

气象卫星信道模拟器的设计及其仿真

郭业才*, 袁 涛, 章 涛

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 201144)

(* 通信作者电子邮箱 guo-yecai@163.com)

摘 要:为研究多径、阴影及天气变化对气象卫星信道的影响,分析信道传播特性并根据不同天气状况研究了贴近实际的卫星信道 Suzuki 模型和扩展 Suzuki 模型。引入两状态 Markov 过程,以反映天气变化或云的移动导致信道状态模型之间的转换。采用成形滤波器法设计了气象卫星信道模拟器并进行了仿真。仿真结果表明,所设计的气象卫星信道模拟器可以用来描述贴近实际的气象卫星信道传播特性。

关键词:气象卫星;多径效应;阴影效应;信道模拟器;Markov 模型

中图分类号:TN927.23 **文献标志码:**A

Simulator design and its simulation of meteorological satellite channel

GUO Yecai*, YUAN Tao, ZHANG Tao

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 201144, China)

Abstract: In order to study the influence of multipath, shadows and the weather variations on meteorological satellite channel, the Suzuki and extension Suzuki channel models were studied according to the analyses on the different weather conditions. Then the two-state Markov model was introduced into satellite channel model, which could describe the transformation between two kinds of channel state models caused by the changes of weather. Finally, the meteorological satellite channel simulator was designed and simulated based on the the shaping filter method. The results show that the proposed meteorological satellite channel simulator can be used in the description of actual meteorological satellite channel propagation characteristics.

Key words: meteorological satellite; multipath effect; shadowing effect; channel simulator; Markov model

0 引言

随着人们对气象信息服务需求量的不断增长以及对信息服务质量要求的不断提高,传统的气象服务已经不能够满足人们在生产、生活中的需求^[1]。采用气象卫星帮助完成全方位的气象服务已成为世界各国气象部门的最佳选择^[2-3]。

信道传播特性的研究是气象卫星通信技术中最基础的研究之一^[4]。信道建模是一种比较有效的信道传播特性研究方法,它可以从数学和物理的角度比较准确地反映信道的真实特性^[5]。同时,由于受到经费、实验环境等的限制,设计可以模拟气象卫星信道传播特性的信道模拟器是十分必要的^[6]。气象卫星信道模拟器在信道理论研究、通信技术开发、新设备测试等方面具有重要作用,其优点是重构性强,不受气候和实际环境影响^[5]。本文主要研究设计气象卫星(L/C/X 波段)信道模拟器方法及其实现。

1 气象卫星信道的传播特性

在气象卫星通信中,由于气象卫星地面接收系统是在确定位置静止接收气象数据,而且接收终端都是选择在周围环境比较理想的开阔地区,所以一些普通陆地移动卫星信道建模中需要考虑的影响因素在气象卫星信道建模中不必考虑,而大气层空间物理环境几乎不可人为改变^[1-3],因此本文在考虑不同天气状况(晴空无云、多云、雨天和雾)下,分析气象卫星信道的传播特性。

1.1 多径传播效应

信号在传播过程中由于云、雾的阻碍,产生反射、散射以及绕射等效应,会造成信号传播方向的改变以及信号强度的变化,导致多径衰落,这种衰落在短期内会对信号的强度产生巨大的影响,常称为小尺度衰落。根据不同的天气环境,可分别将这种效应描述为 Rice 分布和 Rayleigh 分布^[6-7]。

当终端地区的天气为浓雾、沙尘暴、乌云密布时,由于雾、沙尘、云的阻碍,没有直射信号。接收信号的包络服从 Rayleigh 分布,幅度 x 和相位 φ 的概率分布函数分别为:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right); 0 \leq x < \infty \quad (1)$$

$$p(\varphi) = 1/2\pi; 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (2)$$

当终端天气云雾不是很浓密时,一方面由于云雾的阻碍会产生反射、散射等物理效应,存在多径信号,另一方面还存在着直射信号。此时,接收信号包络服从 Rice 分布^[7],幅度 x 和相位 φ 的概率函数分别为:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + \rho^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{x\rho}{\sigma^2}\right); 0 \leq x \leq \rho \quad (3)$$

$$p(\varphi) = \frac{\exp(-\rho^2/2\sigma^2)}{2\pi} \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\rho}{\sigma} \cos(\theta_s - \varphi) \cdot \exp\left(\frac{\rho^2 \cos^2(\theta_s - \varphi)}{2\sigma^2}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\rho \cos(\theta_s - \varphi)}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right] \right\}; 0 \leq \varphi < 2\pi \quad (4)$$

其中:参数 ρ 指主信号幅度的峰值; $I_0(x)$ 为第一类修正贝塞

收稿日期:2013-03-24;**修回日期:**2013-05-23。 **基金项目:**全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(200753);江苏省“六大人才高峰”培养对象资助项目(2008026);江苏省自然科学基金资助项目(BK2009410);2012年度高校科研成果产业化推进工程项目(JHB2012-9);2013年度江苏省高校自然科学研究重大项目(13KJA510001)。

作者简介:郭业才(1962-),男,安徽安庆人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:通信系统仿真、气象信息处理;袁涛(1988-),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要研究方向:气象卫星信道建模及均衡;章涛(1990-),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向:卫星信道建模及其模拟器的设计。

尔函数; $\text{erf}(\cdot)$ 是误差函数。Rice 因子 K 为主信号的功率与多径信号方差之比, $K = \rho^2 / (2\sigma^2)$, $\rho \rightarrow 0, K \rightarrow -\infty$ 。可知主信号幅度减小时, Rice 分布转化为 Rayleigh 分布, 即 Rayleigh 是 Rice 分布的一个特例。

1.2 阴影衰落效应

卫星信号在传播的过程中, 经历诸如云层、污染程度较大的市区环境时, 信号会产生阴影衰落效应, 这种衰落是大尺度衰落, 存在于信号传播的整个路径^[8]。可将这种阴影衰落表示为:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

其中: σ 和 μ 分别是方差和均值。

在气象卫星信道中, 以上两种效应是同时存在的, 对卫星信道的特性产生影响。特别指出的是气象卫星信道中, 由于接收环境相对理想且接收终端是静止的, 其他因素对信道的影响几乎可以忽略。根据实际的天际条件, 可以将以上两种衰落联合表示为 Suzuki 模型和扩展的 Suzuki 模型^[8]。

1) 当天气状况较差(乌云密布、阴雨)时, 信号经卫星信道传播时主要受到阴影效应和不存在直射信号的多径效应影响, 用 Rayleigh 分布和 Lognormal 分布组成的 Suzuki 模型来描述比较合理, Suzuki 模型为:

$$p(x) = \int_0^\infty \frac{x}{\sigma^2} \exp(-x^2/2\sigma^2) \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_s\sigma)} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln \sigma - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] d\sigma \quad (6)$$

其中: σ 是 Rayleigh 分布中各高斯分量的标准差, μ_s 和 σ_s 分别为对数正态分布的均值和标准差。可以看出, Suzuki 模型是将 Rayleigh 分布的标准差 σ 在服从对数正态分布的情况下进行积分的, 实现了从局部特性到全局特性的转化。因此, Suzuki 模型是联合考虑小尺度衰落和大尺度衰落的综合模型。

2) 当天气状况良好(晴空万里)时, 信号经信道时会受到大气中气体、颗粒的阴影效应及直射信号多径效应的影响, 此时的信道模型可以用扩展的 Suzuki 模型描述, 扩展的 Suzuki 模型为:

$$p(x) = \frac{x}{b_0 \sqrt{2\pi d_0}} \int_0^\infty \frac{1}{s} \exp\left[-\frac{(\ln s - \mu)^2}{2d_0} - \frac{(x^2 + s^2)^2}{2b_0}\right] \cdot I_0(x \cdot s/b_0) ds \quad (7)$$

其中: $I_0(\cdot)$ 为零阶修正型贝塞尔函数, s 是受阴影遮蔽的直射分量, $b_0 = \sigma_d^2$ 为多径传播引起的平均散射功率, $\sqrt{d_0}$ 和 μ 是对数正态分布的均方差和均值。

2 气象卫星信道模拟器实现方法

在实际的研究中, 由于实验环境等限制, 设计气象卫星信道模拟器是十分必要的^[9]。

2.1 Suzuki 模型和扩展 Suzuki 模型实现方法

所有的信道模拟器都是基于若干个不相关的有色高斯噪声实现的。模拟器性能的优劣取决于色高斯噪声的相关性, 色高斯噪声相关性越小, 模拟器性能越好, 相反则越差。色高斯噪声的产生方法有两种: 第一种采用是正弦波叠加法, 第二种采用成形滤波器法。本文采用成形滤波器法来仿真气象卫星信道 Suzuki 模型, 并使用 Markov 模型来描述多状态卫星信道相关特性^[10]。

Suzuki 模型可以看成是 Rayleigh 模型和 Lognormal 模型之和, 所以 Suzuki 模型可以通过仿真 Rayleigh 模型和 Lognormal 模型来实现。基于成形滤波器法的 Rayleigh 仿真模型如图 1 所示。

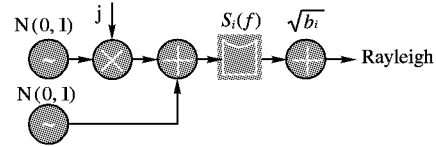


图1 Rayleigh 模型模块框图

图1中, $N(0, 1)$ 为色高斯白噪声, j 为 $\sqrt{-1}$, $\sqrt{b_i}$ 为第 i 条多径信号的散射功率, $S_i(f)$ 为多普勒功率谱密度, 定义为:

$$S_i(f) = \begin{cases} \frac{2\sigma_0^2}{\pi f_{\max} \sqrt{1 - (f/f_{\max})^2}}, & |f| < f_{\max} \\ 0, & |f| \geq f_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中: f_{\max} 为最大多普勒频移, $2\sigma_0^2$ 是平均功率和。通过图1所示的流程可以产生服从 Rayleigh 分布的信号。

若接收信号中不仅存在多径信号还存在直射信号, 则可以用 Rice 分布表示, Rice 分布的仿真模型如图2所示。

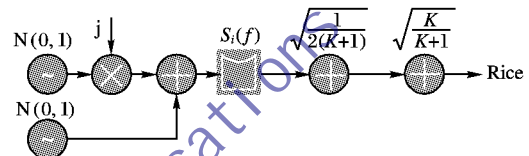


图2 Rice 模型模块框图

图2中, Rice 因子 K 为主信号的功率与多径信号方差之比, 即 $K = \rho^2 / (2\sigma^2)$ 。同理, Lognormal 的仿真模型如图3所示。

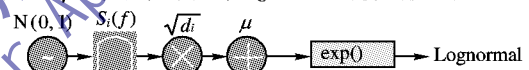


图3 Lognormal 模型模块框图

图3中, $\sqrt{d_1}$ 和 μ 为 Lognormal 的方差和均值, $\exp(\cdot)$ 为指数函数。由图1~3得到 Rayleigh 分布、Rice 分布和 Lognormal 分布后, 按照图4可得到 Suzuki 模型和扩展 Suzuki 模型。

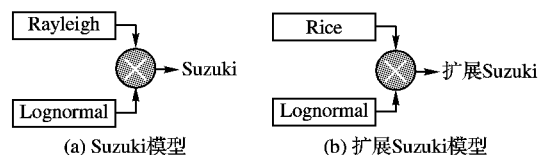


图4 Suzuki 模型和扩展 Suzuki 模型框图

2.2 气象卫星信道 Markov 模型

在陆地移动卫星信道建模中, 随着移动终端的移动, 周围环境时好时坏, 各种状态之间会发生转移。虽然气象卫星和接收终端是静止的, 接收环境也比较理想, 但是气象卫星信道随着天气的变化、云朵的移动, 也会产生 Suzuki 模型和扩展 Suzuki 模型之间的转移, 这种状态转移特性可以用 Markov 模型来描述^[11], 它比较确切地反映卫星信道的动态特性, Markov 模型可以用状态矩阵 S 和转移矩阵 P 来表示。

$$S = [s_1, s_2] \quad (9)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: s_i 是气象卫星信道的第 i 个状态, p_{ij} 表示由第 i 个状态转移到第 j 个状态的概率。因为这个 Markov 链是非周期、不可约的, 所以它的稳态分布存在, 且等于状态分布, 即

$$SP = S \quad (11)$$

按式(11)就可以对气象卫星信道状态进行长期的预测。Markov 模型实现方法如图5所示。图5中, $U(0, 1)$ 表示均匀分布, s_i 表示气象卫星信道的状态, 选择开关1~2是相互独立的, 它们的选择门限就是转移矩阵。

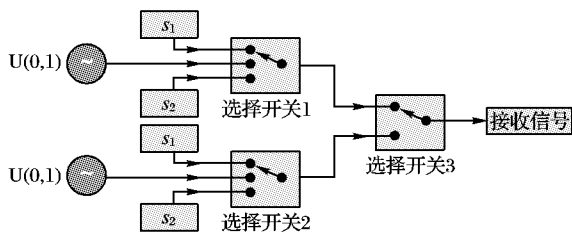


图5 气象卫星 Markov 模型模块框图

一个完整的信道模拟器应该包括接收信号的分析模块,在本模拟器中,分析模块包括接收信号的一阶统计特性(包络统计特性、概率密度函数和累积分布函数),二阶统计特性(电平交叉率、平均衰落时间)的分析,分析模块的实现,如图6所示。

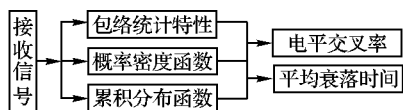


图6 气象卫星信道模拟器分析模块框图

3 计算机仿真

以下采用适当参数对气象卫星信道进行仿真^[5],以验证以上气象卫星信道模拟器的有效性。在仿真中采用四相相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制信号,载波为1.54 GHz,云的移动速度为20 m/s。在Rayleigh信道仿真模型中,正态分布数据平均值为0,方差为1,载波信号振幅为1;在Rice信道仿真模型中,平均值为2.41,方差为1.34;在Lognormal信道仿真模型中,取正态分布数据平均值为0,方差为1,载波信号振幅为1。仿真结果如图7~8所示。

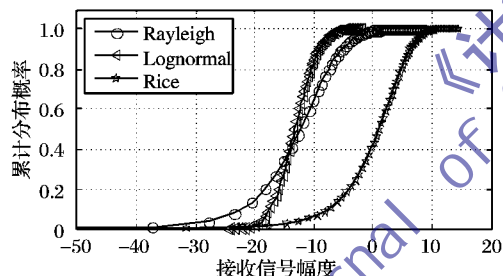


图7 累积分布概率

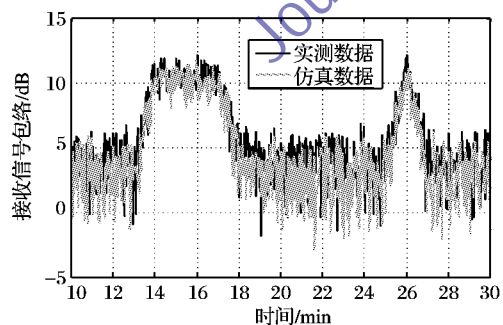


图8 接收信号包络图

电平交叉率和平均衰落时间是信道中比较重要的二阶统计特性。电平交叉率是关于时间的统计过程,定义为1 s内包络低于给定门限的平均次数^[8]。气象卫星信道模拟器的电平交叉率如图9所示。平均衰落时间定义为接收信号包络每次低于给定门限的持续时间,如图10所示。

在图7中,Lognormal分布、Rayleigh分布和Rice分布的累积分布函数符合信道建模中的累积分布函数分布规律^[8]。图8表明气象卫星信道明显存在两个状态,即Suzuki状态和扩展Suzuki状态,且存在状态转换,符合气象卫星信道随天

气和云移动的变化规律。图9~10是气象卫星信道的二阶统计特性电平交叉率和平均衰落时间,它们反映卫星信道的通信质量^[12]。

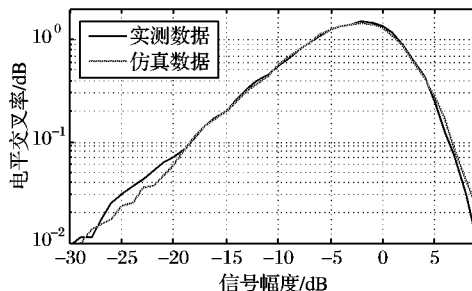


图9 电平交叉率

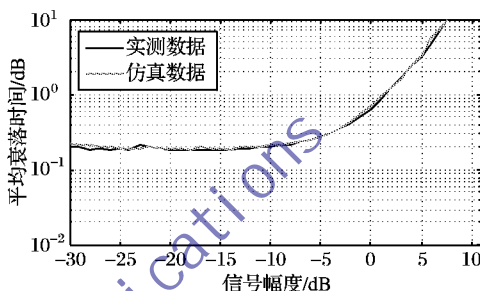


图10 平均衰落时间

从图7~10可知,所设计的气象卫星信道模拟器可以模拟随着天气条件不断变化的卫星信道传播特性,并可分析其相关的统计特性。

4 结语

由以上分析可知在气象卫星通信研究中,Suzuki模型和扩展Suzuki模型可以分别用来描述天气环境良好和天气环境较差时的信道传播特性。两状态Markov模型可以有效克服由于单一状态不能反映实际不断变化的卫星信道状态带来的问题,同时,信道模拟器完全可以用来模拟实际的卫星信道传播特性,有效解决实际科技研究中,由于经费、实验环境等一系列因素的限制,研究者不能多次通过实际测量来获得数据的问题。

参考文献:

- [1] 刘昊元,蔡金曼.风云系列气象卫星发展纪实[J].国防科技工业,2011,35(6):30-32.
- [2] 李俊,方宗义.卫星气象的发展——机遇与挑战[J].气象,2012,56(2):129-146.
- [3] 刘妍芳.气象卫星云图在地面气象观测中的作用[J].气象水文海洋仪器,2011,24(4):103-105.
- [4] 杨国弘,白云.我国第一颗业务型地球静止气象卫星FY-2C[J].气象,2004,26(12):36-38.
- [5] 张秀再,郭业才,陈金立,等.L与X波段气象卫星信道概率统计特性[J].应用气象学报,2012,22(4):478-484.
- [6] 郑晓天,战勇杰,张拯宁,等.卫星衰落信道分析与建模[J].电子设计工程,2011,19(8):89-91.
- [7] 严艳,张其善,常青,等.Lutz卫星信道模型的分析及实现[J].遥测遥控,2007,28(6):89-93.
- [8] 高电波,戴逸松,陈贺新.陆地移动卫星通信信道的统计特性研究[J].通信学报,2001,22(12):117-123.
- [9] 杨明川,郭庆,王振永.阴影环境下陆地移动卫星信道模型及仿真研究[J].遥测遥控,2007,28(3):20-24.
- [10] 李敬军,张曙.一种新的三状态LMSC模型的参数拟合方法研究[J].自动化技术与应用,2010,29(10):65-68.
- [11] 赵翠芹,申东娅,张雪梅,等.卫星移动通信的统计模型仿真与Markov的两状态模型[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2008,20(1):20-25.
- [12] 王俊林,张剑云.卫星移动通信信道模型及仿真[J].火力与指挥控制,2007,22(3):91-93.