

## 三状态 Markov 陆地移动卫星信道模型

王 昕 戚晨皓

(东南大学信息科学与工程学院, 南京, 210096)

**摘要:** 为克服单一状态无法充分体现实际卫星信道传播特性的缺点, 本文研究了三状态 Markov 陆地移动卫星信道的建模方法, 首次基于该信道模型进行了误符号率 (Symbol error rate, SER) 性能仿真。在该建模方法中, 每个状态服从不同参数的 Loo 分布, 状态之间的转移服从 Markov 随机过程。此外, 本文还基于该信道模型进行了 SER 性能仿真, 对比了 S 波段、仰角  $40^\circ$  和正交相移键控下中度树阴影和郊区环境的 SER, 发现 SER 性能的好坏主要取决于卫星信道直视分量的强弱, 当直视分量受到重度遮蔽时, 为了补偿 SER 损失需额外的 3~5 dB 信噪比。另外, 中度树阴影环境相比于郊区环境, 为达到相同的 SER=0.01 的性能, 要多消耗约 5 dB 的信噪比。本文的研究工作有助于研究卫星通信传输技术及其工程应用。

**关键词:** 陆地移动卫星; 信道建模; Markov 过程; Loo 模型

**中图分类号:** TN927.23      **文献标志码:** A

### Three-State Markov Model of Land Mobile Satellite Channel

Wang Xin, Qi Chenhao

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

**Abstract:** To overcome the shortcoming that the single-state channel modeling method cannot sufficiently reflect the practical propagation of satellite channel, a three-state Markov modeling method for land mobile satellite channel is presented. In particular, it is the first time to simulate the symbol error rate (SER) performance based on the presented channel model. Each state of the three-state Markov channel model obeys the Loo distribution with different parameters; while the state transition is modeled as Markov random process. The SER comparisons using the presented channel model are simulated independently for the intermediate tree shadowed scenario and suburban scenario in S band, elevation of  $40^\circ$  and quadrature phase shift keying (QPSK) modulation. The simulation results show that SER performance is mainly determined by the strength of the line-of-sight component. In case of heavy shadow, additional signal to noise ratio (SNR) of 3—5 dB is needed to compensate the SER loss. In addition, in order to achieve the same SER=0.01 performance, the intermediate tree shadowed scenario needs extra about 5 dB SNR compared to suburban scenario. The work is contributed to the research of satellite communication techniques and the engineering application therein.

**Key words:** land mobile satellite; channel modeling; Markov process; Loo model

## 引言

无线通信技术的快速发展和智能终端的迅速普及使得人们对移动数据业务的需求日益增加。地面移动通信系统受基站覆盖区域所限,往往架设在人口密集的城市,很难在边远山区、沙漠戈壁、森林和海洋等地区实现信号全覆盖。要实现真正意义上的通信信号全覆盖,必须借助于卫星通信系统<sup>[1,2]</sup>。陆地移动卫星通信是卫星通信和移动通信相结合的产物,其典型的特征是利用地球静止轨道卫星或中、低轨卫星作为通信的信号源或中继,向其覆盖区域乃至全球范围内的用户提供移动通信业务。卫星系统已成为继互联网和通信之后的第3个信息技术增长点<sup>[3]</sup>。

目前,中国的移动卫星系统和国际上已经发展成熟的移动卫星系统,如铱星系统、全球星系统、亚瑟拉系统、亚洲蜂窝卫星系统和海事卫星系统相比,还不够完善<sup>[4]</sup>。航空、海事、搜救和应急支援等在很大程度上还依赖于国外的卫星系统。因此,国家制定了一系列与卫星通信相关的规划及政策,将发展中国自身的移动卫星通信技术作为重要内容之一。2016年8月6日,中国首颗移动通信卫星——“天通一号”成功在西昌卫星发射中心发射,该星采用S频段,信号传输损耗小,可实现地面终端小型化,便于携带。另外天通一号卫星还可与地面4G网络无缝切换。

相对地面移动通信系统而言,移动卫星通信的信道具有特殊性,在大部分时间内卫星和移动台之间存在直射分量;由于建筑物和树木等物体的遮蔽,存在阴影效应;由于信号的反射、散射和绕射造成的多径效应;由于卫星和移动台间的相对运动形成的多普勒效应。因此,移动卫星信道主要受到多径效应、阴影效应和多普勒效应等影响<sup>[5]</sup>。目前,典型的卫星移动通信信道传播特性的概率分布模型有Loo模型<sup>[6]</sup>、Corazza模型<sup>[7]</sup>和Lutz模型<sup>[8]</sup>。Loo模型认为接收信号是由受阴影遮蔽的直视分量和不受阴影遮蔽的多径分量组成,因此该模型又称为部分阴影模型。Corazza模型假定Loo模型中的直视分量和多径分量受到相同程度阴影遮蔽的影响,因此又称为全阴影模型。上述模型只包含了单一的统计信道状态,只能模拟一种信道状态。Lutz教授在1991年提出了两状态Markov信道模型的研究方法,可模拟两种卫星信道状态,但忽略了直视分量受阴影遮蔽的影响,具有一定的局限性。

Loo模型的主要优点是其仿真实现较为简单。Loo模型起初被提出时,适合描述空旷地、郊区的环境,但是通过信道参数的改变,Loo模型也可以仿真实现城市等人口较为密集的地区。另外,Loo模型在DVB-SH标准里被广泛应用并证实,因此,本文基于Loo模型,研究了三状态Markov陆地移动卫星信道的建模方法,首次对该信道模型进行了误符号率(Symbol error rate, SER)性能仿真,为陆地移动卫星通信技术的研究提供了依据。在该信道建模方法中,每个状态服从不同参数的Loo分布,状态之间按一定的转移概率切换。本文建立的三状态一阶Markov模型充分利用了混合卫星信道的优点,较真实地还原了不同环境、不同仰角和不同频段下的陆地移动卫星信道。此外,本文还对建立的信道模型进行仿真,对比了不同参数条件下的SER性能。

## 1 陆地移动卫星信道传播特性

近年来,卫星移动通信的信道建模和传输技术已成为研究热点之一。陆地移动卫星通信系统主要包含一颗或多颗通信卫星、地面手持或车载等类型的移动终端以及若干控制中心和信关站。如图1所示,地球同步卫星与地面移动终端进行通信,信道兼具卫星信道和移动信道的特征,信号传输过程中存在阴影效应、多径效应和多普勒效应等,对卫星信号传输质量造成了严重影响。

### 1.1 阴影效应

信号在传播路径上遇到障碍物或遮蔽物如建筑群、高山和丛林等阻挡时,会有部分能量被吸收或发生散射,导致直视分量能量降低,信号强度受到不同程度的损耗,使得接收信号的幅度在一定范围内产

生起伏,从而产生阴影衰落,称为大尺度衰落或慢衰落,该阴影效应如图 1 所示。阴影衰落的包络服从对数正态分布,概率密度函数为

$$p(z) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2\sigma_L^2}} \quad z \geq 0 \quad (1)$$

式中: $\mu$  和  $\sigma_L^2$  分别为直视分量幅度的对数均值和对数方差。

### 1.2 多径效应

信号经历陆地移动卫星信道从发送端到接收端的传输过程中,由于大气中的各种微粒和不同气体、地面上的植物、建筑、起伏地形和水面等因素,造成传输信号的反射、绕射、衍射和色散效应,使接收到的信号并不是单一路径的,而是多条不同幅度、时延和相位的多条路径的叠加,从而造成多径衰落,如图 1 所示,这种衰落被称为小尺度衰落或快衰落。多径衰落的包络通常服从瑞利分布,概率密度函数为

$$p(w) = \frac{w}{\sigma_{NL}^2} e^{-\frac{w^2}{2\sigma_{NL}^2}} \quad z \geq 0 \quad (2)$$

其中, $\sigma_{NL}^2$  为多径分量的平均功率。

### 1.3 多普勒效应

当卫星与移动终端存在相对运动时,移动终端收到的信号频率会发生偏移,产生多普勒频偏。多普勒频偏对采用相干解调、依赖于准确信道状态信息的数字通信系统危害较大。在载频处的多普勒频偏表示为<sup>[9]</sup>

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

式中: $\theta_0$  为卫星移动终端连线在地面投影与移动终端运动方向之间的夹角, $\theta_e$  为移动终端的仰角, $v$  为移动终端的速度,如图 1 所示。当终端移动速度较快时,多普勒频偏较大,而信道的相干时间短,信道变化快,此时终端移动带来的负面影响不可忽略。

## 2 三状态 Markov 卫星信道建模方法

陆地移动卫星信道通常由直视分量和多径分量叠加而成。由于终端在移动过程中受到的阴影遮蔽不同,所以直视分量会经历不同程度的衰落,用一种状态例如莱斯分布或者瑞利分布来描述移动卫星信道显然是不完善的。多状态模型具有动态性、适应性等优点,尤其适于描述处于不断变化的陆地移动卫星信道。本文基于 Loo 模型,研究三状态 Markov 陆地移动卫星信道的建模方法。在该方法中,每个状态服从不同参数的 Loo 分布,状态之间的转移由一阶 Markov 过程描述。

### 2.1 Loo 模型

Loo 模型假设卫星信道冲激响应由直视分量部分和多径分量部分共同构成<sup>[6,10]</sup>,即

$$h = h_L + h_{NL} = |h_L| e^{j\phi_L} + |h_{NL}| e^{j\phi_{NL}} \quad (4)$$

式中: $|h_L|$  和  $\phi_L$  分别为直视分量的包络和相位, $|h_{NL}|$  和  $\phi_{NL}$  分别为多径分量的包络和相位, $\phi_L, \phi_{NL}$  独立服从  $[0, 2\pi]$  内的均匀分布,直视分量的包络  $z \triangleq |h_L|$  主要受阴影衰落影响,服从式(1)描述的对数正态分布。多径分量的包络  $w \triangleq |h_{NL}|$  主要受多径衰落影响,服从式(2)描述的瑞利分布,因此卫星信道  $h$  的包络为

$$r = \sqrt{z^2 + w^2} \quad z, w \geq 0 \quad (5)$$

考虑到大尺度衰落相对于小尺度衰落更加稳定,假设  $z$  相对  $w$  保持恒定,则  $r$  的条件概率密度函数

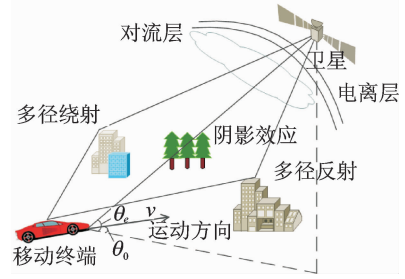


Fig. 1 陆地移动卫星信道示意图  
Fig. 1 Diagram of land mobile satellite channel

服从莱斯分布,即

$$p(r | z) = \frac{r}{b_0} e^{-\frac{r^2+z^2}{2b_0}} I_0\left(\frac{rz}{b_0}\right) \tag{6}$$

式中:  $b_0$  为多径的平均散射功率,即式(2)的  $\sigma_{NL}^2$ ,  $I_0$  为第一类零阶修正贝塞尔函数。则  $r$  的概率密度函数为

$$p(r) = \int_0^\infty p(r, z) dz = \int_0^\infty p(r | z) p(z) dz \tag{7}$$

将式(6)和式(1)代入式(7),得到

$$p(r) = \frac{r}{b_0 \sigma_L \sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{1}{z} e^{-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2\sigma_L^2} - \frac{r^2+z^2}{2b_0}} I_0\left(\frac{rz}{b_0}\right) dz \tag{8}$$

按照行业习惯,通常用以下变量描述 Loo 分布的 3 个参数分别为

$$\alpha = 20 \log_{10}(e^\alpha) \tag{9}$$

$$\psi = 20 \log_{10}(e^\psi) \tag{10}$$

$$MP = 10 \log_{10}(2b_0) \tag{11}$$

式中:  $\alpha$  为直视分量的衰减,以 dB 为单位;  $\psi$  为直视分量的标准差,以 dB 为单位; MP 为多径的平均功率,以 dB 为单位。

### 2.2 三状态 Markov 过程

陆地移动卫星信道不同状态之间的转移是一个相对慢变的过程,主要由终端移动过程和仰角的变化决定。根据直视分量衰落的不同程度将移动卫星信道划分成 3 个状态:(1)直视状态;(2)中度遮蔽状态;(3)重度遮蔽状态。

信道不同状态之间的转移过程可以描述成一个三状态一阶 Markov 过程,如图 2 所示。  $S_1, S_2, S_3$  分别表示不同的信道状态,  $p_{ij}$  表示从状态  $i$  转到状态  $j$  之间的转移概率,且  $0 \leq p_{ij} \leq 1$ ,

$\sum_{j=1}^3 p_{ij} = 1$ 。状态之间的转移由信道状态转移概率矩阵  $\mathbf{P}$  描述,为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}$$

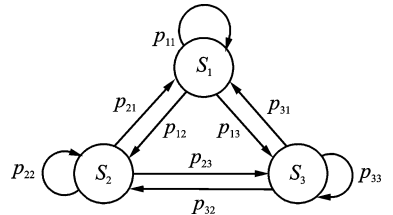
当三状态之间的转移达到稳定时,有

$$\mathbf{wP} = \mathbf{w} \tag{13}$$

式中:稳态概率向量  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3]$ ,满足  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。由于这个 Markov 链是非周期、不可约的,所以稳态分布存在,且等于状态分布。

三状态 Markov 模型因其能动态反映信道的变化过程,而不是使用一种信道模仿单一的信道状态,因此在卫星信道仿真中受到了广泛应用。文献[11]给出了窄带传输条件下,不同环境和不同仰角、S 波段的陆地移动卫星信道三状态模型的仿真参数。文献[12]提出了一种陆地移动卫星信道统计模型,文中分别给出了窄带、宽带条件下,不同环境和不同仰角条件下,S 波段、L 波段和 Ka 波段的陆地移动卫星信道三状态模型的仿真参数。文献[13]利用三状态模型研究了不同天气情况下卫星信道的传播特性。本文基于文献[11,12]里提供的三状态 Markov 模型的相关参数,研究三状态 Markov 陆地移动卫星信道的建模方法。

S 波段中度树阴影环境和郊区环境下,不同仰角对应的  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{w}$  取值分别如表 1 和表 2 所示<sup>[12]</sup>。实际上,信道状态个数的选取与卫星信道变化范围有关,卫星信道动态变化越大,信道状态个数选取的越多,越能描述信道的变化特性,但也造成了系统复杂度的升高。因此,信道状态个数和系统复杂度之间是一个折中关系。



(12) 图 2 三状态 Markov 过程转移示意图  
Fig. 2 Diagram of transition of three-state Markov process

表 1 中度树阴影环境下不同仰角对应的  $P$  和  $w$  值

Tab. 1  $P$  and  $w$  for various elevations in intermediate tree shadowed area

仰角	$P$	$w$
40°	$\begin{bmatrix} 0.719\ 3 & 0.186\ 5 & 0.094\ 2 \\ 0.184\ 8 & 0.726\ 9 & 0.088\ 3 \\ 0.177\ 1 & 0.097\ 1 & 0.725\ 8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.392\ 9 \\ 0.357\ 1 \\ 0.250\ 0 \end{bmatrix}$
60°	$\begin{bmatrix} 0.767\ 5 & 0.232\ 5 & 0.000\ 0 \\ 0.232\ 5 & 0.767\ 5 & 0.000\ 0 \\ 0.224\ 9 & 0.138\ 1 & 0.637\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.0 \end{bmatrix}$
70°	$\begin{bmatrix} 0.736\ 9 & 0.121\ 6 & 0.141\ 5 \\ 0.202\ 4 & 0.662\ 0 & 0.135\ 6 \\ 0.194\ 7 & 0.032\ 2 & 0.773\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.428\ 5 \\ 0.190\ 5 \\ 0.381\ 0 \end{bmatrix}$
80°	$\begin{bmatrix} 0.735\ 1 & 0.209\ 7 & 0.055\ 2 \\ 0.200\ 6 & 0.750\ 1 & 0.049\ 3 \\ 0.192\ 9 & 0.120\ 3 & 0.686\ 8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.428\ 5 \\ 0.428\ 5 \\ 0.143\ 0 \end{bmatrix}$

表 2 郊区环境下不同仰角对应的  $P$  和  $w$  值

Tab. 2  $P$  and  $w$  for various elevations in suburban area

仰角	$P$	$w$
40°	$\begin{bmatrix} 0.817\ 7 & 0.171\ 5 & 0.010\ 8 \\ 0.154\ 4 & 0.799\ 7 & 0.045\ 9 \\ 0.140\ 0 & 0.143\ 3 & 0.716\ 7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.454\ 5 \\ 0.454\ 5 \\ 0.091\ 0 \end{bmatrix}$
60°	$\begin{bmatrix} 0.801\ 9 & 0.131\ 4 & 0.066\ 7 \\ 0.138\ 6 & 0.759\ 6 & 0.101\ 8 \\ 0.124\ 2 & 0.103\ 2 & 0.772\ 6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.333\ 3 \\ 0.266\ 7 \end{bmatrix}$
70°	$\begin{bmatrix} 0.801\ 9 & 0.131\ 4 & 0.066\ 7 \\ 0.136\ 8 & 0.759\ 6 & 0.101\ 8 \\ 0.124\ 2 & 0.103\ 2 & 0.772\ 6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.333\ 3 \\ 0.266\ 7 \end{bmatrix}$
80°	$\begin{bmatrix} 0.716\ 8 & 0.171\ 9 & 0.111\ 3 \\ 0.053\ 5 & 0.800\ 1 & 0.146\ 4 \\ 0.039\ 1 & 0.143\ 7 & 0.817\ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.142\ 8 \\ 0.428\ 6 \\ 0.428\ 6 \end{bmatrix}$

S 波段下,不同环境、不同仰角下和不同状态对应的 Loo 模型的参数由文献[12]所得,文献[12]的数据是基于欧洲航天局实际的陆地移动卫星测量数据,如表 3 所示。

表 3 S 波段 Loo 模型参数

Tab. 3 Parameters of Loo channel model in S band

环境	仰角/ (°)	状态 1:直视			状态 2:中度遮蔽			状态 3:重度遮蔽		
		$\alpha$ /dB	$\psi$ /dB	MP/dB	$\alpha$ /dB	$\psi$ /dB	MP/dB	$\alpha$ /dB	$\psi$ /dB	MP/dB
开阔地	40	0.1	0.37	-22.0	-1.0	0.5	-22.0	-2.25	0.13	-21.2
	60	0.0	0.12	-24.9	-0.7	0.12	-26.1	-1.4	0.25	-23.1
	70	-0.1	0.25	-22.5	-0.5	0.28	-24.5	-0.75	0.37	-23.24
	80	0.1	0.16	-22.4	-0.4	0.15	-23.5	-0.72	0.27	-22.0
郊区	40	-1.0	0.5	-13.0	-3.7	0.98	-12.2	-15.0	5.9	-13.0
	60	-0.3	0.91	-15.7	-2.0	0.5	-13.0	-3.8	0.34	-13.2
	70									
	80	-0.4	0.58	-13.7	-2.5	0.2	-16.0	-4.25	3.0	-25.0
中度树阴影	40	-0.4	1.5	-13.2	-8.2	3.9	-12.7	-17.0	3.14	-10.0
	60	-0.2	0.75	-14.0	-3.1	1.9	-15.5			
	70	-0.8	0.75	-10.0	-3.3	1.1	-10.75	-7.7	2.9	-10.2
	80	-0.6	1.87	-9.25	-2.5	1.55	-10.0	-4.6	2.0	-13.4
重度树阴影	40				-10.1	2.25	-10.0	-19.0	4.0	-10.0
	60				-7.7	4.0	-10.1	-10.8	2.7	-10.0
	70				-4.5	4.6	-12.1	-7.5	2.0	-7.0
	80	-0.9	3.0	-9.1	-3.1	3.4	-9.0	-8.0	5.0	-7.0
城区	40	-0.3	0.73	-15.9	-8.0	4.5	-19.2	-24.4	4.5	-19.0
	60	-0.35	0.26	-16.0	-6.3	1.4	-13.0	-15.2	5.0	-24.8
	70	-0.5	1.0	-19.0	-5.6	1.2	-10.0	-12.3	4.1	-16.0
	80	-0.25	0.87	-21.7	-6.6	2.3	-13.0	-11.0	8.75	-24.2

### 2.3 三状态 Markov 信道模型参数

#### (1) 直视分量相干距离

直视分量相干距离用于描述卫星信道直视分量在给定状态下的变化过程,表征了直视分量服从的对数正态分布的变化快慢。将直视分量相干距离表示为  $L_d$ 。当直视分量采样值的间隔大于  $L_d$  时,可认为它们之间是互不相关的,即每隔  $L_d$  随机生成一个服从对数正态分布的直视分量样本。为了更好地模拟卫星信道直视分量不同状态之间的变化,  $L_d$  通常取  $1\sim 3\text{ m}$ <sup>[11]</sup>。

#### (2) 多径分量相干距离

多径分量相干距离用于描述卫星信道多径分量在给定状态下的变化过程,表征了多径分量服从的瑞利分布的变化快慢。将多径分量相干距离表示为  $L_m$ 。当多径分量采样值的间隔大于  $L_m$  时,可认为它们之间是互不相关的,即每隔  $L_m$  随机生成一个服从瑞利分布的多径分量样本。通常取  $L_m$  为  $\lambda/8\sim\lambda/10\text{ m}$ <sup>[12]</sup>,等效于多径分量相干时间为  $\lambda/(8v)\sim\lambda/(10v)\text{ s}$ ,即每隔  $\lambda/(8v)\sim\lambda/(10v)\text{ s}$  随机生成一个服从瑞利分布的多径分量样本,其中  $\lambda$  为卫星信号的波长,  $v$  为终端的移动速度。

#### (3) 状态帧长度

状态帧长度用于描述三状态 Markov 信道模型中每个状态的变化过程。将状态帧长度表示为  $L_f$ ,则每个状态的最小持续时间为  $L_f/v$ ,即每隔  $L_f/v$  后进行一次状态更新,生成一个新的状态样本。

实际上,每个状态的具体持续时间由式(12)描述的状态转移概率  $p_{ij}$  决定。状态  $S_i$  持续  $N$  个状态样本(对应于持续时间  $NL_f/v$ )不发生转移的概率为  $p_{ii}^{N-1}(1-p_{ii})$ 。

不同波段、不同环境、不同仰角和不同状态下的  $L_f$  值各不相同,文献[14]中采用统一  $L_f=7.5\text{ m}$ ,文献[11]具体给出了 S 波段不同环境、不同仰角和不同状态下的  $L_f$  值。

## 3 仿真实验

地球同步卫星与地面移动终端的通信通常工作于 S 波段。假设卫星工作频率  $f=2.2\text{ GHz}$ 。卫星信道直视分量相干距离设置为  $L_d=1.5\text{ m}$ ,多径分量相干距离设置为  $L_m=\lambda/10=0.0136\text{ m}$ ,状态帧长度  $L_f=5\text{ m}$ <sup>[15]</sup>。仿真中直视分量相干距离的采样点按照三次样条插值与多径分量相干距离的采样点进行匹配。仿真时卫星仰角选取  $40^\circ$ 。变化角度可能对仿真结果的具体数值有一定影响。例如增大卫星仰角,信号受到遮蔽的可能性减小,信道衰落减小,相应的 SER 也会降低。

(1) 卫星仰角取  $40^\circ$ ,环境设置为中度树阴影。查表 1 可得到状态转移概率矩阵  $\mathbf{P}$  和稳态概率向量  $\mathbf{w}$  分别为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.7193 & 0.1865 & 0.0942 \\ 0.1848 & 0.7269 & 0.0883 \\ 0.1771 & 0.0971 & 0.7258 \end{bmatrix}, \mathbf{w} = [0.3929, 0.3571, 0.25]$$

其中,状态 1 为直视状态,状态 2 为中度遮蔽状态,状态 3 为重度遮蔽状态。查表 3 可得到直视分量衰减  $\alpha$ 、直视分量标准差  $\phi$  和多径平均功率 MP 的取值,如表 4 所示。

表 4 仰角  $40^\circ$  中度树阴影的 Loo 模型参数

Tab. 4 Loo model parameters for intermediate tree shadowed area with elevation of  $40^\circ$

状态	$\alpha/\text{dB}$	$\phi/\text{dB}$	MP/dB
状态 1	-0.4	1.50	-13.2
状态 2	-8.2	3.90	-12.7
状态 3	-17.0	3.14	-10.0

利用以上参数对卫星信道包络的状态转移过程进行仿真,如图 3 所示,状态 2 持续了  $10\text{ m}$ ,转移到

状态 1;状态 1 持续了 20 m,转移到状态 3;状态 3 持续了 15 m。不难发现,状态 3 的信道包络变化较状态 2 和状态 1 更频繁,因为状态 3 信道直视分量受到重度遮蔽,信道条件更加恶劣。

针对以上 3 种不同的卫星信道状态,仿真了不同信噪比(Signal to noise ratio,SNR)条件下的 SER,采用正交相移键控(Quadrature phase shift keying,QPSK)调制,仿真 20 000 次后取平均,得到的仿真结果如图 4 所示。作为对比,这里也给出了方差与状态 3 相同的-10 dB 的瑞利信道下的 SER。可见状态 1 的 SER 显著优于状态 2 和状态 3;为了实现相同的 SER=0.01,状态 1 相比于状态 2 能节省约 3dB 的 SNR。另外,状态 3 的 SER 性能与瑞利信道十分接近,说明 SER 性能主要取决于信道直视分量的强弱,而重度遮蔽状态下信道直视分量很小,对卫星通信性能的提升十分有限,为了补偿重度遮蔽下的 SER 损失需要额外的 3~5 dB 的 SNR。

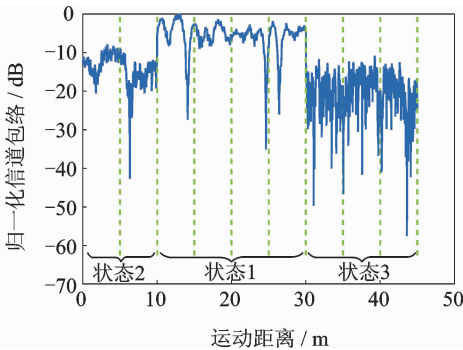


图 3 仰角 40°中度树阴影环境的信道状态转移过程  
Fig. 3 Channel state transition for intermediate tree shadowed area with elevation of 40°

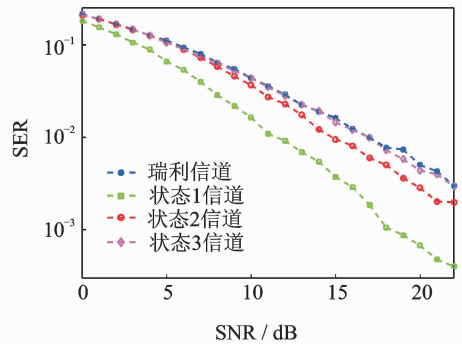


图 4 仰角 40°中度树阴影的 SER 性能对比  
Fig. 4 SER comparisons for intermediate tree shadowed area with elevation of 40°

(2)卫星仰角取 40°,环境设置为郊区。查表 2 可得到状态转移概率矩阵  $\mathbf{P}$  和稳态概率向量  $\mathbf{w}$  分别为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.8177 & 0.1715 & 0.0108 \\ 0.1544 & 0.7997 & 0.0459 \\ 0.1400 & 0.1433 & 0.7167 \end{bmatrix}, \mathbf{w} = [0.4545, 0.4545, 0.091]$$

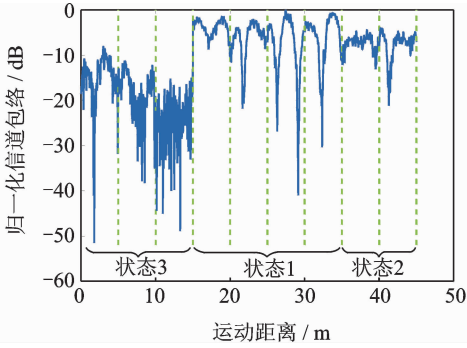
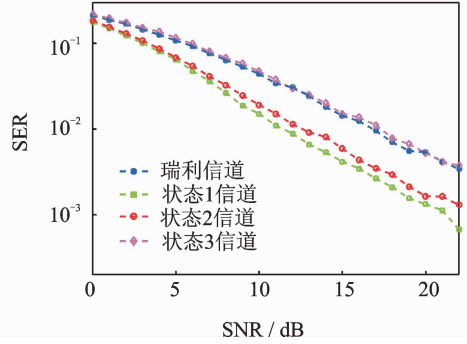
其中,状态 1 为直视状态,状态 2 为中度遮蔽状态,状态 3 为重度遮蔽状态。查表 3 可得到直视分量衰减  $\alpha$ 、直视分量标准差  $\psi$  和多径平均功率 MP 的取值,如表 5 所示。

表 5 仰角 40°郊区 Loo 模型参数

Tab. 5 Loo model parameters for suburban area with elevation of 40°

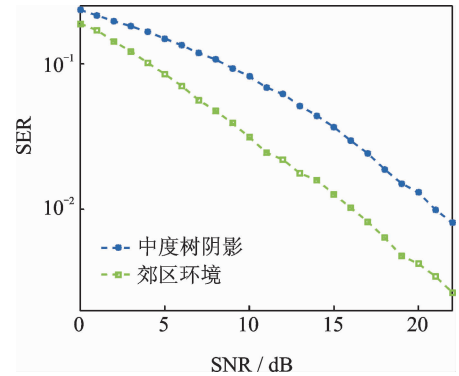
状态	$\alpha$ /dB	$\psi$ /dB	MP/dB
状态 1	-1	0.50	-13.0
状态 2	-3.77	0.98	-12.22
状态 3	-15	5.90	-13.0

利用以上参数对卫星信道包络的状态转移过程进行仿真,如图 5 所示,状态 3 持续了 15 m,转移到状态 1;状态 1 持续了 20 m,转移到状态 2;状态 2 持续了 10 m。针对这 3 种不同的卫星信道状态,仿真了不同 SNR 条件的 SER,采用 QPSK 调制,仿真 20 000 次后取平均,得到的仿真结果如图 6 所示。作为对比,这里也给出了方差与状态 3 相同的-13 dB 瑞利信道下的 SER。可见,状态 1,2 的 SER 显著优于状态 3,为实现相同的 SER=0.01,状态 1 相比于状态 3 能节省约 5 dB 的 SNR,状态 2 相比于状态 3

图5 仰角  $40^\circ$  郊区的信道状态转移过程Fig. 5 Channel state transition for suburban area with elevation of  $40^\circ$ 图6 仰角  $40^\circ$  郊区的 SER 性能对比Fig. 6 SER comparisons for suburban area with elevation of  $40^\circ$ 

能节省约 3 dB 的 SNR,说明为了提高 SER 性能,状态 3 需付出额外 3~5 dB 的 SNR 代价。此外,状态 3 的 SER 性能与瑞利信道十分接近,说明 SER 性能的好坏主要取决于信道直视分量的强弱,而重度遮蔽状态下信道直视分量很小,对卫星通信性能的提升十分有限。图 6 与图 4 相比,状态 2 的性能更好,原因在于图 6 中状态 2 直视分量的均值和方差与状态 1 更加接近。

图 7 给出了三状态 Markov 陆地移动卫星信道模型在 S 波段、卫星仰角  $40^\circ$  条件下中等树阴影、郊区环境下的 SER 性能仿真结果。仿真里中等树阴影环境下,信道状态  $S_1, S_2, S_3$  在总状态数中的比例分别为稳态概率向量  $w$  里的  $w_1, w_2, w_3$ ,如表 1 所示。郊区环境下,信道状态  $S_1, S_2, S_3$  在总状态数中的比例分别为稳态概率向量  $w$  里的  $w_1, w_2, w_3$ ,如表 2 所示。其中,总状态数为观测的运动距离与状态帧长度  $L_f$  的比值。仿真采用 QPSK 调制,仿真 20 000 次后取平均。可见,郊区环境里的 SER 性能显著优于中等树阴影环境里的 SER 性能。为实现相同的 SER=0.01,郊区环境相比于中等树阴影环境能节省约 5 dB 的 SNR,这是由于郊区环境里阴影遮蔽效应相比于中等树阴影环境要弱,直视分量对卫星通信性能有所提升。

图7 仰角  $40^\circ$  中度树阴影、郊区的 SER 性能对比Fig. 7 SER comparisons for intermediate tree shadowed area and suburban area with elevation of  $40^\circ$ 

## 4 结束语

本文研究了三状态 Markov 陆地移动卫星信道的建模方法。在该方法中,每个状态服从不同参数的 Loo 分布,状态之间转移服从 Markov 随机过程。本文所建立卫星信道模型充分利用了混合卫星信道的优点,较真实地还原了不同环境、不同仰角和不同频段下的陆地移动卫星信道,有效克服了单一状态无法完全刻画实际卫星信道传播特性的缺点,为卫星通信传输技术研究提供了理论基础。此外,本文还对建立的信道模型进行了 SER 性能仿真,对比了 S 波段、仰角和 QPSK 调制下中度树阴影和郊区环境的 SER,发现 SER 性能的好坏主要取决于卫星信道直视分量的强弱,当直视分量受到重度遮蔽时,为了补偿 SER 损失需要额外的 3~5 dB 的 SNR。另外,中度树阴影环境相比于郊区环境,为达到相同的 SER=0.01 的性能,要多消耗约 5 dB 的 SNR。



## 参考文献:

- [1] 王明忠. 卫星通信的未来发展[J]. 上海航天, 2000,3:54-59.  
Wang Mingzhong. Future development of satellite communications[J]. Shanghai Aerospace, 2000,3: 54-59.
- [2] Vazquez M A, Perez-Neira A, Christopoulos D, et al. Precoding in multibeam satellite communications: Present and future challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(6):88-95.
- [3] 丁颖婷, 仰帆帆. 新型卫星导航系统在半盲信道中的抗干扰分析[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(5): 595-601.  
Ding Yingting, Yang Fengfan. Anti-interference performance of novel satellite navigation system in half-blind channel[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(5): 595-601.
- [4] 易克初, 李怡, 孙晨华, 等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015, 36(6): 1-16.  
Yi Kechu, Li Yi, Sun Chenhua, et al. Recent development and prospect of satellite communication[J]. Journal on Communications, 2015, 36(6):1-16.
- [5] Ippolito L J. Satellite communications systems engineering: Atmospheric effects, satellite link design and system performance[M]. 2nd Edition. America: Wiley Publishing, 2017:299-338 .
- [6] Loo C. A statistical model for land mobile satellite link[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1985, 34(3): 122-127.
- [7] Corazza G E, 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.
- [8] 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.
- [9] 贾德, 龙伟军. 天基雷达的关键技术[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(4):391-396.  
Ben De, Long Weijun. Key technologies of space-based radar[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(4): 391-396.
- [10] Kanatas A G, Panagopoulos A D. Radio wave propagation and channel modeling for earth-space systems[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016:1-28.
- [11] Fontan F P, Castro M A V, Buonomo S, et al. S-band LMS propagation channel behavior for different environments, degrees of shadowing and elevation angles[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1998, 44(1): 40-76.
- [12] Fontan F P, Castro M A V, Cabado C E, et al. Statistical modeling of the LMS channel[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(6):1549-1567.
- [13] 郭业才, 赵卫娟, 张秀再. 卫星信道三状态 Markov 模型设计与仿真[J]. 计算机应用, 2016, 36(1): 91-95.  
Guo Yecai, Zhao Weijuan, Zhang Xiuzai. Design and simulation of satellite channel three-state Markov model[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(1): 91-95.
- [14] Fontan F P, Conzalez J P, Ferreiro M J S, et al. Complex envelope three-state Markov model based simulator for the narrow-band LMS channel[J]. International Journal of Satellite Communications, 1997, 15(1): 1-15.
- [15] Cerdeira R P, Fontan F P, Burzigotti P, et al. Versatile two-state land mobile satellite channel model with first application to DVB-SH analysis[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2010, 28(2): 291-315.

## 作者简介:



王昕(1993-),女,硕士。研究方向:卫星通信信号处理, E-mail: wang\_xin@seu.edu.cn。



戚晨皓(1981-),男,副教授。研究方向:卫星通信与 MIMO 通信技术, E-mail: qch@seu.edu.cn。