

自适应移动信道模型的研究和模拟¹

王端怡 胡正名

(北京邮电大学信息工程系 北京 100088)

摘 要 研究和模拟了建立一个自适应移动信道模型的全过程。根据所建模型的参数,用计算机软件实现方法产生出描述移动信道长突发错误特性的差错序列。并提出了一种门限电平法检验了所建模型的精确度。

关键词 移动信道, Markov 模型, 差错序列, 计算机模拟

中图分类号 TN911.22

1 引 言

移动通信信道的模化是采用纠错编码技术改善信道的第一步,因此建立一个既实用又有一定精度的移动信道模型是十分必要的。

移动信道作为一种多变参的、复杂的、随机和突发干扰共存的混合信道,各种干扰都会对正常的移动通信业务造成极坏的影响,其中尤以多径快衰落效应造成的长突发误码的影响最为严重。而在影响移动信道长突发误码特性的诸多外界因素中,信噪比(C/N)起着十分关键的作用,因此,如果能找出信道模型中各参数随信噪比的变化规律,也就初步建立了能够适用于各种移动衰落环境的具有普遍意义的信道模型,这就是近年来提出的建立自适应移动信道模型的基本出发点^[1]。

本文在文献[1]的基础上做了进一步的研究,用计算机软件实现的方法建立了移动信道自适应三状态 Markov 模型,在此过程中修正了前人结果中的取样误差,从而提高了模型的精度。根据所建模型的参数,产生出描述移动信道长突发错误特性的信道差错序列。此外,还提出了一种门限电平法,通过验证所产生的差错序列是否符合瑞利分布,检验了所建模型的精度。整个模拟工作用 TURBO C 语言在 PC 386 上完成。

2 移动信道自适应三状态 Markov 模型的建立

我们先以一个简单分群的 Markov 模型作为描述移动信道长突发错误特性的概率统计模型,这是 1967 年由 Fritchman 提出的一类针对混合信道具有广泛适用性的有限状态一般分群的 Markov 模型^[2]的一个重要特例,即只有一个错误状态,其余状态都是无误状态,而且各无误状态间不能转移。如果信道处于无误状态,则不产生错误,反之则以概率 1 产

¹ 1993-12-15 收到, 1995-06-22 定稿
国家自然科学基金资助项目

生错误。考虑到既要力求简单实用又要保证一定精度，这里我们取状态数为 3。此时，该模型的状态转移图如图 1 所示：其状态转移概率矩阵 \mathbf{P} 为

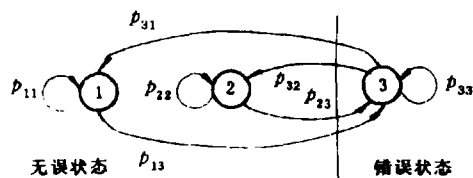


图 1 三状态 Markov 模型

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & 0 & p_{13} \\ 0 & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}$$

其中 P_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 是由第 i 个状态到第 j 个状态的状态转移概率。矩阵 \mathbf{P} 共有 4 个独立参数，这些参数可由差错序列的无误差分布 $G(m)$ 完全确定，即根据

$$G(m) = \sum_{k=1}^2 \frac{p_{NK}}{p_{KK}} p_{KK}^m, \quad m \geq 1 \quad (1)$$

利用指数和表示的 $G(m)$:

$$G(m) = A_1 \exp(\alpha_1 m) + A_2 \exp(\alpha_2 m) \quad (2)$$

其中系数 $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ 为常数，经比较 (1), (2) 式，得

$$p_{11} = \exp(\alpha_1), \quad p_{22} = \exp(\alpha_2), \quad p_{31} = A_1 \exp(\alpha_1), \quad p_{32} = A_2 \exp(\alpha_2). \quad (3)$$

矩阵中其余的 3 个元素 p_{13}, p_{23}, p_{33} 可根据每行元素和等于 1 的关系得到。

如果给出了一组不同 C/N 下的移动信道现场试验统计无误差分布曲线 $G(m) - m$ ，对于每一 C/N 值，我们可以首先从曲线上结合 (2) 式估计出系数 $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ 的初值；再利用非线性最小二乘拟合法求得 $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ 的精确值，从而计算出该 C/N 下模型的解析表达式；然后再以 C/N 为自变量，对这组解析表达式的各个参量进行二次曲线拟合，就得到一个能适合于不同 C/N 值的自适应三状态 Markov 模型。

下面从一组不同 C/N 下的实际移动信道现场实测曲线出发，详细描述自适应三状态 Markov 模型的建模过程。

在移动信道中，我国设 $G(m)$ 表示无误差分布函数，即一个“1”以后出现大于等于 m 个“0”的条件概率，若设突发长度大于等于 m 的概率为 $P_b(m)$ ，则显然有 $G(m) + P_b(m) = 1$ ，从而

$$G(m) = 1 - P_b(m). \quad (4)$$

图 2 是一组在典型的陆地移动通信传播环境下测得的现场试验曲线^[3]，它表明 C/N 为 20dB, 25dB, 30dB, 35dB 和 40dB 时，信道的突发错误分布情况。由 (4) 式，可以描述出相应的无误差分布函数曲线 $G(m) - m$ 如图 3 所示。

对图 3 中不同信噪比下的试验曲线采用肉眼观察的方法，取得拟合所需的样点对 $G(m) - m$ 如表 1 所示：

表 1

C/N(dB)	m	2	4	6	8	10	20	40	60	80	100	200
20		0.559	0.549	0.540	0.529	0.520	0.490	0.430	0.384	0.320	0.300	0.130
25		0.682	0.647	0.626	0.610	0.601	0.550	0.460	0.390	0.310	0.260	
30	$G(m)$	0.696	0.651	0.629	0.612	0.602	0.500	0.370	0.276	0.199		
35		0.695	0.648	0.601	0.564	0.532	0.399	0.199	0.099	0.040		
40		0.681	0.592	0.519	0.461	0.399	0.215	0.060	0.031			

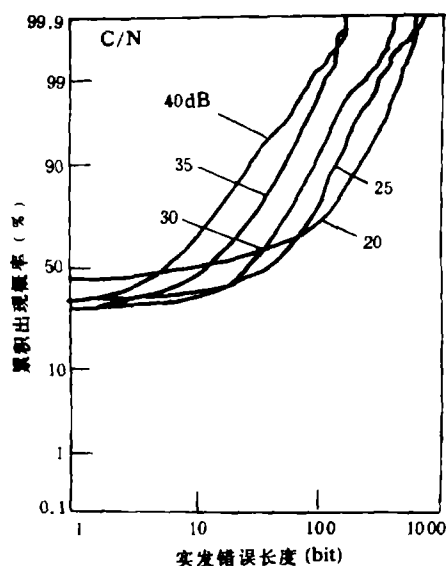
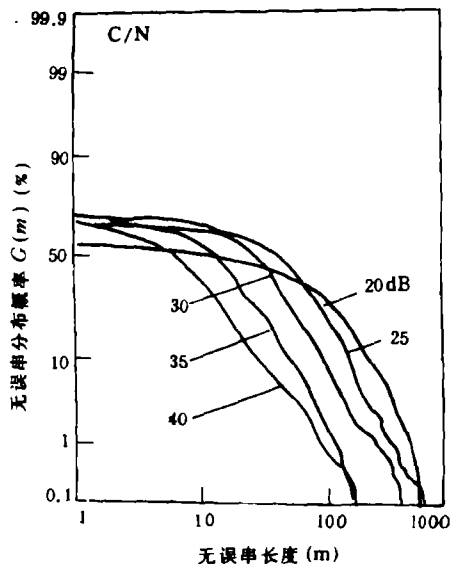


图 2 移动信道突发错误分布情况实测曲线

图 3 无误串分布函数 $G(m)$ - m 曲线

根据表 1 和 (2) 式先大致估计出每种信噪比下四个待定系数 A_1 , A_2 , α_1 , α_2 的初值如表 2 所示；然后采用非线性曲线最小二乘拟合的 Marquardt 算法编程运行，得到第一拟合的信道模型结果如表 3 所示。

表 2

C/N(dB)	20	25	30	35	40
A_1	0.55	0.65	0.66	0.70	0.68
A_2	0.04	0.09	0.10	0.15	0.09
α_1	-0.006	-0.009	-0.015	-0.028	-0.05
α_2	-0.5	-0.49	-0.42	-0.50	-0.45

表 3

C/N(dB)	20	25	30	35	40
A_1	0.561793685	0.659465969	0.692935169	0.737920821	0.721220076
A_2	0.021176610	0.123148933	0.800935030	0.125371918	0.056857862
α_1	-0.006770179	-0.009170454	-0.015576932	-0.032753985	-0.043006621
α_2	-0.737753570	-0.632286668	-2.385046959	-1.930733204	-0.467445076

从表 3，我们可以观察到， $\exp(\alpha_1)$ 和 $A_1 \exp(\alpha_1)$ 与 C/N 大致成二次关系：

$$\exp(\alpha_1) = C_1(C/N)^2 + C_2(C/N) + C_3, \quad (5)$$

表 4

参量	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
初始值	-0.000014	0.00061	0.926	0.00067	0.045
拟合值	-0.000072658	0.002483615	0.973386884	0.000669493	0.046697892
参量	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
初始值	-0.08	0.0044	0.0816	0.0064	0.077
拟合值	-0.105184138	0.000074926	0.038378865	0.001471602	0.181351945

$$A_1 \exp(\alpha_1) = C_4(C/N)^2 + C_5(C/N) + C_6. \quad (6)$$

而 $A_2 \exp(\alpha_2)$ 和 A_2 与 C/N 大致成一次线性关系:

$$A_2 \exp(\alpha_2) = C_7(C/N) + C_8, \quad (7)$$

$$A_2 = C_9(C/N) + C_{10}. \quad (8)$$

因此可再次采用最小二乘拟合的 Marquardt 算法得到 $C_1 \sim C_{10}$ 的精确值如表 4 所示。

将表 4 的拟合值代入 (5) ~ (8) 式, 再结合 (3) 式得到以 C/N 为参量的状态转移概率矩阵 P 中各元素如下:

$$p_{11} = -0.000072658(C/N)^2 + 0.002483615(C/N) + 0.973386884,$$

$$p_{13} = 1 - p_{11},$$

$$p_{22} = (0.000074926(C/N) + 0.038378865)/(0.001471602(C/N) + 0.181351945),$$

$$p_{23} = 1 - p_{22},$$

$$p_{31} = -0.000669493(C/N)^2 + 0.046697892(C/N) - 0.105184138,$$

$$p_{32} = 0.000074926(C/N) + 0.038378865,$$

$$p_{33} = 1 - p_{31} - p_{32}.$$

此即所要建立的自适应三状态 Markov 模型 $P = P(C/N)$ 。

3 移动信道差错序列的产生

根据第 2 节所建立的自适应三状态 Markov 模型的参数, 我们按如下算法编程运行产生出不同 C/N 下表示移动信道运行产生出不同 C/N 下表示移动信道的任意长差错序列 $\{e_i\}$:

- (1) 置 $i = 0$, 任意指定一初始状态 s_0 ($s_0 = 1, 2, 3$ 均可);
- (2) 用混合同余法产生一个具有 $(0, 1)$ 均匀分布的伪随机数 r_i ;
- (3) 确定本状态下的 e_i 值, 同时对下一状态的转向作出判断;
 - (a) 若 $s_i = 3$, 则 $e_i = 1$

$$s_{i+1} = \begin{cases} 1, & r_i < p_{31}; \\ 2, & p_{31} \leq r_i < p_{31} + p_{32}; \\ 3, & p_{31} + p_{32} \leq r_i; \end{cases}$$

(b) 若 $s_i = j \neq 3$, 则 $e_i = 0$

$$s_{i+1} = \begin{cases} j, & r_i < p_{jj}; \\ 3, & r_i \geq p_{jj}; \end{cases}$$

(4) $i = i + 1$, 返回 (2)。

同时, 对每种 C/N 下所产生的信道差错序列 $\{e_i\}$, 程序还自动完成对其无误串分布概率 $G'(m)$ 和平均误比特率 P'_b 的统计工作。

4 信道模型的检验

由于移动信道的长突发特性一般满足 Rayleigh 分布函数, 所以可以通过用一个具有 Rayleigh 分布的 (0, 1) 序列来检验所建自适应模型产生的信道差错序列 $\{e_i\}$ 是否符合 Rayleigh 分布来检验模型的精确性。为此我们提出了一种门限电平法对所建的自适应三状态 Markov 模型进行检验。

首先我们可用 (0, 1) 区间内均匀分布的随机数来产生 Rayleigh 分布的随机数。理论依据为 (0, 1) 区间均匀分布的随机数与任意分布的随机数之间存在着一定的关系。设 r_i 表示 (0, 1) 内均匀分布的随机数, $f(x)$ 表示任意分布随机数的概率密度函数, s_i 表示与 r_i 对应的任意分布随机数, 则

$$r_i = \int_{-\infty}^{s_i} f(x) dx.$$

将 Rayleigh 分布的概率密度函数 $p(x) = x \exp(-x^2/(2u^2))/u^2$ 代入上式, 得

$$r_i = \int_0^{s_i} \frac{x}{u^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2u^2}\right) dx = 1 - \exp\left(-\frac{s_i^2}{2u^2}\right), \quad (s_i > 0),$$

则 $s_i = u\sqrt{-2\ln(1-r_i)}$ 为 Rayleigh 分布随机数。又由于 r_i 符合 (0, 1) 均匀分布, 所以 $1-r_i$ 也符合 (0, 1) 均匀分布, 因此 $s_i = u\sqrt{-2\ln r_i}$ 仍为 Rayleigh 分布随机数, 其中 u 为 Rayleigh 分布的均值。

在得到上述具有 Rayleigh 分布的随机序列 $\{s_i\}$ 后, 我们可设置一个门限电平, 将该序列量化为具有 Rayleigh 分布的 (0, 1) 序列。由于在概率密度函数曲线图中, 横轴表示幅度, 纵轴表示密度百分比, 曲线下的面积为 1, 因此可设一个幅度值为门限, 假设该门限值为 B , 则小于 B 记为 1, 大于 B 记为 0。又根据误码率 P_b 的定义为“1”在总码中的百分比, 对应概率密度图中即为小于幅度 B 的面积占总面积的百分比, 即

$$P_b = \frac{\int_0^B \frac{x}{u^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2u^2}\right) dx}{\int_0^\infty \frac{x}{u^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2u^2}\right) dx} = 1 - \exp\left(-\frac{B^2}{2u^2}\right),$$

则

$$B = u\sqrt{-2\ln(1-P_b)}. \quad (9)$$

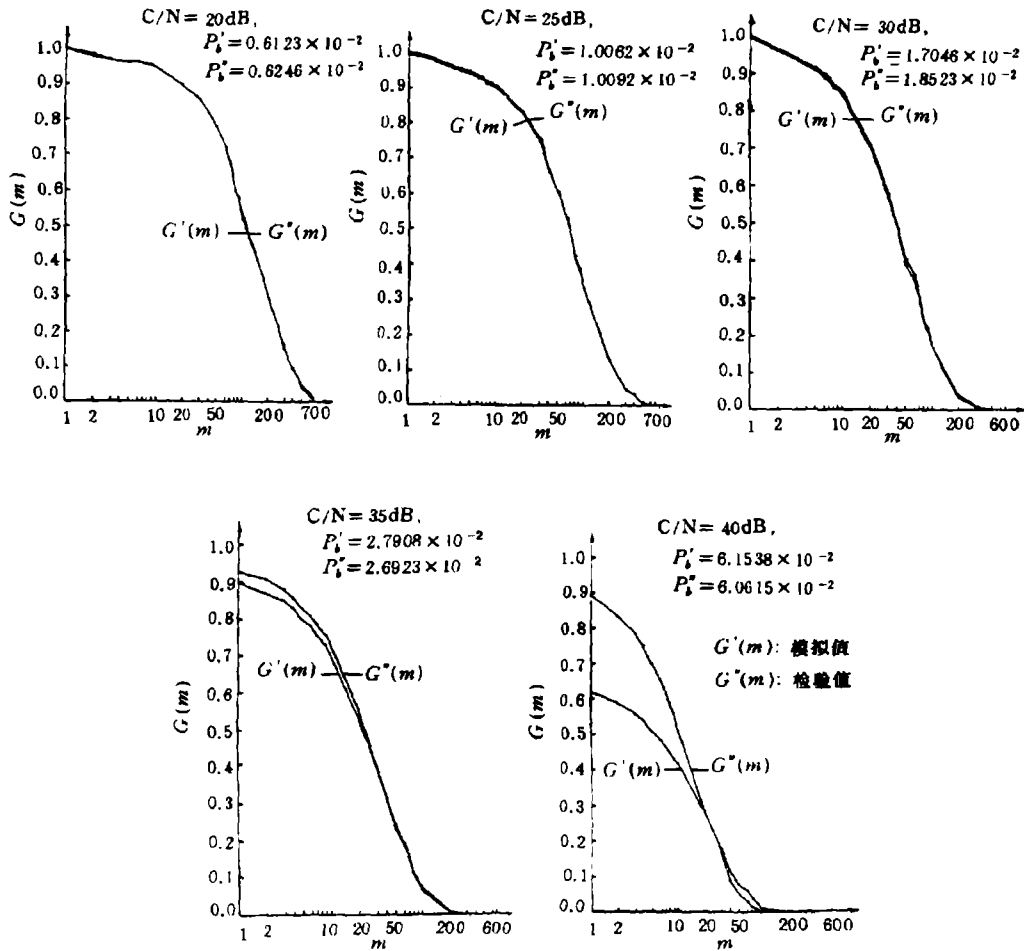


图 4 不同信噪比下模拟结果与理论估计的比较

现将第 3 节中统计的对应自适应三状态 Markov 模型的不同 C/N 下信道差错序列的误码率 P_b' 值分别代入 (9) 式, 即得到各 C/N 下的判决门限, 再用此门限对上述 Rayleigh 分布的随机序列 $\{s_i\}$ 进行量化, 即

$$e_i = 0, \quad s_i > B;$$

$$e_i = 1, \quad s_i \leq B.$$

就得到服从 Rayleigh 分布的 (0, 1) 序列。对此序列进行统计, 计算出 $G''(m)$ 和 P_b'' , 然后与第 3 节中的统计结果 $G'(m)$ 和 P_b' 值进行比较可见, 两种统计结果基本吻合 (见图 4), 只是在 C/N=40dB 时有较大偏差, 这主要是因为当 C/N 达到 40dB 以及大于此值后, 信道差错序列的分布规律已由 Rayleigh 分布向 Rice 分布过度, 此时信道已由严重衰落情况向一般衰落情况过渡, 因此仍采用 Rayleigh 分布的序列来检验就会导致较大偏差。总之, 我们所建立的自适应三状态 Markov 模型能够较准确地反映移动信道的误码特性, 是基本成功的。

5 结束语

移动信道的差错控制系统设计问题是当前数字移动通信系统实现高可靠传输所亟待解决的一大问题。对移动信道模型的研究将为纠错方案的选择和性能估计提供重要依据。如前所述，我们所研究和模拟的自适应三状态 Markov 模型能达到较高的精度要求，而且与一般简单分群的 Markov 模型相比，由于状态只取 3，又有计算简单、应用方便的优点。因此为移动信道模型的优化提供了一条重要而有效的技术途径。

参 考 文 献

- [1] 陶晓忠, 袁东风. 移动信道的自适应三状态 Markov 模型. 第二届全国青年通信学术会议论文集, 南京: 1991, H4.1-H4.4.
- [2] 袁东风, 吴开震. 山东大学学报, 1988, 23(4):34-42.
- [3] Otani K, *et al.* IEEE Trans.on VT, 1981, VT-30(4):156-160.

STUDY AND COMPUTER SIMULATION OF AN ADAPTIVE STATISTIC MODEL FOR MOBILE COMMUNICATION CHANNEL

Wang Duanyi Hu Zhengming

(*Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088*)

Abstract An adaptive statistic model for mobile communication channel is studied and simulated. According to the parameters of the model set up, an error sequence describing the long burst error characteristics of the mobile channel environment is generated on computer. A test method using threshold technique is presented to verify the accuracy of the adaptive channel model. The simulation results show that the adaptive Markov model with three states is more accurate and practical than the conventional mobile channel model and is a feasible scheme for optimization of mobile communication channel model.

Key words Mobile communication channel, Markov model, Error sequence, Computer simulation

王端怡：女，1959年生，博士生，现从事数字移动通信系统中的差错控制的研究工作。

胡正名：男，1931年生，教授，博士生导师，长期从事信号分析、编码和密码理论、数字移动通信系统和应用数学方法及其边沿交叉学科的研究工作。