

基于星地通信系统的变速率通信质量控制方法

刘海燕¹, 蔡飞^{1,2}, 潘成胜^{1,2}, 蔡睿妍^{1,2}

(1. 辽宁省高校通信与信号处理重点实验室, 辽宁 大连 116622; 2. 大连大学 信息工程学院, 辽宁 大连 116622)

(caifeibaozi@126.com)

摘要:为有效地提高星地通信系统的通信质量,提出了一种改变信息传输速率的方法 VCTRM。该方法根据当前星地信道状况自适应地改变调制方式和码元传输速率,克服了采用变调制方式传输时在低信噪比时不能满足系统误比特率的缺陷,同时又解决了采用变码元传输速率在高信噪比时不能提高系统吞吐量的问题。通过 Matlab 对变调制方式、变码率及 VCTRM 三种传输方式进行了仿真,结果表明,VCTRM 在不同信道状况下均能满足系统对误比特率(BER)的要求,且获得的系统吞吐量明显高于其他方法。

关键词:通信质量;吞吐量;误比特率;调制方式;码元传输速率

中图分类号: TP393.03 **文献标志码:** A

Quality control approach of variable-rate communications based on satellite-to-ground communication system

LIU Hai-yan¹, CAI Fei^{1,2}, PAN Cheng-sheng^{1,2}, CAI Rui-yan^{1,2}

(1. Communication and Signal Processing Key Laboratory of University in Liaoning Province, Dalian Liaoning 116622, China;

2. College of Information Engineering, Dalian University, Dalian Liaoning 116622, China)

Abstract: In order to improve the communication quality effectively, an approach of changing information transmission rate named VCTRM was proposed. The approach changed the modulation type and the chip transmission rate adaptively according to the current channel status when satellite communicated with ground station. The approach not only overcomes the defect that variable modulation type cannot meet the requirement of Bit Error Rate (BER) in system, but also solves the problem that the variable chip transmission rate can not improve the throughput in bad channel status. Simulation was given on three kinds of information transmission methods with Matlab, variable modulation method, variable chip transmission method and VCTRM method. The simulation results indicate that the proposed approach can not only meet the requirement of the system BER at any time but also get larger throughput than other approaches apparently.

Key words: communication quality; throughput; Bit Error Rate (BER); modulation type; chip transmission rate

0 引言

随着通信技术的发展,卫星与地面站的通信速率越来越高,低频段有限的频谱资源导致载波频率由原来的几百兆赫兹变为几千兆赫兹甚至几十兆兆赫兹,使得卫星与地面站传输信息时损耗变得越来越大^[1]。当信道状况变差,系统接收端信噪比降低时,系统误比特率、吞吐量、时延、频带利用率等一系列影响通信质量的因素都将会受到严重影响,导致通信质量下降^[2-3]。针对这种情况,最直接有效的办法就是改变信息传输速率,现有的改变信息传输速率的方法主要有变码率方式^[4]和变调制方式^[5-7]。变调制方式传输在低信噪比情况下系统误比特率高,不能保证星地通信时的可靠性;变码率方式传输在低信噪比情况下虽仍能保证星地通信的可靠性,但在高信噪比情况下不能提高系统吞吐量,当传输数据量大时不能有效提高系统通信质量。

兼顾上述二种改变信息传输速率方式各自的优点,同时针对现有改变信息传输速率方式各自的缺点,本文提出了一种基于系统最大吞吐量的改变信息传输速率方法(Variable

Chip Transmission Rate and Modulation, VCTRM)。VCTRM 方法能在满足系统误比特率要求的前提条件下,保持最大的系统吞吐量,这样 VCTRM 方法在保证星地可靠通信的同时,提高系统通信质量。

1 星地链路传输分析

在卫星与地面的通信过程中,信号能否正确被接收取决于接收端接收到信号的信噪比,信噪比越小,误比特率越高,通信质量将越低。如何让星地通信时传输的信息经特殊环境(如自由空间损耗、传输路径损耗等)传输后,使得接收端仍能获得较好的接收性能以提高系统通信质量显得尤为重要^[8]。通过对星地链路传输的分析发现发射机发射功率、天线增益、信息传输损耗、码元传输速率之间的关系如下^[4]:

$$E_b/N_0 = \frac{P_T L_i G_T L_a G_r}{k T_s R_s} \quad (1)$$

其中: E_b/N_0 为接收的每位信息能量与噪声密度之比, P_T 为发射机的功率, L_i 为发射机到天线间的路径损耗, G_T 代表发射天线的增益, L_s 是自由空间损耗, L_a 是传输路径损耗, G_r 是接

收稿日期:2010-10-20;修回日期:2010-12-08。

基金项目:国家 863 计划项目(2009XX);辽宁省科技厅基金项目资助(2008403002)。

作者简介:刘海燕(1963-),女,黑龙江萝北人,教授,博士,主要研究方向:卫星通信;蔡飞(1985-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向:卫星通信、计算机网络;潘成胜(1962-),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:空间通信与网络;蔡睿妍(1979-),女,黑龙江林甸人,讲师,主要研究方向:卫星通信网络。

收天线的增益, k 为玻耳兹曼常数, T_s 代表系统噪声温度, R_s 为码元传输速率。

将空间链路方程以分贝为单位进行链路计算。假设信道处于某一状态时所有增益和损耗之和为 A , 则式(1)可简写为:

$$[E_b/N_0] = A - 10\lg R_s \quad (2)$$

从式(2)中可明显看出, 当各种增益和损耗不变时, 码元传输速率 R_s 和 $[E_b/N_0]$ 之间成反比关系; 若 R_s 保持不变, 当传输损耗增大即 A 减小时, $[E_b/N_0]$ 将减小, 系统误比特率将会增大, 严重影响星地链路传输的通信质量。当传输损耗增大时, 本文通过降低一定的码元传输速率 R_s 来提高 $[E_b/N_0]$ 的值, 弥补由于传输损耗变大带来的损失, 保证星地通信系统链路传输数据时的可靠性。

2 变速率策略

2.1 变调制方式传输

变调制方式是根据信噪比选择满足系统误比特率要求的调制方式, 即随着信道条件的改变而选择相应的信息传输速率, 提高系统吞吐量^[5-7]。各种调制方式的误比特率如图1所示。

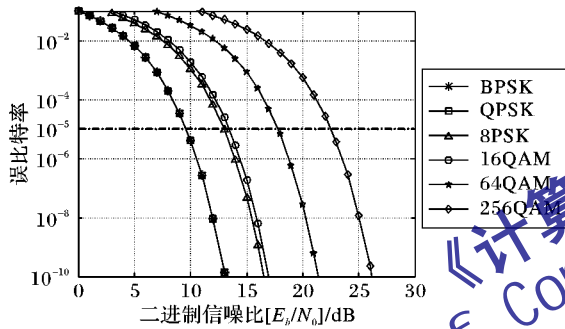


图1 不同调制方式误比特率

假设系统误比特率要求为小于 $1E-5$, 从图1中可以看出, 当 $9.6 \text{ dB} \leq [E_b/N_0] < 13.1 \text{ dB}$ 时, BPSK 和 QPSK 调制方式的误比特率一样, 但 QPSK 调制方式的调制阶数高, 选用 QPSK 调制方式; 当 $13.1 \text{ dB} \leq [E_b/N_0] < 13.5 \text{ dB}$ 时, 选用 8PSK 调制方式等。信噪比越高, 选用调制方式的调制阶数也越高, 相应的信息传输速率也会越高。码元传输速率、信息传输速率和调制阶数的关系如下^[2]:

$$R = R_s \lg M \quad (3)$$

其中: R 为信息传输速率, R_s 为码元传输速率, M 为调制阶数。

但当 $[E_b/N_0] < 9.6 \text{ dB}$ 时, 选择图中任何一种调制方式系统误比特率都将大于 $1E-5$, 不能满足系统误比特率要求, 将严重影响通信质量。

2.2 变码率方式传输

变码率方式传输通过改变码元传输速率能在信噪比低时, 如 $[E_b/N_0] < 9.6 \text{ dB}$ 时, 仍能满足系统误比特率要求, 使系统保持一定的吞吐量。文献[4]中提到, 变码率即保持接收端采样率不变, 降低发送端码元传输速率, 提高接收端判决概率和信号的信噪比。原理如下: 假设当前通信系统采用的调制方式为 BPSK 调制, 发送端码元传输速率为 R_s , 接收端采样频率为 f , 若 R_s 和 f 相等, 即一个码元只采集一次, 如图2所示。

接收端根据一次采集的结果进行判决输出, 所以接收端码元输出速率也为 R_s , 假设信道为高斯白噪声信道, 接收端误比特率由以下理论公式计算^[9], 式中 $M \geq 2$:

$$BER_{\text{MPSK}} \approx \frac{2}{\max(\lg M, 2)} \sum_{i=1}^{\max(M/4, 1)} Q\left(\sqrt{\frac{2E_b \lg M}{N_0}} \sin \frac{(2i-1)\pi}{M}\right) \quad (4)$$

$$BER_{\text{MQAM}} \approx \frac{4}{\lg M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} Q\left((2i-1) \sqrt{\frac{3E_b \lg M}{(M-1)N_0}}\right) \quad (5)$$

若降低 R_s , f 保持不变, 由于 R_s 的降低, 根据式(2), 接收端信号的信噪比将提高, 码元宽度变宽, 接收端在一个码元周期内取得的样点变多, 通过均值滤波器后的信号带宽变窄, 噪声功率变小, 使接收端判断码元正确的概率变大, 降低了系统误比特率^[4]。假设 R_s 变为原来的 $1/4$, 则接收端在判决接收到的码元之前采集的样点变为原来的 4 倍, 如图3所示。

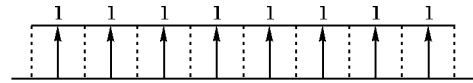


图2 接收端采样率和发送端码元传输速率一致时的采样

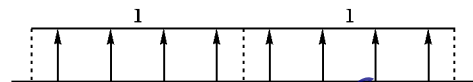


图3 接收端采样率为发送端码元传输速率4倍时的采样

假设原来的码元传输速率为 R_s , 信噪比为 $[E_b/N_0]$, 则由式(4)计算误比特率理论值为 BER ; 降低后的码元速率为 R_s' , 由式(2), 则信噪比变为 $[E_b/N_0]'$, 若码速降低后的采样率和码速保持一致, 即根据一次采集的样点对码元进行判断, 则误比特率由式(4)计算为 BER' 。但码元速率降低后, 判断一个码元, 需要采样 $N = R_s/R_s'$ 次, 对每 N 个采样值进行判决, 判决规则如下^[4]:

$$\sum_{i=0}^{N-1} T_i - N/2 \begin{cases} > 0, & \text{判为 1} \\ \leq 0, & \text{判为 0} \end{cases} \quad (6)$$

其中: T_i 表示第 i 次采样采集的数据, 为 0 或 1。假如码速降低为原来的 $1/5$, 则判断一个码元需要采 5 个样点, 由式(6)可以得出, 5 个样点当中若有 3 个判断正确, 则能正确判断出该码元, 而每个样点判断正确的概率 BER' 应通过将降速后的信噪比 $[E_b/N_0]'$ 代入式(4)计算得出。因此码速降低后通信系统接收端实际误比特率 BER'' 的计算表达式应如下, 式中 $N \geq 2$:

$$BER'' = \begin{cases} C_N^{N/2} BER'^{N/2} (1 - BER')^{N/2}, & N \text{ 为偶数} \\ C_N^{(N+1)/2} BER'^{(N+1)/2} (1 - BER')^{(N-1)/2}, & N \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (7)$$

本文通过 Matlab 对采用上述理论方式进行传输时系统接收端的误比特率进行了仿真, 信噪比范围为 $0 \sim 9.5 \text{ dB}$, 每一种信噪比仿真码元个数为 2 800 000。仿真结果如图4所示。

从图4中可以看出, 当码元传输速率和采样率保持一致, 即根据采集的一个样值判决码元时, 仿真曲线和理论曲线基本一致。当码元传输速率和采样率均降低为原来的 $1/3$ 时, 由式(2), $[E_b/N_0]$ 提高大约 4.8 dB , 误比特率降低。而当码元传输速率降低为原来的 $1/3$, 接收端保持原来的采样率不变, 判决一个码元需要采样三次时, 误比特率将比判决一个码元只采样一次时还要低。当信噪比低于 9.6 dB 时, 通过降低码元传输速率能有效降低误比特率, 从而满足系统误比特率的要求。

虽然这种方式在低信噪比情况下仍能满足系统误比特率要求,但当码元传输速率达到系统能承受的最大传输速率时,由式(3),系统的信息传输速率也达到最大;当传输损耗继续减小,信噪比提高,误比特率降得更低时,由吞吐量计算公式(9),系统吞吐量很难得到有效的提高,当在高信噪比情况下需传输大量数据时,系统通信质量将不能得到改善。

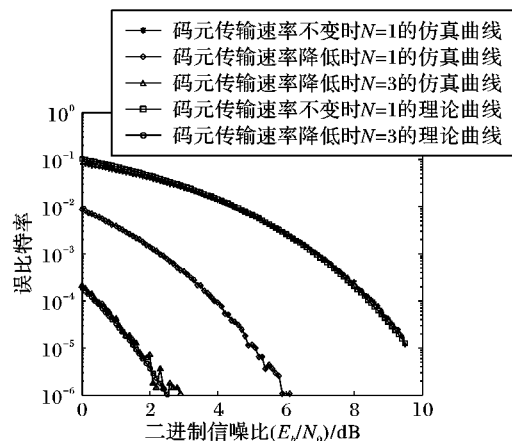


图4 变码率误比特率性能分析

2.3 VCTRM 方式传输

VCTRM 方式传输能使系统在信噪比很低的情况下仍能满足系统对误比特率要求,且能使系统在当前状态下保持较高的吞吐量。VCTRM 方式传输在信噪比低时降低码元传输速率或者改变调制方式或者两者同时改变,选择在满足系统误比特率要求前提条件下能使系统吞吐量达到最大的调制方式和 R_s ; 在高信噪比情况下,当 R_s 达到最大时,随着信噪比的提高适当改变调制方式,选择在满足系统误比特率要求前提条件下能使系统吞吐量达到最大的调制方式。

3 VCTRM 方式传输性能仿真分析

3.1 误比特率性能仿真分析

假设系统误比特率要求为小于 $1E-5$, 码元传输速率最大为 100 MBps。QPSK 调制固定比特率方式传输、QPSK 调制变码率方式传输、变调制方式传输和 VCTRM 方式传输的误比特率如图 5 所示。

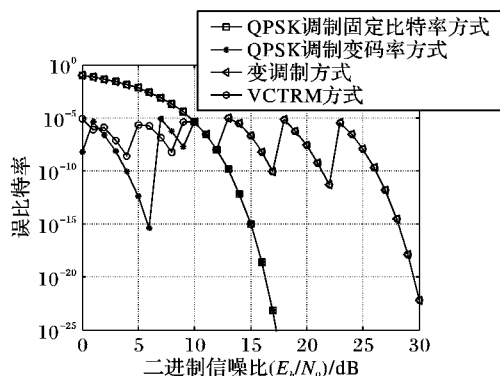


图5 不同方式传输误比特率性能分析

从图 5 可以看出,采用 QPSK 调制固定比特率方式传输时系统的误比特率与信噪比 $[E_b/N_0]$ 成反比,当 $[E_b/N_0] < 10$ dB 时,系统误比特率将大于 $1E-5$,不能满足系统误比特率的要求。采用变调制方式传输时的系统在信噪比较低时即使采用误比特率最低的 QPSK 调制方式,与采用 QPSK 调制固定比特率方式传输时一样,当 $[E_b/N_0] < 10$ dB 时,系统误比特率也将大于 $1E-5$,不能满足系统误比特率的要求。

而采用 QPSK 调制变码率方式传输和 VCTRM 方式传输的系统在信噪比即使很低的情况下仍能满足系统误比特率的要求。通过改变码元传输速率,在信噪比即使很低的情况下也能使系统误比特率小于 $1E-5$,从而保证了通信系统传输数据的可靠性。如当 $[E_b/N_0] < 10$ dB 时,假设 R_s 由 100 MBps 变为 50 MBps,则信息传输速率 R 由 100 MBps 降低为 50 MBps,由式(2), $[E_b/N_0]$ 将会增加约 3 个 dB,由变码率原理,结合式(4)和(7)计算得误比特率要比采用 QPSK 调制固定比特率方式传输时系统的误比特率低很多。改变码元传输速率能改变系统误比特率,且随着信噪比的降低,码元传输速率也会要求降得更低。

3.2 吞吐量性能分析

吞吐量计算公式如下^[10]:

$$\bar{T}_h = R \times \frac{L_f - r_p - r_f}{L_f} \times (1 - BER \times (L_f - r_p)) \quad (8)$$

其中: R 为信息传输速率; BER 为接收端误比特率; r_p 为包开销,假设为 6 B; r_f 为帧开销,假设为 12 B; L_f 为数据帧长,假设为 2 048 B。则吞吐量计算公式(8)可以简写成:

$$\bar{T}_h = R \times 0.982 \times (1 - BER \times 2036) \quad (9)$$

以上四种不同传输方式的系统吞吐量如图 6 所示。

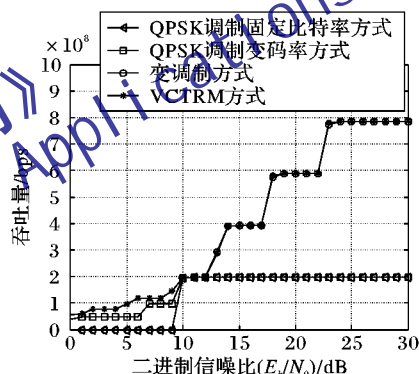


图6 不同方式传输系统吞吐量性能分析

从图 6 中可以看出,采用 QPSK 调制固定比特率方式传输,当 $[E_b/N_0]$ 低于 9 dB 时,由于采用该方式传输不能满足系统误比特率要求,系统吞吐量基本为 0;当信噪比高时,吞吐量基本保持不变,相比于采用其他方式传输时系统的吞吐量低很多。

采用 QPSK 调制变码率方式传输时,在信噪比较低时能满足系统误比特率的要求,因此系统的吞吐量要比采用 QPSK 调制固定比特率方式传输时高。但在信噪比较高时,与采用 QPSK 调制固定比特率方式传输时一样,随着信噪比提高也不能有效提高系统吞吐量。

采用变调制方式传输的系统在高信噪比情况下比采用 QPSK 调制变码率方式传输和 QPSK 调制固定比特率方式传输时的吞吐量都要高。信噪比越高,吞吐量也越高。但当信噪比较低时,与采用 QPSK 调制固定比特率方式传输时一样,不能满足系统误比特率要求,吞吐量也几乎为 0。

VCTRM 方式传输拥有变码率和变调制这两种变速率方式传输的优点,在满足系统误比特率要求前提下,自适应改变调制方式和码元传输速率,以提高系统吞吐量。当信噪比在 0 ~ 30 dB 范围变化时,本文采用的码元传输速率有四种,分别是 100 MBps、50 MBps、25 MBps、20 MBps。当 $[E_b/N_0] \geq 10$ dB 时,码元传输速率达到最大,采用 VCTRM 方式传输时的系统吞吐量与采用变调制方式传输时的系统吞吐量基本一

(下转第 941 页)

据公式:

调度成功率 = 成功调度的任务数/仿真测试任务规模

CPU 利用率 = CPU 被占用的仿真次数/仿真实验总次数

图5、6所示为SPara算法和Myopic算法调度成功率和CPU利用率的模拟测试结果对比。

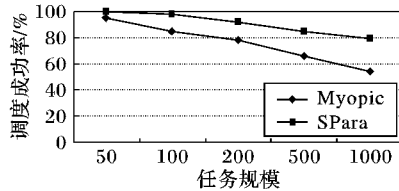


图5 调度成功率对比

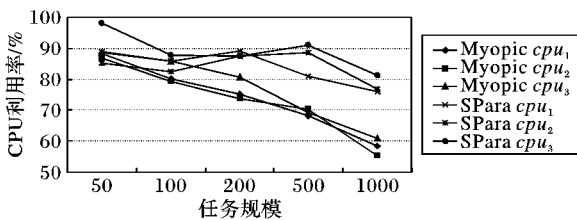


图6 CPU利用率对比

从对比图中明显可以看出:Myopic 算法没有考虑任务的紧迫度,导致任务调度不合理,调度成功率低;而且随着任务规模扩大,这种缺陷越明显。EDPF 算法是在 Myopic 算法的基础上,对不能满足截止期的紧急任务强制分割并行处理,该算法无法预知需要被分割的任务,导致分割任务次数过多,分割对任务的完整性影响很大,最极端的情况是,调度时需要对所有任务进行并行处理,甚至每个任务需要多次并行才能被调度,所以一般不采用这种算法。SPara 算法采用分割并行的方法,综合考虑任务紧迫度等多个因素对任务调度的影响,极大地提高了调度的成功率。

在处理器利用率方面,SPara 算法采用双重策略选择处理器:最早完成时间最小的处理器以及最早可用时间最接近资

源最早可用时间的处理器。这样协调了处理器之间的关系,达到良好的平衡效果,处理器利用率比较高。

4 结语

目前多处理器实时系统广泛应用于航天控制、交通运输等领域。实时多处理器系统的可靠性和高效性是该领域研究的重要课题,其中多处理器调度算法的两个重要目标:满足截止期和提高资源的利用率是提高实时系统性能的关键技术。本文针对执行时间长、紧迫度高的任务,综合考虑紧迫度以及紧急任务分割对调度的影响,提出了分割并行多处理器算法 SPara,解决了 Myopic 等多处理器调度算法的不足,结合高级颜色时间 Petri 网建立调度模型并仿真测试,其仿真结果显示该算法提高了的调度成功率,并且这种动态分割并行调度算法在保证任务截止期限的情况下,CPU 资源利用率也相应提高。

参考文献:

- [1] RAMAMRITHAM K, STANKOVIC J A. Efficient scheduling algorithms for real-time multiprocessor systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1990, 1(2): 184-194.
- [2] MAANIMARAN G, MURTHY C S R. An efficient dynamic scheduling algorithm for multiprocessor real-time systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1998, 9(3): 312-319.
- [3] 胡天一,徐中伟.多处理器并行 EDPF 优化实时调度算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(19): 35-38.
- [4] 魏雪莲,杨玉海,金士尧,等.一种基于分组与适当选取策略的实时多处理器系统的动态调度算法[J]. 计算机学报, 2006, 29(1): 81-91.
- [5] 李建国,陈松乔,鲁志辉,等.实时多处理器系统的动态分批优化调度算法[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(1): 84-89.
- [6] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 186-192.
- [7] 刘林钢,姜浩.基于时间约束 Petri 网的一致性验证算法[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(1): 58-62.

(上接第 906 页)

致;而当 $[E_b/N_0] < 10 \text{ dB}$ 时,采用 VCTRM 方式传输时的系统吞吐量要比采用其他三种传输方式时的系统吞吐量都要高。如当 $7 \text{ dB} < [E_b/N_0] < 10 \text{ dB}$ 时,只有采用 QPSK 调制变码率方式传输和 VCTRM 方式传输时的系统能获得一定吞吐量,采用 QPSK 调制变码率方式传输的系统将码速 R_s 降为 50 Mbps,信息传输速率降为 100 Mbps,便能满足系统误比特率的要求,此时系统吞吐量由式(9)计算得约为 98.2 Mbps;而采用 VCTRM 方式传输的系统将码速降为 20 Mbps,采用 64QAM 调制方式时也能满足系统误比特率要求,此时信息传输速率为 120 Mbps,吞吐量为 117.8 Mbps,比采用 QPSK 调制变码率方式传输时系统的吞吐量高出许多。当信噪比由高变低时,采用 VCTRM 方式传输比采用其他方式传输时的系统吞吐量都要高。

4 结语

卫星与地面站通信过程中,采用 VCTRM 方式传输的通信系统,在信噪比即使很低时仍能满足系统误比特率要求,使系统能保持一定的吞吐量,保证了通信的可靠性;在信噪比较高时又有效地提高了系统吞吐量,且随着信噪比的增大提高的幅度将继续增大。采用 VCTRM 方式传输的通信系统可以有效地控制通信质量。

参考文献:

- [1] (美)PRATT T, BOSTIAN C, ALLNUTT J. 卫星通信[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [2] 樊昌信,张甫翊,吴成柯. 通信原理[M]. 6 版. 北京:国防工业出版社, 2007: 12-14.
- [3] TANABE N, AOKI K, FURUKAWA T, et al. Adaptive communications quality control for wireless LANs[C]// ISAPCS 2007: International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Washington, DC: IEEE, 2007: 534-537.
- [4] 董立珉. 变速率星间射频通信的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007: 20-35.
- [5] 吴虹,袁佳杰,王东方,等. 自适应变速率 MQAM 在 VHF/UHF 频段的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(12): 2813-2815.
- [6] 黄清艳,魏急波,冉茂儒,等. 一种基于 IEEE 802.11 的多速率自适应 MAC 协议[J]. 现代电子技术, 2007(8): 115-120.
- [7] WEBB W T, STEELE R. Variable rate QAM for mobile radio[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(7): 2223-2230.
- [8] HARB K, SRINIVASAN A, HUANG C, et al. Prediction method to maintain QoS in weather impacted wireless and satellite networks[C]// ISIC 2007: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Washington, DC: IEEE, 2007: 4008-4013.
- [9] LU JIANHUA, LETAIEF K B, CHUANG J C-I, et al. M-PSK and M-QAM BER computation using signal-space concepts[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(2): 181-184.
- [10] 李树峰. AOS 协议吞吐量性能分析与 OPNET 建模仿真[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005: 29-34.