

# 噪声功率时变的瑞利慢衰落信道 有限状态 Markov 模型

朱勇刚<sup>1</sup> 李永贵<sup>1</sup> 关胜勇<sup>1</sup> 陈曲珊<sup>2</sup>

(1. 南京电讯技术研究所, 江苏 南京 210007; 2. 华中科技大学电信工程系, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 对衰落信道的准确建模对于自适应无线通信、认知无线电等应用中的信道预测具有重要意义。针对噪声功率存在时变特性的无线通信应用环境, 提出了一种新的瑞利慢衰落信道的有限状态 Markov 模型。通过将接收信号的衰落电平进行离散化处理, 建立了衰落电平区间与 Markov 模型状态之间的一一对应关系, 推导了门限电平与状态转移概率和状态分布概率之间的理论关系式, 并在此基础上提出了一种易于实现的基于等概率的信道模型。理论分析与仿真结果表明: 在噪声功率时变的条件下, 已有的基于信噪比的模型失效, 而该模型能准确反映信道的衰落特性, 最大相对误差小于 7%。

**关键词:** 信道建模; 瑞利衰落; 马尔可夫模型; 时变

**中图分类号:** TN911.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2013)01-0135-07

## Finite State Markov Model of Rayleigh Fading Channels with Time-varying Noise Power

ZHU Yong-gang<sup>1</sup> LI Yong-gui<sup>1</sup> GUAN Sheng-yong<sup>1</sup> CHEN Qu-shan<sup>2</sup>

(1. Nanjing Telecommunication Technology Institute, Nanjing 210007, China)

(2. Department of Electronic and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The model of fading channel is very important for channel prediction, which appears in many modern wireless communication systems, such as adaptive wireless communication, cognitive radio and so on. In order to adapt to the application of wireless communication, in which there power of the noise is time-varying, a novel finite-state Markov model (FSMM) representing Rayleigh fading channels was proposed. The range of the received signal amplitude is partitioned into a finite number of intervals, which are associated with the states of the Markov model. The relationship between the amplitude thresholds, the states transition probabilities and the distribution probabilities of the states are derived in theory. An equal-probability channel model, which is realized easily, is proposed. The theoretical analysis and the Monte Carlo simulation results illustrate that the model based on signal-noise-rate is invalid when the power of the noise is time-varying, while the model proposed in this paper fits with the Rayleigh fading channel very well.

**Key words:** channel modeling; Rayleigh fading; Markov model; time-varying

## 1 引言

信道建模是一门将复杂的物理传播特性转化为

适于分析与仿真的数学模型的艺术。由于有限状态马尔可夫模型(Finite State Markov Model, FSMM)的数学易处理性, 该模型被广泛应用于有记忆信道建

模<sup>[1]</sup>。Gilbert 和 Elliott 于 1963 年首次将接收信号的误码过程建模成误码率为 0 和 0.5 的两状态马尔可夫模型<sup>[2]</sup>；文献[3][4][5]分别通过实测数据和理论分析证明了 HF、VHF 通信以及瑞利、莱斯衰落信道下的误码过程满足马尔可夫特性。然而，由于接收端误码是信道衰落、调制、编码以及接收机设计等多种因素的综合影响结果，误码过程模型难以准确描述信道衰落特征。针对误码过程模型的不足，文献[6]将接收端信噪比进行离散化处理，并将离散化的信噪比与 FSMM 的状态一一对应，由此建立了针对信噪比的 FSMM。在此基础上，文献[7]证明了一阶 FSMM 对慢衰落信道建模的有效性；文献[8][9][10]对信噪比的离散化方法进行了改进，文献[11]将信噪比的 FSMM 应用于对慢衰落信道的估计与跟踪。

然而，针对信噪比建模的 FSMM 存在以下两点不足。一是该模型只适用于信道衰落速率和噪声变化速率都较慢的情形。对于信道衰落速率较慢，而噪声或干扰变化速率较快的应用场景（如：城市慢速移动通信系统<sup>[12]</sup>、战场慢速移动通信系统<sup>[13]</sup>等），接收端信噪比变化较快。此时，针对信噪比的 FSMM 不再成立，需要采用无记忆信道模型近似<sup>[1]</sup>。二是该模型不适用于需要通过频谱感知结果和信道衰落特性共同确定接入频谱的动态频谱接入系统。以基于跳频的频谱共享方案为例<sup>[14][15]</sup>：为了确定下一跳频点是否可用，跳频接收机需要检测该频点是否存在较强的干扰和主用户，同时需要检测该频点是否发生衰落，并综合以上两方面的检测结果才能准确判断频点的可用性。因此，需要针对信道的衰落特性进行单独建模。

针对以上问题，本文通过将接收端的衰落电平进行离散化处理，并与 FSMM 状态之间建立一一对应关系，提出了一种新的瑞利衰落信道的 FSMM。同时，推导了门限电平与状态转移概率和状态分布概率之间的理论表达式，并在此基础上提出了一种基于平均概率的信道模型，理论分析与仿真结果验证了模型的有效性。

## 2 有限状态马尔可夫链

令  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_K\}$  为  $K$  状态 Markov 链的状态空

间； $\{S(t)\}, t=1, 2, \dots$  为状态空间  $S$  上的 Markov 链。那么，在平稳条件下，Markov 链的状态转移概率矩阵  $\mathbf{P}$  和状态分布概率矢量  $\boldsymbol{\pi} = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_K)^T$  满足：

$$\boldsymbol{\pi}^T \mathbf{P} = \boldsymbol{\pi}^T \quad (1)$$

其中，上标 T 表示转置， $P_{i,j} = p(S(t+1) = s_j | S(t) = s_i)$  是  $t$  时刻为状态  $s_i$ ，且  $t+1$  时刻为状态  $s_j$  的状态转移概率。显然， $\boldsymbol{\pi}$  和  $\mathbf{P}$  分别满足归一性：

$$\sum_{k=1}^K \pi_k = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^K P_{ij} = 1, \quad i \in (1, \dots, K) \quad (3)$$

## 3 瑞利衰落信道的 FSMM

### 3.1 瑞利衰落信道的统计特性

无线通信的接收信号是经多条路径反射、散射和绕射的结果。由于每条路径的传播延时、衰减系数不同，导致接收信号的幅度产生随机衰落。典型的衰落特性包括瑞利衰落、莱斯衰落等。经过瑞利衰落信道的接收信号幅度  $r$  服从概率密度函数为  $p_\zeta(r)$  的分布<sup>[16]</sup>：

$$p_\zeta(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (4)$$

其中， $\sigma^2$  是平均接收功率。

除接收信号幅度的概率密度函数外，电平通过率是用来刻画信道衰落特性的另一重要统计量，定义为每秒钟接收信号电平从高到低（或从低到高）通过一个给定电平  $r$  的次数。在 Jakes 功率谱密度的假设条件下，瑞利衰落信道的电平通过率  $N_\zeta(r)$  可以表示为<sup>[16]</sup>：

$$N_\zeta(r) = \sqrt{\pi} f_{\max} \sigma p_\zeta(r) = \sqrt{\pi} f_{\max} \frac{r}{\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (5)$$

其中， $f_{\max}$  是最大多普勒频移，它是由发送方和接收方的相对移动，或信道路径中物体的运动引起的。

### 3.2 模型的推导

令  $\boldsymbol{\Gamma} = (\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{K+1})^T$  为含有  $K+1$  个元素的接收电平门限向量，其中， $0 = \Gamma_1 < \Gamma_2 < \dots < \Gamma_{K+1} = \infty$ 。该门限向量将接收电平化分成  $K$  个相接的区间，若接收电平  $r$  满足  $\Gamma_k < r \leq \Gamma_{k+1}$ ，则称此时信道为第  $k$  状态，那么，衰落信道处于  $k$  状态的概率可以表示为：

$$\pi_k = \int_{\Gamma_k}^{\Gamma_{k+1}} p_\zeta(r) dr = \exp\left(-\frac{\Gamma_k^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{\Gamma_{k+1}^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$k = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

考虑到状态分布概率的归一性(式(2)),状态分布概率向量 $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k)$ 的自由度为 $K-1$ ,不妨假设自由变量为 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{k-1}$ ,则有 $\pi_k = 1 - \sum_{k=1}^{K-1} \pi_k$ 。同时考虑到: $\Gamma_1 = 0, \Gamma_{K+1} = \infty$ ,即接收电平门限向量 $(\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{K+1})$ 的自由度也为 $K-1$ ,因此,利用式(6)可以建立 $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{K-1})$ 与 $(\Gamma_2, \Gamma_3, \dots, \Gamma_K)$ 之间的一一对应关系。

对于信道衰落速率远小于符号速率的慢衰落信道,在一个符号周期内发生多次衰落的概率非常小,因此,可以近似认为<sup>[6][8][9]</sup>:在一个符号周期内,衰落电平只可能保持在当前状态或转移到相邻状态,也就是说对应的 Markov 链为一阶的:

$$P_{i,j} = 0, \quad |i-j| > 1 \quad (7)$$

进一步地,对于符号速率为 $R_s$ 的通信系统,单位时间内处于状态 $k$ 的符号数为 $R_s \pi_k$ ,而单位时间内离开状态 $k$ 进入状态 $k+1$ 和状态 $k-1$ 的数目分别为 $N_\zeta(\Gamma_{k+1})$ 和 $N_\zeta(\Gamma_{k-1})$ ,因此各状态之间的邻近转移概率可以近似表示为:

$$P_{k,k+1} = \frac{N_\zeta(\Gamma_{k+1})}{R_s \pi_k}, \quad k = 1, 2, \dots, K-1 \quad (8)$$

$$P_{k,k-1} = \frac{N_\zeta(\Gamma_k)}{R_s \pi_k}, \quad k = 2, 3, \dots, K \quad (9)$$

根据状态转移概率的归一性(式(3)),得到各状态的状态保持概率:

$$P_{1,1} = 1 - P_{1,2}, \quad P_{K,K} = 1 - P_{K,K-1}, \quad P_{k,k} = 1 - P_{k,k-1} - P_{k,k+1}, \quad k = 2, 3, \dots, K-1 \quad (10)$$

下面对该模型进行一致性检验。也就是说,在平稳状态下,所提出的 Markov 模型满足 $\boldsymbol{\pi}^T \mathbf{P} = \boldsymbol{\pi}^T$ ,即:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \pi_1 P_{1,1} + \pi_2 P_{2,1}, \quad \pi_K = \pi_{K-1} P_{K-1,K} + \pi_K P_{K,K} \\ \pi_k &= \pi_{k-1} P_{k-1,k} + \pi_k P_{k,k} + \pi_{k+1} P_{k+1,k}, \quad k = 2, 3, \dots, K-1 \end{aligned} \quad (11)$$

将式(8)-(10)代入式(11)可以证明,本文提出的 Markov 模型满足一致性检验。

由此提出了针对衰落电平的 Markov 模型。在给定接收电平门限向量的条件下,可以方便地计算出各状态对应的平稳状态分布概率和各状态之间的转移概率。其中,状态转移概率可以用于信道预测<sup>[11]</sup>,而利用平稳状态分布概率可以方便地分析衰落信道下的系统性能<sup>[8]</sup>。

### 3.3 基于平均概率的信道模型

由上一小节的推导可知:状态范围的划分直接影响各状态的平稳分布和状态转移概率。在针对信噪比进行 Markov 建模的研究中,人们提出的状态划分方法主要有:等概率(Equal-Probability, EP)方法<sup>[6]</sup>、等间隔(Equal-Duration, ED)方法<sup>[8]</sup>和相邻转移(Adjacent Transition, AT)方法<sup>[9]</sup>等。在此,本文采用易于实现的 EP 方法来验证所提模型的有效性。

第一步:假设每个量化区间对应的平稳状态分布概率相等:

$$\pi_k = \frac{1}{K}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

需要指出:每个状态对应的衰落电平范围 $(\Gamma_k, \Gamma_{k+1})$ 不能太大,若量化范围太大,则量化误差较大,模型难以准确反映信道衰落特性;衰落电平范围也不能太小,若量化范围太小,则所需的狀態数较多,模型的复杂度增加,并且可能导致一个数据包落入多个量化区间内,相邻状态转移假设(式(7))不再成立。因此,状态总数 $K$ 的选择既不能太大,也不能太小,由图4的仿真结果可以看出: $K$ 的合理取值范围应介于5~10为宜。

第二步:根据式(6)迭代计算各状态对应的门限电平 $\Gamma_2, \Gamma_3, \dots, \Gamma_K$ 。

第三步:根据式(8)~(10)计算状态转移概率矩阵 $\mathbf{P}$ 。

## 4 仿真与分析

本节首先通过比较计算机仿真结果与理论分析结果,验证模型的有效性。仿真中 Rayleigh 衰落信道由 Matlab 中的 Simulink 模块产生。其中,所采用的调制方式为 QPSK,符号速率为 5000 符号每秒,多普勒频谱采用 Jakes 模型,分别针对慢速和快速移动通信系统,取最大多普勒频移 $f_{\max}$ 为 10Hz 和 50Hz 进行仿真,仿真值由 10 秒钟的接收信号统计得到。

图1~图3分别给出了当取状态数 $K=8$ 时, $p_{k,k+1}$ 、 $p_{k,k}$ 和 $p_{k,k-1}$ 的理论与仿真结果。当 $f_{\max}$ 分别为 10Hz 和 50Hz 的条件下,三者之间的理论值与仿真值的最大相对误差( $error_1$ ,  $error_2$ )分别为(4.7%, 6.6%)、(0.3%, 1.1%)和(5.2%, 6.9%)。因此,可以看出:在不同的多普勒频移条件下,所有状态转移概率的理论分析结果与仿真结果吻合较好。

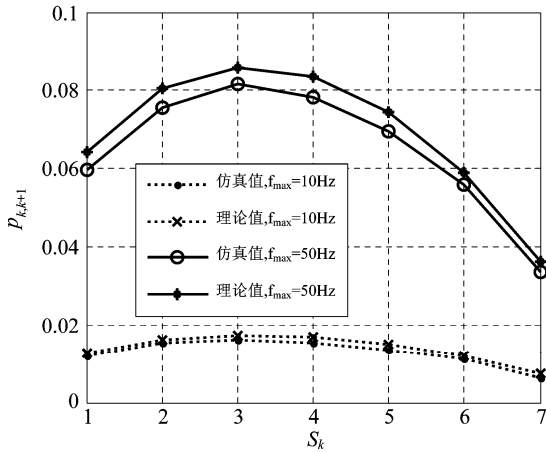


图1  $p_{k,k+1}$ 的理论值与仿真结果比较

Fig. 1 Comparing the theoretical and simulation result of  $p_{k,k+1}$

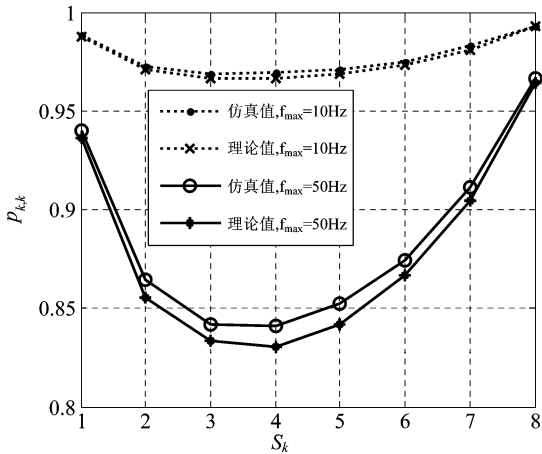


图2  $p_{k,k}$ 的理论值与仿真结果比较

Fig. 2 Comparing the theoretical and simulation result of  $p_{k,k}$

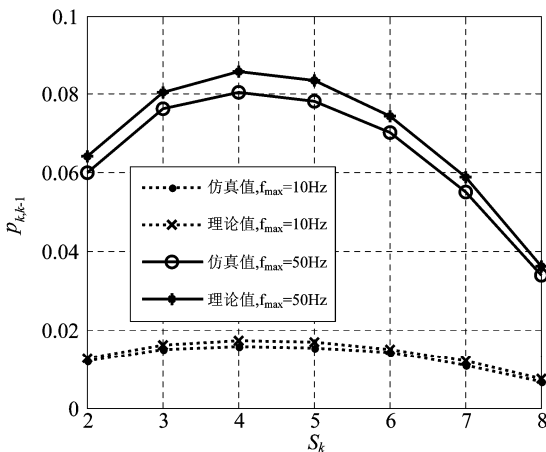


图3  $p_{k,k-1}$ 的理论值与仿真结果比较

Fig. 3 Comparing the theoretical and simulation result of  $p_{k,k-1}$

图4给出了取不同状态数时,最大多普勒频移与非相邻状态转移概率之间的仿真关系曲线,其中,非相邻状态转移概率为所有非相邻状态转移总数与发送符号总数的比值。可以看出:在状态总数一定的前提下,非相邻状态转移概率随最大多普勒频移的增加而增加(这是因为随着最大多普勒频移的增加,接收电平的变化速率增加,导致单位时间内进入非相邻状态的概率增加);在多普勒频移一定的前提下,非相邻状态转移概率随状态总数的增加而增加(这是因为随着状态总数的增加,各状态之间的间隔减小,导致单位时间内进入非相邻状态的概率增加)。

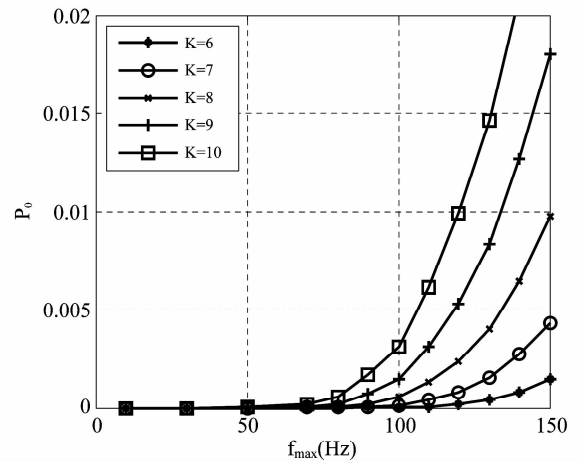


图4 最大多普勒频移与非相邻状态转移概率关系

Fig. 4 Relationship between non-adjacent state transition probability and maximum Doppler shift

为了验证本文所提的基于接收信号电平的模型相对于已有的基于信噪比的模型<sup>[6]</sup>的优越性,对信道存在 Rayleigh 衰落,且噪声(或干扰)功率时变的信道进行仿真。在该仿真中,分别对噪声功率在通信过程中保持恒定、变化1次和变化16次等三种情况进行仿真,用来模拟噪声功率不变、缓慢变化和快速变化的情形,其他仿真条件与图1~图3所采用的仿真条件相同。图5给出了当 $f_{max} = 10\text{Hz}$ 时,由文献[8]得到的信噪比模型的理论结果和相应的计算机仿真结果,其中,图5(a)为 $p_{k,k+1}$ 的理论及仿真结果,可以看出:当噪声功率保持不变时,文献[8]的理论结果与仿真结果吻合较好,而当噪声功率发生1次变化时,理论结果与仿真结果产生较大误差,最大相对误差为32.9%,且随着噪声功率变化次数的增加,理论结果与仿真结果的偏差也显著增加,当变化16次时,最大相对误差达98%。图5(b)、(c)分别为 $p_{k,k}$ 和 $p_{k,k-1}$ 的理论及仿真结

果,同样可以看出:当噪声功率保持不变时,基于信噪比的模型的理论结果与仿真结果吻合较好,而当噪声时变时,理论与仿真结果存在误差,且随着噪声变化速率的提高,误差显著增加。图 6(a)、(b)和(c)分别给出了  $f_{\max} = 50\text{Hz}$  时,由文献[8]得到的  $p_{k,k+1}$ 、 $p_{k,k}$  和  $p_{k,k-1}$  的理论结果与相应的仿真结果。由图 6 可以得出与图 5 类似的结论。

由此可以看出:当噪声功率变化时,已有的信噪比模型并不适用。这主要是由于以下两点原因造成的:一是已有的信噪比模型假设状态转移只发生在相邻状态之间,这一假设在噪声功率不变的条件下是近似成立的<sup>[8]</sup>,然而,在噪声功率时变的条件下,这一假设与实际情况存在较大误差,导致模型不能有效刻画实际衰落信道。二是在噪声功率变化较快的条件下,接收端信噪比的有限状态 Markov 模型将失效,需要采用无记忆模型进行建模。

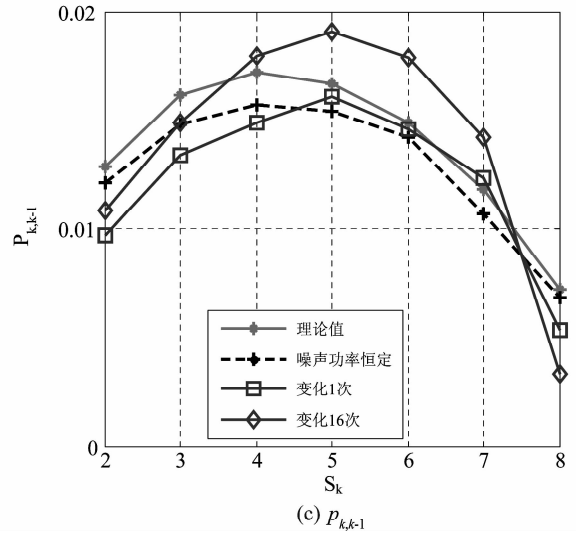
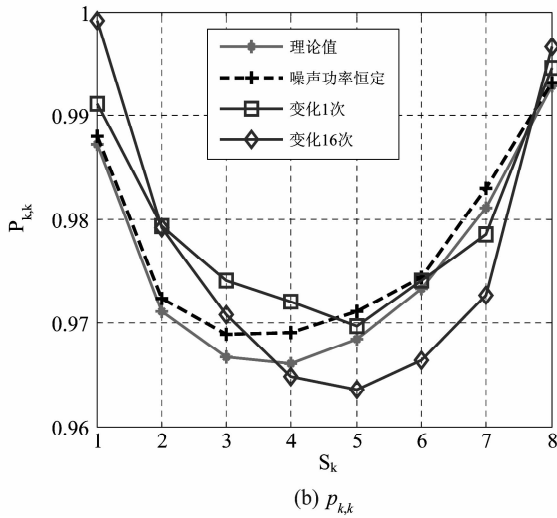
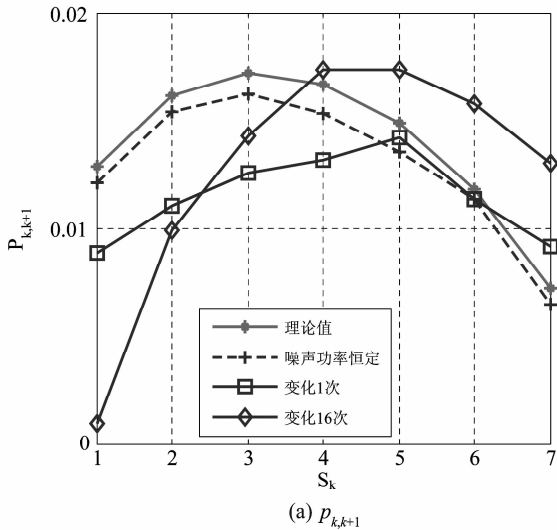
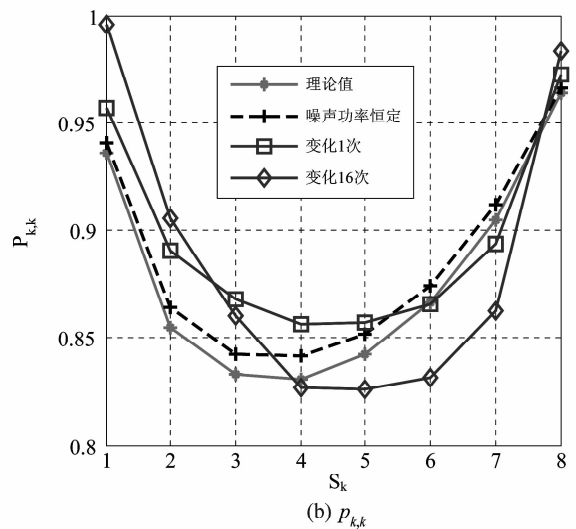
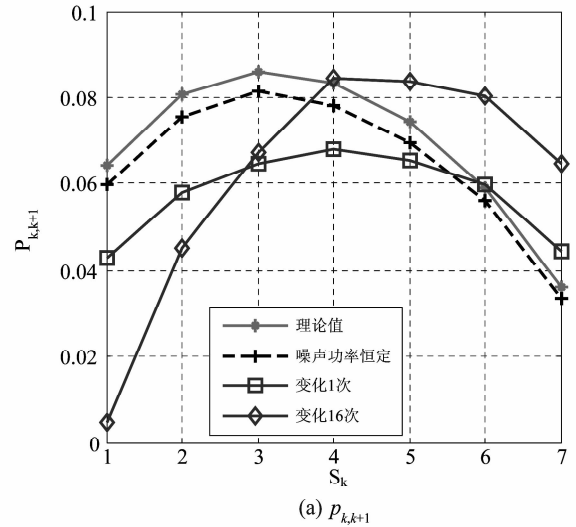


图 5  $f_{\max} = 10\text{Hz}$ ,且噪声功率变换时,信噪比模型<sup>[8]</sup>的理论与仿真结果比较

Fig. 5 Comparing the theoretical and simulation results for SNR model [8], when the power of the noise is changing and  $f_{\max} = 10\text{Hz}$



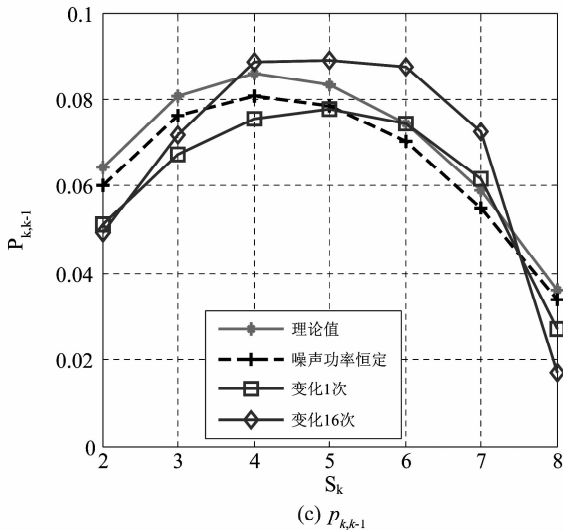


图6  $f_{\max} = 50\text{Hz}$ ,且噪声功率变换时,信噪比模型<sup>[8]</sup>的理论仿真结果比较

Fig. 6 Comparing the theoretical and simulation results for SNR model [8], when the power of the noise is changing and  $f_{\max} = 50\text{Hz}$

导致接收信号衰落的主要原因是信号沿多个路径传播且相互叠加造成的<sup>[17]</sup>,噪声功率的变化对接收信号的衰落几乎没有影响。因此,针对接收信号电平进行建模能够有效避免噪声功率时变对模型的影响,能够准确刻画信道的衰落特性。

## 5 结束语

对衰落信道的准确建模是研究衰落信道下通信系统性能的重要环节之一。已有的文献在噪声功率恒定的前提下,将接收端信噪比建模成有限状态 Markov 模型,提出了多种 Rayleigh 衰落信道模型。然而,在实际无线通信系统中,噪声或干扰功率往往是时变的,这在极大程度上限制了已有信道模型的应用范围。针对噪声功率时变的无线通信应用环境,本文提出了一种新的瑞利衰落信道的有限状态 Markov 模型。与已有的针对信噪比进行建模的 Markov 信道模型不同,该模型针对接收电平进行建模,避免了噪声对信道模型的影响。从理论角度看,本文所提模型是对已有的误码过程模型、信噪比模型的扩展,能够更加准确地描述因多径传播产生的信道衰落特征;从实用角度看,该模型可用于噪声和干扰变化较快而衰落较慢的无线通信系统,同时将该模型与已有的信道估计技术相结合,用于对信道衰落特性的实时估计与跟踪。这是下

一步研究的重点。

## 参考文献

- [1] Amos Lapidot, Prakash Narayan. Reliable Communication Under Channel Uncertainty [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44(6): 2148-2177.
- [2] Elliott E O. Estimates of Error Rates for Codes on Burst-Noise Channels [J]. Bell System Technology Journal, 1963, 42(9): 1977-1997.
- [3] Stephen Tsai. Markov Characterization of the HF Channel [J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1969, COM-17(1): 24-32.
- [4] Francis Swarts, Hendrik C. Ferreira. Markov Characterization of Digital Fading Mobile VHF Channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(4): 977-985.
- [5] Aario R. Hueda, Carmen E. Rodriguez. A New Information Theoretic Test of the Markov Property of Block Errors in Fading Channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 425-434.
- [6] Hong Shen Wang, Nader Moayeri. Finite-State Markov Channel - A useful Model for Radio Communication Channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1995, 44(1): 163-171.
- [7] Hong Shen Wang, Pao-Chi Chang. On Verifying the First-Order Markovian Assumption for a Rayleigh Fading Channel Model, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1996, 45(2): 353-357.
- [8] Qinqing Zhang, Saleem A. Kassam. Finite-State Markov Model for Rayleigh Fading Channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(11): 1688-1692.
- [9] Jae Man Park, Gang Uk Hwang. Mathematical Modeling of Rayleigh Fading Channels Based on Finite State Markov Chains [J]. IEEE Communication Letters, 2009, 13(10): 764-766.
- [10] 刘真, 杨大成. 瑞利衰落信道有限状态 Markov 模型的研究 [J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(5): 85-88. Z. Liu, D. Yang. Research on Finite-State Markov Model for Rayleigh Fading Channels [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(5): 85-88. (in Chinese)
- [11] Bor-Sen Chen, Jung-Feng Liao. Adaptive MC-CDMA Multiple Channel Estimation and Tracking Over Time-Varying

- Multipath Fading Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6): 2328-2337.
- [12] Rodolfo Feick, Reinaldo A. Valenzuela, Luciano Ahumada. Experimental Results on the Level Crossing Rate and Average Fade Duration for Urban Fixed Wireless Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(1): 175-179.
- [13] 胡延平, 李纲, 程翥, 皇甫堪. 自适应跳频通信受扰信道无源确认技术[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(3): 68-72.  
Y. Hu, G. Li, Y. Chen, P. Huang. Adaptive Passive Pre-Detection of Frequency-Hopping Interfered Channel [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(3): 68-72. (in Chinese)
- [14] 刘淇, 苏伟, 李承恕. 基于跳频的自适应频谱共享方案 [J]. 电子学报, 2010, 38(1): 105-110, 116.  
Q. Liu, W. Su, C. Li. Adaptive Spectrum Sharing Scheme Based on FH Communications [J]. Electronic Journal, 2010, 38(1): 105-110, 116. (in Chinese)
- [15] Wendong Hu, Daniel Willkomm, George Vlantis, Mario Gerla, Adam Wolisz. Dynamic Frequency Hopping Communities for Efficient IEEE 802.22 Operation [J]. IEEE Communications Magazine, 2007, (5): 80-86.
- [16] Matthias Patzold. Mobile Fading Channels [M]. New York: Wiley, 2006.
- [17] T. S. Rappaport. Wireless communications principles and practice, second edition [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

### 作者简介



朱勇刚 (1982-), 男, 湖北天门人, 2009年毕业于中国人民解放军理工大学, 获博士学位, 现任南京电讯技术研究所博士后、工程师, 研究方向为: 无线通信信道认知、通信抗干扰。

E-mail: zhumaka1982@163.com

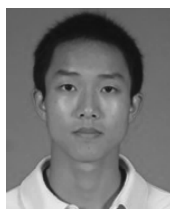


李永贵 (1964-), 男, 安徽泾县人, 2000年毕业于中国人民解放军理工大学, 获硕士学位, 现任南京电讯技术研究所高工、硕士生导师, 研究方向为: 军事通信抗干扰理论与技术。

E-mail: legend64@163.com

关胜勇 (1967-), 男, 安徽肥东人, 博士, 高工, 研究方向为: 通信抗干扰、信号处理和纠错编码。

E-mail: guansy1967@163.com



陈曲珊 (1990-), 男, 湖北天门人, 2011年毕业于华中科技大学, 获学士学位, 现为华中科技大学博士研究生, 研究方向为: 电磁理论与带电粒子及其在通信中的应用。

E-mail: chenqushan@gmail.com