

基于 IEEE802.11 的星间链路 最短接入时延退避算法

王星宇¹, 李勇军¹, 赵尚弘¹, 曹桂兴², 谭庆贵³, 郑永兴¹, 姜 勇¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077; 2. 中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094;
3. 中国空间技术研究院西安分院空间微波技术国家级重点实验室, 陕西西安 710000)

摘 要: 为满足空间信息网络低轨卫星用户多址接入骨干中继卫星的访问需求, 基于 IEEE 802.11 机制, 提出最短接入时延退避算法 (Delay-Optimal Backoff, DOB), 可解决大时空尺度条件下, 传统二进制退避算法 (Binary Exponential Backoff, BEB) 造成的网络平均接入时延高和吞吐量低的问题. 根据用户卫星与中继卫星的相对位置特性, 设定中继卫星通信窗口, 利用通信窗口内不同用户卫星数量时用户接入时延与平均接入请求概率的变化关系, 确定最短接入时延条件下用户平均接入请求概率, 实现动态调整碰撞窗口大小. 研究表明, 该算法使网络接入时延较 BEB 算法平均降低了 10s, 饱和吞吐量提升一倍, 归一化业务量阈值比 BEB 算法增加至 0.6, 网络多址接入性能显著提高.

关键词: 空间信息网络; IEEE802.11; 接入时延; 碰撞窗口; 退避算法; 星间链路; 网络吞吐量; 卫星通信; 数据中继卫星

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)12-2936-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.016

A Delay-Optimal Backoff Algorithm for IEEE802.11 over Inter-Satellite Links

WANG Xing-yu¹, LI Yong-jun¹, ZHAO Shang-hong¹, CAO Gui-xing²,
TAN Qing-gui³, ZHENG Yong-xing¹, JIANG Yong¹

(1. Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

2. China Academy of Space Technology Institute of Telecommunication Satellite, Beijing 100094, China;

3. China Academy of Space Technology, Science and Technology on Space Microwave Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: In order to meet the multiple access requirements of LEO (Low Earth Orbit) satellites when accessing to data relay satellite, the delay-optimal backoff (DOB) algorithm based on IEEE 802.11 scheme is proposed, which shows a better performance in access delay and throughput compared with the traditional binary exponential backoff (BEB) algorithm at large-spatial and temporal-scale inter-satellite links. In this paper, we construct the communication coverage of a data relay satellite to LEO spacecrafts based on the space position relation between LEO spacecrafts and data relay satellite. The DOB algorithm can dynamically adjust the values of backoff window depending on the access request probability which is related to the number of user satellites in the communication coverage. Research results show that average access delay of DOB algorithm is decreased by about 10s, the traffic threshold is increased to 0.6 and the maximum throughput has doubled compared to BEB algorithm, which improves the network performance on multiple access.

Key words: space information network; IEEE802.11; access delay; contention window (CW); backoff algorithm; inter-satellite links; throughput; satellite communications; data relay satellite

1 引言

随着人类空间探索范围的扩大以及探索手段的日渐丰富,如何在多用户、多业务类型的空间信息网络中实现航天器用户的动态多址接入,已成为国际国内的研究热点^[1]. 复杂的星间链路接入关系、有限的信道资源以及时变的拓扑结构致使卫星用户在采用传统的固定多址接入方案^[2-6]时,将出现接入失败率急增和资源申请周期延长等问题^[7]. 而 IEEE802.11^[8] 则以其灵活性和自适应性等特点更好地满足了空间信息网络“随遇接入,自主可控”的需求^[9]. 在 IEEE802.11 协议下,用户采用 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 的机制共享访问星间信道资源,大大降低了网络计算的复杂度. 然而,在大时空尺度下 IEEE 802.11 协议中采用的传统二进制退避 BEB 算法将会造成用户平均接入时延高,系统吞吐量低的问题. 为解决此问题,文献[10]、[11]采用地面无线网络中接入概率与网络中业务节点数量的关系,提出根据接入概率动态调整碰撞窗口大小的方法,进行饱和吞吐量和平均接入时延的网络性能优化.

目前,大多退避算法是以时隙 (slot) 为最小时间单位进行退避^[12]. 根据 IEEE802.11 机制的规定,时隙等于接入点到网络覆盖的最远端间距离的往返时间 (round-time trip), 而低轨卫星到地球同步卫星的传播延迟约为 250ms, 往返时间则超过了半秒,其时隙长度远大于地面网络的几十微秒. 因此,卫星网络中用户节点在争用信道的过程中,一旦竞争失败,节点必须等待较长的传播时延后才能接收 ACK 分组,其结果是用户不能立即重发分组,导致网络最大吞吐量和最短接入时延时的接入概率非同步,无法满足系统吞吐量和接入时延同时达到最优^[13]. 本文将接入时延优化和系统节点数量可变两者结合考虑,提出基于 IEEE802.11 的星间链路最短接入时延退避算法.

2 接入原理及接入时延

2.1 接入原理

网络应用背景是以数据中继卫星为处于低轨道高度为 300km 的国际空间站^[14] (International Space Station, ISS) 及其周围航天器设备提供 IEEE802.11 机制下的接入服务. 假设系统由一个在同步轨道 (Geosynchronous Earth Orbit, GEO) 数据中继卫星和分布高度为 300km 的低轨道中的 N 颗 LEO 用户卫星组成,如图 1 所示. S_0 表示数据中继卫星, S_n 表示用户卫星,其中 $n = 1, 2, 3, \dots, N$. 用 $L_n(t)$ 表示任意 t 时刻用户卫星 S_n 与数据中继卫星 S_0 之间的距离. 同时,根据星间最大可视距离约束条件,设定通信窗口范围.

与地面网络节点的随机移动性不同,卫星运动具有周期性,通信窗口范围具有可预测性. 根据轨道动力学原理,可获得星间距离和通信窗口范围的关系,在用户卫星一个周期内变化情况如图 2 所示,距离变化从 3.5 万公里到 4.15 万公里.

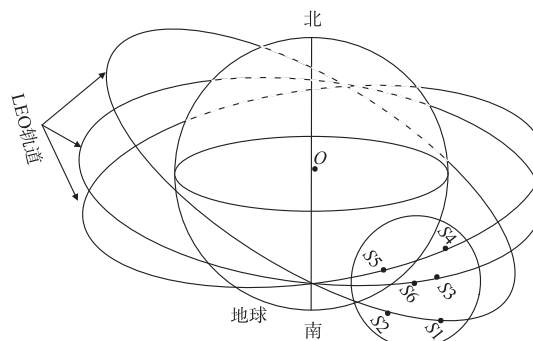


图1 用户卫星集群结构

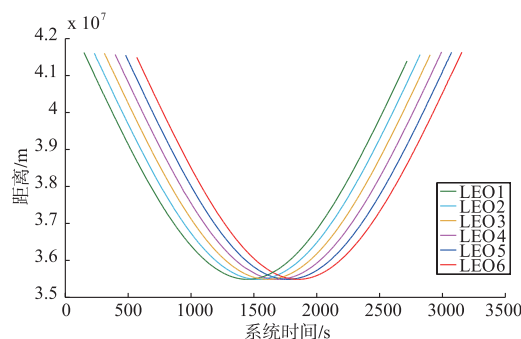


图2 相对距离变化情况

在此场景下,基于 IEEE802.11 协议的用户卫星到数据中继卫星接入原理如图 3 所示. 首先,用户卫星在竞争传输信道之前需要判断是否满足数据中继卫星的通信窗口范围. 其次,卫星用户侦听信道,若信道空闲,则通过发送接入请求帧 RTS (Request-To-Sent), 数据中继卫星回传 CTS (Clear-To-Sent) 帧建立连接. 最后,传输完毕后,接收端发送确认 ACK (ACKnowledgement) 帧标志着本次传输结束;在此过程中,其他用户卫星节点则可以通过监听该 RTS/CTS 帧的网络分配向量 NAV (Network Allocation Vector), 以静默状态判断信道是否空闲,并根据具体的退避策略随机选择退避时间进行退避,待退避结束之后,发送接入请求 RTS 帧重新尝试接入.

2.2 接入时延

用户的平均接入时延 D 定义为数据包由用户发送端发送后至接收端介质访问控制层 MAC (Media Access Control) 的平均时间差. 其大小包括竞争信道的退避时延 T_b , 传播时延 T_p 以及在接入端 MAC 层的排队等待时间 T_w 三大部分. 为分析方便,我们假设发送数据包的大小是固定的,并且 MAC 最长等待队列为 1. 因此,MAC 队列中排队等待时延可忽略不计.

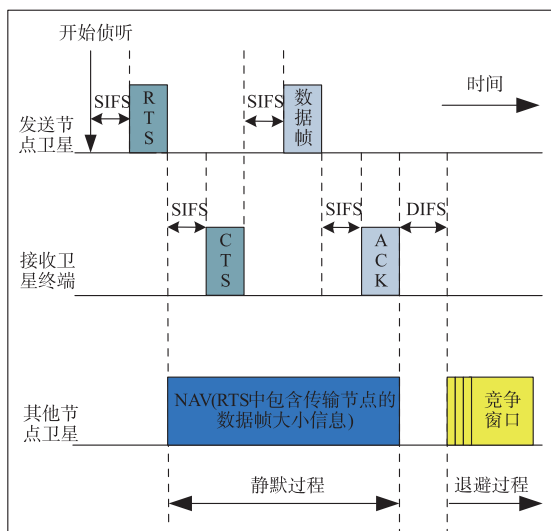


图3 基于IEEE802.11协议的星间多址接入原理

假设 N 颗 LEO 用户卫星在每个传输时隙中均以独立概率 P 接入信道, 且概率 P 仅由碰撞退避时延和网络业务节点数量决定. 对此, 平均退避时延 $T_b = 1/P$. 另一方面, 根据 IEEE802.11 机制的规定, 传输时隙 T_{slot} 等于接入点到网络覆盖的最远端间距离的往返时间 (round-time trip), 设传播速度 C 为 $3 \times 10^3 \text{ km/s}$, 由图 2 可知最大通信范围 L_{max} 为 42166 km , 得到传输时隙 $T_{\text{slot}} = 2L_{\text{max}}/C \approx 0.28 \text{ s}$. 用 q 表示接入成功概率, $1/q$ 则表示单位时隙内接入成功次数. 根据图 3 的原理, 每次成功接入过程包括 RTS-CTS 的握手时延, 数据包发送时延以及 DIFS ($2.5T_{\text{slot}}$)、SIFS ($0.5T_{\text{slot}}$) 帧定时共 $6T_{\text{slot}}$. 设数据包在 ACK 确认包回传达到前 T_{slot} 到达接收端即为完成一次成功传输, 那么用户的平均接入时延 D 可近似表示为

$$D \approx \frac{1/P + 6T_{\text{slot}}}{q} - T_{\text{slot}} \quad (1)$$

此外, 设系统平均吞吐量 $R = NPq$, 表示平均每个时隙中到达的数据包个数. 为了分析方便, 我们用 $\lambda = Np$ 表示系统平均业务量. 若每个时隙中数据包数量服从泊松分布, 则:

$$R = \lambda e^{-\lambda} \text{ packet/slot} \quad (2)$$

因此, 接入成功概率可表示为 $q = \exp(-Np)$. 根据式(1)和(2), 可以得到平均接入时延 D :

$$D \approx \frac{1/P + 6T_{\text{slot}}}{e^{-NP}} - T_{\text{slot}} \quad (3)$$

3 基于最短接入时延的动态调整碰撞窗口优化算法

3.1 基于最短时延的碰撞窗口

为获得最短时延情况下概率 $P = 1/N$, 对式(3)求

偏导, 令 $\frac{\partial D}{\partial P} = 0$, 可得:

$$e^{NP} (6P^2 NT_{\text{slot}} + NP - 1) = 0 \quad (4)$$

由于 $e^{NP} \neq 0$, 则有:

$$6P^2 NT_{\text{slot}} + NP - 1 = 0 \quad (5)$$

当 $T_{\text{slot}} \approx 0$, 即时隙较小的地面网络中时, 可以得到 $P = 1/N$, $\lambda = 1 \text{ packet/slot}$, 也即接入吞吐量与传播时延无关. 在空间信息网络中, T_{slot} 不可忽略, 我们可以近似得到:

$$P \approx \frac{1}{\sqrt{6NT_{\text{slot}}}} \quad (6)$$

若节点在每个时隙过程中均以独立概率 P 接入信道, 那么可以在退避过程中建立以时隙为单位的离散条件下的二进制退避阶数 $s(t)$ 和碰撞窗口 $b(t)$ 的马尔科夫过程^[13], 如图 4 所示.

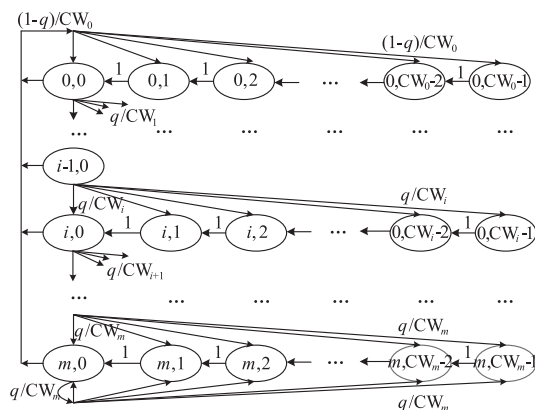


图4 碰撞窗口马尔科夫模型

由图 4 可以得到四种状态下的完备条件转移概率集合:

$$\begin{aligned} P = \{i, k | i, k+1\} &= 1, & i \in (0, m), k \in (0, CW_i - 2) \\ P = \{0, k | i, 0\} &= (1-q)/CW_0, & i \in (0, m), k \in (0, CW_i - 1) \\ P = \{i, k | i-1, 0\} &= q/CW_0, & i \in (1, m), k \in (0, CW_i - 1) \\ P = \{m, k | m, 0\} &= q/CW_m, & k \in (0, CW_m - 1) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 第一个等式表示节点在 i 阶退避次数下, 当前碰撞窗口值 k 每经过一个时隙, 减 1 时的转移概率; 第二个等式表示节点经 i 阶退避后, 完成成功传输, 退避阶数回到初始值 0, 随机选取碰撞窗口值 k , $k \in (0, CW_i)$ 时的转移概率; 第三个等式表示节点经 $i-1$ 次退避后, 重新竞争失败, 增加退避阶数至 i , 碰撞窗口为 k 时的转移概率; 第四个等式则表示节点处于最大退避阶数 m , 退避结束后再次竞争失败, 重新退避时的转移概率.

根据马尔可夫过程中绝对概率分布等于转移概率的极限性质, 令 $b_{i,k}$ 表示节点处于退避阶数 i , $i \in (0, m)$ 碰撞窗口为 k , $k \in (0, CW_i)$ 的概率, 则有:

$$b_{i,k} = \frac{CW_i - k}{CW_i} \cdot \begin{cases} (1-q) \sum_{j=0}^m b_{j,0}, & i=0 \\ q \cdot b_{i-1,0}, & 0 < i < m \\ q(b_{m,0} + b_{m,0}), & i=m \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$b_{i,0} = b_{i-1,0} \cdot q = q^i \cdot b_{0,0}, i \in (0, m) \quad (9)$$

$$b_{m-1,0} \cdot q = (1-q)b_{m,0} \Rightarrow b_{m,0} = \frac{q^m}{1-q} \cdot b_{0,0} \quad (10)$$

结合式(9)和式(10), $b_{i,k}$ 可归纳为:

$$b_{i,k} = \frac{CW_i - k}{CW_i} b_{i,0}, i \in (0, m), k \in (0, CW_i) \quad (11)$$

由于 $\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{CW_i-1} b_{i,k} = 1$, 则有:

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{CW_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{CW_i-1} \frac{CW_i - k}{CW_i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \frac{CW_i + 1}{2} \quad (12)$$

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2q)(1-q)}{(1-2q)(CW+1) + qCW[1-(2q)^m]} \quad (13)$$

所以,系统用户的发送请求概率 P 为:

$$P = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-q} = \frac{2(1-2q)(1-q)}{(1-2q)(CW+1) + qCW[1-(2q)^m]} \quad (14)$$

因此,通过式(6)和式(14)可建立发送请求概率为 P 的等式:

$$\frac{1}{\sqrt{2NT_{\text{slot}}}} = \frac{2(1-2q)(1-q)}{(1-2q)(CW+1) + qCW[1-(2q)^m]} \quad (15)$$

其中, m 为二进制退避算法中用户最大次数. 本文中不采用二进制指数退避机制方式, 则 $m=0$. 因此, 最短时延条件下 CW_{opt} 可表示为:

$$CW_{\text{opt}} = 2 \sqrt{6NT_{\text{slot}}} - 1 \quad (16)$$

3.2 碰撞窗口调整算法

基于 3.1 节中时延最优条件下 CW_{opt} 的计算公式(9), 针对通信窗口内用户卫星节点数 N , 本论文碰撞窗口的调整是通过计算当前时刻 t 的用户卫星和数据中继卫星的距离 $L_n(t)$ 来得到通信窗口内卫星个数实现动态调整碰撞窗口的算法. 具体实现步骤如下:

(1) 系统参数初始化. 确定系统的运行周期 $t > T_{\text{simulation}}$, 初始化窗口内卫星个数 $N=0$, 时间 $t=0$;

(2) 计算当前 t 时刻, 用户卫星和数据中继卫星的距离 $L_n(t)$ 值;

(3) 判断: 用二进制变量 δ_n 来表示时刻 t 用户卫星 S_n 是否处于数据中继卫星 S_0 的通信窗口范围, 若 $0 \leq$

$L_n(t) \leq L_{\text{max}}, \delta_n = 1$, 否则 $\delta_n = 0$;

(4) 统计 $\delta_n = 1$ 的个数, 记为 N 的值, 代入式(9), 取整结果, 得到当前时刻 t 时的碰撞窗口 CW_{opt} ;

(5) 时间 t 以时隙 T_{slot} 为单位累加 $t = t + T_{\text{slot}}$;

(6) 重复步骤(2)~(5), 直至 $t > T_{\text{simulation}}$.

4 仿真与结果分析

网络仿真场景中, 数据中继卫星为 1 颗 GEO 卫星, 用户卫星包括 $N=6, 12, 18$ 颗轨道高度为 300km 的 LEO 卫星三种情况. 其中, 三种不同 LEO 用户卫星数量情况下, LEO 用户卫星的升交点赤经 (Right Ascension of Ascending Node, RAAN) 依次分别间隔 $5^\circ, 10^\circ$ 和 15° . 为分析方便, 其余轨道参数均设置为 0. 设用户卫星数据帧产生时间服从泊松分布. 根据第三节的分析, 选取时隙大小为 0.28s, 具体参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数设置

| 参数 | 数值 |
|------------------------|-------------------------------------|
| 轨道高度 | 低轨近地轨道 300km |
| 用户卫星个数 (N) | 6, 12, 18 |
| 轨道升交点赤经间隔 ($^\circ$) | 5, 10, 15 |
| 通信窗口范围 | 35486km - 42166km (from LEO to GEO) |
| 数据帧到达率 | 泊松分布 |
| 时隙大小 | 0.28s |
| 更新窗口周期 | 0.28s |

图 5 表示在不同业务量 $\bar{\lambda}$ 情况下, 采用传统二进制退避 BEB 算法和 DOB 算法的系统平均接入时延. 由图 5 可知, 在低业务量情况下, 由于 BEB 算法自身的初始碰撞窗口已经固定, 在低业务量情况下也会产生退避时延, 因此其接入时延较长. DOB 算法会根据信道竞争情况, 自动调整碰撞窗口值大小, 从而减少了不必要的退避时延, 降低了系统平均接入时延. 另外, 当网络节点数 $N=6$ 时, DOB 算法比 BEB 算法平均接入时延降低了 10s. 而随着网络节点数量的增加, BEB 算法的系统平均接入时延迅速增加, 而 DOB 算法的平均接入时延仍然较低, 接入时延参数性能改善明显.

图 6 表示不同业务量 $\bar{\lambda}$ 情况下, 采用传统二进制退避 BEB 算法和 DOB 算法的系统吞吐量. 由图 6 可知, DOB 算法不仅使系统饱和吞吐量平均增加一倍, 其饱和时业务量阈值也大于 BEB 算法. 在网络节点数 $N=6$ 时, BEB 算法的业务量 $\bar{\lambda}=0.3$ 时就达到饱和吞吐量 0.0917. 而改进后的 DOB 算法在 $\bar{\lambda}=0.6$ 左右时, 系统才达到饱和状态, 且饱和吞吐量为 0.172, 较 BEB 算法提升了 0.08. 综上所述, DOB 算法的系统平均接入时延和吞吐量较 BEB 算法有较大的改善, 且随着网络业务量的增加, 达到饱和吞吐量时业务量的阈值大小

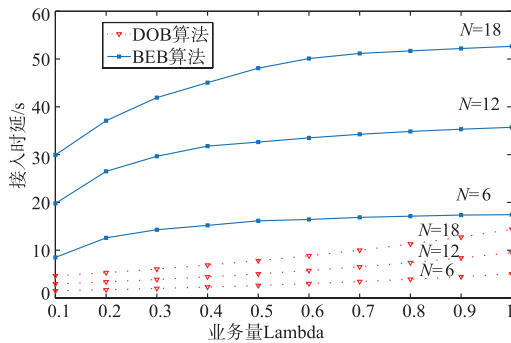


图5 网络平均接入时延

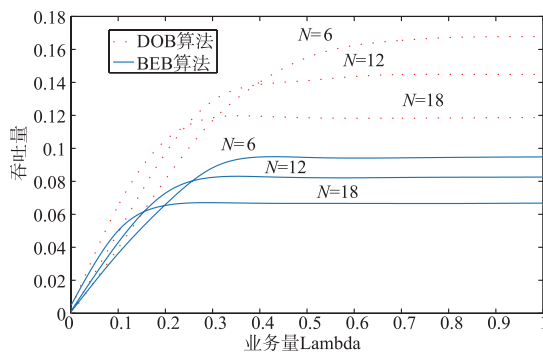


图6 归一化网络吞吐量

也较 BEB 算法有所提高。

5 结束语

基于理论最短接入时延,利用系统用户节点个数和退避时隙相关的特点,设置碰撞窗口大小,提出了基于 IEEE802.11 的星间链路最短接入时延退避算法和理论模型.该算法采用自适应机制,根据当前网络中节点数量及时调整碰撞窗口值,解决了大时空尺度下空间信息网络中采用传统退避机制时,带来用户平均接入时延高和系统吞吐量低的问题.研究表明,该算法在用户平均接入时延和饱和吞吐量方面有较大改善,可以使 IEEE802.11 机制更加高效地运行于空间信息网络中.虽然 DOB 算法的饱和吞吐量较 BEB 算法高,但 DOB 算法下的饱和吞吐量距离理论极限值仍然有一定距离.其原因在于,在空间信息网络大时空尺度环境下,IEEE802.11 竞争接入的机制造成重传次数增多,导致传播时延大大增加,而系统最大吞吐量又受到传播时延的限制.后续工作将聚焦于均衡系统平均接入时延和吞吐量两个性能指标,对算法进行改善,提升网络综合效率.

参考文献

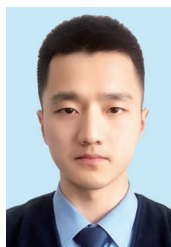
- [1] 李德仁,沈欣,龚健雅,等.论我国空间信息网络的构建[J].武汉大学学报,2015,40(6):710-715.
LI De-ren, SHEN Xin, GONG Jian-ya, et al. On construc-

tion of China's space information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6):710-715. (in Chinese)

- [2] Celandroni N, Ferro E, Potorti F. Comparison between distributed and centralized demand assignment TDMA satellite access schemes[J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2015, 14(2):95-111.
- [3] Sun R, Guo J, Gill E K A, et al. Characterizing network architecture for inter-satellite communication and relative navigation in precise formation flying[J]. Iaria, 2011, 27(1):21-36.
- [4] 王星宇,李勇军,赵尚弘.空间信息网络多址接入技术研究进展[J].计算机工程与应用,2017,53(21):8-16.
Wang Xing-yu, Li Yong-jun, Zhao Shang-hong. Research on multiple access technologies for space information network[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(21):8-16. (in Chinese)
- [5] Chen B C, Yu L, Tao K. Implementation and analysis of networking protocols for low earth orbit satellite formation network[A]. International Conference on Information Science & Engineering [C]. Hangzhou, IEEE, 2010. 2122-2125.
- [6] Kita T, Kitayama S, Kawamura M, et al. Multimedia satellite networks and TCP/IP traffic transport[J]. International Journal of Computers and Applications, 2016, 93(21):436-443.
- [7] 李勇军,吴继礼,赵尚弘,等.中低轨卫星跨层激光链路二次同步切换方法[J].电子学报,2017,45(3):762-768.
Li Yong-jun, WU Ji-li, ZHAO Shang-hong, et al. A two-step synchronous handover scheme of optical inter-orbit links in LEO and MEO satellite network[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(3):762-768. (in Chinese)
- [8] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3):535-547.
- [9] 翟政安.下一代数据中继卫星系统发展思考[J].飞行器测控学报,2016,35(2):89-97.
Zhai Zheng-an. Development of next generation data relay satellite systems[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2016, 36(2):89-97. (in Chinese)
- [10] Kawsu S, Tanya V. Wireless communication in LEO satellite formations[A]. NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware & Systems [C]. Noordwijk: IEEE, 2012. 255-262.
- [11] Radhakrishnan R, Edmonson W W, Afghah F, et al. Optimal multiple access protocol for inter-satellite communication in small satellite system[A]. The 4s Small Satellite Systems and Services Symposium [C]. Majarca, 4s Symposium, 2014. 21-36.

- [12] 周圣杰,丁洪伟,杨志军,等. 自适应三维概率 CSMA 控制策略研究[J]. 电子学报,2017,45(2):440-445.
Zhou Sheng-jie, Ding Hong-wei, Yang Zhi-jun, et al. Study on adaptive three-dimensional probability CSMA control policy[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(2):440-445. (in Chinese)
- [13] Radhakrishnan R, Edmonson W W, Afghah F, et al. Survey of inter-satellite communication for small satellite systems: physical layer to network layer view [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4):2442-2473.
- [14] Majid G, Christian S, Majid K. On throughput-delay tradeoff of random access over satellite links [A]. IEEE International Conference on Communications [C]. London, IEEE, 2015. 850-855.

作者简介



王星宇 男,1994 年生于四川绵阳. 现为空军工程大学信息与导航学院硕士研究生. 主要研究方向为卫星通信,多址接入控制技术.
E-mail:wang_kgd@foxmail.com



李勇军(通信作者) 男,1979 年生于陕西西安. 现为空军工程大学信息与导航学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为卫星光通信与网络,空间微波光子技术.
E-mail:tz_228@163.com



赵尚弘 男,1964 年生于甘肃兰州. 现为空军工程大学信息与导航学院教授、博士生导师. 主要研究方向为激光原理技术,卫星光通信与网络.
E-mail:zhaoshangh@aliyun.com