

面向6G卫星物联网的帧内干扰消除随机接入技术研究

徐 誉, 郭 庆

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘 要: 6G网络中一类重要应用场景为超大规模机器类通信, 主要面向卫星物联网等海量用户并发接入的应用场景。针对6G卫星通信网络, 设计出能够满足机器类通信场景中大规模用户并发接入业务需求的接入机制是一个非常重要的问题。针对这一问题, 提出一种基于帧内干扰消除的随机接入协议。在该协议中, 每个需要传输数据的接入用户在一帧内发送多个分组副本, 接收机通过在帧内采用干扰消除算法, 可以将冲突时隙中来自多个用户的分组成功接收。相比于传统的随机接入机制, 该机制在多用户并发接入的场景下能够在很大程度上提高吞吐率性能。

关键词: 卫星物联网; 随机接入; 帧内干扰消除; 二分图; 吞吐率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021040

Research on Random Access Technology of Inter-Frame Interference Cancellation for 6G Satellite Internet of Things

XU Yu, GUO Qing

School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China

Abstract: In 6G, one of the important application scenarios is ultra-massive machinetype communications, which is mainly oriented to the application scenarios of concurrent access of massive terminals such as the satellite Internet of Things. How to design an access mechanism that can meet the concurrent access service requirements of large-scale users in machine communication scenarios for the future 6G satellite communication network is an important problem to be solved. A random access protocol based on intra-frame interference cancellation was proposed. In this protocol, each access user who needs to transmit data sends multiple packet copies in one frame, and the receiver can successfully receive packets from multiple users in conflicting time slots by using interference cancellation algorithms in the frame. Compared with the traditional random access mechanism, this mechanism can greatly improve the throughput performance in the scenario of multi-user concurrent access.

Keywords: satellite internet of things, random access, inter-frame interference cancellation, bipartite graphs, throughput

1 引言

如何突破地形限制, 将卫星通信与地面网络融合构成全球无缝覆盖的海陆空天一体化信息网络, 成为当前学术界和产业界的研究热点。3GPP和ITU等国际组织成立了相应的工作组进行星地融合的标准化研究。其中3GPP立项的非地面网络(Non-Terrestrial Networks, NTN)致力于将卫星通信与5G融合, 解决新空中接口支持NTN的关键问题。相比于ETSI提出的相对成熟的DVB S2/S2X卫星协议, 这是卫星通信技术首次进入3GPP标准

化进程^[1-2], 其标准化工作将为6G星地融合研究奠定技术基础。

6G卫星通信网络将由5G时代的增强移动宽带(enhanced Mobile Broadband, eMBB)、超可靠与低时延通信(Ultra-Reliable and Low Latency Communications, URLLC)和大规模机器类通信(massive Machine Type Communications, mMTC)三大应用场景扩展为未来增强移动宽带(Further enhanced Mobile Broadband, FeMBB)、极可靠低时延通信(Extremely Reliable and

Low Latency Communications, ERLLC)、广覆盖高移动通信(Long-Distance and High-Mobility Communications, LDHMC)、超大规模机器类通信(ultra-massive Machine Type Communications, umMTC)和极低功率通信(Extremely Low-Power Communications, ELPC)五大应用场景。其中umMTC主要针对卫星物联网等海量用户并发接入的应用场景,在该场景下每平方千米具有1亿个终端用户^[3]。针对6G卫星通信网络设计出能够满足umMTC用户并发接入业务需求的接入机制则是本文的研究重点。

有许多文献针对卫星物联网通信中的介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议进行了研究和分析。总体而言,MAC协议可分为以下两类。

(1) 基于中心控制节点的固定分配接入:这类协议能够确保网络中的每个用户在时间、频率上都有独立的资源用于数据传输,从而避免冲突。这类接入机制的典型技术代表是窄带物联网(Narrow Band Internet of Things, NB-IoT)技术。具体而言,NB-IoT在下行链路中使用OFDMA进行数据传输,而在上行链路中使用SC-FDMA。系统分配给每一个接入用户的时频资源是不同的。因此,即使在多个用户同时传输的情况下,也不会发生冲突。然而,这种机制需要中心控制节点在数据传输过程开始之前告诉接入用户用于数据传输的资源。此外,这种机制还需要系统严格的同步,以保证时间和频率的正交性,避免多用户信道之间的干扰。卫星信道,尤其是近地轨道(Low Earth Orbit, LEO),具有较高的往返时延(Round Trip Time, RTT)和较严重的多普勒效应。这使得将这类基于资源分配的MAC协议应用到未来卫星通信网络中充满了挑战性。

(2) 基于随机接入:基于随机接入的MAC协议非常适合用作6G中卫星物联网应用的多用户接入机制,因为随机接入机制与物联网应用中接入用户的流量特征非常匹配。现有的用于卫星返回链路中的按需分配多址(Demand Assignment Multiple Access, DAMA)协议在具有低占空比和短分组长度特性的物联网应用中表现不佳^[4-5]。在随机接入机制中,当有信息需要传输时,用户会在没有与接入节点进行任何协作的情况下以分组形式发送信息。如果用户没有从网络中接收到应答,将会在随机延迟一段时间后再次发送相同的分组,直到达到最大发送次数。这种协议虽然简单,却能够在流量适中的情况下表现良好。由于资源的分配是随机的,可能会有多个用户使用相同的资源进行数据传输的情况,从而导致分组冲突。最具代表性的随机接入协议如ALOHA, LoRa和Sigfox等典型的物联网技术都使用了该协议的变体^[6]。时隙ALOHA的峰值吞吐率只有大约0.3,这显然并不能够支持卫星物联网中多用户并

发接入的业务需求。在过去的几年中,有许多研究对其进行了改进,研究出了更先进的卫星物联网随机接入方案^[7-12]。其中性能最好且最具有潜力的是采用了干扰消除(Interference Cancellation, IC)的基于ALOHA的变体技术,典型代表有冲突解决分集时隙ALOHA(Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA, CRDSA)技术^[8]以及不规则重复分集时隙ALOHA(Irregular Repetition Slotted ALOHA, IRSA)技术^[9]。研究表明,在渐进情况下基于IC的随机接入技术能够达到1的吞吐率^[13]。

2 基于干扰消除的随机接入

卫星信道具有较高的RTT和较严重的多普勒效应,使得基于分配的MAC机制并不适用于未来面向海量用户连接的卫星物联网应用。随机接入技术具有接入灵活、不受网络规模限制、系统部署简单等优势,且能较好地适应物联网短分组突发业务,被视为未来卫星物联网系统中多址接入技术的有力候选方案^[14]。在已有的基于IC的随机接入技术中,大多数接入协议在网络过载的情况下吞吐率性能都会迅速下降,如CRDSA、IRSA等。与之相比,参考文献[11-12]提出了一种基于误率码的随机接入技术,能够根据当前的接入情况自适应地调整数据帧的长度,使其在网络过载的情况下吞吐率性能不至于下降太多。然而这种方式需要接入节点不停地检查当前的解码状态并实时地广播停止信标以便确定最佳帧长,这必然会带来接收机复杂度的提升。因此,本文提出了一种面向卫星物联网应用的基于帧内IC的随机接入协议。与参考文献[11-12]相比,本文所提协议基于固定长度数据帧,不需要接入节点不停地检查当前的解码状态,并且能够在网络过载的情况下获得较大的吞吐率。

2.1 系统模型

卫星多址接入系统模型如图1所示。在该系统中, K 个地面站用户同时使用一个卫星上行信道进行数据传输。当有用户需要发送信息时,会以分组形式在当前竞争周期发起接入。考虑将一个包含 M 个等长时隙的数据帧作为用户接入的竞争周期,用户只能在规定的时隙内发送分组。如果多个用户选择了相同时隙发送分组,则视为冲突。每个需要发送分组的用户随机产生一列长度为 M 的二进制序列,这个序列称为时隙索引。假设某用户 k 所产生二进制序列中1的个数用 A_k 表示,其中 A_k 服从参数为 (M, p) 的二项分布。 p 为竞争参数,由接入节点通过下行信道广播给各个用户。用户 k 将待发的分组复制成 A_k 个相同的副本,接着在所产生二进制序列中1的位置所对应的时隙发送相同的分组。工作原理如图2所示。

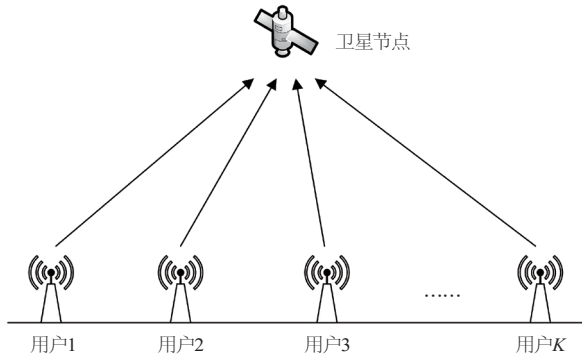


图1 卫星多址接入系统模型

在图2中, 数据帧长 $M=5$ 个时隙, 持续时间为 T_F , 每个时隙的长度 $T_s=T_F/M$ 。用户1随机产生的二进制序列为11100, 则用户1在数据传输帧的第一个、第二个和第三个时隙发送相同的分组副本; 用户2随机产生的二进制序列为00101, 则用户2在数据传输帧的第三个和第五个时隙发送相同的分组副本, 以此类推。每个副本的有效信息载荷中都包含该用户随机产生的二进制序列, 当某个分组副本被成功接收时, 即可获取该用户的时隙索引, 从而帮助接收机接收其他用户发送的分组。

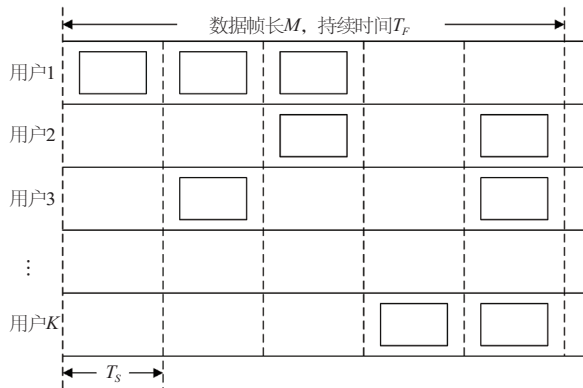


图2 基于帧内IC的随机接入工作原理

当每次需要发送分组副本时, 用户 k 都会重复发送

$$X_k' = \frac{h_k^*}{|h_k|^2} X_k, 1 \leq k \leq K \quad (1)$$

其中, X_k 表示用户 k 需要发送的信息符号, 更一般地, 这里用符号 X_k 表示用户 k 需要发送的分组副本。 h_k 为用户 k 信道估计所得参数, 将发送符号乘以基带系数 $h_k^*/|h_k|^2$ 可以抵消信道衰落带来的影响。

卫星节点在第 j 个时隙接收到的多用户叠加信号 y_j 可表示为

$$Y_j = \sum_{k=1}^K a(k, j) X_k + Z_j, 1 \leq j \leq M \quad (2)$$

其中, Z_j 表示单位方差的加性高斯白噪声。 $a(k, j)$ 是二进制制变量, 用来表示用户 k 是否在时隙 j 中发送了分组副本, 如果发送了分组副本, 则 $a(k, j)=1$, 否则 $a(k, j)=0$ 。

2.2 接收机译码

数据传输帧的每个时隙可能有3种状态: 没有分组发送、有单个分组发送、有多个分组冲突, 假设接收机可以识别时隙的这3种状态。不同于传统的随机接入协议, 对于有多个分组冲突的时隙, 接收机会将其在该时隙接收到的叠加信号存储起来, 而不是直接丢弃。参考文献[9]表明, 多用户随机接入过程可以通过二分图进行表述。一个例子如图3所示, 该图表示了3个用户在一个包含4个时隙的数据帧中发送分组的随机接入过程。图3左边的圆形节点表示用户节点, 图3右边的方形节点表示时隙节点, 其中用户节点与时隙节点分别用字母 u 和字母 s 表示。在随机接入过程中, 图3左边节点与图3右边节点的连线表示该用户选取了该时隙发送分组副本, 如用户1在时隙3发送了分组副本, 用户2分别在时隙1和时隙4分别发送了分组副本。

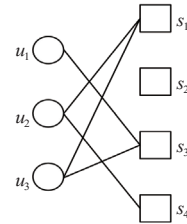


图3 随机接入过程的二分图表示示例

对于有单个分组发送的时隙, 通过物理层的可靠信道编码技术, 假设接收机可以无差错地接收分组。此时, 接收机不仅成功接收到了用户传输的数据, 同时获取了该用户的时隙索引。根据未发生冲突分组有效信息载荷中其副本的位置信息, 消除该副本引入的干扰, 从而得到更多未发生冲突的分组。这个迭代IC过程可以用二分图表示, 如图4所示。

在图4中, 接收机分别在时隙1和时隙3收到了多个用户的冲突分组, 将其存储起来。在时隙4收到了用户2的分组, 将其成功接收并获得了用户2的时隙索引, 得知用户2在时隙1发送了分组。通过将其重构并减去可以从时隙1的冲突分组中得到的用户3的分组并成功接收, 最后用同样的方法得到了用户1的分组。当竞争周期结束时如果仍然有一些未被成功接收到的分组, 则将已经存储的冲突分组丢弃。未

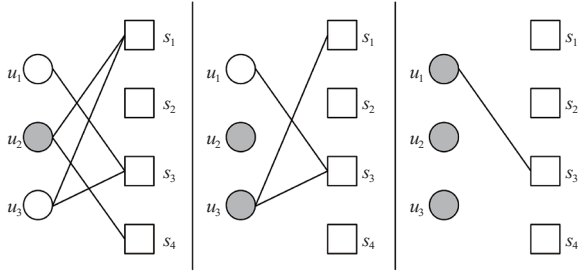


图4 迭代IC译码的二分图表示

传输成功的用户将在新一轮的竞争周期中重新发送分组。

3 吞吐率理论性能分析

在二分图表示的随机接入过程中,假设在一个竞争周期内发起接入的用户数为 K ,对应二分图有 K 个用户节点;一个数据帧包含 M 个等长的时隙,对应二分图有 M 个时隙节点。定义用户节点的度分布函数为

$$\Lambda(x) \triangleq \sum_l \Lambda_l x^l \quad (3)$$

其中, Λ_l 表示某个用户选择了 l 个时隙发送分组副本的概率,对应二分图中某个用户节点连接了 l 个时隙节点的概率。时隙节点的度分布函数定义为

$$\Psi(x) \triangleq \sum_l \Psi_l x^l \quad (4)$$

Ψ_l 表示某个时隙有 l 个用户同时发送分组副本的概率,对应二分图中某个时隙节点有 l 个用户节点与之相连的概率。

对于数据帧中某个时隙而言,在该时隙发送分组的用户数服从参数为 (N, p) 的二项分布,可以得出单个时隙的平均接入用户数 G 为

$$G = p \cdot N \quad (5)$$

同时可以得出单个时隙有 n 个用户同时接入的概率

$$\Psi_n = \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \approx \frac{G^n}{n!} e^{-G} \quad (6)$$

在式(6)中,当接入用户数很大时,二项分布可近似为泊松分布。结合式(4)和式(6),时隙节点度分布函数可计算为

$$\Psi(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \Psi_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{G^n}{n!} e^{-G} x^n = e^{-G(1-x)} \quad (7)$$

同理可计算出某用户在一个竞争周期内发送 m 次分组副本的概率为

$$\Lambda_m = \binom{M}{m} p^m (1-p)^{M-m} \approx \frac{((1+\varepsilon)G)^m}{m!} e^{-(1+\varepsilon)G} \quad (8)$$

其中, $\varepsilon = M/N - 1$ 。

结合式(3)和式(8),用户节点度分布函数可表示为

$$\Lambda(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \Lambda_m x^m = e^{-(1+\varepsilon)G(1-x)} \quad (9)$$

接下来定义用户节点边分布函数和时隙节点边分布函数,两者分别定义为

$$\lambda(x) \triangleq \sum_l \lambda_l x^{l-1} \quad (10)$$

$$\rho(x) \triangleq \sum_l \rho_l x^{l-1} \quad (11)$$

其中,参数 λ_l 和 ρ_l 分别由式(12)和式(13)计算得出

$$\lambda_l = \frac{\Lambda_l l}{\sum_l \Lambda_l l} \quad (12)$$

$$\rho_l = \frac{\Psi_l l}{\sum_l \Psi_l l} \quad (13)$$

从上述定义不难看出度分布函数与边分布函数的关系满足下式

$$\lambda(x) = \Lambda'(x) / \Lambda'(1) \quad (14)$$

$$\rho(x) = \Psi'(x) / \Psi'(1) \quad (15)$$

现考虑某个用户在一个竞争周期中发送了 l 个分组副本,对应二分图中该用户节点有 l 条边。用 q 表示该用户节点某一条边未知的概率,这条边未知表示该用户在这条边所连接时隙节点对应的时隙不能够将该用户发送的分组副本进行消除。假设其他 $l-1$ 条边中的任意一条边未知的概率为 p ,只要其他 $l-1$ 条边中的任意一条边已知,则这条边就已知。因此可以得到 $q = p^{l-1}$ 。同理,考虑某个时隙节点有 l 个用户节点与之相连,对应二分图中该时隙节点有 l 条边, p 表示任意一条边未知的概率。这条边未知表示接收机能够将该时隙上这条边所对应的用户分组成功接收,假设其他 $l-1$ 条边中的任意一条边所对应的用户分组在前一个IC迭代步骤中以 $1-q$ 的概率被检测出。只有当其他 $l-1$ 条边所对应的用户分组均能够被检测出时,该边对应的用户分组才能够被检测出。因此可以得到 $1-p = (1-q)^{l-1}$ 或等价地得到 $p = 1 - (1-q)^{l-1}$ 。根据参考文献[15]的分析方法,通过用户节点和时隙节点的边分布函数对这两个表达式求平均,可以算出第 i 次IC迭代后用户分组未被成功检测的概率

$$q_i = \sum_l \lambda_l p_{i-1}^{l-1} = \lambda(p_{i-1}) \quad (16)$$

$$p_i = \sum_l \rho_l (1 - (1 - q_i)^{l-1}) = 1 - \rho(1 - q_i) \quad (17)$$

其中下标 i 表示迭代次数。通过将式(16)和(17)迭代到给定次数,可以分析基于IC的随机接入方式的收敛性,最后得到的 q 即为在该竞争周期中未能够成功传输分组的用户平均占比。

4 性能仿真与分析

本节主要通过蒙特卡洛仿真实验来比较与分析基于

帧内IC的随机接入方式的各种性能。在仿真实验中,通过固定竞争周期的帧长大小来探讨各种性能与在一个周期内并发接入用户数之间的关系。为了简化分析,假设需要传输数据的用户在一个竞争周期发送分组,分组的长度与时隙长度相同,各个接入用户可以通过下行信标与接收机进行同步。接收机在解码时不考虑捕获效应,同时,借助物理层的信道编码技术,假定接收机可以无差错地接收分组。因此,系统的丢包主要考虑多个用户的分组冲突问题。此外,当接收机成功地接收某个用户发送的分组后,需要将其从另一个时隙重构并消去时,假设干扰消除是理想的,即没有重构误差。

图5为6种随机接入方式的吞吐率性能比较,帧长时隙数 M 设置为200。这些随机接入方式可分为两种,一类为传统无IC的随机接入方式,包括ALOHA、S-ALOHA以及DSA;另一类为采用了IC的随机接入方式,包括CRDSA、IRSA以及基于帧内IC的随机接入。从图5中可以看出ALOHA、S-ALOHA、DSA 3种协议能获得的最大吞吐率分别为0.18、0.37、0.31。而CRDSA、IRSA及基于帧内IC的随机接入方式能获得的最大吞吐率分别为0.55、0.77、0.76。从峰值性能来看采用了IC的随机接入方式要明显优于传统无IC的随机接入方式。尽管采用了IC的随机接入方式可获得的最大吞吐率要高,然而随着并发接入用户数的继续增大,性能迅速下降,这是由于接入用户数过多导致了接入信道的堵塞。基于帧内IC的随机接入方式在网络过载的情况下吞吐率性能没有下降太多,在这几种随机接入方式中性能表现最好。

图6给出了6种随机接入方式的丢包率性能与并发接入用户数之间的关系曲线。从图6中可以看出,性能曲线的增长趋势一致,丢包率随着并发接入用户数的增加而增加。在系统过载的情况下,基于帧内IC的随机接入方式表现最好。

图7为6种随机接入方式的归一化平均接入时延性能对比,接收机在接收到数据帧后开始进行解码,在计算平均接入时延时,仅考虑用户所发送分组在当前竞争周期没有被成功接收而在之后的帧中重传导致的时延,其中设置用户的最大重传次数为8次。从图7中可以看出,随着并发接入用户数的增加,平均接入时延也在增加。结合图5可以得出,吞吐率越大的随机接入方式,平均接入时延也越低,其中基于帧内IC的随机接入时延性能最好。

图8同时给出了6种随机接入方式中达到最大重传次数时仍未能够接入的用户占比。在过载情况下,大多数随机接入方式的性能较差,而S-ALOHA在过载1倍的情况下有约30%的用户在达到最大重传次数时仍然不能够被

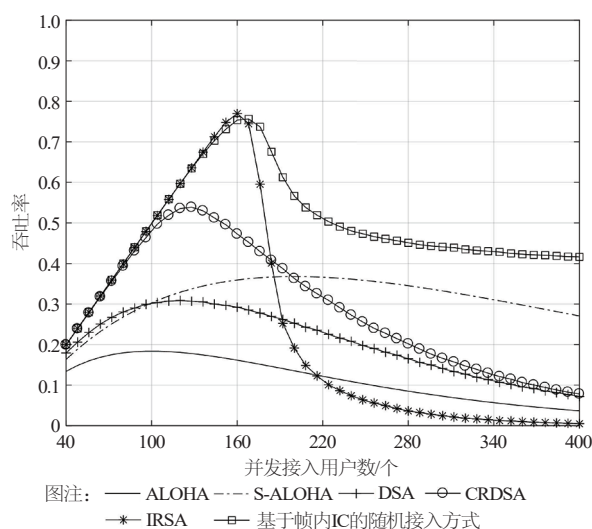


图5 6种随机接入方式的吞吐率性能比较

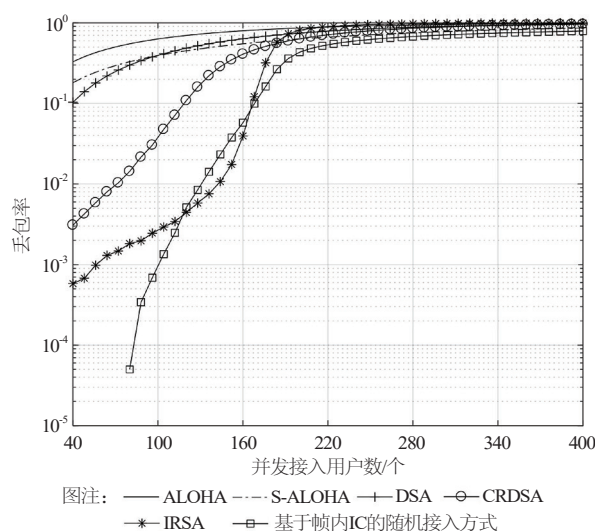


图6 6种随机接入方式的丢包率性能与并发接入用户数之间的关系曲线

接入。基于帧内IC的随机接入方式在过载1倍的情况下有约15%的用户不能够被接入,性能表现最好。

接收机的复杂度主要来源于两部分。首先,在解码端,接收机会首先对所有时隙上的叠加信号进行检测,如果通过循环冗余检测,则意味着该时隙上的分组未发生冲突,并且被成功接收。复杂度的第一部分来源于对时隙是否发生冲突的检测部分。其次,在采用了IC的随机接入协议中,接收机会根据信道状况,重新生成该分组,其中信道状况可由导频信息结合信道估计算法获得。根据未发生冲突分组有效信息载荷中其副本的位置信息,消除该副本引入的干扰。复杂度的第二部分来源于干扰消除,迭代次数越多复杂度越高。传统无IC的随

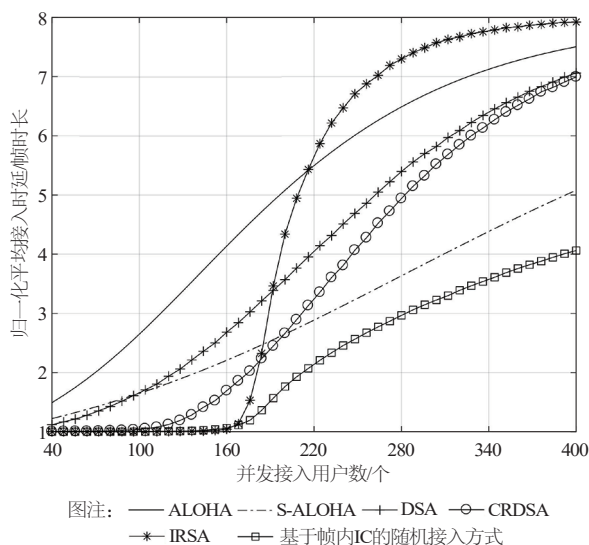


图7 6种随机接入方式的归一化平均接入时延性能对比

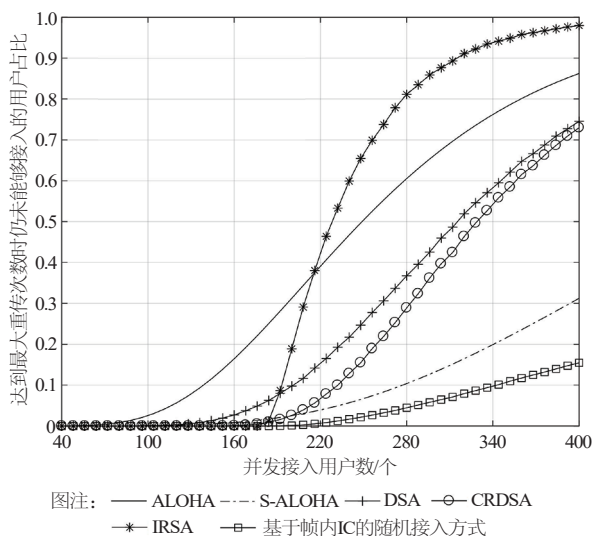


图8 6种随机接入方式中达到最大重传次数时仍未能够接入的用户占比

机接入方式只需要对所有时隙上的叠加信号进行检测一次,检测复杂度为 $O(1)$ 。采用了IC的随机接入方式可能需要对所有时隙上的叠加信号检测多次,且后续需要执行干扰消除算法。因此可以看出采用了IC的随机接入方式在复杂度上要高于传统无IC的随机接入方式。在采用了IC的随机接入方式中,干扰消除的迭代次数越多,检测次数也越多。因此采用解码过程中干扰消除的迭代次数作为衡量指标,能够很好地反映采用了IC的随机接入方式实际解码时的复杂度性能。图9对3种采用了IC的随机接入方式的干扰消除迭代次数进行了比较。在图9中可以看出,3种采用了IC的随机接入技术IC迭代次数会随着并

发接入用户数的增加而先增加后下降。这是由于接入用户数过多会导致有单个分组发送的时隙数占比减少,而干扰消除算法需要先从单个分组发送的时隙所接收到的分组开始迭代译码。在这3种随机接入方式中,基于帧内IC的随机接入复杂度最高。结合图6的吞吐率性能曲线来看,基于帧内IC的随机接入在不过载的情况下性能不及IRSA;在过载情况下性能要明显高于IRSA且复杂度没有高出太多。

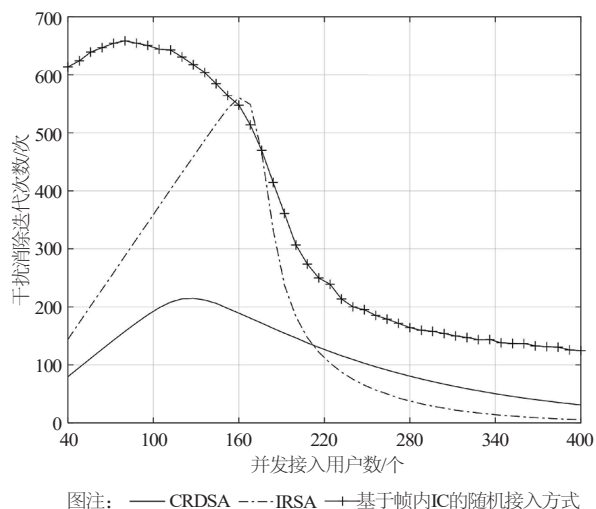


图9 3种采用了IC的随机接入方式的干扰消除迭代次数比较

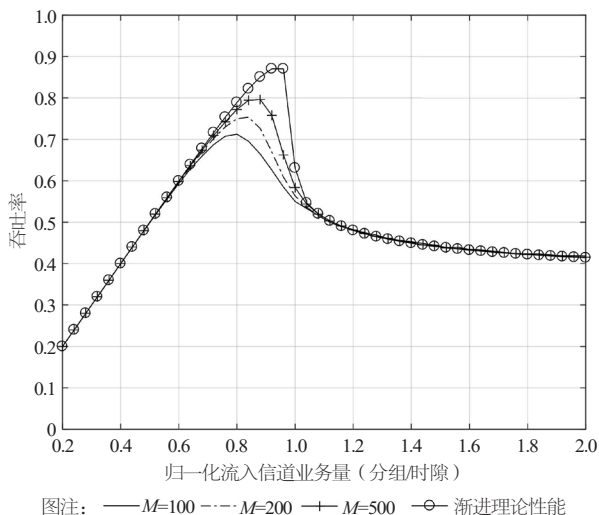


图10 基于帧内IC的随机接入方式在不同帧长设置下的吞吐率性能比较

图10对基于帧内IC的随机接入方式在不同帧长设置下的吞吐率性能进行了比较。参数设置分别为 $M=100$ 、200、500。从图10中可以看出,帧长越大,峰值吞吐率越大,性能曲线越趋近于渐进性能曲线。3种参数设置下的

峰值吞吐率性能分别为0.70、0.75和0.80。此外，帧长越长，线性区范围越大，但是这个差别并不明显。

5 结束语

本文提出了一种面向6G卫星物联网的基于帧内干扰消除的随机接入协议。接入用户在一个竞争周期内发送多个分组副本，分组由时隙索引和传输的数据两部分组成，当接收机成功接收某用户所发送的分组时，即可获取该用户的时隙索引，从而帮助接收其他用户的分组。接收机通过在帧内采用干扰消除算法，可以将冲突时隙中来自多个用户的分组成功接收。本文详细分析了该协议的理论模型以及研究方法，并对吞吐率等性能进行了仿真分析。相比于传统的随机接入协议，基于帧内干扰消除的随机接入协议在吞吐率以及时延性能上均具有很大优势。随着竞争周期长度的增加，峰值吞吐率性能越来越高，趋近于理论性能。仿真结果表明，基于帧内干扰消除的随机接入协议在系统过载的情况下能取得较好的性能。

参考文献：

- [1] 3GPP. Study on NewRadio (NR) to support non terrestrial networks V15.0.0 (Release 15) : 3GPP TR 38.811[S]. 2018.
- [2] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) V1.0.0 (Release 16) : 3GPP TR 38.821[S]. 2019.
- [3] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 28-41.
- [4] DE GAUDENZI R, DEL RIO HERRERO O. Advances in Random Access protocols for satellite networks[C]//Proceedings of 2009 International Workshop on Satellite and Space Communications. Piscataway: IEEE Press, 2009: 331-336.
- [5] KISSLING C, MUNARI A. On the integration of random access and DAMA channels for the return link of satellite networks[C]//2013 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2013: 4282-4287.
- [6] FERRER T, CÉSPEDES S, BECERRA A. Review and evaluation of MAC protocols for satellite IoT systems using nanosatellites[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(8): 1947.
- [7] CHOUDHURY G, RAPPAPORT S. Diversity ALOHA - A random access scheme for satellite communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(3): 450-457.
- [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] LIVA G. Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(2): 477-487.
- [10] PAOLINI E, LIVA G, CHIANI M. Coded slotted ALOHA: a graph-based method for uncoordinated multiple access[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(12): 6815-6832.
- [11] STEFANOVIC C, POPOVSKI P, VUKOBRATOVIC D. Frameless ALOHA protocol for wireless networks[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 2087-2090.
- [12] STEFANOVIC C, POPOVSKI P. ALOHA random access that operates as a rateless code[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4653-4662.
- [13] NARAYANAN K R, PFISTER H D. Iterative collision resolution for slotted ALOHA: an optimal uncoordinated transmission policy[C]//Proceedings of 2012 7th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information Processing (ISTC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 136-139.
- [14] DE GAUDENZI R, DEL RIO HERRERO O, GALLINARO G, et al. Random access schemes for satellite networks, from VSAT to M2M: a survey[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2018, 36(1): 66-107.
- [15] LUBY M G, MITZENMACHER M, SHOKROLLAHI M A. Analysis of random processes via And-Or tree evaluation[C]//SODA '98: Proceedings of the ninth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms. 1998: 364-373.

[作者简介]



徐誉（1995—），男，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院博士生，主要研究方向为物联网和多址接入技术。



郭庆（1964—），男，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院教授，博士生导师，主要研究方向为卫星通信和宽带多媒体通信。