

基于跨层设计的卫星 MAC 协议

李 陆, 郭 庆, 管明祥, 井庆丰

(哈尔滨工业大学 电子与信息技术研究院, 哈尔滨 150001)

摘要: 基于跨层设计的思想, 将物理层的信道状态和 MAC 层的接入策略联合考虑, 提出了 CFDAMA-CCSI (combined channel state information) 协议。根据信道状态的动态变化, 终端和卫星调度器调整接入策略。仿真结果表明, 在雨衰环境中, 该策略有效提高了信道利用率, 改进了时延性能。

关键词: 通信技术; CFDAMA-CCSI; 跨层设计

中图分类号: TN927 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2008)06-1458-05

Cross-layer design for satellite MAC protocol

LI Lu, GUO Qing, GUAN Ming-xiang, JING Qing-feng

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the idea of cross-layer design, in consideration of both channel state in physical layer and access scheme in MAC layer, a novel MAC protocol, called CFDAMA-CCSI protocol using channel state information was proposed. According to the channel state, the terminals and satellite dynamically adjust the access scheme. Simulations demonstrate that the proposed protocol can increase channel utilization efficiency and improve delay performance.

Key words: communication; CFDAMA-CCSI; cross-layer design

在有线网络中, 协议设计方式按照 OSI 的 7 层协议模型进行分层独立设计, 各层具有相对比较独立的功能。每一层只用到下一层所提供的固定信息, 而并不关心下层的工作过程。这种模块化的网络分层结构设计方法简化了网络设计, 具有较好的通用性。然而, 这种严格的分层设计方法不能很好地适应无线通信的特点, 没有充分利用网络资源以实现最优的性能。

相对于有线网络, 卫星网络具有频谱资源有限, 存在高误码率的特点。由于雨衰的作用, 使得卫星信道具有时变的特性, 对于协议的性能有一

定的影响。如将频谱资源分配给信道差的用户会造成资源的浪费; 由于链路错误导致数据包传输错误会引起 TCP 发送端启动拥塞控制策略, 影响吞吐量性能。在卫星网络中, 协议设计并不是单独的对某一层进行工作, 而是需要将各个相关层进行综合考虑。跨层协议设计方式就是为了应对无线网络的特点提出的^[1-2]。跨层协议设计可以根据信道状态的动态变化, 将状态信息传递给相应的协议层。协议层通过对跨层信息进行分析, 改变自己的工作方式以便适应动态变化的信道环境, 提高了卫星网络的性能。在卫星网络中, 已经

收稿日期: 2007-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60532030).

作者简介: 李陆(1980-), 男, 博士研究生. 研究方向: 卫星网络跨层协议设计. E-mail: liluhit@126.com

通信作者: 郭庆(1964-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 卫星通信. E-mail: qguo@hit.edu.cn

开展了一些跨层协议设计的研究工作^[3-4]。

同地面网路相比,卫星的带宽资源有限,需要有效接入控制算法(MAC: Medium Access Control)保证资源的有效利用。在卫星网络中,应用较多的 MAC 协议大都是基于 CFDMA (Combined Free/Demand Assignment Multi-Access)协议的几种变化形式:采用预定预约时隙 CFDMA-PA(Pre-Assigned request)、采用随机接入预约方式 CFDMA-RA(Random Access Request)、采用捎带预约方式 CFDMA-PB(Piggy-Backing Request)^[5]、采用混合式随机接入/捎带预约方式 CFDMA-CR(Combined random access /piggybacking Request)^[6],预测预约方式 CFDMA-PR(Predictive Request)^[7]。这些协议都是集中在 MAC 层进行优化研究,而未考虑动态变化的信道状态会对协议产生性能上的影响。而在实际卫星环境中,此影响不可忽略。

基于跨层设计的思想,作者提出了一种基于 MAC 层和物理层联合跨层设计的 CFDMA-CCSI(Combined Channel State Information),改善了卫星 MAC 协议在信道动态变化环境中的性能。该协议可以根据变化的信道状态动态调整协议工作方式。仿真结果表明,在雨衰环境中,该策略相对于传统的接入方式有更好的时延性能,提高了信道利用率。

1 CFDMA-CCSI 协议

本文所研究的卫星网络结构为:具有星上处理(OBP:On Board Processing)功能的同步轨道卫星,上行链路采用 TDMA 技术,下行链路采用 TDM 复用技术。

1.1 地面终端工作方式

地面终端可以通过两种接入方式向卫星申请资源。终端首先判断在当前帧中,是否收到了自由分配时隙,如果收到自由分配时隙,则可以在下一帧中通过附带预约的方式向卫星申请资源。如果没有得到分配时隙,则通过随机预约的方式向卫星进行资源申请。上行链路帧结构见图 1。

当终端在随机接入预约子帧以时隙 ALOHA 方式向星上集中控制调度器发出预约请求,终端预约的时隙数目如公式(1)所示

$$NSR = NPQ - NOR \quad (1)$$

式中: NSR 为终端预约的时隙数目; NPQ 为终端缓存队列中的分组数目; NOR 为终端已经预约但

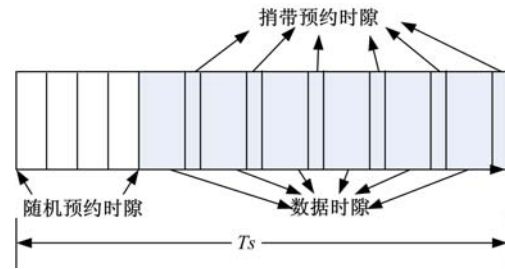


图 1 卫星上行数据帧结构

Fig. 1 Uplink frame format of CFDMA-CCSI protocol

未获得享用的时隙数目。

当随机预约请求发出后, NOR 值就增加 NSR。终端每获得一个按需分配时隙, NOR 值就减 1。对于随机接入预约方式,终端发出预约申请后,经过一个时间间隔(一个 RTT+星上调度器对预约请求的处理时延),若没有收到星上调度器对随机接入预约请求的应答分组,说明预约请求不成功, NOR 值就减少 NSR,等待下一帧重新申请。

终端还可以通过捎带方式向星上集中控制调度器发出预约请求,预约的时隙数目由式(2)给出

$$NSR = (NPQ - 1) - NOR \quad (2)$$

在捎带预约方式下,由于预约请求是捎带在上行链路业务分组之上,所以当预约请求发出后,终端缓存队列中的分组数目为 NPQ-1。同随机预约申请方式相同,当预约请求发出后, NOR 值就增加 NSR。终端每获得一个按需分配时隙, NOR 值就减 1。

由于雨衰的作用,卫星信道具有时变的特性。信道状态的变化不但会影响接收数据的正确性,还会影响上行及下行链路的传送速率。在传输链路上根据不同的信噪比采用相应的自适应调制编码(AMC: Adaptive Modulation and Coding)^[8]可以提高信道利用率。AMC 策略在 DVB-RCS 网络的下行广播数据中已经得到了广泛的应用。将每种调制编码组合称为一种模式,每种模式都有相应的频谱效率。将信道按照所支持的模式进行信道状态的划分: $[\delta_0, \delta_1], [\delta_2, \delta_3], \dots, [\delta_{M-1}, \delta_M]$ 。当终端的信道状态处于区间 $[\delta_0, \delta_1]$ 时,发射的数据并不能被卫星正确接收。在发送随机预约申请时,如果终端处于该状态仍然发送预约信息,则发送的预约信息并不能被卫星端正确接收。同时由于碰撞的原因还会影响其他没有处于深衰落情况的终端所发送的预约信息,造成了随机预约时隙的浪费,影响了随机接入预约申请的成功

率。所以,终端在发送随机预约时隙申请信息时,首先检测信道状态,当满足条件时才进行预约请求的发送。在其他信道状态发送数据时,采用相应的调制编码方式可以有效提高信道利用率。

在实际的卫星环境中,终端不能直接对上行链路进行信道状态的估计。终端可以利用降雨频率转换算法,如式(3)、(4)所示。通过对下行接收信号做信噪比估计,就可以得到上行链路的衰减情况。

$$A_{\text{down}}/A_{\text{up}} = \phi(f_{\text{down}})/\phi(f_{\text{up}}) \quad (3)$$

$$\phi(f) = \frac{f^{1.72}}{1 + 3 \times 10^{-7} f^{3.44}} \quad (4)$$

式中: f 为发射频率; A_{down} 和 A_{up} 为对应于相应频率的衰减。

1.2 卫星端工作方式

星上调度器负责信道时隙的分配和下行的数据包传送。终端*i*在进行上行数据传输的同时,将下行信道状态的估计值 $\delta_i(t)$ 传送给卫星。当卫星需要给终端*i*发送数据时,首先进行信道状态的区间判断,按照公式(5)的发送速率进行下行数据的发送。

$$R_b(i) = \begin{cases} 0, & \delta_i(t) < \delta_1 \\ \eta_m R, & \delta_m < \delta_i(t) < \delta_{m+1} \\ \eta_M R, & \delta_i(t) > \delta_M \end{cases} \quad (5)$$

式中: δ_1 为下行传输数据支持的最小信噪比; η_m 为该模式频谱效率; $R_b(i)$ 为下行链路传播速率。

卫星除了接收终端发送来的预约申请信息外还进行上行信道状态的估计,以决定终端的上行传输模式。对处于不同衰落情况的终端按照公式(6)进行时隙时间的分配。

$$t_i = \frac{\text{NSR}_i}{R_s \eta_m} \quad (6)$$

1.3 协议整体工作过程

CFDAMA-CCSI 根据动态变化的信道信息调整接入策略,在上行和下行链路上提高了信道利用率。协议的整体工作过程如图 2 所示。

2 信道模型和信源模型

2.1 信道模型

根据文献[9]中的方法,建立多状态 Markov 模型来进行雨衰情况下的信道状态的模拟。

根据传输数据的误码率要求按照不同的传输模式,进行信道区间的划分: $\delta_0 < \delta_1 < \delta_2 < \dots < \delta_M$ 。在每一个信道状态中,采用相应的模式就可

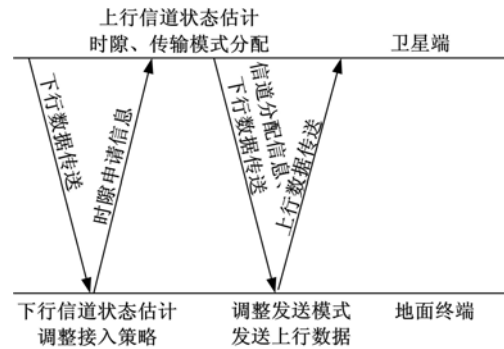


图 2 CFDAMA-CCSI 工作过程

Fig. 2 The whole operation process of CFDAMA-CCSI

以满足误码率的要求。在文献[9]中建立的是信道衰落状态的 Markov 过程,将信噪比阈值转换为衰落阈值。如果晴天条件下行信道接收信噪比为 δ_{clear} ,对应于每个信道状态的衰减值

$$A_i = \delta_{\text{clear}} - \delta_i \quad (7)$$

重新划分信道阈值为: $[A_0, A_1, \dots, A_K]$ 。即在 $\pi_0 = [A_0, A_1]$ 信道处于相对好的信道条件,在 $\pi_K = [A_{K-1}, A_K]$ 信道处于深衰落过程中。

假设卫星网络中共有 96 个终端平均分布在四个不同的地区^[10]。利用 ITU-R^[11]降雨衰减预报模型进行衰减的估计,衰减模型由公式(8)给出。当超过年平均时间 0.01% 的降雨衰减值 $A_{0.01}$ 已知时,可以计算出对于每个衰减值所对应的概率 A_p

$$A_p = A_{0.01} 0.12 p^{-(0.546+0.043 \log p)} \quad (8)$$

根据信道衰减情况可以求出处于每个状态的稳定概率 $\{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_k\}$ 。状态转移概率由下式近似

$$n_k = f_k p_{\Lambda_k} = f_k \frac{1}{A_k \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln A_k - m)^2}{2\sigma^2}\right] s \quad (9)$$

式中: f 为降雨衰耗的变化率,在衰落深度为 A_k 时,每秒钟跨越 A_k 的次数为 N_k , m 和 σ 分别为降雨衰耗分布的均值和方差。

状态转移概率 $p_{k,k+1}$, $p_{k,k-1}$ 分别为

$$p_{k,k+1} \approx \frac{N_k}{\pi_k} \quad (10)$$

$$p_{k,k-1} \approx \frac{N_{k-1}}{\pi_k} \quad (11)$$

所以 $p_{k,k}$ 为

$$p_{k,k} = 1 - p_{k,k+1} - p_{k,k-1} \quad (12)$$

通过上述公式即可建立雨衰环境中的

Markov 信道模型,如图 3 所示。

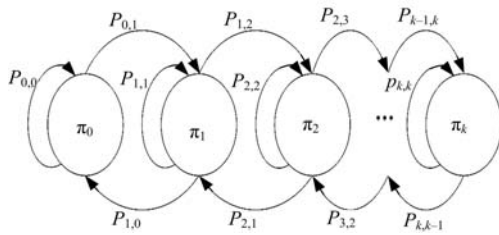


图 3 雨衰环境多状态 Markov 信道模型
Fig. 3 Multi-state markov model for rain-fade channel

2.2 信源模型

在本文中采用 IFP (Interrupted Fluid Process)信源模型对协议的性能进行评估。信源的分组用 ON-OFF 过程描述,在 ON 状态产生分组,在 OFF 状态不产生分组。由 ON 状态转换到 OFF 状态的概率为 β ,由 OFF 状态转换到 ON 状态的概率为 α 。在 ON 状态,分组以恒定速率 λ 到达,ON 状态的持续时间分别呈均值为 $1/\beta$ 和 $1/\alpha$ 的指数分布。

3 仿真结果与分析

本文通过仿真对 CFDAMA-CR 和 CFDAMA-CCSI 在雨衰环境中进行了性能的比较分析。仿真参数见表 1。

表 1 系统仿真主要参数

Table 1 System simulation parameter

卫星高度/km	35786
TDMA 帧长/s	0.027136
地面终端数目	96
上行链路数据业务时隙大小/Bytes	53
带宽/MHz	4
信道负载	0.1~1.0
调制方式	BPSK、QPSK、8PSK
码率	1/2
频谱效率	0.5、1、1.5
误码率阈值	10^{-6}
随机预约时隙数目	32
不同地理位置终端的衰减 A0.01 值/dB	12、32、36、64

在信道负载和随机预约时隙数目变化时,以下参数用作性能评估:①协议的成功接收随机预约分组比例;②数据包传送的平均端到端时延。

图 4 给出了成功接收随机预约分组比例随信道负载变化的情况。成功接收随机预约分组比例是指调度器正确接收的随机预约分组占终端发出的总随机预约分组的比。在 0.1~0.3 信道负载范围内,终端并没有发送随机预约分组。这是由于在较低的信道负载情形下,在按需分配后,每一

帧还有剩余时隙可供自由分配,从而系统中的终端在每一帧都获得时隙分配,所以并不需要发送随机预约请求进行时隙的申请。而随着信道负载的上升,卫星信道被少数终端占有,致使系统中部分终端在一帧内获得时隙分配的概率下降,所以需要随机接入预约的方式发送预约请求。CFDAMA-CR 并没有考虑信道状态对于协议的性能影响,处于衰落状态的终端仍然发送随机接入请求。调度器不能正确接收该请求信息,同时由于碰撞的原因,还会影响其他终端发送的请求信息。CFDAMA-CCSI 根据信道状态信息动态调整发送策略,可以避免该情况。通过这种方式可以有效保证处于信道条件好的终端预约成功,从而可以利用更有效的调制编码方式来传输数据。从图 4 中就可以看到将信道状态作为接入条件后,成功接收预约分组比例有了提高。

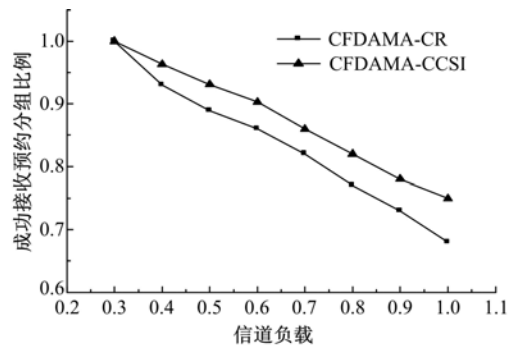


图 4 成功接收预约分组/信道负载

Fig. 4 Ratio of successfully received request packets/channel load

图 5 给出了平均端到端时延同信道负载之间的关系。在 0.1~0.3 信道负载内,两种协议实现了相似的端到端时延性能。这是由于在较低信道负载下,虽然 CFDAMA-CR 没有根据信道状态采用最有效的调制编码方式,但是由于信道负载

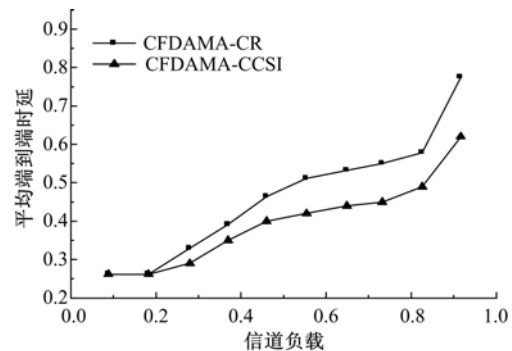


图 5 平均端到端时延/信道负载

Fig. 5 Mean end-to-end delay/channel load

较低,卫星信道有足够的资源为终端进行带宽的分配。而随着信道负载的增加,带宽资源已经不足以满足所有终端的发送请求时,时延会有所提高。CFDAMA-CCSI 无论是在上行和下行链路上都采用了相对于 CFDAMA-CR 更高效的调制编码方式,提高了信道利用率,改善了时延性能。

4 结束语

卫星网络中的跨层协议设计正成为卫星通信领域的研究热点。根据卫星网络的特点,结合关系紧密的协议层,达到优化整个系统结构的目的。本文采用跨层协议方式,提出了一种利用物理层信道信息作为条件来调整 MAC 层接入策略的协议 CFDAMA-CCSI。终端和卫星调度器都根据信道状态动态调整自己的工作方式,达到了优化性能的目标。

参考文献:

- [1] Vineet Srivastava, Mehul Motani. Cross-layer design: A survey and the road ahead[J]. IEEE Communications Magazine, 2005,12:112-119.
- [2] Sanjay Shakkottai, Theodore S Rappaport. Cross-layer design for wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2003,10:74-80.
- [3] Giovanni Giambene, Sastri Kota. Cross-layer protocol optimization for satellite communications networks:A survey[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2006,24:323-341.
- [4] 吕蓉,曹志刚. 卫星 ATM 网络中跨层设计的星上缓存管理优化方案[J]. 宇航学报,2005,26(6):682-686.
- Lü Rong, Cao Zhi-gang. Cross-layer designed on-board buffer management strategy for satellite ATM networks[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(6): 682-686.
- [5] Mitchell P D, Tozer T C, Grace D. Improved medium access control for data traffic via satellite using the CFDAMA protocol[J]. IEE Seminar on the Critical Success Factors, 2000, 18:1-7.
- [6] Mitchell P D, Grace D, Tozer T C. Performace of the combined free/demand assignment multiple access protocol with combined request strategies via satellite[C]//2001 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. San Diego: IEEE, 2001,2: F-90-F94.
- [7] 周熙,贾世楼. 随机接入预约 CFDAMA-PR MAC 协议性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,9:1196-1199.
- Zhou Xi, Jia Shi-lou. Performance of CFDAMA-PR MAC protocol with random access request strategy [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004,9: 1196-1199.
- [8] Andrea J Goldsmith, Chua Soon-Ghee. Adaptive coded modulation for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(5):595-602.
- [9] 舒畅,周坡. 基于离散降雨衰减状态的卫星信道模型[J]. 指挥控制与仿真,2007,29(4):48-51.
- Shu Chang, Zhou Po. A satellite channel model based on discrete rain attenuation states[J]. Command Control and Simulation, 2007, 29(4):48-51.
- [10] 康健,王宇飞. 中国 Ka 波段卫星通信线路的雨衰分布特性[J]. 通信学报,2006,8:78-81.
- Kang Jian, Wang Yu-fei. Rain attenuation distribution characterstic of Ka band satellite communication [J]. Journal on Communications,2006, 8:78-81.
- [11] Geneva ITU. Propagation data and prediction methods required for the design of earth space telecommunications systems [R]. ITU Recommendations, 1995, PN. 618-3.