

# VSAT 卫星通信准时隙 ALOHA-CDMA 信道及其性能分析

邵建华, 殷奎喜, 赵 华, 王兴和

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 提出了一种可用于具有大量用户的 VSAT 卫星通信内向信道的准时隙 ALOHA-CDMA 接入协议, 并给出这种接入协议的信道模型. 然后, 分析计算了这种信道数据分组成功接收的概率和扩频码间干扰, 并对其信道吞吐性能进行分析和仿真. 仿真结果表明, 这种系统可以显著提高信道吞吐性能和信道利用率. 本文提出的准时隙 ALOHA-CDMA 信道, 对于简化组网成本具有现实的意义.

[关键词] 准时隙 ALOHA-CDMA, 扩频多址, 吞吐量

[中图分类号] TN914.5 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2008)04-0056-05

## Acknowledgment-type-ALOHA-CDMA Channels for VSAT Satellite Communication and Its Performance Analysis

Shao Jianhua Yin Kuixi Zhao Hua Wang Xinghe

(School of Physics and Technology Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract** A new kind of multiple access channel which is called acknowledgment-type random access and code division multiple access channel (ACK-ALOHA-CDMA) is proposed, which is suitable for inner channel of VSAT satellite communication. First the channel model is given, and then the throughput performance of the channel is studied. Simulation results show that a significant performance improvement can be gained by the ACK-ALOHA-CDMA channel.

**Key words** ACK-ALOHA-CDMA, spread spectrum, throughput

VSAT 卫星通信系统采用何种多址方式, 将直接影响 VSAT 系统的性能和成本. 基于 ALOHA 的随机接入方式是一种非常简单的和不规则的 TDMA 方式, 被广泛地应用于卫星 VSAT 分组数据传输中. 在每秒发生的消息数目服从泊松分布假设下, 经典的 ALOHA 信道的信道利用率为 0.184 时隙 ALOHA 信道的信道利用率也仅为 0.368. 采用 CDMA 扩频方法可以提高系统吞吐量<sup>[1-4]</sup>. 本文在此基础上, 提出一种基于时隙 ALOHA-CDMA 信道的、将扩频图案个数扩展为  $M$  的准时隙 ALOHA-CDMA 信道. 首先给出这种信道模型, 然后分析和计算了数据分组成功接收概率和扩频码间干扰, 通过对其信道性能进行分析及仿真结果表明, 这种系统可以显著提高信道吞吐性能和信道利用率. 它非常适用具有大量用户的卫星 VSAT 系统分组数据通信, 且能简化组网成本.

### 1 信道模型

在时隙 ALOHA 系统, 数据分组在时隙的始端开始发送, 需要全网同步设备, 组网成本较高. 为了在保证系统运行效率和吞吐性能情况下, 简化卫星 VSAT 系统组网成本, 本文提出一种适用于 VSAT 系统内向信道的准时隙 ALOHA-CDMA 信道模型, 具体做法如下:

由 VSAT 系统的主站 (Hub) 向端站 (VSAT) 发出询问信号包, 询问信号 (同步信号) 相当于时隙 ALO-

收稿日期: 2008-01-12

基金项目: 教育部重点实验室基金 (NS206005)、江苏省重点实验室开放基金 (JK20050304) 资助项目.

通讯联系人: 邵建华, 副教授, 研究方向: 编码、扩频通信和卫星通信. E-mail: shaojianhua@njnu.edu.cn 殷奎喜, 教授, 博士生导师, 研究方向: 编码及信息安全方面的研究. E-mail: yinkuixi@njnu.edu.cn

HA 信道中的定时信息. 端站收发信机中的控制单元的动作与询问脉冲同步. 由于端站到主站传输路径的距离不同, 对于同一个询问信号, 端站信号发射的动作并不同步, 因此这种信道可视为一种准时隙的 ALOHA-CDMA 信道.

将整个系统的扩频图案个数设定为  $M$  个, 将全部端站分成  $M$  个子系统, 每个子系统使用相同的扩频图案. 这样在子系统之间实现码分多址; 主站发出周期性询问信号, 端站收发信机可响应任意一个同步信号, 向主站发射数据分组; 端站发射信号后在一固定的时间内应收到回答信号, 否则随机地选择后面几个同步周期之一, 重发前一个数据分组, 直至成功. 图 1 给出这种准时隙 ALOHA-CDMA 接入协议和信道模型. 图中的  $\lambda_0$  是在原始状态下端站响应询问信号的发送概率;  $\lambda_r$  是在重发状态下端站响应询问信号的重发概率.

以主站发出的询问信号定义为时间原点, 将 VSAT 站经卫星到达 Hub 的时间记为 TOA, 则存在最大到达时间差  $D = \max(\text{TOA}) - \min(\text{TOA})$ . 显然, VSAT 端站数据分组到达 Hub 主站的时刻是一个随机变量, 假定其服从区间  $[0, D]$  上的均匀分布.

2 准时隙 ALOHA-CDMA 信道的性能分析

2.1 数据分组成功接收概率

假设在同一个询问脉冲周期  $T$  内, 某一子系统中发出数据分组的个数为  $n_i$ .  $n_i$  服从强度为  $\lambda_i$  的泊松分布<sup>[5]</sup>, 即:

$$P_{\text{rob}}[n_i = k] = \frac{(\lambda_i)^k}{k!} \exp(-\lambda_i), \tag{1}$$
$$k = 0, 1, 2, \dots; \quad i = 1, 2, \dots, M,$$

式中  $\lambda_i$  为子系统的业务量强度, 单位为个信号/秒.

在任何一个小系统中, 采用同一个扩频图案. 由于扩频码的自相关特性, 时间上重叠的分组只有落入冲突区间时才会发生碰撞. 设数据分组长度为  $T_0$ . 分组中的冲突区间为  $\alpha T_0$  (一般不超过扩频码的 2 个 chip), 其中  $\alpha$  称为俘获比<sup>[6]</sup>.

图 2 给出  $n$  个帧号相同的数据分组到达主站的时间  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . 其到达时间间隔  $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$  服从如下分布<sup>[7]</sup>:

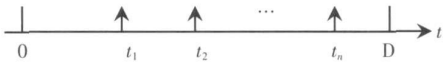


图 2 来自同一子系统数据分组到达时间  
Fig.2 Time of arrival for the same frame

$$P_{\text{rob}}[\Delta t_k > x] = \left[1 - \frac{x}{D}\right]^n, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad 0 < x < D \tag{2}$$

对于  $D/T_0 < 1$  时, 只有第一个数据分组可能成功, 其概率为:

$$P = P_{\text{rob}}[\Delta t_2 > \alpha T_0] = \left[1 - \frac{\alpha T_0}{D}\right]^n. \tag{3}$$

对于  $D/T_0 > 1$  时, 可能有一个以上的数据分组可能成功. 当  $n \geq 2$  时, 设  $p^{(k)}$  为第  $k$  个到达的数据分组成功的概率,  $q^{(k)}$  为某数据分组第  $k$  个到达的概率. 成功概率为:

$$P(n) = \sum_{k=1}^n p^{(k)} \cdot q^{(k)}. \tag{4}$$

显然:

$$q^{(k)} = \frac{1}{n}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

第 1 个到达的数据分组成功, 需要满足条件  $\Delta t_2 = t_2 - t_1 > \alpha T_0$ , 故:

$$p^{(1)} = P_{\text{rob}}[\Delta t_2 > \alpha T_0] = \left[ \left[ 1 - \alpha \frac{T_0}{D} \right] \right]^n. \quad (6)$$

第  $n$  个到达的数据分组成功, 需要满足条件  $\Delta t_n = t_n - t_{n-1} > T_0$ , 故:

$$p^{(n)} = P_{\text{rob}}[\Delta t_n > T_0] = \left[ \left[ 1 - \frac{T_0}{D} \right] \right]^n. \quad (7)$$

第  $k$  ( $2 \leq k \leq n-1$ ) 个到达的数据分组成功, 要同时满足条件

$$\begin{aligned} \Delta t_k &= t_k - t_{k-1} > T_0 \\ \Delta t_{k+1} &= t_{k+1} - t_k > \alpha T_0, \end{aligned} \quad (8)$$

因此有:

$$\begin{aligned} p^{(k)} &= P_{\text{rob}}[\Delta t_k > T_0, \Delta t_{k+1} > \alpha T_0] \approx P_{\text{rob}}[\Delta t_k > T_0] \cdot P_{\text{rob}}[\Delta t_{k+1} > \alpha T_0] = \\ &= \left[ \left[ 1 - \alpha \frac{T_0}{D} \right] \left[ 1 - \frac{T_0}{D} \right] \right]^n, \quad k = 2, 3, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (9)$$

由 (4)、(5)、(6)、(7) 和 (9) 式有:

$$P(n) = \frac{n-2}{n} \left[ \left[ 1 - \alpha \frac{T_0}{D} \right] \left[ 1 - \frac{T_0}{D} \right] \right]^n + \frac{1}{n} \left[ 1 - \alpha \frac{T_0}{D} \right]^n + \frac{1}{n} \left[ 1 - \frac{T_0}{D} \right]^n, \quad n \geq 2. \quad (10)$$

## 2.2 扩频信号多址干扰

设整个系统由  $M$  个子系统构成, 第  $i$  个子系统采用伪随机序列  $C^{(i)} = \{C_1^{(i)}, C_2^{(i)}, C_3^{(i)}, \dots, C_N^{(i)}\}$ , ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) 作为扩频序列,  $N$  为伪随机码长度,  $C_j^{(i)} = \pm 1$  为  $C^{(i)}$  的第  $j$  个码片 ( $j = 1, 2, \dots, N$ ). 由于作为扩频图案的伪随机码的相关特性不理想, 所以子系统间的碰撞必定产生干扰.

考虑第一个子系统数据分组, 接收机输入信号为:

$$r(t) = \sqrt{2S}C^{(1)}(t)d^{(1)}(t)\cos\omega t + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J_i} \sqrt{2S}C^{(i)}(t-t_j^{(i)})d_j^{(i)}(t-t_j^{(i)})\cos(\omega t + \varphi_j^{(i)}) + n(t), \quad (11)$$

式中, 第二项是干扰信号,  $S$  是信号功率,  $J_i$  是服从 (1) 式泊松分布随机变量,  $t_j$  是分组数据到达时间,  $n(t)$  是高斯白噪声. 解扩后输出信号为:

$$\begin{aligned} y(t) &= \sqrt{S/2}C^{(1)}(t)d^{(1)}(t) \cdot T_d + \\ &= \sqrt{S/2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J_i} \left\{ \int_0^{T_d} [C^{(i)}(t-t_j^{(i)})d_j^{(i)}(t-t_j^{(i)})] dt \cos\varphi_j^{(i)} \right\} + \int_0^{T_d} n(t)C^1(t)\cos\omega t dt \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $T_d$  为码元宽度. 显然多址干扰和噪声干扰  $z(t)$  为:

$$z(t) = \sqrt{S/2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J_i} \left\{ \int_0^{T_d} [C^{(i)}(t-t_j^{(i)})d_j^{(i)}(t-t_j^{(i)})] dt \cos\varphi_j^{(i)} \right\} + \int_0^{T_d} n(t)C^1(t)\cos\omega t dt. \quad (13)$$

因此, 多址干扰功率和噪声功率之和为:

$$\sigma_{z(t)}^2 = \frac{1}{4}S \sum_{i=1}^M \lambda_i T_0 \cdot (\overline{R_{1i}^2} + \overline{R_{li}^2}) \leq \frac{1}{4}SG \min_{1 \leq i, j \leq M} (\overline{R_{ji}^2} + \overline{R_{ji}^2}) + \frac{1}{4}N_0 T_d, \quad (14)$$

式中,  $R_{ji}$  是  $C^{(1)}$  和  $C^{(i)}$  非周期自相关函数,  $T_0$  为分组数据长度,  $N_0$  是噪声谱密度. 令:

$$r_{ki}(l) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{N-l-1} C_j^{(k)} C_{j+l}^{(i)}, & 0 \leq l < N-1 \\ \sum_{j=0}^{N+l-1} C_{j-l}^{(k)} C_j^{(i)}, & 1-N \leq l < 0 \\ 0 & \text{其它 } l, \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{ki}(n) = \sum_{l=1-N}^{N-1} r_{ki}(l) \cdot r_{ki}(l+n), \quad (16)$$

则有:

$$\overline{R_{ki}^2} + \overline{\hat{R}_{ki}^2} = \frac{T_d^2}{3N^3} [2\mathcal{U}_{ki}(0) + \mathcal{U}_{ki}(1)] . \tag{17}$$

若采用 Gold 码作为扩频图案, 一般可近似为  $2\mathcal{U}_{ki}(0) + \mathcal{U}_{ki}(1) = N^2$ , 则有多址干扰项 MAI

$$\text{MAI} = \frac{1}{4}SG \cdot \frac{T_d^2}{3N},$$

式中  $G = M \lambda_i T_0$ , 分组数据的误比特率  $P_e$  可由下式估计:

$$P_e = Q \left[ \frac{\frac{1}{2}ST_d^2}{\frac{1}{4}SG \frac{T_d^2}{3N} + \frac{1}{4}N_0T_d} \right]^{\frac{1}{2}} = Q \left[ \left[ \frac{2}{\frac{1}{3N}G + \text{SNR}_0^{-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \right] . \tag{18}$$

对于分组数据长度为  $T_0$  询问周期为  $T$  的准时隙 ALOHA-CDMA 信道, 分组数据的误比特率  $P_e$  可修正为:

$$P_e = Q \left[ \left[ \frac{2}{\frac{1}{3N}G \frac{T_0}{D} + \text{SNR}_0^{-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \right] . \tag{19}$$

若采用的纠错编码可纠正  $e$  位错误, 则分组数据被正确传输的概率  $P_w(G)$  为:

$$P_w(G) = \sum_{i=0}^e \binom{L}{i} P_e^i (1 - P_e)^{L-i} . \tag{20}$$

2.3 吞吐量

结合 (1)、(10) 和 (20) 式, 得到准时隙 ALOHA-CDMA 信道的吞吐量  $S(G)$  为:

$$S(G) = MP_w(G) \sum_{k=1}^{\infty} [k \cdot P(k) \cdot P_{\text{rob}}[n_i = k]] = P_w(G) \cdot M e^{-GM} \left[ e^{\beta_1 GM} + e^{\beta_2 GM} + \frac{\beta_3 G}{M} e^{\beta_3 GM} - \frac{(\beta_1 + \beta_2 - \beta_3 - 1)}{M} G - 2e^{\beta_3 GM} \right] , \tag{21}$$

式中:  $\beta_1 = 1 - \alpha T_0 D$ ,  $\beta_2 = 1 - T_0 D$ ,  $\beta_3 = \beta_1 \beta_2$

3 仿真与数值结果分析

考虑到 VSAT 站的地理分布及数据分组长度,  $D/T_0$  取值为 3 数据分组长度  $L$  取 100 俘获比  $\alpha$  取 0.05 图 2 是扩频处理增益  $N = 511$ , 子系统数  $M = 30$  接收机输入端信噪比为 6 dB 纠错位数  $e$  分别为 0 1 2 时, 系统的吞吐性能, 当  $e > 2$  时, 系统吞吐量已无明显改善, 除非接收机输入端信噪比达不到 6 dB 或扩频处理增益远低于 511 图 3 是扩频处理增益  $N = 511$ , 纠错位数  $e = 2$  接收机输入端信噪比为 6 dB 子系统数  $M$  分别为 10 30 100 时, 系统的吞吐性能, 系统吞吐量随着  $M$  的增加改善得非常明显. 实际的 VSAT 通信系统中, 如果 VSAT 端站数量不是太多, 可考虑每个端站给定一个扩频码, 使系统吞吐性能达到最佳.

图 4 是子系统数  $M = 30$  纠错位数  $e = 2$  接收机输入端信噪比为 6 dB 扩频处理增益  $N$  分别为 31 63 511 时, 系统的吞吐性能, 当  $N > 511$  时, 系统吞吐量已无明显改善. 图 5 是扩频处理增益  $N = 511$ , 纠错位数  $e = 2$  子系统数  $M = 30$  接收机输入端信噪比 SNR 分别为 2 dB 3 dB 10 dB 时, 系统的吞吐性能, 在 SNR  $< 10$  dB 时, 系统吞吐量随着 SNR 的增加改善得非常明显, 但 SNR  $> 10$  dB 后, 信噪比的提高, 系统吞吐量改善不明显, 因此, 可以说在这种条件下, 接收机输入信噪比只需达到 10 dB 时, 系统即可获最佳吞吐性能.

4 结束语

本文提出了一种可用于具有大量用户的 VSAT 卫星通信内向信道的准时隙 ALOHA-CDMA 信道, 给出其信道模型, 分析计算了这种信道数据分组成功接收的概率和扩频码间干扰, 并对其信道吞吐性能进行分析. 由于这种系统的时间同步由主站向 VSAT 站发送询问信号即同步信号来实现, 因此对简化系统方案,

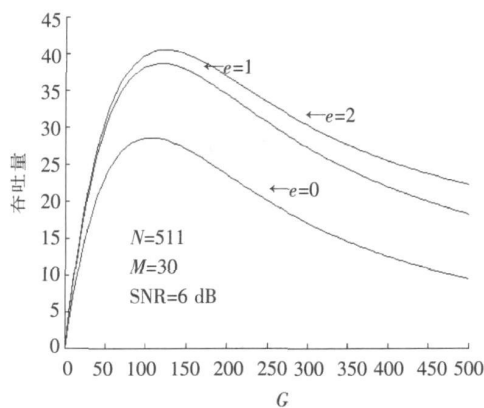


图 2  $e=0, 1, 2$  时系统吞吐量  
Fig.2 Throughput for  $e=0, 1, 2$

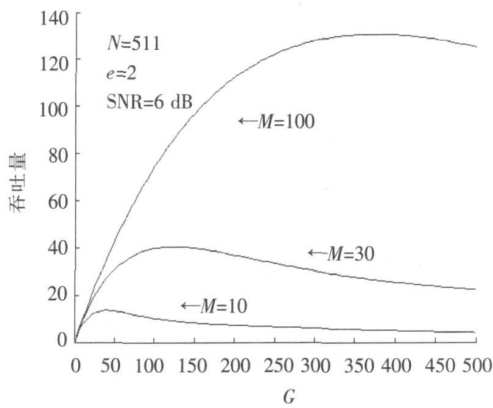


图 3  $M=10, 30, 100$  时系统吞吐量  
Fig.3 Throughput for  $M=10, 30, 100$

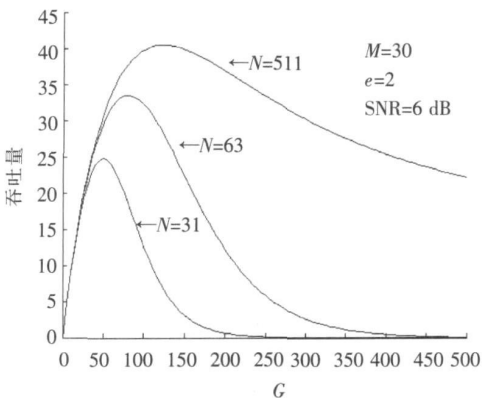


图 4  $N=31, 63, 511$  时系统吞吐量  
Fig.4 Throughput for  $N=31, 63, 511$

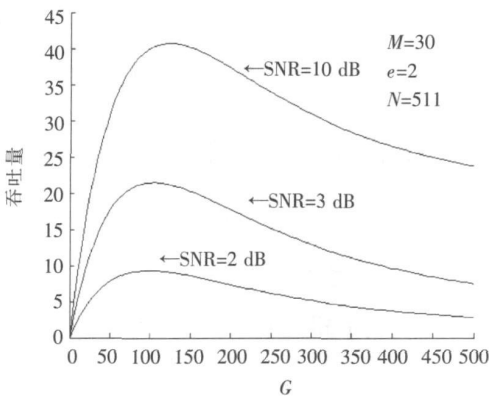


图 5  $\text{SNR}=2 \text{ dB}, 3 \text{ dB}, 10 \text{ dB}$  时系统吞吐量  
Fig.5 Throughput for  $\text{SNR}=2 \text{ dB}, 3 \text{ dB}, 10 \text{ dB}$

降低组网成本大有好处。仿真结果表明,这种信道的吞吐性能和信道利用率得到了极大的提高,且其最佳吞吐性能在不同信噪比条件下,可以通过增加纠错码纠错位数或提高扩频处理增益来达到。如在接收机信噪比 SNR 为 10 dB 时,只要保证扩频处理增益  $N$  为 511,纠错位数  $e$  为 2 位,如果 V SAT 端站数量不是太多,可考虑每个端站给定一个扩频码,即可以使系统的吞吐性能达到最佳水平。

[参考文献]

[ 1 ] Abramson N. Fundaments of packets multiple access for satellite networks [ J ]. IEEE Trans Commun, 1988, 36( 3 ): 272-280

[ 2 ] de Graaf P W, Lehnert J S. Performance comparison of a slotted ALOHA DS/SSMA network and a multi-channel narrow-band slotted ALOHA network [ J ]. IEEE Trans Commun, 1998, 46( 4 ): 544-551.

[ 3 ] Toshimitsu K, Yamazoto T, Katayama M, et al. A novel spread slotted ALOHA system with channel bad sensing protocol [ J ]. IEEE J Select Areas Commun, 1995, 12( 4 ): 665-672

[ 4 ] Tsuyoshi Arai, Hiroasa Haruchi. On the frame structure of the spread ALOHA system using three-valued signaling [ C ] // 2004 International Symposium on Information Theory and Its Applications ( ISITA 2004 ), Parma: Society of Information and Its Application, 2004

[ 5 ] 邵建华,殷奎喜,王兴和,等. 准时隙 ALOHA-CDMA 信道的检测概率 [ J ]. 南京师大学报: 自然科学版, 2008, 31( 3 ): 54-58

[ 6 ] Davis D H, Gronemeyer S A. Performance of slotted ALOHA random access with delay capture and randomized time of arrival [ J ]. IEEE Trans Commun, 1980, 28( 5 ): 703-710

[ 7 ] Robert B C. Introduction to Queueing Theory [ M ]. 2nd ed. New York: North Holland, 1980

[责任编辑: 顾晓天]