

# 低轨卫星物联网多址接入方式研究

韦芬芬<sup>1</sup> 刘晓旭<sup>2</sup> 谢继东<sup>1</sup> 张更新<sup>1</sup>

(1.南京邮电大学 通信与网络技术国家工程研究中心 江苏 南京 210003;

2.中国空间技术研究院西安分院 陕西 西安 710100)

**摘要:** 物联网的出现深刻影响了人们的生活和工作方式,但是地面物联网的覆盖范围十分有限,而低轨卫星物联网作为地面物联网的延伸和补充,具有覆盖范围广、单一波束下用户数多等特点,很好地解决了地面物联网的不足。然而,解决海量用户终端接入,并保证其信息传输的可靠性和时效性是必须要解决的问题。因此,需要针对低轨卫星通信的特点,设计一种面向物联网海量连接的高效可靠的多址接入协议。通过研究分析现有的基于争用解决的分集时隙ALOHA(CRDSA)多址接入协议,针对低轨卫星物联网的工作特点提出了一种改进的多址接入方法,并在该方法的基础上,加入了终端有数据包发送的概率,增大了终端数和终端发送数据包的随机性。理论分析和仿真结果证明了所设计方法的有效性。

**关键词:** 低轨卫星; 物联网; 海量; CRDSA; 多址接入

中图分类号: TN927+.23

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2019)05-0116-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2019.05.025

## Research on Multiple Access Methods for LEO Satellite IoT

WEI Fen-fen<sup>1</sup> LIU Xiao-xu<sup>2</sup> XIE Ji-dong<sup>1</sup> ZHANG Geng-xin<sup>1</sup>

(1.National Engineering Research Center for Communication and Network Technology,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2.CAST' Xi'an, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The emergence of the Internet of Things (IoT) has a profound impact on people's lives and working. However, the coverage of ground IoT is limited. As an extension and supplement of the ground IoT, the IoT of low-orbit satellites has a wide coverage and a large number of users under a single beam, which well solves the shortcomings of the ground IoT. However, it is necessary to solve the problem of mass user terminal access and ensure the reliability and timeliness of its information transmission. Therefore, aiming at the characteristics of LEO satellite communication, an efficient and reliable multiple access protocol for mass connection of IoT must be designed. By researching and analyzing the existing multiple access protocol of contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA), we design an improved multiple access method for the work characteristics of the IoT. On the basis, the probability of sending packets, the number of terminals and the randomness of packets sent by terminals are added. Theoretical analysis and simulation results have demonstrated the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** LEO satellite; Internet of Things; mass; CRDSA; multiple access

## 0 引言

伴随着物联网的兴起,提供物联网接入能力的设备类型以及数目正发生着剧烈的变化。但由于地面物联网主要覆盖业务相对密集的城市、郊区等地区,覆盖范围十分有限,在一些诸如沙漠、森林、山区、海洋等特殊环境,地面物联网无法完全覆盖,这限制了物联网的应用和发展。因此,仅靠地面通信网不能满足社会发展的

需求,需要将卫星通信网与地面通信网相互结合,才能真正实现全球覆盖<sup>[1]</sup>。

相对于传统的高轨卫星和中轨卫星来说,低轨卫星系统提供了更短的传输时延以及更小的路径损耗,具有覆盖范围广、通信容量大、顽存性高、便于实现终端小型化、卫星发射灵活等突出特点<sup>[2]</sup>。因此,在未来信息网络中,将低轨卫星与物联网结合起来可以有力地弥补地

收稿日期: 2018-06-17

修回日期: 2018-10-28

网络出版时间: 2018-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(91738201)

作者简介: 韦芬芬(1993-),女,硕士研究生,研究方向为低轨卫星物联网; 刘晓旭,高级工程师,研究方向为卫星通信、数据链; 谢继东,教授,研究方向为卫星天线、卫星移动通信系统; 张更新,教授,研究方向为空间信息网络、卫星通信、深空通信。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20181221.1554.046.html>

面通信网的不足,解决全球覆盖问题,从而大大扩展物联网的应用范围。

然而,面对海量的传感器终端,卫星需要从传感器终端收集数据,并将数据发送到地面信关站,然后再把这些传感器数据送到云平台及应用服务。在这个过程中,卫星的多次访问和传感器的随机数据发送,导致数据冲突并增加延迟。这些都给低轨卫星物联网多址接入方案的设计带来了更严苛的要求:未来的多址接入方案不仅需要给海量接入的终端提供更高的传输速率,而且需要具备高度的自适应性可以灵活适配低轨卫星网络拓扑的动态变化。这些新的特点和需求将深刻影响未来多址接入方案的设计<sup>[1]</sup>。由于巨大的挑战和迫切的需求,这个问题近来在学术界和工业界引起了广泛关注<sup>[3]</sup>。

文中主要对随机多址接入协议的性能进行分析,包括 CRDSA 协议和改进的 CRDSA++协议<sup>[4]</sup>,得出副本数为 3 的 CRDSA++协议的整体性能较好。在此基础上研究了适用于低轨卫星物联网多址接入协议,增加了数据包的发送概率,增大了终端数量,使其更适合于低轨

卫星物联网多址接入的特点。最后对低轨卫星物联网接入协议的下一步设计提出展望。

## 1 随机多址接入协议的性能分析

### 1.1 基于争用解决的分集时隙 ALOHA (CRDSA)

随机多址接入自提出以来,就以其高灵活性和低信令开销的特点而广受关注<sup>[5-6]</sup>。近年来,为了提升帧时隙 ALOHA<sup>[7]</sup>的接入效率,Casini 等提出一种基于争用解决的分集时隙 ALOHA (contention resolution diversity slotted ALOHA, CRDSA)<sup>[8]</sup>。它的核心思想是:在同一帧中,一个包选择 2 个不同的时隙发送 2 个副本。在接入点侧,接收机利用迭代干扰消除算法 (iterative interference cancellation) 逐次分解发生碰撞混叠的数据包。具体来说,接收机先译码没有发生碰撞的数据包,一旦译码成功,则将该数据包在其他时隙上传输的副本删除以消除干扰。

如图 1 所示,由于时隙 5 中数据包 3 没有发生碰撞,可以成功恢复其信息;然后,可以消除时隙 4 中数据包 3 的干扰,从而可以恢复数据包 2 的信息。重复

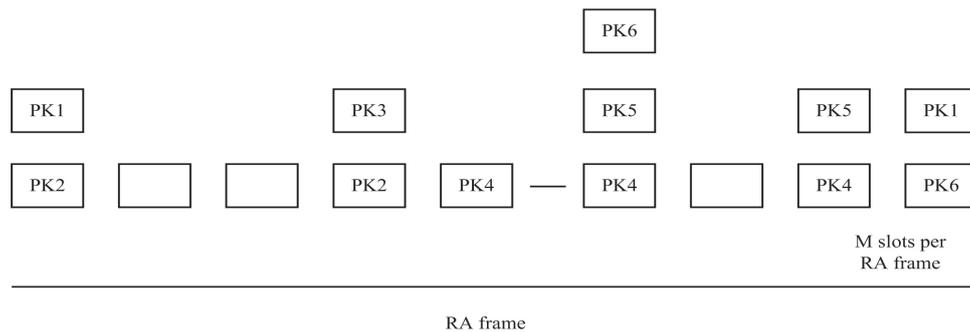


图 1 CRDSA 的争用解决过程

该过程进行不断迭代,直到不能再恢复出新的数据包为止。可以直观地看出,相对于 ALOHA 协议,CRDSA 可以更加充分地利用发生碰撞的数据包中含有的信息,在一定程度上改善了丢包率,降低了传输时延,显著提升了系统的吞吐量。

对上述过程进行分析,据文献[8]的公式推导出:

$$P_{pd}^A(N|G) \leq \left(1 - \frac{2}{M}\right)^{GM-1} + \sum_{i=1}^{GM-1} \binom{GM-1}{i} \left(\frac{2}{M}\right)^i \left(1 - \frac{2}{M}\right)^{GM-1-i} \cdot [P_{pd}^A(N-1|G)]^i \quad (1)$$

$$T(N|G) = G \cdot \{1 - [1 - P_{pd}^A(N|G)]^2\} \quad (2)$$

其中,  $N$  表示迭代次数;  $G$  表示归一化负载,即在一帧中,平均每个时隙发送包的数量;  $M$  表示一帧中时隙的数目(仿真时  $M$  取 100)。  $P_{pd}^A(N|G)$  是当负载为  $G$  迭代  $N$  次时,同一个包的副本  $A$  被成功解码的概率(其中副本  $B$  被成功解码的概率与副本  $A$  相同)。

$T(N|G)$  表示当负载为  $G$  迭代  $N$  次时的吞吐量。

图 2 的仿真结果表明,当  $G = 0.65$ ,  $N = 16$  时,CRDSA 的吞吐量达到峰值为 0.52; 当  $G = 1$  时,标准

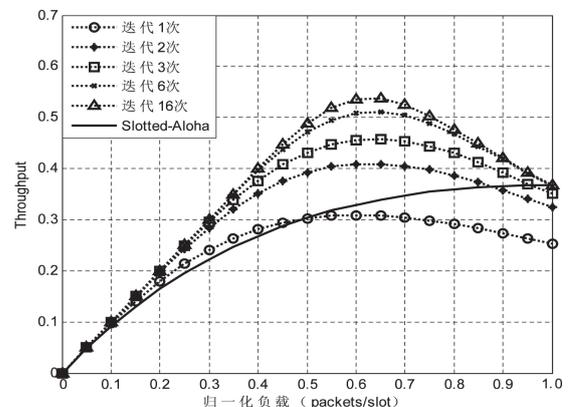


图 2 SA 和 CRDSA 迭代 1、2、3、6、16 次的吞吐量与归一化负载的关系曲线

SA 的吞吐量达到峰值为 0.36。另外,当  $G$  从 0 变化到 0.4 时,CRDSA 的吞吐量呈线性增长,而 SA 只有在  $G$

从 0 到 0.1 时呈线性增长。因此,CRDSA 协议的吞吐量性能相比 S-ALOHA 方式有明显改善。

### 1.2 改进的 CRDSA 协议

近年来,一个增强版的 CRDSA 协议被称为 CRDSA++在文献 [4] 中被提出。CRDSA++协议在 CRDSA 协议基础上做了两大改进:一是增加发送数据分组的次数(CRDSA 发送 2 次,CRDSA++发送 3~5 次),二是利用接收数据分组功率分布不平衡的特点,进一步提高随机接入协议的吞吐量<sup>[9]</sup>。根据文献 [8] 的公式进行了推导,得出了 CRDSA++关于吞吐量的公式。

推导出的  $P\{p_k \in S_n\}$  表示包  $p_k$  ( $r$  个副本中的一个) 出现在时隙  $S_n$  上的概率。

$$P\{p_k \in S_n\} = \frac{r}{M} \quad (3)$$

$$P_{im}(i|G) = \binom{G \cdot M - 1}{i} (P\{p_k \in S_n\})^i \cdot (1 - P\{p_k \in S_n\})^{G \cdot M - 1 - i} \quad (4)$$

其中,  $P_{im}(i|G)$  表示负载为  $G$  时,在时隙  $S_n$  上有  $i$  个干扰数据包的概率,从而推出在时隙  $S_n$  上零干扰的概率:

$$P_{al}^A(G) = P_{im}(0|G) = (1 - P\{p_k \in S_n\})^{G \cdot M - 1} \quad (5)$$

当副本为  $r$  时,推导出  $P_{pd}^A(N|G)$ :

$$P_{pd}^A(N|G) \leq P_{al}^A(G) + (r - 1) \sum_{i=1}^{G \cdot M - 1} P_{im}(i|G) \cdot [P_{al}^A(N - 1|G)]^i \quad (6)$$

当副本为  $r$  时,推导出吞吐量  $T(N|G)$ :

$$T(N|G) = G \cdot [1 - (1 - P_{pd}^A(N|G))^r] \quad (7)$$

对于 CRDSA++,虽然在同一帧中数据分组重发的次数增多会导致分组碰撞概率增加,但发生碰撞时隙分组多元化的增长也能够更加有效地利用迭代干扰消除技术恢复信息<sup>[10]</sup>。对其进行相应的计算仿真,图 3 中的虚线分别对应  $r=3,4$  和 5 时,CRDSA++协议的吞吐量与归一化负载的关系曲线。

理论仿真结果表明:当  $r=3$ ,归一化负载  $G=0.7$ ,迭代次数  $N=10$  时,吞吐量达到最大值为 0.68;当  $r=4$ ,归一化负载  $G=0.65$ ,迭代次数  $N=13$  时,吞吐量达到最大值为 0.65;当  $r=5$ ,归一化负载  $G=0.6$ ,迭代次数  $N=18$  时,吞吐量达到最大值为 0.6。当副本数大于 3 时,吞吐量的最大值就逐渐下降。因为随着副本数增大,碰撞模型中形成的无法消除的环就会增多<sup>[11]</sup>。另外,在吞吐量达到最高点后,随着负载增加,系统吞吐量急剧衰减,且副本数越多,系统吞吐量的衰减就越剧烈。在吞吐量达到最高点前,和副本数为 2 的 CRDSA 相比,CRDSA++协议的吞吐量有显著提高,尤其当副本数为 3 时,系统吞吐量性能达到

最佳<sup>[12]</sup>。

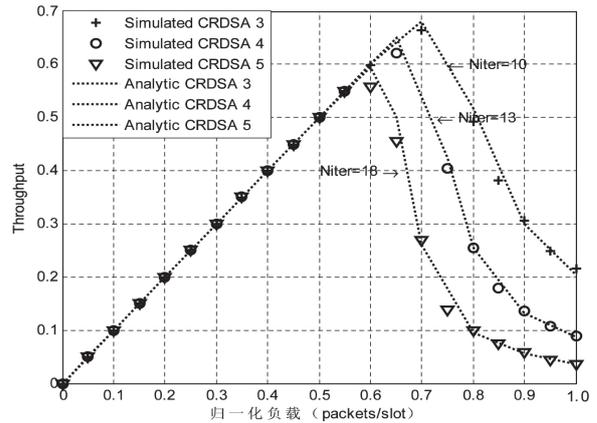


图 3 CRDSA++实际仿真和理论分析的吞吐量与归一化负载的仿真曲线

为了验证公式推导的正确性,对 CRDSA 和 CRDSA++的吞吐量进行仿真,如图 3(加号、圆圈、三角)所示。仿真结果和理论分析基本吻合,但是在快靠近最大吞吐量时,理论分析结果略大于仿真结果,这是因为式 6 表示一个上界,没有考虑出现“环”的概率而在实际仿真中,可能在某几个数据包中会出现环,导致无论怎么迭代都无法消除干扰<sup>[8]</sup>。如图 1 所示,在数据包 4 和 5 之间会出现一个环,在第  $M-1$  个时隙中,为了获得数据包 4 的信息必须先消除数据包 5 的干扰,但是为了消除数据包 5,必须要获得第  $M-3$  个时隙中它的副本信息,但在第  $M-3$  个时隙中又存在数据包 4 副本的干扰,所以它们之间就会形成环而无法恢复信息<sup>[8]</sup>。

将 MAC 层的丢包率定义如下:

$$PLR_{MAC}(G) = 1 - \frac{T(G)}{G} \quad (8)$$

分别对  $r=2,3,4,5$  时对应的丢包率与归一化负载的关系进行仿真,如图 4 所示。

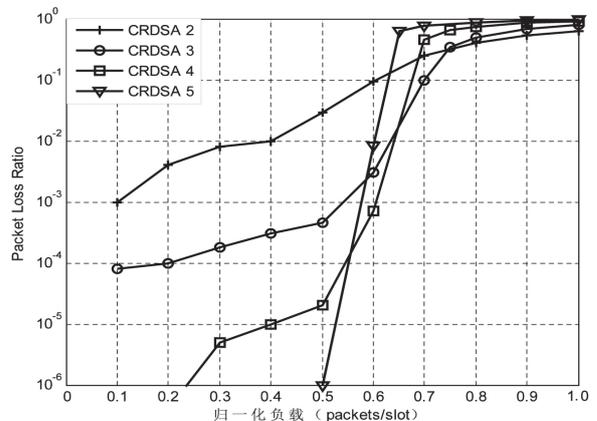


图 4 丢包率与归一化负载的关系曲线

仿真结果表明:当  $G$  小于 0.6 时,CRDSA 和 CRDSA++的丢包率都很低,但 CRDSA 要明显高于 CRDSA++的丢包率;当  $G$  大于 0.6 时,丢包率急剧上

升,尤其是 CRDSA5 最为明显,而 CRDSA 相对于 CRDSA++的丢包率上升较为平缓。

综合考虑,CRDSA3 在吞吐量和丢包率方面,性能要优于 CRDSA2、CRDSA4 和 CRDSA5。

### 2 适用于低轨卫星物联网多址接入协议的性能分析

在低轨卫星物联网中,由于地面上的传感器<sup>[13]</sup>终端数量众多,上传的数据多为短突发类型,在某一时间点,并不是所有的终端都要上传数据。同时,地面上的传感器种类多种多样,所传输的数据类型也千差万别(温度、湿度、海拔、岩土、测斜等)<sup>[14]</sup>,传统的基于固定分配多路访问<sup>[6]</sup>无法满足需求,因而低轨卫星物联网的 MAC 协议一般采用随机多址接入协议。

而对于第一节中,由于当每个时隙都有数据同时发送,即同一时刻有数据发送的终端数量很大时,CRDSA++的吞吐量会显著下降。在第一节仿真中,考虑时隙数  $M = 100$ ,  $G$  在 0 到 1 之间,每个终端在同

一时刻发送包的概率为 1,最大终端数为 100。而在该低轨卫星物联网系统中,同一时刻每个终端有数据发送的概率非常小<sup>[15]</sup>,大多数终端都处于深度睡眠状态,而且终端数量非常大<sup>[16]</sup>。

对于低轨卫星物联网海量接入系统,尝试以副本数为 3 的 CRDSA3 为例进行进一步仿真,设某一时刻每个终端有数据发送的概率为  $p$ ,总的终端数为  $n$ ,一帧的时隙数  $M = 100$ 。由于每个终端有数据发送的随机性比较大,即某一时刻,在海量的终端<sup>[17]</sup>中有数据包发送的终端数量分布的比较分散,所以假设某一时刻有数据发送的终端数满足正态分布。根据正态分布的  $3\sigma$  原则<sup>[18]</sup>和上述低轨卫星物联网的特点,设正态分布的均值  $\mu = p \cdot n$ ,方差  $\sigma^2 = (\frac{1}{6}\mu)^2$ 。

图 5、图 6 分别为  $p = 0.5\%、1\%、2\%$  时,CRDSA3 协议的吞吐量与终端数量的关系曲线和丢包率与终端数量的关系曲线。

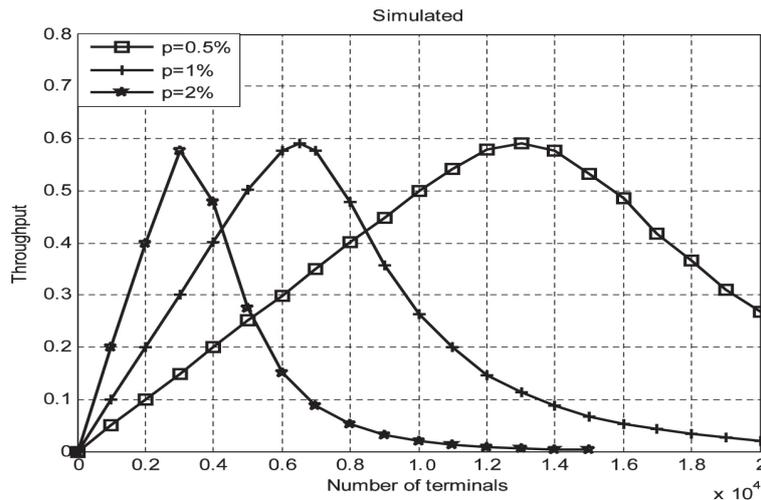


图 5 CRDSA3 协议的吞吐量与终端数量的关系曲线

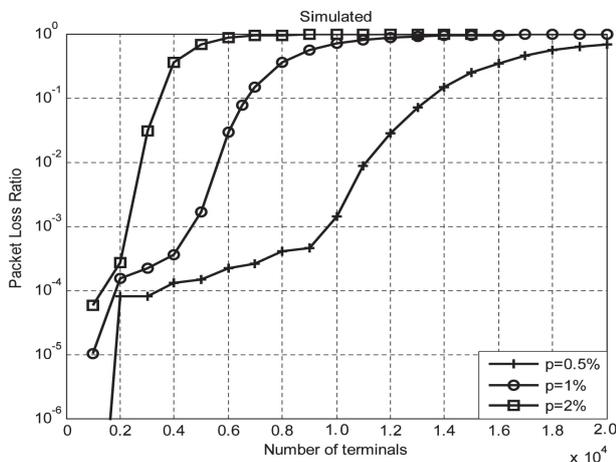


图 6 CRDSA3 协议的丢包率与终端数量的关系曲线

从图 5 中可以看出,在增加了发送概率、增大了终

端数和终端发送数据包的随机性之后,CRDSA3 协议的最大吞吐量为 0.58,比图 3 中仿真的 CRDSA3 最大吞吐量低了 0.1 左右,这是由于终端有数据发送的随机性导致的。在吞吐量大于 0.4 时,不同的发送概率对应的终端数也不同。当  $p = 0.5\%、1\%、2\%$  时,对应的最大终端数分别为: 17 300、8 500 和 4 400。从图 6 中可以看出,当  $p = 0.5\%$  时,丢包率明显低于  $p = 1\%$  和  $p = 2\%$  的情况;另外,在相同的丢包率情况下, $p = 0.5\%$  时可接入的终端数是  $p = 1\%$  和  $p = 2\%$  的 2~4 倍。从吞吐量和丢包率这两方面综合考虑,当每帧时隙数相同的情况下,终端有数据发送的概率越低,可接入的终端数就越多;在相同丢包率的情况下,数据包发送概率越低,可接入的终端数也越多。

### 3 结束语

文中主要对现有的应用于卫星通信的多址接入协议—基于争用解决的帧时隙 ALOHA (CRDSA) 进行研究分析,并在此基础上对 CRDSA 吞吐量计算公式进行修改,使其适用于 CRDSA++ 协议。并对 CRDSA 和 CRDSA++ 协议的吞吐量和丢包率进行理论分析和仿真,根据仿真结果得出,CRDSA3 在吞吐量和丢包率方面,性能要优于 CRDSA2、CRDSA4 和 CRDSA5。最后,结合低轨卫星物联网接入协议的设计要求和考虑的问题,在 CRDSA3 协议的基础上,对每个终端有数据发送的概率进行了控制,当时隙数相同的情况下,数据包发送的概率越低,可接入的终端数就越多,但是,可接入的终端数还是不够多。在下一步工作中,可以多部署几条信道<sup>[19]</sup>,并加入重传机制,在增加终端数的同时,也使系统具备较高的吞吐量。

#### 参考文献:

- [1] 王献斌.低复杂度大规模接入协议设计[D].杭州:浙江大学,2017.
- [2] 黄飞.低轨卫星通信接入与切换策略研究[D].成都:电子科技大学,2009.
- [3] ANDREWS J G ,BUZZI S ,CHOI W ,et al.What will 5G be [J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications , 2014 ,32( 6) : 1065-1082.
- [4] DEL RIO HERRERO O ,DE GAUDENZI R.A high-performance MAC protocol for consumer broadband satellite systems [C]//Proceedings of 27th AIAA international communications satellite systems conference.Edinburgh ,United Kingdom: AIAA ,2009: 512-513.
- [5] HASAN M ,HOSSAIN E ,NIYATO D.Random access for machine-to-machine communication in LTE-advanced networks: issues and approaches [J].IEEE Communications Magazine , 2013 ,51( 6) : 86-93.
- [6] 张淼科.卫星通信 MAC 协议的发展研究[J].中国科技信息 , 2010( 17) : 60-62.
- [7] 史长琼 ,肖瑞强 ,吴丹.改进的动态帧时隙 ALOHA 防撞算法[J].计算机工程与设计 , 2014 ,35( 6) : 1897-1900.
- [8] CASINI E ,DE GAUDENZI R ,DEL RIO HERRERO O.Contention resolution diversity slotted ALOHA ( CRDSA) : an enhanced random access scheme for satellite access packet networks [J].IEEE Transactions on Wireless Communications , 2007 ,6( 4) : 1408-1419.
- [9] 高倩 ,张更新.低轨卫星物联网多址接入协议研究[J].通信技术 , 2018 ,51( 3) : 588-592.
- [10] DE GAUDENZI R ,HERRERO O D.Advances in random access protocols for satellite networks [C]//2009 international workshop on satellite and space communications.Tuscany ,Italy: IEEE , 2009: 331-336.
- [11] LIVA G.Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA [J].IEEE Transactions on Communications , 2010 ,59( 2) : 477-487.
- [12] BACCO M ,GOTTA A ,ROSETTI C ,et al.A study on TCP error recovery interaction with random access satellite schemes [C]//2014 7th advanced satellite multimedia systems conference and the 13th signal processing for space communications workshop.Livorno ,Italy: IEEE , 2014: 405-410.
- [13] 李文锋 ,符修文.无线传感器网络抗毁性[J].计算机学报 , 2015 ,38( 3) : 625-647.
- [14] 王振杰 ,王强民 ,杨小玲.基于移动云交换的智能 IoT 系统 [J].计算机技术与发展 , 2018 ,28( 10) : 199-204.
- [15] KAWAMOTO Y ,NISHIYAMA H ,FADLULLAH Z M ,et al.Effective data collection via satellite-routed sensor system ( SRSS) to realize global-scaled internet of things [J].IEEE Sensors Journal , 2013 ,13( 10) : 3645-3654.
- [16] QU Zhicheng ,ZHANG Gengxin ,CAO Haotong ,et al.LEO satellite constellation for internet of things [J].IEEE Access , 2017 ,5: 18391-18401.
- [17] 贺瑶 ,王文庆 ,薛飞.基于云计算的海量数据挖掘研究 [J].计算机技术与发展 , 2013 ,23( 2) : 69-72.
- [18] 卜俊芳.基于正态分布  $3\sigma$  原则的直觉语言随机多准则决策方法[J].现代商贸工业 , 2011( 24) : 308.
- [19] 杨柳 ,范平志 ,郝莉.基于捕获与退避的多信道时隙 ALOHA 协议性能分析[J].西南交通大学学报 , 2013 ,48( 4) : 761-768.