

## 基于马尔可夫过程的卫星移动信道模型及长期预测方法

周 坡\* 曹志刚

(清华大学信息科学与技术国家实验室 北京 100084)

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**摘 要:** 卫星移动信道可被描述为基于有限状态马尔可夫过程的衰落模型, 该文分析了卫星信道的可预测性, 然后基于加权预测思想提出了一种卫星移动信道长期预测方法, 该方法在当前信道采样的基础上进行二次采样, 采样频率大于马尔可夫状态转移速率的 2 倍, 利用信道状态的相关性和信道状态转移概率信息来加权预测未来长期内的信道状态, 并依据自回归预测模型给出信道预测输出值, 仿真结果表明, 采用此方法对卫星信道未来的信道状态进行预测, 在信噪比较高时均方误差能够达到  $10^{-2}$  量级, 在自适应传输过程中可以降低系统平均误比特率, 且能够提高系统吞吐量性能, 这对卫星移动通信系统的自适应传输和自适应资源分配都具有一定的指导意义。

**关键词:** 卫星移动信道; 马尔可夫过程; 加权预测; 长期预测

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)12-2948-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00437

## Markov Process Based Satellite Mobile Channel Model and Long Term Prediction Method

Zhou Po Cao Zhi-gang

(National Laboratory of Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Satellite mobile channel can be described as a fading channel model based on Markov process. Firstly, the predictability of satellite mobile channel is analyzed in this paper. Then a long term prediction method is proposed based on weighting prediction. The method resamples the channel sample values with a sample rate 2 times of the Markov state transferring speed, and uses the correlation of the channel states and Markov state transfer probability to predict the future channel state and outputs the channel prediction value of the long term future according to autoregression prediction model. Simulation results show that by using the proposed method the mean square error can reach about  $10^{-2}$  when signal noise ratio is relatively high, moreover, the system average bit error rate can be reduced and the system throughput can be increased. This method can be used to instruct the adaptive transmission and adaptive resource assignment of satellite mobile communications.

**Key words:** Satellite mobile channel; Markov process; Weighting prediction; Long term prediction

### 1 引言

卫星移动通信系统<sup>[1]</sup>将作为 B3G 和 4G 地面无线移动通信系统的有力补充, 可以保证移动用户在全球范围内无缝漫游。地面无线移动通信的发展引领了卫星移动通信的发展方向。地面无线通信系统中的自适应传输技术是近年来的研究热点, 它依赖于对未来信道状态的预测<sup>[2-4]</sup>, 自适应调整终端调制阶数、编码码率以及传输功率等参数, 从而大大提高系统的频谱和功率效率。这种机制同样也可以应用于卫星移动通信系统。

卫星移动信道同时具有卫星信道和移动信道的特征, 存在着多径效应、阴影效应、多普勒频移以及电离层闪烁等严重影响着数字信号传输的因素。目前常用的描述卫星移动信道传输特性的统计概率模型包括 Loo 模型<sup>[5]</sup>, 文献[6]模型和文献[7]模型, 3 种模型都能够较好地反映信道传播特性。卫星信道模型中接收信号由直射信号(Line Of Sight, LOS)分量和多径信号分量叠加而成, 根据 LOS 分量和多径分量是否受到遮蔽影响得到接收信号包络的统计概率分布。近年来, 许多新的卫星移动信道模型能更加准确地反应信道特性, Fernando 等人<sup>[8]</sup>提出了一种基于马尔可夫过程的卫星移动信道模型, 根据 L 波段和 S 波段的实测数据给出了模型的统计参数,

2011-05-09 收到, 2011-07-18 改回

国家自然科学基金(61021001)和清华大学自主科研计划资助课题

\*通信作者: 周坡 zhou-p06@mails.tsinghua.edu.cn

能够适用于窄带和宽带系统；Liolis 等人<sup>[9]</sup>提出了一种用于多天线系统的卫星移动信道统计模型，对于多天线卫星移动通信系统的设计和性能评估十分有用。

相对于地面无线通信信道来讲，卫星信道具有大时延特性，当前的信道状态信息不能作为自适应传输的依据，同时也增加了卫星信道预测的难度。目前针对 L 或 S 波段卫星移动信道相关性进行分析和预测的相关文献较少，文献[10]讨论了在美军 MUOS<sup>[11]</sup>系统中的信道预测方法和自适应传输策略，指出在信道相干时间大于 0.5 s 时传统的信道预测方法就能够适用于 GEO (Geostationary Earth Orbit) 卫星自适应传输，并给出了基于最小二乘的信道长期预测方法，在信道多普勒较小且用户移动速度较小时此预测方法可以达到较好的预测效果。仿真分析中将本文方法与文献[10]中的方法做了对比。

本文第 2 节阐述了基于马尔可夫过程的卫星移动信道模型，第 3 节对卫星移动信道的可预测性进行了分析，并提出了基于加权马尔可夫的卫星移动信道预测方法，第 4 节给出的仿真数据表明此预测方法能够指导对卫星移动通信系统的自适应传输。

## 2 基于马尔可夫过程的卫星移动信道模型

卫星移动通信系统中接收信号可以表示为

$$c(t) = A_0 e^{j(2\pi f_0 t + \varphi)} + \sum_{m=1}^M A_m e^{j(2\pi f_m t + \varphi_m)} + s(t) \quad (1)$$

式中第 1 项为直射信号分量，直射信号分量在遮蔽环境中经历阴影衰落(慢衰落)， $A_0$ ,  $f_0$  和  $\varphi$  分别表示直射信号分量的幅度、多普勒频移和相位；式中第 2 项为多径分量，多径分量引起信号的快衰落， $A_m$ ,  $f_m$  和  $\varphi_m$  分别表示多径分量的幅度、多普勒频移和相位。 $s(t)$  为高斯白噪声。

用户在移动过程中在不同遮蔽情况下接收信号中的直射分量会经历完全不同的衰落，根据直射信号衰落深度的不同可以将卫星移动信道划分为 3 个状态：直射状态、中度遮蔽状态和深度遮蔽状态。相对来讲信道状态的变化是一个很慢的衰落过程，信道状态之间的转变由用户移动过程中的距离和仰角的变化决定，那么在用户移动过程中在给定的时刻或地点信道可被描述为一个一阶马尔可夫过程，如图 1 所示。其中  $S$  表示信道状态， $P$  表示信道状态的转移概率矩阵， $p_{ij}$  表示状态之间的转移概率， $C$  表示不同状态下信道输出观测值。

那么接收信号在信道中所经历的衰落反应到信道模型就是信道输出观测序列  $C$ ，在每个信道状态

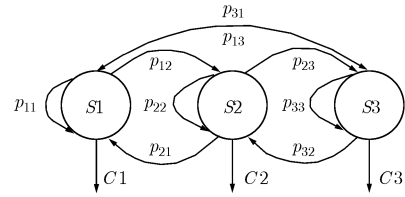


图 1 基于 3 状态马尔可夫过程的卫星移动信道模型示意图

下信道的输出观测值采用 Loo 分布<sup>[5]</sup>对直射信号分量和多径分量的幅度进行联合描述，其概率分布如式(2)：

$$p(r) = \frac{r}{b_0 \sqrt{2\pi d_0}} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{z} \exp \left[ -\frac{(\ln z - \mu)^2}{2d_0} - \frac{r^2 + z^2}{2b_0} \right] I_0 \left( \frac{rz}{b_0} \right) dz \quad (2)$$

其中  $\mu$  和  $d_0$  为直射信号分量的均值和标准方差， $b_0$  为多径分量的平均功率。 $I_0$  为修正的零阶贝塞尔函数。在不同的信道衰落状态下，Loo 分布的参数不同。 $\mu$  和  $d_0$  决定直射信号分量的慢衰落， $b_0$  决定多径引起的快衰落。这里用  $\alpha$  (dB)、 $\Psi$  (dB) 和  $MP$  (dB) 表示 Loo 分布的 3 个参数，其中  $\alpha = 20 \lg(e^\mu)$ ， $\Psi = 20 \lg(e^{\sqrt{d_0}})$ ， $MP = 10 \lg(2b_0)$ 。

## 3 卫星移动信道预测

### 3.1 卫星移动信道的可预测性

由前述卫星移动信道模型可知，卫星移动信道的衰落是由于信道受到遮蔽和多径两个主要原因造成。

遮蔽造成卫星移动信道大尺度衰落，进而根据衰落深度可以将卫星移动信道划分为 3 个状态，采用马尔可夫过程进行描述，此过程是一个缓慢的过程，用户移动过程中信道状态的保持约在 5 m 的距离<sup>[8]</sup>，根据用户移动的速度转换为时间来表示时如表 1 所示。从由遮蔽而形成不同信道状态的角度来讲，卫星移动信道的衰落状态是可预测的，并且能够满足卫星信道时延长达约 260 ms 时进行自适应传输的需求。

在不同的信道衰落状态，多径引起状态内的信号频率选择性衰落，衰落过程可以采用瑞利分布进行描述，相对于由遮蔽引起的大尺度衰落来讲此过

表 1 不同用户移动速度时信道参数

用户移动速度(km/h)	20	36	90	150
信道保持时间(ms)	900	500	200	120
最大多普勒频率(Hz)	27	48	121	202
相干时间(ms)	37	21	8.3	4.9

程是一个快衰落过程。多径信号在用户移动过程中会发生多普勒频移,造成信道的时延选择性衰落。多普勒频移越大,信道相干时间越短,变化越快,此时信道的相关性将决定信道短时内的可预测性。对于 GEO 卫星移动通信系统,卫星相对地面静止,此时信道的多普勒频移可以由式(3)来表示,其中  $\theta_e$  为用户当前所处位置的仰角,  $\theta_0$  为卫星和用户的连线在地面上的投影和用户移动方向之间的夹角。

$$f_d = f \frac{v}{c} \cos \theta_0 \cos \theta_e \quad (3)$$

以北京为例,  $f = 2$  GHz 时,当  $\theta_0 = 0$  时可得 GEO 卫星移动通信系统中的最大多普勒频移如表 1 所示。从表中可以看出,用户移动速度为 36 km/h 时信道的相干时间为 21 ms,从这个角度来看,采用传统的线性预测方法对卫星移动信道的短时预测值在卫星大时延特性下不能满足要求,需要寻求新的预测方法。

### 3.2 线性回归信道预测方法

传统的最小均方误差  $K$  阶线性回归预测器<sup>[2]</sup>可以表示为

$$\hat{c}(\tau) = \hat{c}_v = \sum_{j=0}^{K-1} d_j c_{-j} \quad (4)$$

其中  $\tau = vT_s$  ( $\tau > 0$ ) 是线性预测器的预测范围,  $c_{-j}$  为当前  $K$  阶线性预测器的观测序列,即信道接收信号的采样值,文献[2]指出在信道预测过程中信道接收信号的采样频率不小于接收信号最大多普勒频移的 2 倍,  $\hat{c}(\tau)$  为  $\tau$  时刻信道预测输出值,  $d_j$  为线性回归预测器的系数,而信道预测器的均方误差可以通过式(4)来表示,通过均方误差最小化可以得到线性回归预测器的系数  $d_j$ 。

$$E(|e(\tau)|^2) = 1 - \sum_{j=0}^{K-1} d_j r(\tau + jT_s) \quad (5)$$

其中  $r(t)$  为信道的自相关函数。随着预测范围  $\tau$  的增加,信道的相关性逐渐减小,预测所得的均方误差也就越来越大,同时需要注意的是信道观测序列的采样值须大于信道最大多普勒频移的 2 倍,而预测的信道值可以通过插值的方法与数据速率匹配。文献[2]中采用此预测方法可以预测约 10 ms 之后的信道值。可以看出,传统的线性回归预测方法并不适用于大时延卫星信道。

### 3.3 卫星移动信道长期预测方法

卫星移动信道的长时延特性决定信道预测必须是大范围的。卫星信道遮蔽效应引起的大尺度衰落使得信道状态在大范围内起伏,本文基于前述的 3 状态马尔可夫过程的卫星移动信道模型,提出一种卫星移动信道长期预测方法,此方法充分利用了卫

星移动信道的特点,采用加权预测思想<sup>[12]</sup>首先对卫星信道未来长期的信道状态进行预测,然后采用线性回归的预测方法给出未来信道状态的输出值。

$S = (s_i, i = 1, 2, 3)$  为卫星移动信道模型的状态空间,任意时刻  $t$  信道所处的状态  $q_t \in S$ , 其概率分布为式(2)所示。那么卫星移动信道可以由初始状态概率分布  $\pi$  和一步状态转移概率  $p_{ij}$  来描述,不同地面环境和纬度时  $\pi$  和  $p_{ij}$  由卫星移动信道实测数据统计得到<sup>[8]</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \pi_i &= p(q_t = s_i), \quad i = 1, 2, 3 \\ p_{ij} &= p(q_{t+1} = s_j | q_t = s_i), \quad i, j = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

假定 GEO 卫星移动信道中的最大多普勒频移为  $f_{dm}$ , 这里以  $f_s$  的信道采样率对信道进行观测,得到信道观测序列  $C = (c_n, n = 1, 2, \dots, N)$ 。此时假定信道的状态保持时间为  $T_h$ , 将信道观测序列进行二次采样,采样频率为  $f_c$ , 得到信道状态观测序列  $A = (a_m, m = 1, 2, \dots, M)$ 。序列  $A$  是反应用户移动过程中信道状态的变化随机变量,其各阶自相关系数描述了信道状态随用户移动的相关性。序列  $A$  的  $k$  阶自相关系数为

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{M-k} (a_t - u)(a_{t+k} - u)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{M-k} (a_t - u)^2 \sum_{t=1}^{M-k} (a_{t+k} - u)^2}} \quad (7)$$

其中  $u$  为信道观测序列  $C$  的期望值,假定这里需要计算的自相关系数的最大阶数为  $K$ , 则各阶自相关系数的归一化权重可表示为

$$w_k = |r_k| / \left| \sum_{k=1}^K |r_k| \right| \quad (8)$$

确定序列  $A$  中各值所处的信道状态,那么对于预测时刻  $t$  的信道状态,利用序列  $A$  中  $t$  时刻前  $K$  个值所处的信道状态作为初始状态,可以计算得到多步状态转移概率  $p_i^k(t)$ , 则  $t$  时刻的各信道状态预测概率为

$$p_i(t) = \sum_{k=1}^K w_k p_i^k(t), \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

那么  $\max\{p_i(t), i = 1, 2, 3\}$  所对应的信道状态即为  $t$  时刻的信道预测状态,此时取  $t$  时刻最可能出现的信道状态所对应的线性回归预测器模型对  $t$  时刻的信道值进行预测输出。其中各信道状态的线性回归预测器的系数为  $d_{ij}$ ,  $d_{ij}$  由观测序列  $C$  中处于信道  $i$  状态的观测值采用传统  $K$  阶线性回归的方法训练得到。取序列  $C$  中  $K$  个最新的观测值  $c_{-j}$  作为信道  $i$  状态下线性回归预测器的输入。则  $t$  时刻的信道预测值可以表示为

$$\hat{c}(t) = \delta_{qi} + \sum_{j=0}^{K-1} d_{ij}c_{-j} \quad (10)$$

序列  $C$  中  $K$  个最新的观测值  $c_{-j}$  处于信道状态  $q$ ，式中  $\delta_{qi}$  表示由信道状态  $q$  到  $t$  时刻信道状态  $i$  的加权值，表示不同信道状态时的信道期望值之差，此时信道预测输出值与序列  $A$  进行拟合输出该信道状态下的信道预测值。

此方法预测过程中充分利用了马尔可夫状态的转移概率和信道采样序列的相关特性。完整的卫星移动信道长期预测方法归纳如下：

步骤 1 划分卫星移动信道状态，根据当前卫星移动用户所处地理位置和地面环境取相应的信道状态初始概率分布  $\pi$  和状态转移概率  $p_{ij}$ ；

步骤 2 对卫星移动信道进行抽样得到采样序列  $C$  和  $A$ ，并确定  $A$  中各信道采样值所处的信道状态；

步骤 3 根据式(7)计算序列  $A$  的  $k$  阶自相关系数，并根据式(8)得到各阶自相关系数的归一化权重；

步骤 4 以序列  $A$  中采样值所处的信道状态为初始状态，计算经  $k$  步转移到达预测时刻  $t$  所处信道状态  $i$  的多步转移概率；

步骤 5 根据式(9)计算预测时刻  $t$  所处状态  $i$  的概率，并取概率最大的状态作为预测状态；

步骤 6 根据式(10)采用的自回归预测模型计算预测时刻  $t$  的信道预测值。

### 4 仿真分析

本节针对上述卫星移动信道长期预测方法进行仿真。卫星移动信道模型中信道状态依据遮蔽效应造成衰落的尺度进行划分为状态  $s1$ ,  $s2$  和  $s3$ 。信道模型中参数采用文献[8]中  $S$  频段实测数据统计结果，信道仿真参数如表 2 所示，选择郊区林荫环境的实测数据统计结果，卫星仰角为  $40^\circ$ ，此环境中信道能够反应典型的卫星移动应用场景，信道状态分布比较均匀，信道状态的转移相对频繁，更加有利

于对信道长期预测方法的仿真实验。表 2 中  $p_{ij}$  表示 3 个状态之间的统计转移概率，其中 3 个状态到自身的转移概率都约为 0.72，而在此环境中 3 个状态的稳定概率分布较为平均，同时可以看出，3 个状态下描述多径信号分量的参数  $MP$  相差并不大，也可以印证信道衰落状态的变化主要来自直射信号分量的变化。

基于表 2 给出的信道参数，图 2 给出了基于 3 状态马尔可夫过程卫星移动信道模型的概率密度分布曲线，横坐标对接收信号的幅度进行了归一化，

表 2 卫星移动信道仿真参数

卫星移动信道状态	$s1$	$s2$	$s3$
状态转移概率 $p_{ij}$	0.7193	0.1865	0.0942
	0.1848	0.7269	0.0883
	0.1771	0.0971	0.7258
稳定概率分布 $\pi_i$	0.3929	0.3571	0.25
$\alpha$	0.1	-1.0	-2.25
$\psi$	0.37	0.5	0.13
$MP$	-22.0	-22.0	-21.2

从图中可以看出，卫星移动信道接收信号的归一化幅度值在 0.12 时其概率密度约为 0.4。图 3 给出了信道接收信号采样相对于直射信号的功率值，直射信号功率固定，接收端信道采样速率为 500 Hz，信道状态保持时间为 100 ms，从图 3 可以看出信道接收信号采样相对于直射信号的功率值对应了信道衰落状态变化，与文献[8]中实测接收信号的对比中可以看出，此卫星信道模型能够较好地反映卫星移动信道衰落带来的信道状态变化。

基于此卫星信道模型，我们对提出的信道长期预测方法进行了仿真分析。仿真中用户移动速度、信道最大多普勒频移以及信道保持时间采用表 1 中给出的数据，信道采样速率  $f_s$  为 500 Hz，采样观测序列  $C$  长度为 10000(20 s 采样数据)，信道二次采

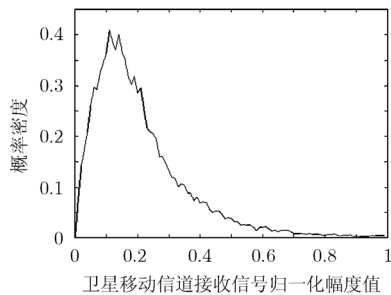


图 2 卫星移动信道模型概率密度分布

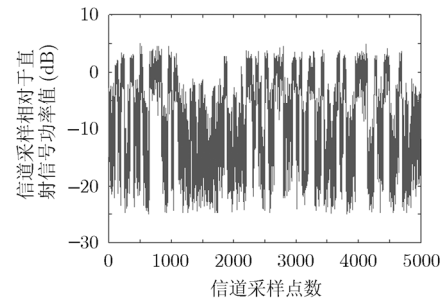


图 3 卫星移动信道模型信号接收功率

样速率  $f_c$  为 20 Hz, 采样观测序列  $A$  长度为 400。计算序列  $A$  中观测值  $K=10$  阶自相关函数。仿真分析中采用本文方法与文献[10]中的方法进行了比较。仿真中假定信道状态发生转移的时间为 100 ms, 通过仿真平均可得在不同信噪比情况下未来信道状态预测值均方误差情况如图 4 和图 5 所示, 均方误差表示为信道状态预测值与信道状态实际值之差平方的统计平均。图 4 中采用文献[2]中方法对 200 ms 信道状态信道进行长期预测时均方误差很大, 说明该方法不能用于卫星信道的长期预测。采用本文提出的长期预测方法和文献[10]中的预测方法对未来卫星移动信道状态进行预测, 用户移动速度为 90 km/h, 本文的方法在信噪比大于 6 dB 时 200 ms 预测输出值的均方误差可以达到约  $6 \times 10^{-2}$ , 300 ms 预测输出值的均方误差可以达到约  $6.5 \times 10^{-2}$ , 400 ms 预测输出值的均方误差可以达到约  $9 \times 10^{-2}$ 。图 4 中给出了采用文献[10]预测方法在用户速度 90 km/h 时 200 ms 的预测输出, 可以看出, 本文方法 200 ms 预测输出具有一定优势, 此时文献[10]预测方法的预测输出与本文方法 300 ms 预测输出的均方误差更加接近。图 5 中给出了本文方法在不同用户移动速度时和文献[10]预测方法在用户移动速度为 20 km/h 时 200 ms 信道预测输出值的均方误差, 可以看到用户移动速度在 20 km/h, 36 km/h 和 90 km/h 时两种方法的预测性能都比较接近, 而文献[10]预测方法在用户移动速度 20 km/h 时预测性能较本文预测方法具有少量优势, 这是由于在用户移动速度较小时信道状态的转移更少, 本文方法中的二次信道状态采样影响了部分性能。在 GEO 卫星系统中的信道传输时延约为 260 ms, 采用此信道长期预测方法接收端对未来 300 ms 的信道状态进行预测, 预测输出值通过回传信道到达接收端时信道预测值并不过期, 能够指导卫星移动通信系统的自

适应传输。

将此信道模型和预测方法运用到卫星移动通信自适应传输过程中, 采用简单的自适应传输策略, 用户接收端在信道状态处于  $s_1$  状态时系统采用 8PSK,  $s_2$  状态时采用 QPSK,  $s_3$  状态时采用 BPSK, 其它仿真条件不变, 仿真过程中未加入信道编码, 在用户速度为 90 km/h 时, 对用户接收端 300 ms 信道输出值进行预测, 并根据信道输出值进行调制方式自适应选择, 固定传输符号速率, 可得系统的平均误比特率性能和吞吐量性能如图 6 和图 7 所示。图 6 中给出了系统只采用 BPSK, QPSK 和 8PSK 时以及采用信道预测和自适应传输时的系统平均误比特性能, 在平均信噪比较低时, 系统平均误比特性能接近于只采用 BPSK 的性能, 当信噪比较高时, 由于系统选择高阶调制方式系统误比特性能略高于 BPSK 的性能。图 7 中给出了在不同信道平均信噪比时每符号传输的平均比特数, 这也反应了系统的吞吐量性能, 可以看到信噪比大于 15 dB 时每符号传输的平均比特数大于 2 bit, 随着信噪比的不断增加每符号传输的平均比特数将趋近于 3。

## 5 小结

本文介绍了基于马尔可夫过程的卫星移动信道模型, 并在此基础上分析了卫星信道的可预测性, 指出传统的信道预测方法并不能适用于卫星系统中, 而利用卫星信道的相关性和信道状态转移概率信息可以对长期卫星信道状态进行预测, 基于加权预测的思想提出了一种卫星移动信道长期预测方法, 在得到未来卫星移动信道的状态后通过自回归模型给出当前卫星信道状态下的最大概率输出值。仿真分析表明, 此方法能够用于卫星移动通信系统的自适应传输和自适应资源分配。

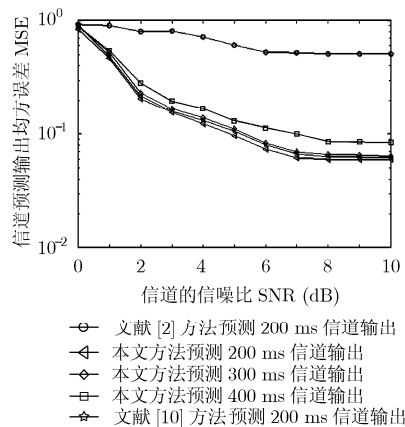


图 4 用户速度为 90 km/h 时信道预测结果

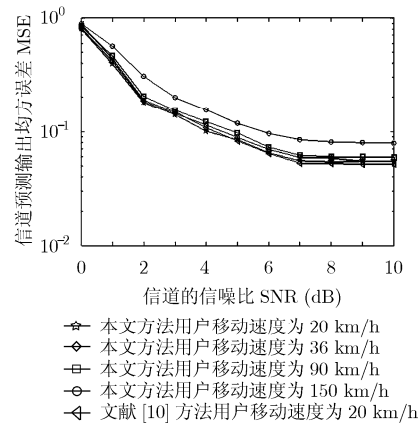


图 5 不同用户速度时 200 ms 信道预测结果

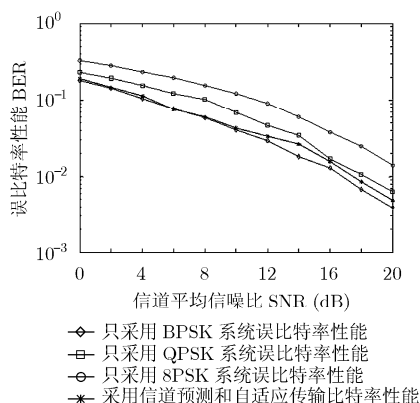


图 6 系统平均误比特性能

## 参 考 文 献

- [1] Chini P, Giambene G, and Kota S. A survey on mobile satellite systems[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2010, 28(1): 29-57.
- [2] Duel-Hallen A, Hu Sheng-quan, and Hallen H. Long-range prediction of fading signals[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2000, 17(3): 62-75.
- [3] Luong Dinh-Dung, Gregoire J C, and Dziong Z. Pattern-based channel quality prediction for adaptive coding and modulation in wireless networks[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Cape Town, South Africa, May 23-27, 2010: 1-6.
- [4] Heidari A, Khandani A K, and McAvoy D. Adaptive modeling and long-range prediction of mobile fading channels[J]. *IET Communications*, 2010, 4(1): 39-50.
- [5] Loo C. A statistical model for land mobile satellite link[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1985, 34(3): 122-127.
- [6] Corazza G E and Vatalaro F. A statistical model for land mobile satellite channels and its application to nonstationary orbit systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1994, 43(3): 738-742.
- [7] Lutz E, Cygan D, Dippold M, et al. The land mobile satellite communication channel-recording, statistical and channel model[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, 40(2): 375-386.

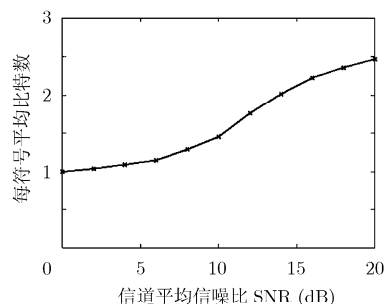


图 7 每符号传输的平均比特数

- [8] Fernando P F, Maryan V C, Cabado C E, et al. Statistical modeling of the LMS channel[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2001, 50(6): 1549-1567.
- [9] Liolis K P, Gómez-Vilardebó J, Casini E, et al. Statistical modeling of dual-polarized MIMO land mobile satellite channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(11): 3077-3083.
- [10] Satorius E H and Zhong Ye. Adaptive modulation and coding techniques in MUOS fading/scintillation environments[C]. *Proceedings of the IEEE Military Communication Conference*, Anaheim, USA, Oct. 7-10, 2002: 321-327.
- [11] Samuel J M, Christopher J K, Reuben E E, et al. Geosynchronous Satellites for MUOS. [http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile\\_User\\_Objective\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_User_Objective_System), 2011. 4.
- [12] 刘震, 王厚军, 龙兵, 等. 一种基于加权隐马尔可夫的自回归状态预测模型[J]. *电子学报*, 2009, 37(10): 2113-2118.  
Liu Zhen, Wang Hou-jun, Long Bing, et al. Research on condition trend prediction based on weighed hidden Markov and autoregressive model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(10): 2113-2118.

周 坡：男，1979 年生，博士生，研究方向为卫星通信、移动通信。

曹志刚：男，1939 年生，教授，博士生导师，研究方向为卫星通信、无线通信等。