

基于 Markov 链模型的卫星无线分组 抗干扰网络性能分析

刘海涛¹, 韩方景², 万建伟²

(1. 上海桂平路 680 号 33 号楼 6 楼, 上海 200233; 2. 国防科技大学 四院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 设计了一种新的基于自适应调零天线阵的分组无线网络低轨小卫星(LEO)接收机系统。本自适应阵列接收机级联了扩频、自适应调零和变换域滤波三种抗干扰技术。为了发挥系统优势,提出了导频信道辅助的扩频方案。建立了马尔可夫链模型,详细讨论了这种扩频时隙 ALOHA 协议的吞吐量和延迟性能。结果表明,网络的吞吐量与延迟特性均得到显著改善,当阵列天线数为 8 时,吞吐量与标准的时隙 ALOHA 协议相比增加了 125%。

关键词: 马尔可夫链 小卫星通信系统 自适应调零天线阵 分组无线网络 时隙 ALOHA 协议

由于小卫星技术的发展,目前卫星移动通信系统主要采用非同步的低轨道小卫星,具有在传输时延短、路径损耗低、能更有效地实现频率复用、多星组网、卫星研制周期短和发射费用低等一系列优点,在国民经济与国防建设中有着很好的发展前景^[1]。对于军事卫星通信系统,研制具有极强生存能力、能够保障强对抗环境下不间断、抗干扰的保密通信的战略战术卫星显得尤为重要。

卫星与各小站之间的下行链路一般采用广播方式,相对较简单,上行链路的多址接入方式很多^[1],这也是本文的研究重点。CDMA-ALOHA 协议在卫星通信中的应用很广泛^[2],Abramson 在文献[3]中分析了分组无线数据网络中 ALOHA 与 CDMA 多址接入协议的联系,提出了单码扩频 ALOHA 协议,并与多码 CDMA 系统进行了比较,发现两者的性能相当,但是单码 ALOHA 协议可以极大地简化接收机设计。

本文设计了一种新的基于自适应调零天线阵的无线分组网络小卫星的抗干扰通信系统。提出一种自适应阵列接收机,将扩频、自适应调零和变换域滤波三种抗干扰技术级联在一起。利用 Markov 链模型,详细讨论了这种采用单码(导引信道辅助)扩频 slot-ALOHA 协议的性能,并分析了这些技术给网络性能带来的影响。

1 自适应调零天线阵系统

采用自适应天线调零的目的是使到达方向上的干扰功率最小而使到达方向上的有用信号功率最大。由于 LMS 算法不需知道信号的波达方向(这在军事移动通信中极为重要),成为常用的自适应调零算法^[4]。要想使算法依一种准则自适应地收敛到维纳解,需要一个与期望信号相关的参考信号,可以使用训练序列实现参考信号。但是训练序列不仅占用频带资源,而且不太适合时

变的信道环境。Compton 提出了对阵列输出扩频信号进行 PN 码的捕获、跟踪和解扩、窄带滤波、重扩等几个步骤完成参考信号提取的方法^[5],文献[6]改进了该技术,并详细讨论了系统进入抗干扰稳态的条件。

结合商用网络中上行链路采用导引信道的成功经验,考虑到军事通信装备的兼容性需求,本文设计了导引信道辅助的扩频方案,导引信道不仅可以建立通信双方的载波和码元同步^[7],而且在导引信道获得的定时信息帮助下,可以直接完成数据通道的解扩。由于分组无线网络的 PN 码捕获和同步保持对于网络性能的影响十分大,分组初始捕获成功后,由于信道传输的影响和收发信机固有的频差可能会造成同步飘移。借助导引信道,接收机很容易对此进行修正。专门的一个导引控制信道不但能够实现快速的捕获效应,而且便于实现同步保持。图 1 为采用这种方案的发射机扩频框图,其中 PN_DATA 与 PN_pilot 频率及相位均相同,同时满足正交条件,因此,只要在接收端与 PN_pilot 码(巴克码)同步,即对 PN_DATA 码实现了同步。

接收机系统结构图如图 2,级联了三种抗干扰手段:自适应阵调零、扩频、变换域滤波。其中变换域滤波是对

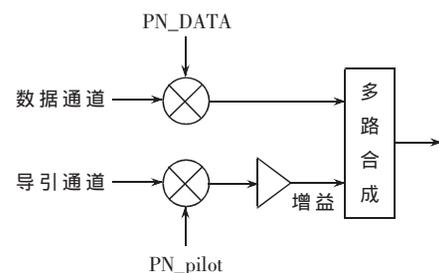


图 1 导引信道辅助的发射端扩频方案

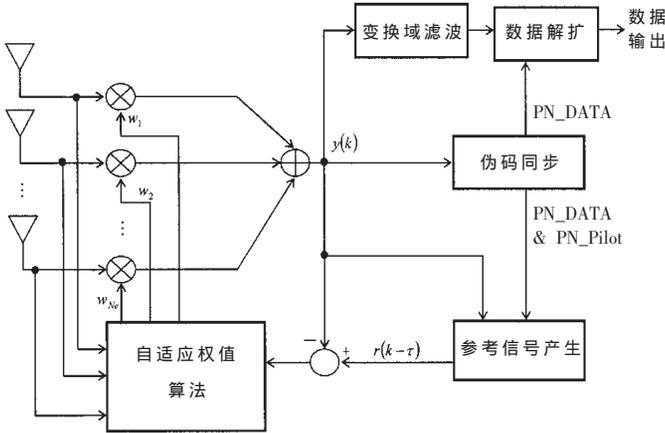


图2 自适应阵系统结构

前两种手段的补充,能够将时域信号变换到频域,然后利用频域上信号与干扰的区别来去除干扰,特别是对干扰与信号在空间上不能区分的情况。

自适应阵应用于分组无线网络的难点是捕获问题,具备延迟捕获的接收机的网络性能会得到很大的提高^[8]。自适应阵的初始权值一般设置为全向天线,如果两个使用相同扩频导引码调制的分组同时到达接收机,它们是强相关的,但是只要它们到达时间偏移量超过一个码片间隔,那么就是正交的,具备延迟捕获能力的接收机就能够成功捕获第一个到达分组^[9],然后立即进入同步跟踪状态,并且在相关峰内产生自适应阵列收敛所需的参考信号,后到的分组被当成干扰信号。参考信号提取环路结构如图3^[6]。

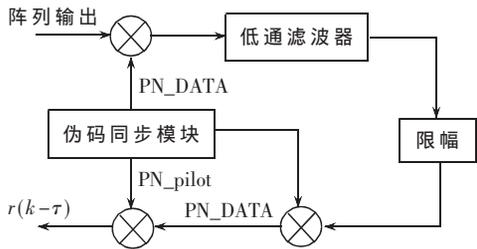


图3 参考信号提取环路

为了保证分组接入的公平性,发射机传输分组时在一个不确定时间(T_u)内随机选择开始时刻,时隙间隔 T_s 为分组时段长度 T_p 与 T_u 的和,如图4。导引信道从捕获到阵列收敛,进入抗干扰状态所需的时间为 T_{cov} ,数据信道的分组数据从此开始,如图4所示。

2 网络性能分析

本文假设的网络环境为 M 个终端小站节点和一个装

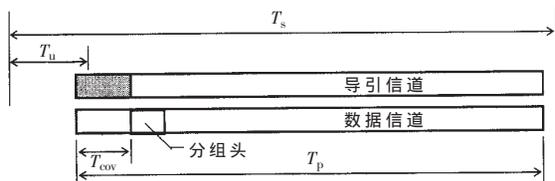


图4 数据包结构

备自适应天线阵的小卫星转发器,同时假设网络均衡,每个节点具有相同的行为和特性。在上行链路中,终端节点通过扩频时隙ALOHA协议实现多址随机接入。为了通过Markov链来分析系统性能,将节点分成两种状态:积压(backlogged)状态和非积压(unbacklogged)状态^[10]。如果一个节点数据包中的传输不成功,并在当前时刻等待重传,则称之为积压状态,反之则为非积压状态。同时假设只有非积压节点产生新的数据包,而且包的传输概率为 p_n 。当新数据包传输失败在下一时隙变成积压节点时,重传概率为 p_r ,一般假设 $p_r \geq p_n$,使得积压节点得以迅速清除^[11]。

2.1 Markov链模型

设 X_k 为 k 时隙的积压节点数目,则 $k+1$ 时隙的积压节点数决定于 k 时隙的积压节点数和成功传输的数据包数目,所以 X_k 为一个Markov链,状态空间为 $E_X = \{0, 1, \dots, M\}$,其中一步转移矩阵 $P = [P_{ij}]$ 。

设在一个时隙内产生的数据包总数为 $n_i = n_n + n_r$,其中 n_n 为非积压节点产生的新数据包数, n_r 为积压节点产生的重传数据包数。当 $X_k = i (i \in E_X)$ 时, n_n, n_r 为独立伯努利(Bernoulli)随机变量,其分布分别为:

$$Q_r(l/i) = P_r\{n_r = l | X_k = i\} = \binom{i}{l} p_r^l (1-p_r)^{i-l} \quad (1)$$

$$Q_n(l/i) = P_n\{n_n = l | X_k = i\} = \binom{M-i}{l} p_n^l (1-p_n)^{M-i-l} \quad (2)$$

则总的数据包数目分布为:

$$Q_i(l/i) = P_r\{n_i = l | X_k = i\} = \sum_{s=0}^l Q_n(s/i) Q_r(l-s/i) \quad (3)$$

设 $P_s(l)$ 为在 l 个数据包同时传输时,成功接收一个数据包的概率,它取决于自适应阵的特性和接收机的捕获性能。注意到接收机一个时隙内最多只能接收一个分组,通过枚举所有可能的条件,得出 $P = [P_{ij}]$ 。

$$P_{i,j} = \begin{cases} 0 & j < i-1 \\ Q_n(0/i) \sum_{l=1}^i Q_r(l/i) P_s(l) & j = i-1 \\ Q_n(k+1/i) \sum_{l=0}^i Q_r(l/i) P_s(l+k+1) & j = i+k, i=0, \dots, M, \\ & k=0, \dots, M-i \\ + Q_n(k/i) \sum_{l=0}^i Q_r(l/i) (1-P_s(l+k)) & \end{cases}$$

2.2 数据包成功接收概率

为了求 $P_s(l)$,首先要区分成功捕获的数据包和成功接收的数据包。成功捕获的数据包是指针对目标节点的参考信号已经产生,收发之间通过PN_pilot实现了同步(设捕获概率为 $P_{ac}(l)$)。成功捕获之后,成功接收捕获数据包的概率为 $P_{su/ac}(l)$,由此:

$$P_s(l) = P_{ac}(l) P_{su/ac}(l) \quad (4)$$

由于扩频通信的接收机提供延迟捕获的能力,如果首达数据包与其他数据包到达的时间大于一个码片间

隔,接收机可以成功捕获第一个到达包^[8],捕获概率为:

$$P_a(l) = \begin{cases} 1 & l=1 \\ (1-1/Q)^l & l \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $Q = \frac{T_u}{T_c}$ 表示延迟捕获子时隙数目, T_c 为码片间隔, T_u 为不确定的随机竞争间隔。

数据包捕获之后,成功接收与否不仅与接收机的误码率有关,而且还与无线网络环境的干扰节点的数据包相关。

根据文献[12],扩频和自适应阵结合的接收机的误码率为:

$$P_b(l) = Q \left(\sqrt{\frac{3GD}{l(1+8\beta)-1}} \right) \quad (6)$$

其中, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$, G 为扩频增益, β 为

复用因子(根据本系统,取值 0.149 62), D 为波束方向系数(为了便于分析网络性能,天线模型不考虑俯仰角的影响):

$$D = \frac{2\pi}{\int_0^{2\pi} G(\varphi) d\varphi}, G(\varphi) \text{ 为方向图。}$$

由以上比特误码率可以得到包传输成功概率:(设数据包长度为 L)

$$P_{pa}(l) = (1 - P_b(l))^L \quad (7)$$

当一个分组被成功初始捕获后,马上进入自适应算法所需的参考信号提取阶段,并自适应调整天线权值,形成零陷来达到抗干扰的目的。但是零陷数目受天线数目 (N_e) 的限制, N_e 单元天线阵最多只能产生 $N_e - 1$ 个零^[13]。空域抗干扰性能与阵列的调零分辨率 (θ_b) 有关,对在同一主瓣之内的信号和干扰,自适应阵不能形成零陷,自适应阵列的角度分辨率用波束宽度来衡量,它通常被定义为主波束的半功率 (-3dB) 点之间的角度范围。对于孔径长为 L_a 的阵列,可得:

$$\theta_b = \Delta\varphi_{3dB} \approx \frac{\lambda}{L_a} \quad (8)$$

设抗干扰成功接收概率为 $P_{anti_su}(l)$,各节点到达角度的独立性由上分析可得^[11]:

$$P_{anti_su}(l) = \begin{cases} 1 & l=1 \\ \left(1 - \frac{\theta_b}{2\pi}\right)^{l-1} & 2 \leq l \leq N_e \\ 0 & l > N_e \end{cases} \quad (9)$$

进而得到捕获后成功接收数据包的概率:

$$P_{su/ac}(l) = P_{pa}(l) P_{anti_su}(l) \quad (10)$$

由此可综合求出 $P_s(l)$ 。

2.3 吞吐量与延时性能分析

当求出 $P_s(l)$ 之后,可以计算在 j 状态下的条件吞吐量:

$$S(j) = \sum_{l=1}^M Q_T(l/j) P_s(l) \quad (11)$$

平均产生的新分组为:

$$S_in(j) = (M-j)P_n \quad (12)$$

由于转移矩阵是有限状态的层次不可约,可以得到 Markov 链的稳态分布^[14]:

$$\Pi = \pi P \quad (13)$$

其中 $\sum_{j=0}^M \pi(j) = 1$ 。

根据稳态值可以求出平均积压节点数目 $\bar{B} = \sum_{j=0}^M j\pi(j)$, 以

及平均吞吐量 $\bar{S} = \sum_{j=0}^M S(j)\pi(j)$ 。

在稳态时,平均到达率等于平均吞吐量,根据里托定理^[10],可以求得平均延迟:

$$\bar{D} = \frac{\bar{B}}{\bar{S}} \quad (14)$$

3 结果分析

首先考察系统的条件吞吐量 $S(j)$, 假设 $M=30$, $P_n=0.01$, 系统的业务量 $M \times P_n = 0.3$ (packets/slot), $P_r=0.2$, $L=1024$, $G=20$, $Q=50$, 频率 20GHz, 如图 5。当自适应阵列加入之后,由于对干扰形成零陷的数目相应增加,减少了碰撞,网络吞吐量得到了明显的提升。

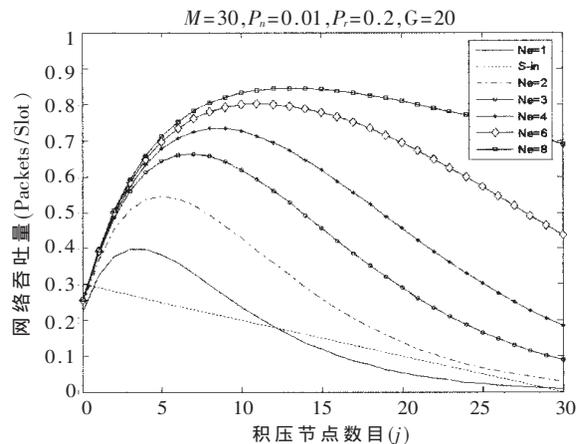


图 5 条件吞吐量比较

根据 ALOHA 协议的稳定性分析,如果条件吞吐量 $S(j)$ 与新到分组曲线 $S_in(j)$ 只有一个交点,且交点位置处于低延迟区域,则有限样本的 ALOHA 模型是稳定的^[10,15];即这个交点代表平均网络输出负载(包括新发送和重传分组)与平均输入新分组的平衡点。当有两个交点时 ($N_e=1$),说明网络工作在一个双稳态,其中一个就是非稳定的平衡点,系统一旦到达该点马上进入饱和状态。结果表明,当采用了自适应阵之后,网络由不稳定状态进入稳定状态,且平衡点均在低延迟、高吞吐量区域。当 $N_e=8$ 时,网络性能比标准时隙 ALOHA 协议 (0.368) 提升了 125%。

当业务量较大, $P_n=0.03$ ($M \times P_n = 0.9$ (Packets/slot)), 如图 6, 当 N_e 个数大于 4 时,才达到稳定,可以根据业

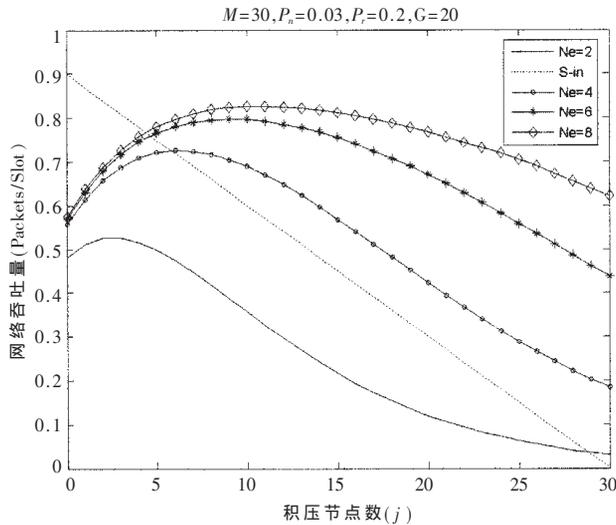


图 6 业务量增加对网络的影响

务量的大小选择适当的自适应阵来满足需求。

平均延迟与天线数目的关系见图 7，阵列天线数目的增加明显改善了网络的延迟特性。

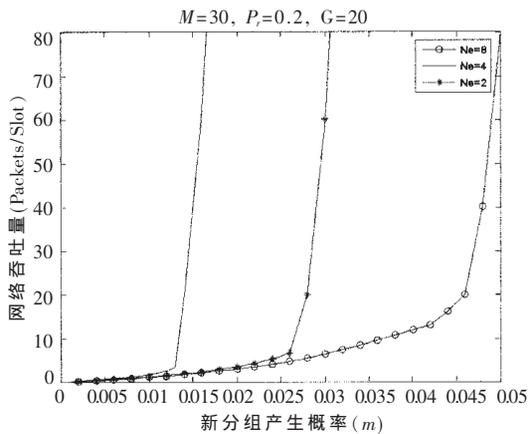


图 7 平均延迟与天线数目的关系

延迟捕获子时隙数目 Q 值对网络性能的影响可见图 8。碰撞对于时隙 ALOHA 协议性能的影响是主要因

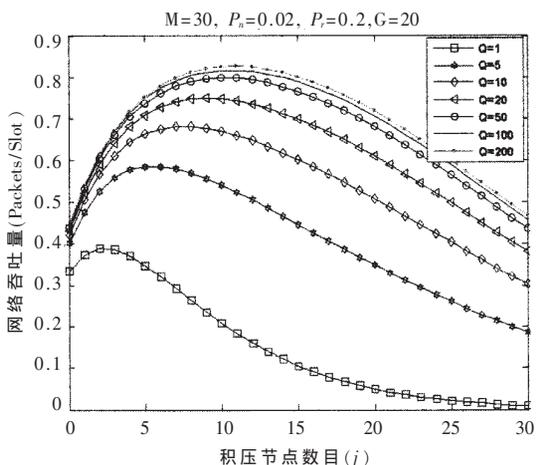


图 8 延迟捕获子时隙数目 Q 对性能的影响

素。由于接收机具备延迟捕获能力,随着 Q 值的增加,性能明显改善。当增加到一定程度时(与业务量大小和节点总数有关),碰撞概率下降,改善已不大,同时过大的 Q 值会浪费分组的数据段时间,所以必须权衡取值。

本文设计了一种新的基于自适应调零天线阵的分组无线网络低轨小卫星接收机系统。详细讨论了这种采用自适应调零天线阵的单码扩频时隙 ALOHA 协议的吞吐量和延迟性能。结果表明,采用这种技术的接收机,网络性能得到明显提高,而且本系统具备的抗干扰能力适合于军事小卫星通信系统。

参考文献

- 1 王秉钧,王少勇. 卫星通信系统. 北京: 机械工业出版社, 2004
- 2 González O A and Kohn R. A spread slotted CDMA/ALOHA system with hybrid ARQ for satellite multiple access. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2000;18(1)
- 3 Abramson N. Multiple access in wireless digital networks. Proceedings of the IEEE,1994;82(9)
- 4 Y.Lee W C. 移动通信工程理论和应用. 北京: 人民邮电出版社, 2002
- 5 Compton R T and Jr. Adaptive antennas concepts and performance. Hal Inc, Englewood Cliffs,New Jersey, 1988
- 6 韩方景.自适应天线抗干扰技术. 博士论文. 长沙: 国防科技大学, 2002
- 7 Choi J.Pilot Channel-Aided techniques to compute the beam-forming vector for CDMA systems with antenna array. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2000;49(9):1760~1775
- 8 Davis D A and Gronemeyer S A. Performance of slotted ALOHA random access with delay capture and randomized time of arrival, IEEE Tran.on COMMU,1980;28(5):703~710
- 9 Pursley M B. The role of spread spectrum in packet radio networks. Proceeing of the IEEE,1987;75(1):116~134
- 10 (美)伯塞卡斯等著,卢刚等译. 数据网络. 北京: 人民邮电出版社, 2004
- 11 Ward J, Compton T R and Jr. Improving the performance of a slotted ALOHA packet radio network with an adaptive array. IEEE Tran.on COMMU,1992;40(2):292~300
- 12 Liberti C J, Rappaport T S. Analytical results for capacity improvements in CDMA. IEEE Transactionson Vehicular Technology, 1994;43(8):680~690
- 13 罗伯特.A.蒙津戈,托马斯.W.米勒著,沈铁汉等译.自适应阵导论. 北京: 国防工业出版社, 1988
- 14 陆大绘.随即过程及其应用.北京:清华大学出版社,2001
- 15 K. L. and Lam S S. Packet switch in a multiaccess broadcast channel performance evaluation. IEEE Tran.on COMMU, 1975;23(4):410~423

(收稿日期:2006-04-29)