信号的差分时延幅度及概率分布、频谱分布、多普勒效应等信道特性进行了测试,结果表明:信道频率选择性特征显著;时延分布范围较大,最小时延与利用射线描述算法在波导环境中的计算结果一致. 我国科研人员近年来也对蒸发波导预测、环境特性及传播问题进行了研究,但对波导环境信道特性的研究尚无文献报道^[5~7]. 笔者通过对电波射线径数、差分时延、射线到达角等参数的分析,提出了多特征路径通信信道仿真模型.

收稿日期:2007-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助(60741003);电波环境特性及模化技术重点实验室资助(51486030104DZ0101)

作者简介:赵小龙(1976-),男,西安电子科技大学博士研究生,E-mail: xlzhao76@163.com.

1 蒸发波导环境中的多径传播

通信环境的变化是影响通信系统性能的一个重要因素. 通常, 通信中的一些问题都是基于标准大气条件进行处理的, 但在大气波导环境中却不能简单地用同样的方法处理. 在蒸发波导环境中的电波传播较常用的方法是几何光学理论中的射线描迹技术和基于赫姆霍兹方程的傅里叶分步算法. 射线描迹技术能快速地计算波导环境中的电波传播路径及覆盖范围, 但对传播损耗、粗糙地形、折射指数水平不均匀分布等情况不能很好地处理. 通过 Helmholtz 方程近似得到的抛物型方程可以很好地解决非均匀大气环境下电磁波的传播问题, 并具有很好的稳定性, 适用于蒸发波导环境下近水平小仰角的电波传播分析^[8]. 图 1 和图 2 是利用傅里叶分步算法得到的 10 GHz 电波在标准大气、蒸发波导环境中的传播路径图^[7]. 由图 2 可以看出, 波导环境中的电波传播具有显著的多径特征.

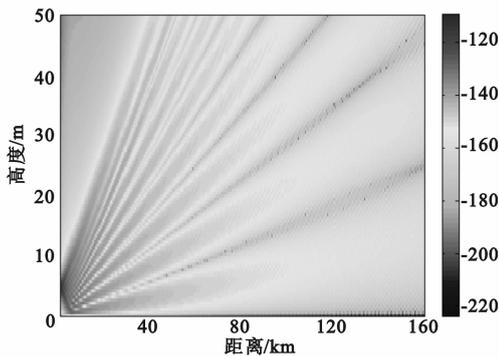


图 1 标准大气中的电波传播
(天线高度 5 m, 仰角 0.35°)

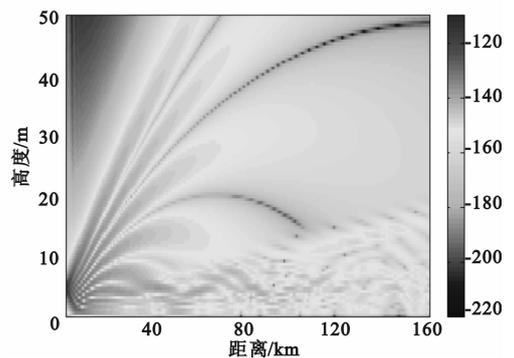


图 2 大气波导环境中的多径传播
(波导高度 30 m, 天线高度 5 m, 仰角 0.35°)

2 信道参数分析

海上微波通信中, 由于波导结构的折射、粗糙海面的散射及大气的散射等因素, 从发射站到接收站的电波射线通常有多条. 这些经历了不同程度衰减、延迟的电波相互干涉导致了接收信号的多径衰落, 严重影响通信系统的性能.

蒸发波导环境中的多径信道可以用复基带脉冲响应的线性滤波器来描述^[9]:

$$h(t) = \sum_{k=0}^N a_k \delta(t - \tau_k) \exp(-j\phi_k) F(\theta_k) \quad , \quad N \rightarrow \infty \quad , \quad (1)$$

其中 N 是到达接收天线的射线径数, a_k 是射线强度, τ_k 是时延, ϕ_k 是相移, θ_k 是信号的到达角, $F(\cdot)$ 是接收天线方向图. 实际上, 多径参数 $\{N, a_k, \tau_k, \theta_k, \phi_k\}$ 都是随时间、空间随机变化的, 但它们的变化率远小于发射信号的变化.

2.1 电磁波射线径数

通常无线通信信道都是以 Rayleigh 信道和 Rice 信道为基本模型, 并认为径数无限. 事实上对于任何通信区域或环境特征, 接收站在任何地方收到的电波径数总是有限的. 基于一个有限容量的状态空间, Markov 生灭过程能够更好地描述多径信道的径数变化^[10].

若接收站在初始位置接收到的电波路径数目为 N , 则位移 u 后接收到 M 条路径的概率 $p_{NM}(u)$ 为

$$p_{NM}(u) = \begin{cases} a(N_T - N)u + 0(u) \quad , & M = N + 1 \quad , \\ b(N - m)u + 0(u) \quad , & M = N - 1 \quad , \\ 1 - a(N_T - N)u - b(N - m)u + 0(u) \quad , & M = N \quad , \\ 0(u) \quad , & |M - N| > 1 \quad , \end{cases} \quad (2)$$

其中 a, b 分别是电波路径的出现率和消失率; N_T 是径数状态空间的最大值; m 为最小电波路径数目, $m \leq$

$N \leq N_T$; 位移 u 是以 a, b 为参数、具有指数概率分布的随机变量. 由全概率公式^[11], 在任意位置接收到 M 条路径的概率均可通过前一位置收到 N 条路径的概率和式(2)的条件概率得到, 其矩阵表达式为

$$P(M) = P(N)\Pi(M | N) \quad (3)$$

其中 $\Pi(M | N) = (p_{NM}(u))_{N_T \times N_T}$ 是状态转移矩阵. 由于 Markov 过程对通信环境的区域特征无特殊要求, 通过大气波导环境中通信传播实验确定各参数后, 即可仿真海上多径信道电波径数的随机动态变化.

2.2 差分时延

海上多径信道中各电波射线路径间的差分时延是造成信道时间选择性衰落和频率选择性衰落的根本原因. 差分时延决定了系统的相干带宽和信息传输速率, 还导致码间干扰, 增大了通信系统的误码率. 若接收站在某一位置接收到 N 条路径, 每条路径经发射站到达接收站的射线长度分别为 L_1, L_2, \dots, L_N , 每条路径分别具有时延 t_1, t_2, \dots, t_N , 即 $t_n = L_n/c$, c 是光速, 则各条电波路径间的差分时延可定义为

$$\tau_n = (L_n - L_{\min})/c = t_n - t_{\min} \quad (4)$$

其中 L_{\min} 是最小路径长度, t_{\min} 是最小时延. 接收站位移变化 u 时接收到的电波路径数目 N 和 t_n, t_{\min} 都是随机变化的.

目前通信工程中应用最广泛的差分时延分布模型为指数模型, 但该模型与测量结果相差较大. 针对多种环境下的测量结果, 高式昌^[12]对差分时延指数模型进行了修正. 但以上两个模型仅适用于陆地移动通信环境. 海上波导通信环境中的测试试验表明, 微波超视距通信由于受到对流层散射通信的影响, 差分时延近似为瑞利分布^[4]. 笔者结合波导环境中通信测量试验的结果^[4], 提出下面的三参数差分时延模型:

$$p(\tau) = \exp(-(\tau - a)/T)^2 / (b(1 - \exp(-\tau_m/T))) \quad (5)$$

其中 τ_m 是最大差分时延值, $a, b, T > 0$, 通过对具体通信环境的传播测量, 利用最小方差准则即可确定模型中的参数. 利用式(5)可确定大气波导环境中多径传播的时延扩展及平均时延, 而利用蒙特卡罗方法可产生满足式(5)的差分时延随机变量.

2.3 到达角(AOA)

由于接收天线方向图的约束, 多径信号的到达角决定了天线真正接收到信号的路径数目. 对于波导环境中采用大气分层模型的情况, 利用几何光学理论中的射线描述技术可近似得到接收站位置处的到达角. 而基于抛物型方程的傅里叶分步算法, 针对具体发射天线、波导环境特征可得到全空间的场分布, 根据天线孔径位置处的场分布可计算到达角的分布.

在多径传播情形下, 天线高度 z 处的接收信号(如图3)可表示为 N 个垂直平面波的线性组合^[13]:

$$r(z) = \sum_{i=1}^N A_i \exp(j[(2\pi z/\lambda) \sin \theta_i - \delta_i]) + n(z) \quad (6)$$

其中 λ 是波长, A_i, θ_i 分别是垂直平面内第 i 条射线的幅度和到达角(AOA), δ_i 是在 $z = 0$ 的相位延迟, $n(\cdot)$ 是高斯白噪声. 利用波束成形方法(FFT)、功率谱估计、最大熵估计、MUSIC 算法等方法, 均可根据天线孔径场分布实现对到达角的估计^[14]. MUSIC 算法是近年来被广泛重视的一种高分辨率算法, 能够对多径信道中信号到达角、信号源数目进行最佳估计, 笔者将利用该方法对到达角进行数值估计.

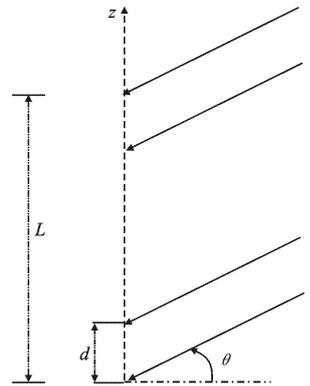


图3 均匀线性天线阵示意图

3 数值计算

若多径信道中电波路径的出现率和消失率分别为 $a = 0.3$ 和 $b = 0.15$, 状态容量 $N_T = 15$, 接收站在初始位置接收到的径数 $N_0 = 6$, 则利用蒙特卡罗方法模拟多径环境中到达接收站的路径数目与接收站位移量 u 随机动态变化的过程见图4.

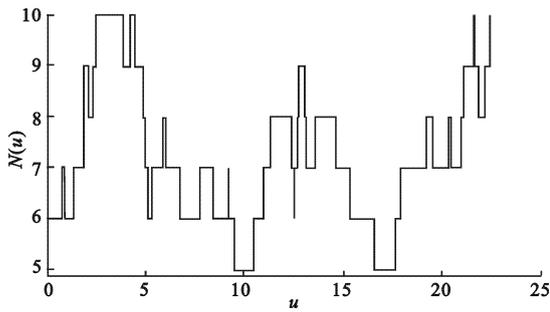


图 4 多径信道中电波径数的动态变化

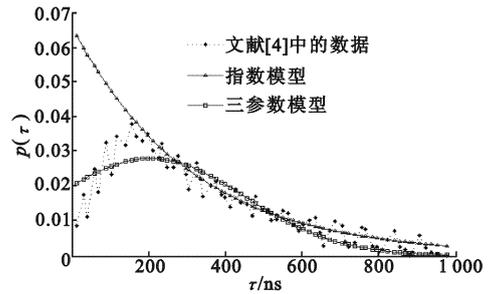


图 5 波导环境中差分时延的概率密度分布

图 5 对指数模型、笔者提出的模型与通信测量结果的差分时延的概率密度分布进行了比较,由图中可以看出:波导环境中的多径信道的差分时延已不适宜采用指数分布模型,而笔者提出的模型与试验结果有较好的一致性。由于对流层散射及粗糙海面的散射影响,经散射信道的差分时延发生概率较大,而由于波导结构的陷获作用而产生的差分时延概率较小。

若接收站微波天线为线性阵元,孔径长度为 20λ ,阵元间距为 $\lambda/2$,利用 MUSIC 算法和功率谱估计的 FFT 分别对 $A_i = [1 \ 0.5]$, $\theta_i = [10^\circ \ 40^\circ]$ 时的到达角进行了估计,见图 6。从图 6 可以看出, MUSIC 算法有效克服了由于高斯白噪声的存在而使功率谱估计 FFT 结果中出现的强烈起伏,同时提高了到达角位置处的信噪比,能够对外场测试及理论研究中的到达角进行最佳估计。

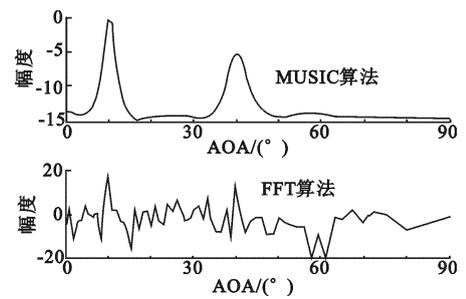


图 6 MUSIC 方法和 FFT 方法对到达角的估计

4 波导环境中的信道仿真模型

对径数、差分时延、到达角等多径信道参数的分析表明:海上大气波导环境中微波超视距通信信号能够从发射器经过有限 N_T 条显著路径传输到接收器,也存在大量经随机动态粗糙海面的反射、散射以及大气波导层结的折射、散射的分量,且经散射路径到达的信号差分时延较大,发生概率也较大,信号强度小,而经大气波导结构到达的信号差分时延较小,发生概率也较小,信号强度大。

若定义收发天线间的明显路径为特征路径,通过该特征路径到达接收天线的信号为特征信号,且每一路特征路径信号都包含了一个主要、稳定的分量和多个小的、随机散射分量(子特征路径分量),则接收信号可表示为

$$r(t) = \sum_{n=0}^{N(u)} \left[a_n s_n(t - \tau_n(t)) + \sum_{m=1}^M a_n a_{nm} s_{nm}(t - \tau_n(t) - \tau_{nm}(t)) \right] + n(t) \quad (7)$$

其中 $s(t) = \text{Re}[A(t)\exp(j\theta(t))\exp(j2\pi f_c t)]$, 是发送的已调制信号, $A(t)$, $\theta(t)$ 分别是已调信号的幅度和相位; $N(u)$ 是到达接收站的特征路径数目,它是接收站位移量 u 的随机变量,满足容量有限的 Markov 生灭过程; $a_n(t)$, $\tau_n(t)$ 是特征路径信号的幅度、时延; M 是第 n 条特征路径中的子特征路径数目; $a_{nm}(t)$, $\tau_{nm}(t)$ 是相对于第 n 条特征路径的子特征信号幅度、差分时延; $n(t)$ 是高斯白噪声。当 $N=0$ 或 $N=1$ 时,即波导环境中无特征路径或只有一条特征路径时,式(7)退化为经典的瑞利信道、莱斯信道接收信号模型。

5 结束语

海上微波通信信号由于波导结构的陷获作用经过有限个显著的电波传播路径到达接收站,因而具有与陆地无线通信信道不同的参数特征。海上多径信道中路径数目不再是无限多个,而是有限容量 N_T 的状态空间,且是一 Markov 生灭过程。根据大气波导中差分时延试验测量的近似瑞利分布,笔者提出了三参数模型

并确定了模型参数. 由于接收天线方向图的制约, 多径信号的到达角限制了接收信号的路径数目, 具有高分辨率的 MUSIC 算法能够对到达角进行最佳估计. 基于以上参数的数值计算及仿真, 笔者提出了波导环境中多径信道的多特征路径仿真模型, 该模型在存在一条特征路径、无特征路径时退化为经典的莱斯信道、瑞利信道模型. 多特征路径信道模型将有助于在大气波导环境中微波通信系统的设计与性能优化.

参考文献:

- [1] Heemskerk H J M, Boekema R B. The Influence of Evaporation Duct on the Propagation of Electromagnetic Waves Low above the Sea Surface at 3-94 GHz[C]//Eighth International Conference on Antennas and Propagation, Edinburgh: IEEE, 1993: 348-350.
- [2] Hitney H V. Hybrid Ray Optics and Parabolic Equation Methods for Radar Propagation Modeling[C]//Proceedings of Radar 92, IEE Conf Pub. Brighton: IEEE, 1992: 58-61.
- [3] Akbarpour R, Webster A R. Ray Tracing and Parabolic Equation Method in the Modeling of a Tropospheric Microwave link[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2005, 53(11): 3785-3791.
- [4] Vilar E, Austin J, Wan K W, et al. A Wide Band Transhorizon Experiment at 11.6 GHz[C]//Int Conf Ant and Prop, ICAP 93. Edinburgh: IEEE, 1993: 441-445.
- [5] 戴福山. 海洋大气近地层折射指数模式及其在蒸发波导分析上的应用[J]. 电波科学学报, 1998, 13(3): 280-286.
- [6] 刘成国, 黄际英, 江长荫, 等. 我国对流层波导环境特性研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2002, 29(1): 119-122. Liu Chengguo, Huang Jiying, Jiang Changyin, et al. Characteristics of the Lower Atmospheric Duct in China[J]. Journal of Xidian University, 2002, 29(1): 119-122.
- [7] 赵小龙, 黄际英, 王海华. 蒸发波导环境中的雷达探测性能分析[J]. 电波科学学报, 2006, 21(6): 891-894. Zhao Xiaolong, Huang Jiying, Wang Haihua. Analysis of Radar Detection Ability in Evaporation Duct Environment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(6): 891-894.
- [8] Dockery G D. Modeling Electromagnetic Wave Propagation in the Troposphere Using the Parabolic Equation[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1988, 36(10): 1464-1470.
- [9] Hashemi H. Simulation of the Urban Radio Propagation Channel[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1979, 28(3): 213-225.
- [10] 钟顺时, 江长荫, 高式昌. 陆地移动通信多径传播中电波径数的分布及模拟[J]. 通信学报, 1998, 19(2): 66-72. Zhong Shunshi, Jiang Changyin, Gao Shichang. Path-number Distribution for Multipath Propagation Land Mobile Communications and Its Simulation[J]. Journal on a Communication, 1998, 19(2): 66-72.
- [11] 陈明. 信息与通信工程中的随机过程[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 253-299.
- [12] 高式昌, 钟顺时, 江长荫. 陆地移动通信多径传播的差分时分延分布[J]. 上海大学学报, 1998, 4(1): 67-71.
- [13] Webster A R, Merritt T S. Multipath Angles-of-arrival on a Terrestrial Microwave Link[J]. IEEE Trans on Communications, 1990, 38(1): 25-30.
- [14] Schmidt R. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.

(编辑: 郭 华)