

基于 Ka 频段的低轨卫星自适应信息传输方案

于秀兰 王思仪

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘 要 针对 Ka 频段卫星通信信号传输易受降雨和地面移动环境影响的问题,结合低轨卫星高速移动特点及星地链路电波传播特性,对 Ka 频段下的低轨卫星信道雨衰分布进行了研究,提出了一种基于 Ka 频段的低轨卫星自适应信息传输方案。首先,针对信号在空间传输受降雨及周围环境两种因素影响的问题,建立了 Ka 频段的低轨卫星移动通信信道模型;其次,根据卫星仰角变化范围以及仰角概率密度函数推导得到基于卫星仰角变化的雨衰概率密度函数;然后,根据当前信道状态和雨衰概率密度函数计算得到信道参数值,从而确定信道状态信息;接着,根据已确定的信道状态信息,计算得到当目标误码率为 1×10^{-4} 时不同信道状态和调制编码方式下的信噪比阈值;最后,利用自适应调制编码选择算法,将反馈信噪比与计算得到的信噪比阈值进行对比,选出最佳调制编码方式对信号进行调制编码之后再传输,以提高空间信息传输的可靠性。仿真结果表明,在不同信道状态下,卫星仰角越小,地面阴影程度越严重,系统误码率越高,自适应信息传输方案使得系统误码率始终低于目标误码率 1×10^{-4} 。从而进一步说明,所提出的自适应信息传输方案可以有效地解决信号因降雨、地面移动环境以及卫星移动性三方面因素共同导致的严重衰减问题,从而有效提升了 Ka 频段低轨卫星系统的信息传输质量。

关键词 Ka 频段,低轨卫星,卫星仰角,雨衰分布,自适应调制编码

中图法分类号 TN929.5 文献标识码 A DOI 10.11896/jsjx.181001862

Adaptive Information Transmission Scheme for LEO Satellite Based on Ka Band

YU Xiu-lan WANG Si-yi

(School of Communication and Information Engineering,Chongqing University of Posts and
Telecommunications,Chongqing 400065,China)

Abstract Aiming at solving the problem that Ka-band satellite communication signal transmission is easily affected by rainfall and ground environment, this paper studied the distribution of the Ka-band based rain attenuation of LEO satellite channel by considering the high-speed movement characteristics of LEO satellite and the propagation characteristics of satellite-to-earth link, and proposed an adaptive information transmission scheme for LEO satellite to improve the reliability of system information transmission. Firstly, a Ka frequency band LEO satellite mobile communication channel model is established to solve the problem that the transmission signal is easily affected by rainfall and the variation of elevation angle. Secondly, the probability density function of the rain attenuation based on the change of the elevation angle is calculated by combining the elevation varying range and the elevation probability density function of LEO satellite. Thirdly, according to the probability density function of the rain attenuation and the current channel state, the channel parameters are calculated and the channel state information can be obtained. Then, according to the confirmed channel state information, the signal-to-noise ratio thresholds of different channel states and different modulation coding modes can be calculated with the error rate of 1×10^{-4} . Finally, by comparison of the feedback signal-to-noise ratio and the calculated signal-to-noise ratio thresholds, the best modulation and coding mode is selected through the adaptive modulation coding selection algorithm, which can promote the transmission reliability of spatial information. The simulation results show that the lower the elevation angle of satellite is, the more serious the ground shadowing is, and the bit error ratio of system is higher under the different channel states. The proposed adaptive information transmission scheme makes the bit error ratio of the satellite communication systems always lower than the target bit error ratio of 1×10^{-4} . The results show that the proposed adaptive information transmission scheme can effectively solve the problem of serious attenuation of transmission signal caused by rainfall, ground mobile environment and satellite mobility,

到稿日期: 2018-10-08 返修日期: 2019-03-31 本文受重庆邮电大学文峰人才工程项目(E010W2016034), 国家自然科学基金项目(61601075), 重庆市科委自然科学基金项目(cstc2016jcyjA0174)资助。

于秀兰(1973—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为无线通信理论与技术, E-mail: yuxl@cqupt. edu. cn; 王思仪(1994—), 女, 硕士生, 主要研究方向为移动卫星通信技术, E-mail: 351203934@qq. com(通信作者)。

and effectively enhance the information transmission quality of LEO satellite system based on Ka band.

Keywords Ka band, LEO satellite, Satellite elevation angle, Rain attenuation distribution, Adaptive modulation and coding

近年来,卫星通信因具有覆盖范围广、通信距离远、通信容量大等优点而逐渐成为了全球通信网络必不可少的组成部分。与传统卫星工作频段(C, L, S)相比, Ka 频段(30/20GHz)以其带宽充裕、通信容量大及抗干扰能力强等优点日益引起了学者们的广泛关注^[1-3]。然而,采用 Ka 频段进行信号传输易受天气影响,其中降雨对信号造成的影响最大,因此对降雨衰减特性展开研究在星地链路传输信号的性能分析过程中至关重要。

已有研究通常建立一个雨衰预测模型^[4-6]来估计传输信号在通信链路中的性能损耗。国际上应用最广泛的雨衰模型是 ITU-R 预测模型^[4],其优点是计算准确度高,但由于输入参数少,数据估计的精准度较低。与 ITU-R 模型相比,文献[5]提出了一种基于实测昼夜雨量统计的雨衰预测模型,该模型的数据统计精准度较高;文献[6]提出了一种基于降雨率与雨衰之间等概率事件的雨衰预测模型。但上述雨衰模型不适用于卫星仰角不断变化的中、低轨卫星通信系统。除此之外,地面传输环境同样会对 Ka 频段的卫星传输信号造成严重的干扰,例如阴影衰落和多径衰落^[7-10]。

为了解决降雨以及地面传输环境造成通信质量变差的问题,已有学者提出了多种有效解决措施。其中,文献[11-17]采用的是自适应调制编码技术(Adaptive Modulation and Coding, AMC),即发射端根据接收端反馈的信道状态信息(Channel State Information, CSI)选择最佳调制编码方式对传输信息进行调制编码,从而保证链路的传输质量。文献[11]针对固定调制编码使得卫星通信信道资源利用率低的问题,提出了一种自适应调制编码传输方案以提高卫星通信的频谱效率。文献[12]针对地面用户数量增多导致传输信道吞吐量低的问题,提出了一种自适应调制编码选择方案来提高卫星系统的吞吐量。但文献[11-12]的无线传输信道都基于 L 频段,相比 L 频段, Ka 频段具有通信容量大及抗干扰性能强等优点,更具有研究价值。文献[13]针对因用户的移动性造成信道状态改变的问题,提出了一种基于多状态信道模型的 AMC 方案,以改善卫星通信系统的性能;但其只考虑了地面传输环境对信号性能的影响,忽略了降雨因素的影响。文献[14]重点分析比较了在多波束卫星广播通信系统下的自适应调制编码技术与可变调制编码技术的优缺点:在 Ka 频段下,相比可变调制编码技术,采用自适应调制编码技术能更好地改善信号传输质量。文献[15]针对固定编码调制使得星间链路信道资源利用率低的问题,提出了一种新的自适应调制编码方案,新方案不仅保证了系统信号传输的可靠性,还提高了系统信号传输的有效性。文献[16]针对信道时变性引起的卫星通信能效浪费问题,提出了一种能量有效的 AMC 方案,与固定调制编码方式相比,该方案有效提高了卫星通信的能量效率。然而,文献[14-16]的无线传输信道都应用在单一信道条件下,未考虑降雨和周围环境的双重影响。文献[17]综合考虑了 Ka 频段下降雨及地面环境对传输信号的影响,提出

了一种新的自适应调制编码方案,以提高卫星通信系统的信号传输质量;但其未考虑卫星移动性造成信道状态改变的问题。

针对以上问题,本文综合考虑了天气以及地面移动环境对传输信号的影响,并结合低轨卫星的移动特性,进行了基于 Ka 频段的低轨卫星信道雨衰分布研究,提出了一种基于 Ka 频段的自适应信息传输方案。首先,根据低轨卫星移动轨迹,推导得到基于卫星仰角变化的雨衰概率密度函数;其次,根据雨衰概率密度函数,计算得到不同卫星仰角下的雨衰参数值,确定信道状态信息;最后,根据已确定的信道状态信息,通过自适应调制编码选择算法选择最佳调制编码方式进行信号调制编码。仿真结果表明:所提自适应信息传输方案有效地解决了因降雨、地面移动环境以及卫星移动性三方面因素导致的传输信号严重衰减的问题,大大提高了 Ka 频段低轨卫星通信信号的传输质量。

1 系统模型

1.1 网络模型

Ka 频段低轨卫星通信系统的网络模型如图 1 所示。

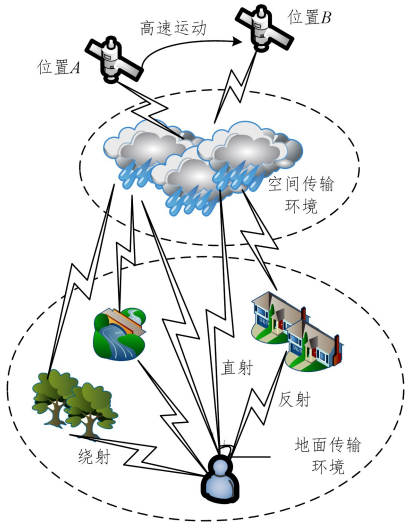


图 1 卫星网络模型
Fig. 1 Satellite network model

该模型由低轨卫星、地面用户以及用户可接收信号区域共同组成。由低轨卫星发出的信号在无线信道传输时不仅易受天气特别是降雨的影响,还易受建筑物、树木、河流等障碍物的影响,从而产生多径效应和阴影效应。其中,降雨是一个随机过程,不同地区的降雨量不同,对信号造成的衰减程度也不同。因此,准确了解降雨衰减分布可以有效帮助分析卫星通信链路的衰减情况。传统雨衰模型可以看作是一个高斯分布^[18],如式(1)所示:

$$p(a/\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(\theta)}} \exp\left[-\frac{[a-m(\theta)]^2}{2\sigma(\theta)^2}\right]$$
 (1)

其中, a 表示雨衰, $m(\theta)$ 和 $\sigma(\theta)$ 分别表示雨衰的均值和方差。

但是,传统雨衰模型忽略了卫星对地的相对运动速度,而低轨卫星对地的运行速度最快。图 1 中,当低轨卫星沿着轨道从位置 A 运转到位置 B 时,地面用户接收信号的卫星仰角相应地从 θ 变化到 β ;与此同时,雨衰模型中的均值 $m(\theta)$ 和方差 $\sigma(\theta)$ 也应随卫星仰角的变化而变化。因此,传统雨衰模型不适用于卫星仰角不断变化的星地链路间的衰减情况。

1.2 信号传输模型

为了解决卫星移动性加剧卫星信道时变性的问题,并综合考虑降雨以及地面传输环境对传输信号的影响,提出了一种基于 Ka 频段的低轨卫星自适应信息传输方案。自适应传输方案的模型如图 2 所示。

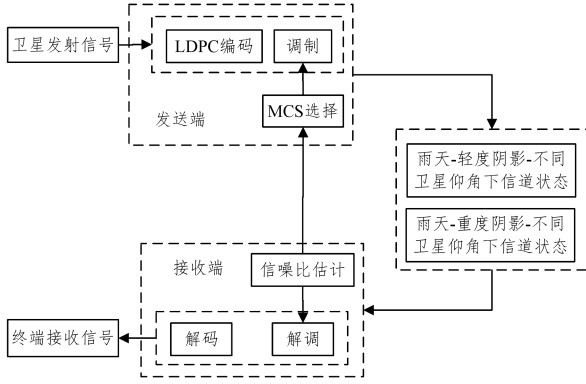


图 2 自适应传输方案模型

Fig. 2 Adaptive transmission scheme model

发送端和接收端之间的信道为一条无线传输信道,信道编码采用 LDPC 码,选择目前卫星通信系统中 5 种常见的 MCS: QPSK 1/2, 8QAM 1/2, 16QAM 1/2, 32QAM 1/2 和 64QAM 1/2。综合考虑降雨以及周围环境因素的影响,把信道分为雨天-轻度阴影和雨天-重度阴影两种状态,在每种状态下结合低轨卫星的移动性,根据卫星仰角变化对传输信号影响程度的不同,将无线传输信道分为 8 种情况,即雨天-轻度阴影($10^\circ \sim 15^\circ$)、雨天-轻度阴影($15^\circ \sim 22^\circ$)、雨天-轻度阴影($22^\circ \sim 37^\circ$)、雨天-轻度阴影($37^\circ \sim 90^\circ$)、雨天-重度阴影($10^\circ \sim 15^\circ$)、雨天-重度阴影($15^\circ \sim 22^\circ$)、雨天-重度阴影($22^\circ \sim 37^\circ$)、雨天-重度阴影($37^\circ \sim 90^\circ$)。设定系统的最大误码率值为 1×10^{-4} ,计算上述 8 种传输信道下的 CSI,发射端根据接收端反馈的 CSI,通过自适应调制编码选择算法选择合适的调制编码方式进行信息传输,从而保证系统误码率值始终低于目标误码率,有效改善了通信系统的传输质量。

Ka 频段低轨卫星自适应调制编码方案的具体步骤如下:

1) 发射端发射的信号经过编码、调制后进入到 Ka 频段的无线传输信道。

2) 低轨卫星的移动性,使得地面用户只能在一定的仰角范围内接收同一颗卫星发送的信息。根据低轨卫星移动轨迹以及地面用户地理位置,计算得到地面用户可接收信号的卫星仰角的变化范围。为了便于比较分析,将范围按等时间间隔分为 $10^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 22^\circ$, $22^\circ \sim 37^\circ$, $37^\circ \sim 90^\circ$ 。

3) 由于卫星仰角的变化会导致雨衰分布中的参数值也随之变化,因此展开了对 Ka 频段下的低轨卫星信道雨衰分布的研究,并通过推导计算出了 8 种信道状态下的信道参数值,据此确定 CSI。

4) 设定系统目标误码率为 1×10^{-4} ,根据已经确定的 CSI,仿真出 8 种信道条件下已选 5 种调制方式的误码率,计算出每种调制方式下误码率为 1×10^{-4} 时对应的信噪比阈值。接收端根据发射端发送的信号估计出信道的信噪比,并将估计出的信噪比反馈给发射端;发射端将反馈的信噪比与第 2) 步计算出的 5 种调制方式的阈值做对比,判断当下的信噪比属于哪种调制方式范围,并将该调制编码方式作为下一次信号传输采用的 MCS。

2 基于卫星仰角变化的雨衰分布

Ka 频段低轨卫星传输信号在空间传输时主要考虑降雨因素的影响,又因低轨卫星高速移动的特点导致信号穿过雨区的斜径长度随仰角的变化而变化,所以,本文提出了一种基于卫星仰角变化的雨衰分布。首先,根据卫星的运行轨迹计算得到可视时间内卫星仰角的范围,并按照等时间间隔分成 4 部分;其次,根据地面用户地理位置与星下点之间的夹角以及可视时间内低轨卫星出现的时间间隔,计算得到卫星仰角概率密度函数;然后,根据信号穿过雨区的斜径长度与卫星仰角函数的关系计算得到雨衰分布参数值;最后,把计算得到的卫星仰角概率密度函数和雨衰分布参数值进行积分,得到基于卫星仰角变化的雨衰分布。

基于卫星仰角变化的雨衰分布的具体计算过程如下:

1) 如图 3 所示,地球半径 $R_e = 6378 \text{ km}$,卫星到地球的距离 $h = 778 \text{ km}$, θ 为地面观察点对卫星的仰角,由正弦定理可以得到卫星的自转角 W_s 为:

$$W_s(t) = \arccos\left(\frac{R_e \cos \theta}{R_e + h}\right) - \theta \quad (2)$$

单颗卫星绕地运行的时间 t 与地球自转角之间的关系满足:

$$W_E(t) = \frac{2\pi}{86400}t \quad (3)$$

由正切定理得到卫星仰角 θ 与时间 t 之间的函数关系^[19]为:

$$\theta(t) = \arctan(a/b) \quad (4)$$

其中, a 和 b 的计算公式如下:

$$a = H \sin \alpha_s(t) \sin \alpha_e(t) \quad (5)$$

$$b = [H^2 \cos^2 \alpha_s(t) + H^2 \sin^2 \alpha_s(t) \cos^2 \alpha_e(t)]^{0.5} \quad (6)$$

$$H = [R_e^2 \sin^2 W_s(t) + (R_e + h - R_e \cos W_s(t))^2]^{0.5} \quad (7)$$

$$\alpha_s(t) = \arctan\left[\frac{(1+h/R_e) \cos W_s(t) - 1}{(1+h/R_e) \sin W_s(t)}\right] \quad (8)$$

$$\alpha_e(t) = \arctan\left[\frac{(1+h/R_e) \cos W_E(t) - 1}{(1+h/R_e) \sin W_E(t)}\right] \quad (9)$$

通过式(4)计算得到地面用户可接收信号的最大卫星仰角为 90° ,最小卫星仰角为 10° 。为了便于后文分析与对比卫星仰角时变性对传输信号的影响,把计算得到的仰角范围按照等时间间隔划分为 4 个部分,每部分对应的仰角值分别为 $10^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 22^\circ$, $22^\circ \sim 37^\circ$, $37^\circ \sim 90^\circ$ 。

2) 如图 3 所示,中心角 $\gamma(\theta)$ 为地面用户和星下点之间的夹角,如式(10)所示:

$$\gamma(\theta) = \arccos(a \cdot \cos \theta) - \theta \quad (10)$$

其中, θ 为卫星仰角, a 是地球半径 R_e 与卫星半径之比,卫星

半径等于地球半径 R_e 与卫星到地面的距离 h 之和。

假设地面用户所在位置地理位置变化不大,每隔一段时间接收来自同一颗卫星发射的信号,那么可视时间内单颗低轨卫星出现的时间间隔满足:

$$T(\theta)=\frac{2}{W_s-W_E\cos i}\arccos\left[\frac{\cos\gamma(\theta)}{\cos\gamma(\theta_{\max})}\right],\theta_{\min}\leq\theta\leq\theta_{\max}$$

(11)

于是,卫星仰角服从的累积分布函数(CDF)为:

$$F_s(\theta)=1-\frac{T(\theta)}{T(\theta_{\min})},\theta_{\min}\leq\theta\leq\theta_{\max}$$

(12)

对计算求得的累积分布函数进行微分,得到卫星仰角的概率密度函数(Probability Density Function,PDF),如式(13)所示:

$$p(\theta)=\frac{dF_s(\theta)}{d\theta}$$

$$=\frac{G(\theta)\sin\gamma(\theta)}{\sqrt{\cos^2\gamma(\theta_{\max})-\cos^2\gamma(\theta)}\cdot\arccos\left[\frac{\cos^2\gamma(\theta_{\min})}{\cos^2\gamma(\theta_{\max})}\right]}$$

$$=\frac{\left[\frac{1+a^2-2a\cos\gamma(\theta)}{1-a\cos\gamma(\theta)}\right]\sin\gamma(\theta)}{\sqrt{\cos^2\gamma(\theta_{\max})-\cos^2\gamma(\theta)}\cdot\arccos\left[\frac{\cos^2\gamma(\theta_{\min})}{\cos^2\gamma(\theta_{\max})}\right]}$$

(13)

其中, a 是地球半径 R_e 与卫星半径之比,卫星半径等于地球半径 R_e 与卫星到地面的距离 h 之和。仰角的最小值 $\theta_{\min}$ 和最大值 $\theta_{\max}$ 分别对应前文按等时间间隔所划分得到的 4 部分卫星仰角区间的最小值与最大值。

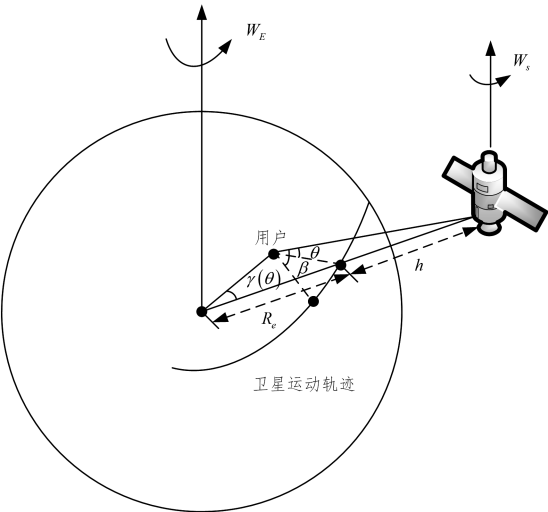


图 3 星地几何关系图
Fig. 3 Satellite earth geometry

3)信号穿过雨区到达地面的斜径示意图如图 4 所示。

首先,根据地面用户所处位置的纬度计算等效雨高 h_R ,如式(14)所示:

$$h_R(\text{km})=\begin{cases} 5.0-0.075(\phi-23), & \phi\geq 23^\circ, \text{北半球} \\ 5, & 0^\circ\leq\phi\leq 23^\circ, \text{北半球} \\ 5, & 0^\circ\leq\phi\leq 21^\circ, \text{南半球} \\ 5.0+0.1(\phi+21), & 21^\circ\leq\phi\leq 71^\circ, \text{南半球} \\ 0, & \phi\geq 71^\circ, \text{其他} \end{cases}$$

(14)

假设地面用户所处位置的海拔为 h_s ,由式(14)计算得到等效雨高 h_R ,由式(4)计算得到地面用户可接收信号的最小卫星仰角为 10° ,则传输信号穿过雨区的斜径长度 L_s 如式(15)所示:

$$L_s=(h_R-h_s)/\sin\theta,\theta\geq 10^\circ$$

(15)

倾斜路径 L_s 的水平投影 L_G 如式(16)所示:

$$L_G=L_s\cos\theta$$

(16)

然后,再分别计算得到 $10^\circ\sim 15^\circ, 15^\circ\sim 22^\circ, 22^\circ\sim 37^\circ$ 以及 $37^\circ\sim 90^\circ$ 这 4 个部分仰角范围下的雨衰概率密度函数,如式(17)所示:

$$p(a/\theta_i)=\frac{1}{a\sigma(\theta_i)\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(1na-m(\theta_i))^2}{2\sigma(\theta_i)^2}\right]$$

(17)

其中, θ_i 为随时间变化的卫星仰角; $1na$ 为对数雨衰; $m(\theta_i)$ 和 $\sigma(\theta_i)$ 分别为 $1na$ 的均值和方差,对于不同卫星仰角, $m(\theta_i)$ 和 $\sigma(\theta_i)$ 的取值不同,可根据斜径在水平的投影 L_G 与降雨率的标准方差的关系来计算。

$$\sigma^2(\theta)=\ln\{1+H\cdot\exp(b^2S_r^2-1)/L_G^2\}$$

(18)

$$m(\theta)=aR_m^b\exp\{([b^2S_r^2-\sigma^2(\theta)]/2)\cdot L_G\}$$

(19)

其中, G 是以 km 为单位的特征距离,范围为 $0.75\sim 3$,本文取 0.75 ; L_G 表示倾斜路径在水平方向的投影长度^[4]; S_r 表示降雨率 $\ln R$ 的标准方差;系数 a 和 b 表示与极化方式以及卫星仰角相关的参数; H 的计算公式如式(20)所示:

$$H=L_GG\left[\sin h^{-1}\left(\frac{L_G}{G}\right)-\sin h^{-1}\left(-\frac{L_G}{G}\right)\right]+2G^2\left[1-\sqrt{\left(\frac{L_G}{G}\right)^2+1}\right]$$

(20)

最后,计算不同卫星仰角范围下雨衰概率密度函数的参数值,如表 1 所列。

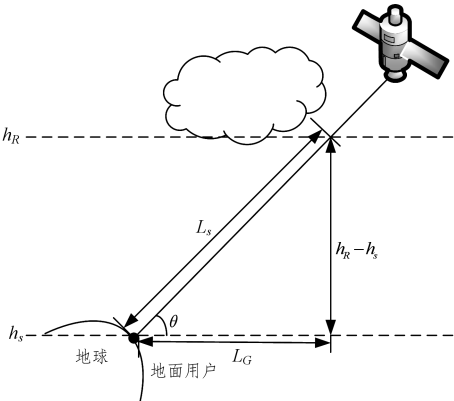


图 4 等效雨高示意图
Fig. 4 Schematic diagram of equivalent rainfall height

表 1 不同卫星仰角下的雨衰分布参数值

	satellite elevation angles			
	10°~15°	15°~ 22°	22°~ 37°	37°~90°
$\sigma(\theta_i)$	0.8631	0.9070	0.9203	0.7699
$m(\theta_i)$	1.5239	1.1028	0.6516	0.4632

4)将式(13)计算求得的卫星仰角的概率密度函数以及式(17)计算求得的雨衰概率密度函数的参数值进行积分,得到最终基于卫星仰角变化的雨衰分布,如式(21)所示:

$$p_w(a)=\int_{\theta_1}^{\theta_2} p(a/\theta_i) p(\theta)d\theta \tag{21}$$

其中, θ_1 和 θ_2 分别对应按等时间间隔所划得的 4 部分卫星仰角区间的最小值与最大值。

3 自适应传输方案的设计

3.1 信道模型

信号在地面传输时易受多径效应和阴影效应的影响。考虑到地面用户的移动速度相比低轨卫星的移动速度可忽略不计, 将其看作静止状态, 即将地面用户的周围环境视为单状态。既适用于乡村又适用于城区的经典单状态信道模型是 Corazza 模型^[20], 其又称为全阴影概率模型, 即直射信号和多径信号均受到阴影效应的影响。接收信号 $r(t)$ 满足:

$$r(t)=[z(t)+d(t)] \cdot s(t)=R(t) \cdot s(t) \tag{22}$$

其中, $z(t)$ 是直射分量, $d(t)$ 是多径分量, $s(t)$ 为两种信号分量受阴影效应影响产生的衰落。既含直射信号又含多径信号 $R(t)$ 的 PDF 服从莱斯分布, 如式(23)所示:

$$p(r/S)=2(K+1)\frac{r}{S^2}\exp[-(K+1)\frac{r^2}{S^2}-K] \cdot I_0(2\frac{r}{S}\sqrt{K(K+1)}) \tag{23}$$

其中, r 表示接收信号的包络, S 代表阴影效应, I 为零阶修正贝塞尔函数, K 为莱斯因子。衰落信号 $s(t)$ 的 PDF 服从对数正态分布, 如式(24)所示:

$$p_s(S)=\frac{1}{\sqrt{2\pi h\sigma S}}\exp[-\frac{1}{2}(\frac{\ln S-u}{h\sigma})^2] \tag{24}$$

其中, $h=\ln(10)/20$, u 为 $\ln S$ 的均值, σ 是 $\ln S$ 的标准方差。

将式(23)和式(24)进行积分, 得到接收信号 $r(t)$ 的 PDF 如式(25)所示:

$$p_r(r)=\int_0^{\infty} p(r/S) p_s(S)dS \tag{25}$$

假设在空间段传输的信号和在地面段传输的信号彼此相互独立, 则综合信道模型为:

$$p_r(r)=p_g(r) \cdot p_w(a) \tag{26}$$

其中, $p_w(a)$ 表示信号在空间段传输时在卫星仰角变化下降雨对信号造成的衰减, 如式(21)所示; $p_g(r)$ 表示在地面段传输时移动环境对信号造成的衰减, 如式(25)所示。

3.2 自适应调制编码方式的选择

为了减小信道传输环境对信号的影响, 提高信息传输质量, 本文提出了一种自适应调制编码选择算法, 即在不同信道状态下, 发射端根据接收端反馈的信噪比选择最佳调制编码方式, 进而对传输信号进行调制编码。其具体计算步骤如下: 首先, 设定系统目标误码率为 1×10^{-4} , 根据信道传输环境把 Ka 频段的低轨卫星传输信道分为 8 种情况; 其次, 根据第 2 节推导得到的基于卫星仰角变化的雨衰概率密度公式计算得到每种信道状态下的信道参数值, 以确定当前信道的状态信息; 然后, 仿真出 5 种已选编码调制在不同信道条件下的系统误码率, 并计算得到每种调制方式对应设定系统目标误码率为 1×10^{-4} 时的信噪比阈值范围; 最后, 发射端将接收端反馈的信噪比与上一步计算得到的 5 种调制方式的阈值做对比, 进而选择最佳 MCS 进行信息传输。若信道状态较好, 则选择

阶数较高的调制编码方式, 否则选择阶数较低的调制编码方式。

3.2.1 轻度阴影下 MCS 的选择

在轻度阴影-雨天信道下, 根据卫星仰角变化对传输信号的不同影响程度, 把轻度阴影-雨天信道状态分为雨天-轻度阴影($10^\circ \sim 15^\circ$)、雨天-轻度阴影($15^\circ \sim 22^\circ$)、雨天-轻度阴影($22^\circ \sim 37^\circ$)、雨天-轻度阴影($37^\circ \sim 90^\circ$) 4 种情况。信道编码采用 LDPC 码, 选择的 5 种 MCS 分别为: QPSK 1/2, 8QAM 1/2, 16QAM 1/2, 32QAM 1/2, 64QAM 1/2。

对于 M-QAM 调制, 系统的误码率如式(27)所示:

$$P_{e,MQAM}(\gamma)=\frac{4}{\log_2 M}(1-\frac{1}{\sqrt{M}})\sum_{k=1}^{\sqrt{M}/2} Q(a_k \sqrt{\gamma}) \tag{27}$$

其中, $a_k=(2k-1)\sqrt{3/(M-1)}$, M 表示调制阶数, $Q(\cdot)$ 表示 q 函数。

系统总误码率的计算如式(28)所示:

$$p(e/r)=\int_0^{\infty} p_e(\gamma) p_r(r)dr \tag{28}$$

根据式(26)一式(28)得到 Ka 频段低轨卫星通信系统的误码率。

对于 M-PSK 调制, 系统的误码率为:

$$P_{e,MPSK}(\gamma)=\frac{2}{\zeta M}\sum_{k=1}^{\max(M/4,1)} Q(\sqrt{2\gamma}b_k) \tag{29}$$

其中, $\zeta M=\max(\log_2 M, 2)$, $b_k=\sin \frac{(2k-1)\pi}{M}$ 。同样地, 把式(26)和式(29)代入式(28)得到 M-PSK 的系统误码率。

根据 M-QAM 和 M-PSK 的误码率公式, 分别在 4 种不同信道状态下对 5 种调制方案进行了仿真, 仿真结果如图 5—图 8 所示, 信道参数值如表 2 所列。

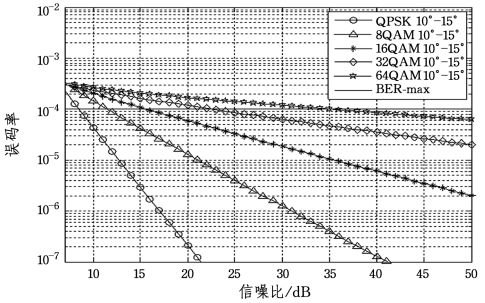


图 5 雨天-轻度阴影($10^\circ \sim 15^\circ$)下 5 种调制方式的误码率
Fig. 5 Error rate of five modulations under rainy-light shadowing with 10° to 15°

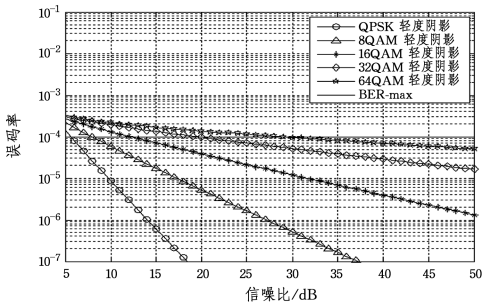


图 6 雨天-轻度阴影($15^\circ \sim 22^\circ$)下 5 种调制方式的误码率
Fig. 6 Error rate of five modulations under rainy-light shadowing with 15° to 22°

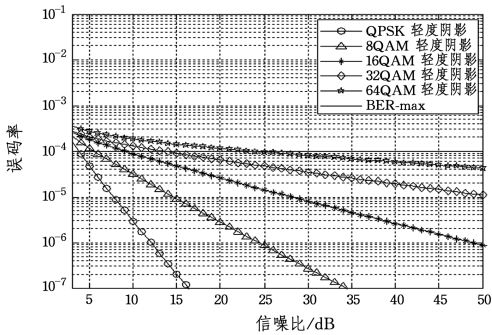


图 7 雨天-轻度阴影(22°~ 37°)下 5 种调制方式的误码率

Fig. 7 Error rate of five modulations under rainy-light shadowing with 22° to 37°

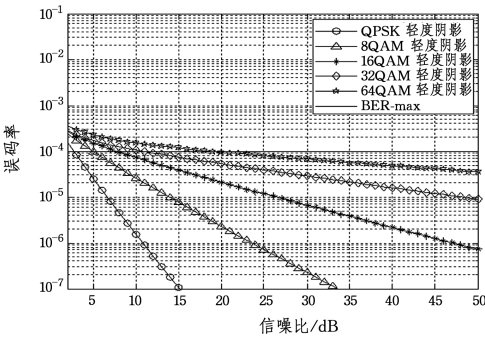


图 8 雨天-轻度阴影(37°~90°)下 5 种调制方式的误码率

Fig. 8 Error rate of five modulations under rainy-light shadowing with 37° to 90°

表 2 雨天信道参数的取值

Table 2 Channel parameters in rainy days

不同卫星 仰角范围	均值 $m(\theta_i)$	方差 $\sigma(\theta_i)$	环境状态	k	u	σ
10°~15°	1.5239	0.8631	轻度阴影	4.0	0.13	1.0
			重度阴影	0.6	-1.08	2.5
15°~22°	1.1028	0.9070	轻度阴影	4.0	0.13	1.0
			重度阴影	0.6	-1.08	2.5
22°~37°	0.6516	0.9203	轻度阴影	4.0	0.13	1.0
			重度阴影	0.6	-1.08	2.5
37°~90°	0.4632	0.7699	轻度阴影	4.0	0.13	1.0
			重度阴影	0.6	-1.08	2.5

根据图 5—图 8 给出的系统误码率仿真图,分别计算在 4 种信道状态的每种调制方式下使得 $BER=BER_{\max}=1\times10^{-4}$ 的信噪比阈值,具体计算结果如表 3 所列。

表 3 雨天-轻度阴影衰落信道信噪比阈值

Table 3 Signal to noise ratio thresholds based on rainy day-mild shadow fading channel

序号	调制方式	雨天轻度阴影信噪比阈值			
		10°~15°	15°~22°	22°~37°	37°~90°
MCS1	QPSK	8~12	6~8	4.5~7	3~5
MCS2	8QAM	12~15	8~12.5	7~9.5	5~8.5
MCS3	16QAM	15~23.5	12.5~21	9.5~15	8.5~12.5
MCS4	32QAM	23.5~35	21~30	15~25.5	12.5~20
MCS5	64QAM	>35	>30	>25.5	>20

接收端根据发射端发送的信号估计当前传输信道的信噪比,并将估计出的信噪比反馈给发射端;发射端将反馈的信噪比

比值与表 3 中的 5 种 MCS 信噪比阈值进行对比,判断反馈的信噪比值属于哪一个区间,从而选择合适的调制编码方式对信号进行调制编码。

3.2.2 重度阴影下 MCS 的选择

重度阴影-雨天信道情况下,根据卫星仰角的变化范围把信道状态分为 4 种:雨天-重度阴影(10°~15°)、雨天-重度阴影(15°~22°)、雨天-重度阴影(22°~37°)、雨天-重度阴影(37°~90°)。利用 M-QAM 和 M-PSK 误码率计算公式以及表 2 中重度阴影下的信道参数,仿真出 5 种调制方式在 4 种信道条件下的误码率,并根据仿真出的误码率曲线计算 5 种调制编码方式下系统的信噪比阈值。同样地,信道编码采用 LDPC 码,选择的 5 种 MCS 分别为:QPSK 1/2,8QAM 1/2,16QAM 1/2,32QAM 1/2,64QAM 1/2。仿真结果如图 9—图 12 所示。

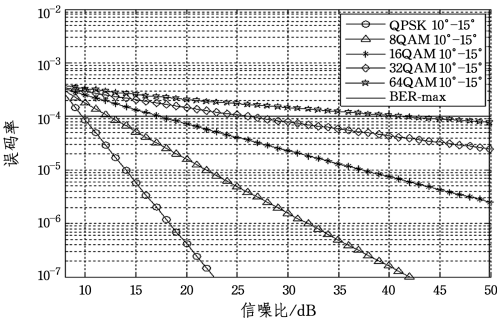


图 9 雨天-重度阴影(10°~15°)下 5 种调制方式的误码率

Fig. 9 Error rate of five modulations under rainy-heavy shadowing with 10° to 15°

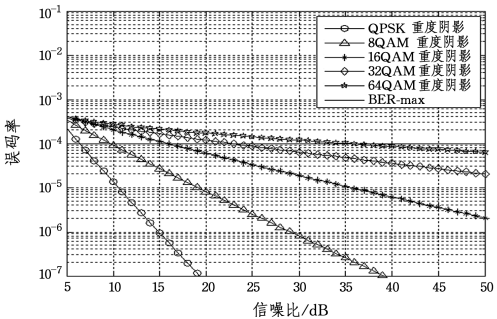


图 10 雨天-重度阴影(15°~22°)下 5 种调制方式的误码率

Fig. 10 Error rate of five modulations under rainy-heavy shadowing with 15° to 22°

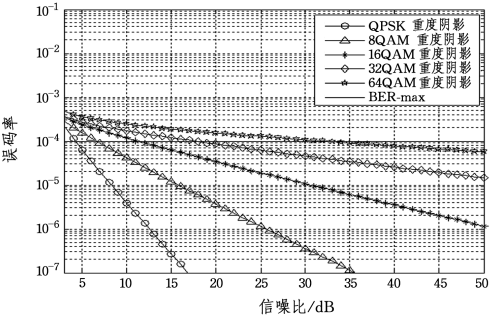


图 11 雨天-重度阴影(22°~37°)下 5 种调制方式的误码率

Fig. 11 Error rate of five modulations under rainy-heavy shadowing with 22° to 37°

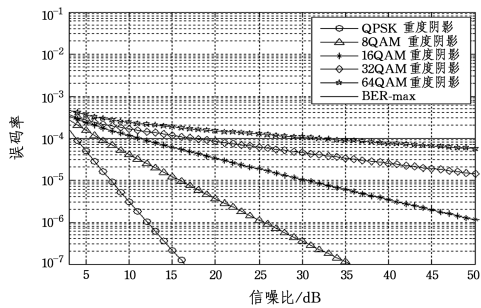


图 12 雨天-重度阴影(37°~ 90°)下 5 种调制方式的误码率
Fig. 12 Error rate of five modulations under rainy-heavy shadowing with 37° to 90°

根据图 9—图 12 给出的 5 种调制编码方式在 4 种信道条件下的系统误码率仿真图,计算出每种调制方式在不同信道条件下系统误码率等于系统目标误码率 1×10^{-4} 时对应的信噪比阈值,结果如表 4 所列。发射端将接收端反馈的信噪比值与表 4 中的 5 种调制编码对应的信噪比阈值进行对比,确定当前信道的状态,进而选择最佳调制编码方式作为信号传输的 MCS,以保证信息传输的可靠性。

表 4 雨天-重度阴影衰落信道的信噪比阈值

序号		雨天重度阴影信噪比阈值			
		10°~15°	15°~22°	22°~37°	37°~90°
MCS1	QPSK	9.5~13	7~10.5	4.5~8	3~7
MCS2	8QAM	13~17.5	10.5~16	8~11.5	7~10.5
MCS3	16QAM	17.5~25	16~24.5	11.5~19	10.5~17
MCS4	32QAM	25~39.5	24.5~36.5	19~35	17~32
MCS5	64QAM	>39.5	>36.5	>35	>32

4 仿真实验及分析

本文通过 MATLAB 仿真了基于 Ka 频段低轨卫星的自适应信息传输方案的误码性能。仿真实验中信道周围环境的阴影程度分别为轻度和重度两种情况,天气条件主要考虑降雨,具体信道仿真参数的取值如表 5 所列。本文重点研究 Ka 频段低轨卫星通信系统的自适应调制编码算法对 MCS 方案的选择。

表 5 仿真参数的设置

Table 5 Setting of simulation parameters

参数名	参数值
卫星轨道	LEO
轨道高度/km	778
轨道倾角/(°)	86.4
最小仰角/(°)	10
最大仰角/(°)	90
载波频段/GHz	20
极化方式	圆极化
调制方式	AMC

不同卫星仰角范围下的雨衰概率密度函数如图 13 所示,卫星仰角范围为 10°~15°时雨衰概率密度函数的曲线峰值最低,卫星仰角范围为 15°~22°时峰值较低,卫星仰角范围为 22°~37°时峰值较高,卫星仰角范围为 37°~90°时峰值最高。随着卫星仰角的增大,传输信号穿过雨区的斜径长度越短,雨水对传输信号造成的影响越小,传输信号衰减的程度越小。因此,雨衰概率密度函数的曲线越陡峭,峰值越大。

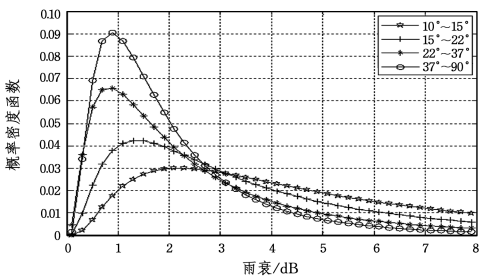


图 13 不同卫星仰角下的雨衰分布
Fig. 13 Rain attenuation based on different satellite elevation angles

图 14 和图 15 分别仿真了信号在雨天-轻度阴影和雨天-重度阴影两种条件下卫星仰角依次为 10°~15°,15°~22°,22°~37°以及 37°~90°4 种情况下基于 Ka 频段的自适应传输系统的误码率性能。从图中看出,无论是在雨天-轻度阴影条件下还是雨天-重度阴影条件下,相比固定调制编码方式,采用 AMC 总能使得系统的误码率低于系统的最高误码率值 1×10^{-4} 。自适应调制编码方式选择算法是发射端根据接收端反馈的信噪比来估计当前信道状态,选择最佳调制编码方式。信道条件好时,选择阶数高、纠错能力差的调制编码方式;信道条件差时,选择阶数低、纠错能力高的调制编码方式,这种选择方式不仅能保证链路传输的质量,还能最大限度地利用 Ka 频段的频谱资源。除此之外,无论是在雨天-轻度阴影还是雨天-重度阴影信道条件下,卫星仰角范围在 37°~90°时系统误码率最低,卫星仰角范围为 22°~37°时系统误码率较低,卫星仰角范围为 15°~22°时系统误码率较高,卫星仰角范围为 10°~15°时系统误码率最高。卫星仰角低时,传输信号穿过雨区的斜径长度较长,雨水对传输信号造成的衰减较大,又因传输信号在地面传输时受高楼、房屋、河流等障碍物阻挡,传播路径复杂,因此系统的误码率较高。

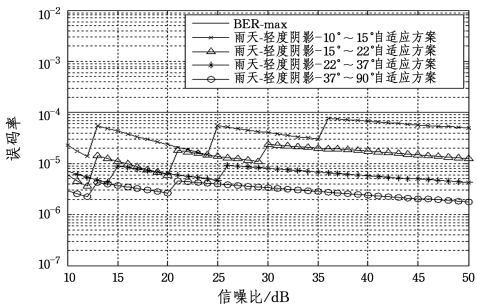


图 14 雨天-轻度阴影衰落的误码率性能
Fig. 14 Error rate performance under rainy-light shadowing

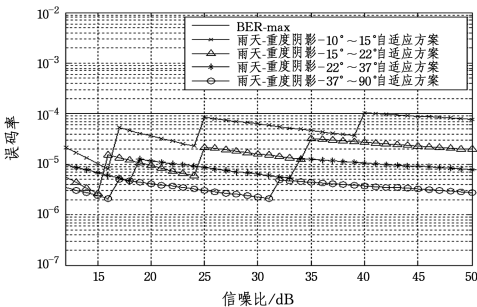


图 15 雨天-重度阴影衰落的误码率性能
Fig. 15 Error rate performance under rainy-heavy shadowing

结束语 本文针对降雨以及地面移动环境对 Ka 频段信号造成严重衰减的问题,结合低轨卫星的移动性,提出了一种基于 Ka 频段的低轨卫星自适应信息传输方案。首先,针对信息传输易受降雨及周围环境影响的问题,建立一个 Ka 频段的低轨卫星移动通信信道模型;然后,根据低轨卫星的移动轨迹,推导了基于卫星仰角变化的雨衰分布,并根据推导得到的雨衰分布计算不同卫星仰角下的雨衰分布参数值,以确定信道状态信息;最后,根据确定的信道状态信息,通过 AMC 选取最佳的调制编码方式进行信息传输。仿真结果表明,本文提出的基于 Ka 频段的低轨卫星自适应传输方案有效解决了因降雨、地面移动环境以及卫星移动性三方面因素导致的传输信号严重衰减的问题,有效降低了系统误码率,改善了 Ka 频段的通信质量。

参 考 文 献

[1] LI X,WANG Y K,CHEN J Y,et al. The Research on the Ka-Band Characteristics of the Satellite-Ground Link [J]. Applied Mechanics Materials,2013,336-338:1726-1732.

[2] RYTIR M,CHEFFENA M,GROTTHING A P,et al. Three-Site Diversity at Ka-Band Satellite Links in Norway:Gain,Fade Duration, and the Impact of Switching Schemes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2017,65(11):5992-6001.

[3] DENG R Y,YANG F,XU S H,et al. An FSS-Backed Ku/Ka Quad-Band Reflectarray Antenna for Satellite Communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2018,66(8):4353-4358.

[4] ITU-R.P. 618-10. Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems[S]. Geneva,2009.

[5] THIENNVIBOON P,LERVATANAKITTAVORN P,LERVATANAKITTAVORN F K,et al. Simple Prediction Model for Diurnal Rain Attenuation Statistics on Earth-Space Links [C]//IEEE International Conference on Electrical Engineering. Phuket:IEEE,2017:258-261.

[6] VIDYARTHI A,GARG S,JASSAL B S,et al. Modeling of Rain Attenuation using Equiprobability of Rain Fade and Rain Fall [C]//IEEE International Conference on Computer Communication and Control. Indore:IEEE,2015:1-6.

[7] GONG S H,WEI D X,XUE X W,et al. Study on the Channel Model and BER Performance of Single-Polarization Satellite-Earth MIMO Communication Systems at Ka Band [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2014,62(10):5282-5297.

[8] PAN C S,LIU C L,LI H F,et al. Statistical Analysis of Bit Error in Ka Band Mobile Satellite Channel[J]. Journal of Computer Applications,2012,32(8):2137-2140.

[9] PEREZFONTAN F,JEANNIN N,CASTANET L,et al. Statistical and Physical-statistical Modeling of the Land Mobile Satel-

lite,LMS,Channel at Ku and Ka Band[C]//IEEE European Conference on Antennas and Propagation. Rome:IEEE,2011:27-3241.

[10] PANAGOPOULOS A D,KOUROGIORGAS C,PECHAC P,et al. Inverse Gaussian-based Composite Channel Model and Time Series Generator for Land Mobile Satellite Systems Under Tree Shadowing[J]. IET Microwaves Antennas and Propagation,2016,6(10):612-616.

[11] TARCHI D,COEAZZA G E,CORALLI V A,et al. Adaptive Coding and Modulation Techniques for Next Generation Hand-held Mobile Satellite Communications[C]//IEEE International Conference on Communications. Budapest:IEEE,2013:4504-4508.

[12] MIGUEL A M,SHANKAR B M R,KOUROGIORGAS I C,et al. Precoding,Scheduling, and Link Adaptation in Mobile Interactive Multibeam Satellite Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2018,22(9):1826-1829.

[13] WEI L,SONG G J. Adaptive Coded Modulation Based on Partial Channel Information for Mobile Satellite Systems[C]//IEEE International Conference on Communication Technology. Chengdu:IEEE,2017:2576-7828.

[14] MOREL C,ARAPOGLOU D P,ANGELONE M. Link Adaptation Strategies for Next Generation Satellite Video Broadcasting:A System Approach[J]. IEEE Transactions on Broadcasting,2015,61(4):603-614.

[15] XUE R,YU H,CHENG Q L. Adaptive Coded Modulation Based on Continuous Phase Modulation for Inter-Satellite Links of Global Navigation Satellite Systems[J]. IEEE Access,2018,6(1):20652-20662.

[16] GHARSELLAOUI A E,GHANEM S A M,TARCHI D,et al. Energy Efficient Adaptive Network Coding Schemes for Satellite Communications[C]//IEEE International Conference on Wireless and Satellite Systems. Cardiff:IEEE,2018:202-212.

[17] LUINI L,EMILIANI L,CAOSONI C. Planning of Advance Sat-Com Systems Using ACM techniques:The Impact of Rain Fade [C]//IEEE European Conference on Antennas and Propagation. Rome:IEEE,2011:3965-3969.

[18] CHUN L. Statistical Models for Land Mobile and Fixed Satellite Communications at Ka band [C]//Proceeding of Vehicular Technology Conference. Atlanta:IEEE,1996:1023-1027.

[19] MATRICCIANI E,SELVA S P. Attenuation Statistics Estimated from Radar Measurements in MEO Satellite Communication Systems for Mobile Terminals[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking,2003,20(10):167-185.

[20] CORAZZA G E,VATALARO F. A Statistical Model for Land Mobile Satellite Channels and Its Application to Nongeostationary Orbit Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,1994,43(3):738-742.