

文章编号: 2095-4980(2023)07-0901-09

卫星物联网混合随机接入技术

万 茜¹, 蒋丽凤², 刘子威¹, 张更新¹

(1.南京邮电大学 卫星通信研究所, 江苏 南京 210003; 2.西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710000)

摘要: 在卫星物联网(IoT)场景中, 随着终端数量不断增加, 频谱资源日益紧张。传统的随机接入技术频谱利用率较低, 使得传统随机接入协议不适用于未来卫星 IoT 的高并发业务需求。同时, 卫星通信链路长, 开放性, 难以保证特种终端信号的安全性。对此, 本文提出一种适用于卫星 IoT 的混合随机接入方案。该方案引入重叠传输的容量提升与安全性优势, 利用扩频码对瞬时功率谱密度的控制能力, 构造功率域非正交接入条件, 并通过接收端的迭代分离实现稳健接收。对本文所提方案的吞吐量性能进行闭式解推导分析与计算机仿真, 结果表明, 与传统的随机接入协议相比, 所提方案可提高系统吞吐量。同时, 相较于常用信号隐藏方法, 所提方法利用常规接入数据包的功率优势, 强化了波形隐藏效果, 提升了特种信息接入的安全性。

关键词: 扩频 Aloha; 随机接入; 安全接入; 卫星物联网

中图分类号: TN927+.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022110

Hybrid random access technology of satellite Internet of Things

WAN Xi¹, JIANG Lifeng², LIU Ziwei¹, ZHANG Gengxin¹

(1.Institute of Satellite Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China;
2.Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: In the satellite Internet of Things(IoT) scenario, as the number of terminals continues to increase, the spectrum resources are of shortage increasingly, and the traditional random access technology has low spectrum utilization, making the traditional random access protocol unsuitable for the high concurrent service requirements of the future satellite IoT. At the same time, satellite communication links are long and open, making it difficult to guarantee the security of special terminal signals. This paper proposes a hybrid random access scheme suitable for satellite Internet of Things. This scheme introduces the capacity improvement and security advantages of overlapping transmission, utilizes the ability of spreading code to control the instantaneous power spectral density, constructs non-orthogonal access conditions in the power domain, and achieves robust reception through iterative separation at the receiving end. The derivation analysis and computer simulation of the throughput performance of the proposed scheme are carried out. The simulation results show that the proposed scheme can improve the system throughput compared with the traditional random access protocol. At the same time, compared with common signal concealment methods, the proposed method utilizes the power advantage of conventional access data packets to strengthen the waveform concealment effect and improve the security of special information access.

Keywords: spread spectrum Aloha; Random Access(RA); secure access; satellite Internet of Things

目前, 物联网概念已日趋完善, 传统地面物联网已经形成了比较完整的技术体系, 得到了广泛应用。从智能家居、智慧城市、智能运输, 再到智能医疗、物资管控等都与物联网密不可分^[1]。随着物联网业务的多样化, 城市外围、海洋、山区等需要物联网提供服务的场景越来越多, 然而受空间、环境等因素的限制, 地面网络难以支撑物联网应用场景的拓展。2020年, 国家发改委将卫星互联网与5G、物联网、工业互联网一起列入新型基础设施建设范围, 卫星通信技术与物联网的结合是未来国家新型基础设施建设过程中重要的发展方向^[2]。卫星通

信系统具有覆盖范围广、系统抗毁性强等优势,可以为放置在偏远地区的物联网终端提供接入服务^[3]。因此全球覆盖的卫星物联网星座是对地面物联网强而有力的补充,也是突破地面物联网覆盖瓶颈、促进产业发展的必要有效途径^[4]。

但卫星物联网也面临一些问题,包括:卫星频谱资源有限,覆盖范围大,单颗卫星需要服务数量庞大的终端,多用户高并发的特征使常规接入技术难以支持吞吐量需求^[5];实际应用场景中存在很多需要保证高安全性的物联网终端,但卫星通信链路长,开放性强,难以保证安全传输这些终端发送的信号^[6]。综上,怎样在提高卫星物联网系统容量的同时保证传输信息的安全性是亟需考虑的问题。

现有的卫星通信系统大多针对传统面向连接的通信业务,主要采用正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)技术,然而传统的正交多址接入协议信令交互过多,导致其十分低效,而且只能为一个用户分配单一的无线资源,资源分配不够灵活,难以承载海量低轨卫星物联网终端^[7]。非正交多址接入技术(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)为海量连接问题的解决提供了一种可行方案^[8],它可将一个资源分配给多个用户,相比其他非正交接入方式具有实现简单、接收机逻辑设计清晰等优势^[9]。但常规 NOMA 是面向连接的,要完成功率分配、信道估计、用户配对等接入控制;同时,卫星信道的缓变特性和不明显的远近效应使得传播带来的功率差不足以实现功率域非正交条件^[10]。针对这一问题,目前在地面移动通信的受控接入方面进行了相关探索。文献[11]中提出了一种基于分时多址(Time Division Multiple Access, TDMA)与光码分多址(Optical Code Division Multiplexing Access, OCDMA)结合的 NOMA-2000 多址接入方案。文献[12]提出了基于正交频分多址(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA)与多载波码分多址(Multi-Carrier Code Division Multiple Access, MC-CDMA)结合的 NOMA-2000 多址接入方案。虽然卫星覆盖范围内的终端数量非常庞大,但并不是所有终端都会一直有数据信息要发送出去,TDMA 等固定分配的方式会造成资源的大量浪费^[13]。与之不同的随机接入(RA)技术系统用户通过竞争的方式获得系统资源,具有接入灵活、部署简单、不受网络规模限制的优势,但高负载区吞吐量不高^[14]。目前随机接入技术领域也开始关注非正交随机接入问题,但大多数接入模式较为单一,没有兼顾安全性问题,导致应用范围受限。因此,需要研究一种新的接入方法,以构造非正交接收条件,在提高系统容量的同时兼顾卫星物联网场景下多种终端的业务需求^[15-18]。

本文立足于卫星物联网天地融合、全球覆盖的特性,针对系统面临的资源紧缺和信息安全无法保障的问题,从系统容量与安全接入 2 个角度出发,提出了一种新的混合随机接入方案^[19]。该方案利用扩频码对瞬时功率谱密度的控制能力,构造功率域非正交接入条件来实现重叠传输,并通过接收端的迭代接收实现非正交信号的接入,在提高系统容量的同时,融合扩频传输的低谱密度特性及与非扩频数据包间的准正交性,利用信道中的常规数据包掩护扩频数据包,从而达到保证安全传输的目的。

1 系统模型

1.1 低轨卫星物联网场景

卫星物联网系统以卫星通信为基础,融合了卫星导航、遥感等服务,是为万物互联提供服务的综合系统^[20]。低轨卫星物联网体系架构如图 1 所示,可以分为空间段和地面段。空间段由多颗卫星组成的卫星星座组成,用于传输终端收集到的信息^[21]。地面段包括分布在地球表面的物联网终端和地面信关站,物联网终端用于信息的感知和收集,地面信关站作为认证管理和数据处理中心^[22]。

近年来,国内外已公布了一批由低轨小卫星组成的星座,用于满足日益增长的物联网市场需求^[23]。国外比较有代表性的有:轨道通信(Orbcomm)系统,主要用于交通运输、油气田、水利、环保、渔船和消防报警等;一网(OneWeb)系统,应用领域包括全球通信、应急通信、机载通信、车载蜂窝网络、面向个人、家庭、小机构的互联网接入等^[24];星链(Starlink)系统,应用范围包括通信传输、卫星成像、遥感探测等。国内方面:“天地一体化信息网络”、“鸿雁”系统、“行云系统”等都计划提供卫星物联网相关服务。低轨卫星物联网业务分类情况如图 2 所示。

这些物联网业务的开展大多需要高通量的卫星系统。以运输服务业为例,表 1 统计了部分地区在航海应用服务、陆地运输车载通信服务和空中互联网接入服务 3 个领域 2025 年的卫星市场容量预测情况^[25]。

由表 1 可以看出,上述业务对卫星系统容量需求很大。不仅在运输服务业,其他卫星物联网业务同样需要高吞吐量的接入协议。

卫星物联网也可服务于特种信息传输,例如用于导航定位、侦察监视、对天基目标的探测和摧毁等领域,但现有的接入方法难以满足卫星物联网广覆盖范围下多用户高并发业务的安全需求^[26]。因此研究能保障卫星通

信信息安全的通信系统具有十分重要的现实意义。

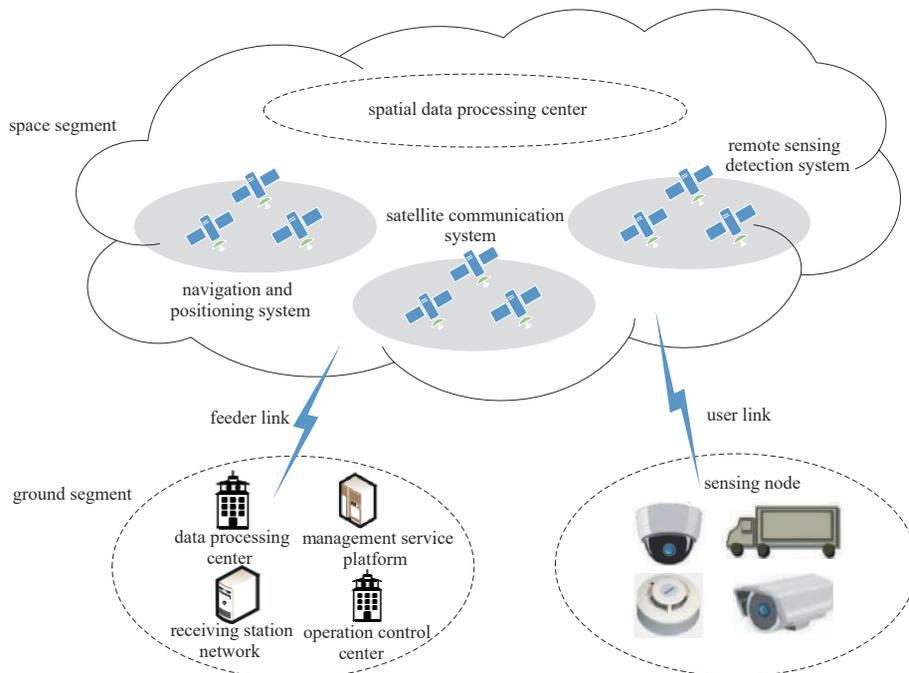


Fig.1 Low-orbit satellite IoT architecture
图 1 低轨卫星物联网体系架构

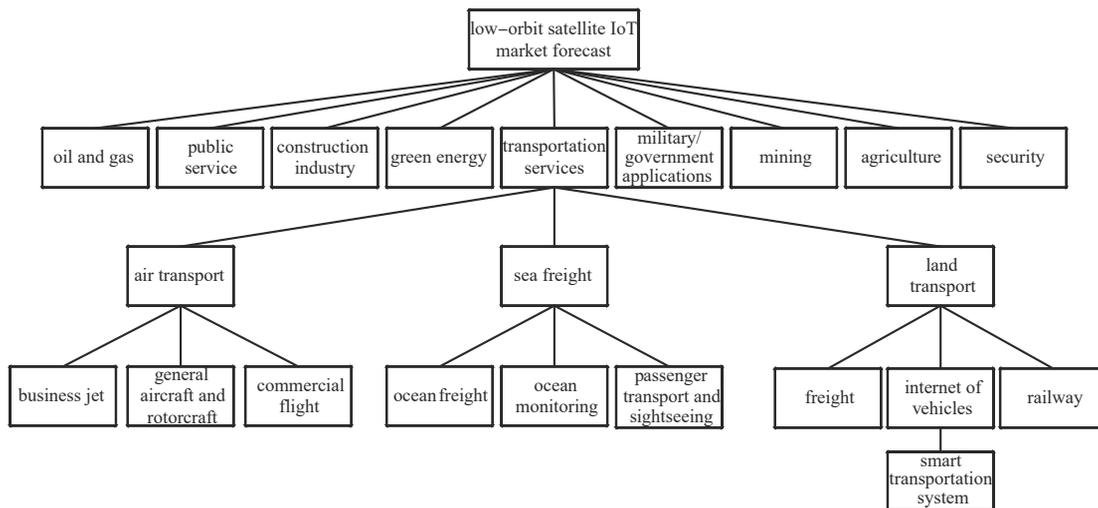


Fig.2 LEO satellite IoT business classification
图 2 低轨卫星物联网业务分类

表 1 不同领域 2025 年卫星市场容量预测

Table1 Forecast of satellite market capacity in different fields in 2025

application field		highest market capacity/(Gbit/s)	
nautical application service	service type	ocean freight ship	170.75
		cruise	54.60
		ocean fishing boat	59.18
land railway passenger communication service	service area	China	104.60
		Southeast Asia	5.11
		South Asia	18.23
		Central and Eastern Europe	7.18
		West Asia and North Africa	55.65
air internet access service	service area	China	88.85
		Southeast Asia	70.04
		South Asia	57.04
		Central and Eastern Europe	39.46
		West Asia and North Africa	78.69

1.2 混合随机接入方案系统模型

怎样构造功率域非正交接入条件是该方案设计的关键。考虑到扩频传输的低谱密度特性，本方案将低谱密度的扩频信号与非扩频信号进行叠加传输，接收机处用户信号之间的功率差是扩频终端发送信号扩展所固有的，因此不需要在信号输入端进行功率差的设计，这样就避免了常规非正交接入技术提出的输入端功率不平衡要求。设计的混合随机接入方案模型如图 3 所示。

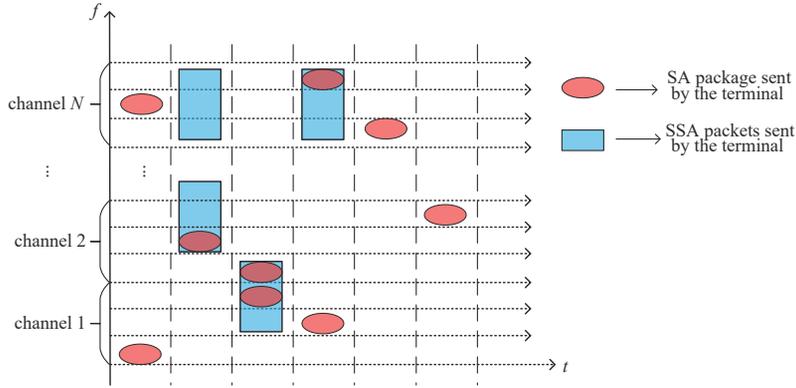


Fig.3 Hybrid random access scheme model
图3 混合随机接入方案模型

考虑到时隙 Aloha(Slotted Aloha, SA)是目前最常用的随机接入方式，并且扩频时隙 Aloha(Spread Spectrum Aloha, SSA)具有低复杂度、较好的抗干扰能力和抗多径衰落性能等优势，因此在该混合随机接入模型中，选用 SA 作为非扩频信号，选用 SSA 作为低谱密度的扩频信号。实际中，2 种数据包共享无线信道，共享方式也影响着系统的吞吐量。本文采用的信道划分方式不支持部分重叠，并且由于常规终端数量远大于扩频终端数量，一个时隙中叠加多个扩频数据包仅为可能出现的特殊情况。

图 4 为该混合随机接入方案流程图。该方案的整个流程大致为：

- 1) 终端接收同步信号，完成帧和时隙同步；根据终端自身发送要求，选择非扩频和扩频模式；
- 2) 对于非扩频终端信号进行载波调制，对于扩频终端信号先扩频后调制；
- 3) 两组终端选择信道和时隙发送数据包；
- 4) 接收端捕获数据包后，对数据包进行参数估计、解扩、解调并进行迭代分离。

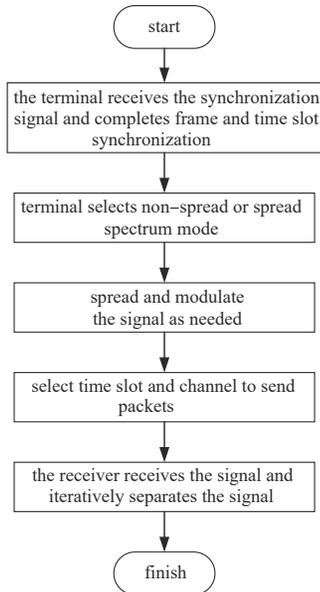


Fig.4 Flow chart of hybrid random access scheme
图4 混合随机接入方案流程图

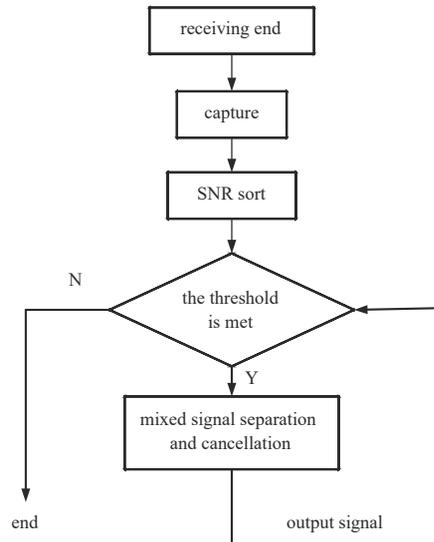


Fig.5 The overall process of receiving the plan
图5 接收方案总体流程

图 5 为接收方案流程图。接收方案基于串行干扰消除的思想，对捕获的混合信号进行信噪比排序，判断大功率信号是否满足阈值，接着用参数估计方法估计并补偿频偏和相差，之后通过基于最小均方差准则的自适应滤波对混合信号进行分离抵消。

图 6 为混合信号分离抵消模块设计思路。首先对混合信号进行能量判决，大于判决阈值，表明混合信号中存在大功率的 SA 信号，则合作方利用已知的 SA 掩盖信号先验信息，实现对 SA 信号的解调、波形重构与拟合。对 SA 信号的成分进行干扰消除后，解扩 SSA 信号，完成载波同步、符号同步后输出；小于判决阈值，则表明混合信号中均为扩频信号，则对信号先解扩，再进行匹配滤波、载波同步和符号同步后输出。若存在多个扩频信号，则连续迭代干扰消除，直到所有扩频信号均被解出。

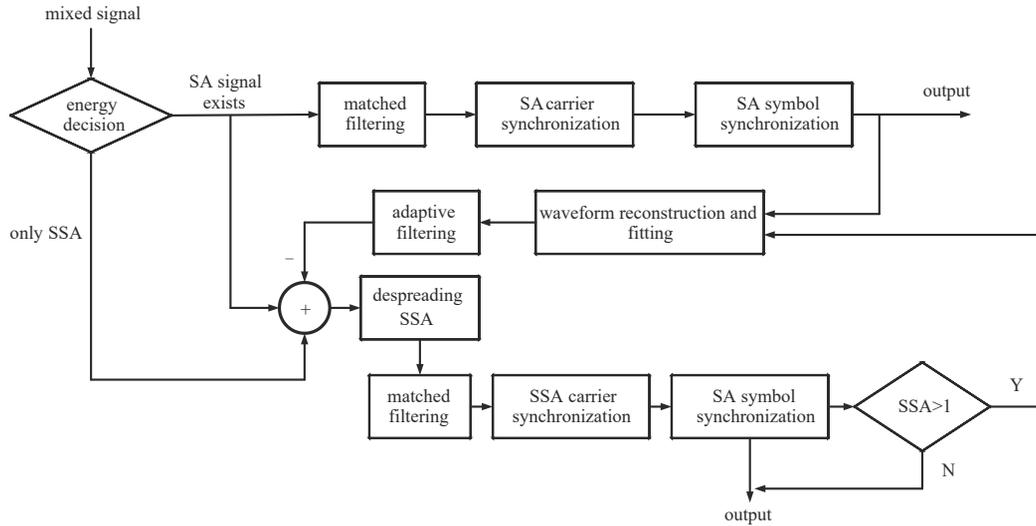


Fig.6 Mixed signal separation and cancellation module
图 6 混合信号分离抵消模块

2 接入性能的理论分析

卫星随机接入系统的性能通常从吞吐量、丢包率 2 个指标来评估。吞吐量越高，丢包率越低，代表随机接入系统性能越好。

对于卫星物联网接入场景，海量接入的数据包间满足独立，因此，基于 Palm-Khintchine 定理^[27]，可将终端发送数据包近似看作一个泊松过程。

在泊松分布下，一个时隙时间 t 的范围内有 k 个数据包的概率为：

$$f(k, t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} = \frac{G^k e^{-G}}{k!} \quad k \geq 0 \tag{1}$$

式中： λ 为到达强度； $G = \lambda t$ 为归一化负载。

假设一段频域资源被划分成了 N 个子信道，在每个子信道中，一个时隙仅有一个 SA 数据包才能传输成功(即 $k = 1$)。 N 个 SA 子信道的归一化负载 G_{SA} 可表示为 $G_{SA} = G_1 \times N \times \frac{1}{N} = G_1$ 。 N 个 SA 子信道总归一化吞吐量 S_{SA} 可表示为：

$$S_{SA} = S_1 \times N \times \frac{1}{N} = \frac{G_1^k}{k!} e^{-G_1} \Big|_{k=1} = G_1 e^{-G_1} \tag{2}$$

式中： G_1 为 SA 一个子信道的负载； S_1 为一个子信道中 SA 的吞吐量。

受解调门限的影响，时隙中不可能容纳无限个 SSA 数据包。设 M 为一个时隙中容纳 SSA 数据包的上限。由于假设所有 SSA 数据包使用不同的扩频码，所以只要一个时隙中容纳的 SSA 数据包 $\leq M$ ，就可以成功传输。混合系统 SSA 的归一化负载为 $G_{SSA} = G_2 \times \frac{1}{N}$ ，SSA 归一化吞吐量 S_{SSA} 为：

$$S_{SSA} = S_2 \times \frac{1}{N} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M \frac{G_2^k}{k!} e^{-G_2}, \quad k \geq 0 \tag{3}$$

式中： G_2 为 SSA 系统的负载； S_2 为 SSA 吞吐量。

设 G 为混合随机接入方案总的归一化负载，由于时隙 Aloha 和扩频时隙 Aloha 系统相叠加，实际上只占用了时隙 Aloha 所占用的频域资源，因此该方案归一化总负载为：

$$G = G_{SA} + G_{SSA} \times \frac{1}{N} = \left(G_1 \times N + G_2 \times \frac{1}{N} \right) \times \frac{1}{N} = G_1 + G_2 \times \frac{1}{N^2} \tag{4}$$

同理，混合随机接入方案总吞吐量 T 可表示为：

$$T = S_{SA} + S_{SSA} \times \frac{1}{N} = \left(S_1 \times N + S_2 \times \frac{1}{N} \right) \times \frac{1}{N} = G_1 \times e^{-G_1} + \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^M \frac{G_2^k}{k!} e^{-G_2}, k \geq 0 \tag{5}$$

由式(5)可看出，吞吐量的理论值由 2 部分组成。其中 $G_1 e^{-G_1}$ 为时隙 Aloha 的吞吐量表达式，2 组信号叠加后吞吐量增加的部分为多容纳的 SSA 数据包对吞吐量的影响。理论上该混合随机接入方案的吞吐量相比 SA 系统有一定提升。从式(5)还可以看出，一个时隙中容纳 SSA 数据包的上限 M 越大，吞吐量值越大。理论上划分的时隙个数 N 越多，吞吐量越小。但时隙个数与扩频增益大小有关，扩频增益大小间接影响着 M 的值，故 N 的值不可随意变小。

根据丢包率的定义，混合随机接入方案丢包率可表示为：

$$PLR(G) = 1 - \frac{T}{G} \tag{6}$$

3 仿真结果

3.1 接入性能仿真参数设置

在本节中，首先对数据包功率、解调门限和调制方式等参数进行了设置，参数汇总见表 2 所示。

3.2 接入性能仿真结果及分析

3.2.1 理论与仿真对比分析

按照表 2 设置的参数，对方案进行了仿真，图 7 为本方案理论和仿真吞吐量对比图。图 8 为理论和仿真丢包率对比图。

表 2 仿真参数

Table2 Simulation parameters

parameters	values
number of time slots, N	10
SA packet power/dBW	17
SSA packet power/dBW	7
channel	AWGN
modulation	BPSK
demodulation threshold/dBW	6.8
noise power/dBW	0
spread spectrum gain/dB	27

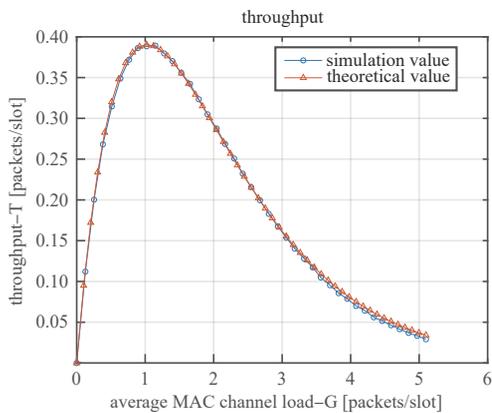


Fig.7 Comparison of simulated and theoretical throughput
图 7 仿真和理论吞吐量对比图

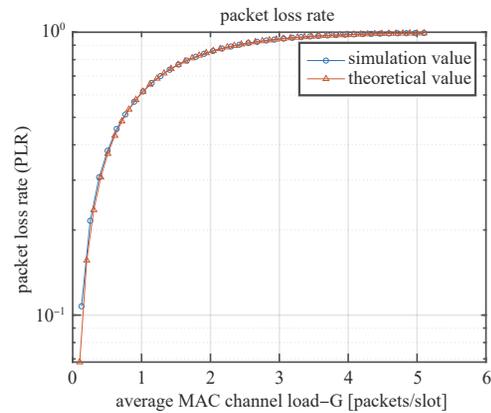


Fig.8 Comparison of simulated and theoretical packet loss rates
图 8 仿真和理论丢包率对比图

由仿真图可以看出，前一节推导的公式的理论值与仿真结果是一致的。在归一化负载为 1 时，吞吐量达到最大值，约为 0.39。在高负载部分吞吐量较低。

3.2.2 与传统随机接入算法对比分析

将所提出的方案与传统时隙 Aloha 及竞争解决的分集时隙 Aloha(Contention Resolution Diversity Slotted Aloha, CRDSA)的性能效果进行了比较。吞吐量的仿真结果如图 9 所示。

由仿真图可以看出：a) 与传统时隙 Aloha 相比，混合随机接入方案吞吐量整体高于传统时隙 Aloha 系统，在归一化负载为 1 时，可达到最大值，约为 0.39；传统时隙 Aloha 在负载为 1 时，吞吐量最高约为 0.36，吞吐量提高了 6% 左

右。高出 0.36 的吞吐量是由于 2 种多址方式迭代带来的增益，随着负载的增加，数据包发生碰撞的可能性加大，吞吐量呈下降趋势。b) 与 CRDSA 相比，在低负载区 CRDSA 系统的吞吐量高于该混合随机接入方案，在归一化负载为 0.6 时，CRDSA 吞吐量达到了最高值，为 0.52。但随着负载的增加，CRDSA 数据包之间的碰撞加剧，吞吐量迅速恶化，而混合随机接入方案在高负载区性能明显优于 CRDSA，缓解了高负载区 CRDSA 接入协议的“雪崩效应”。

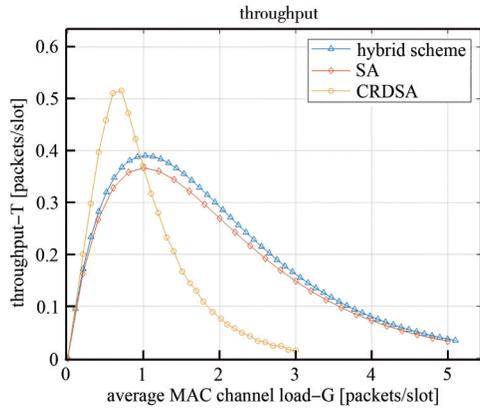


Fig.9 Comparison of hybrid random access scheme and SA/CRDSA throughput
图 9 混合随机接入方案与 SA/CRDSA 吞吐量对比图

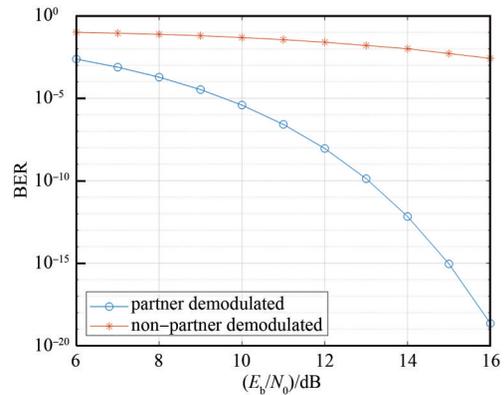


Fig.10 BER of demodulated masked signals
图 10 解调被掩盖信号的误码率

3.3 安全传输能力分析

在该混合随机接入方案中，常规数据包与扩频数据包进行了叠加，有安全传输需求的 SSA 信号被强功率的 SA 信号所掩盖，2 路信号间存在较大的功率差异。信号分离时，合作方可利用功率差以及通信双方共享的掩盖信号波形的参数信息，解调混合信号中的 SA 掩盖信号，继而实现对掩盖信号的重构和抵消；而非合作方无法得知掩盖信号的符号速率、调制方式等内容，难以重构和抵消掩盖信号。

为研究该方案的安全传输能力，对解调扩频信号的误比特率性能进行了仿真。其中合作方利用先验信息分离抵消掩盖信号，而非合作方直接从掩盖信号中解调掩盖信号后进行分离抵消。仿真的两路叠加信号均采用二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制，两信号功率差为 8 dB，仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可看出，非合作方解调被掩盖信号误比特率明显高于合作方，在误比特率均为 10^{-3} 数量级时，存在 9 dB 以上的损失。这是由于非合作方无法获知掩盖信号的符号速率、调制方式等内容，参数估计等也存在较大误差，无法彻底分离掩盖信号，通信信号中仍存在着未完全抵消的掩盖信号成分，从而影响了被掩盖信号的正确解调，导致解调扩频信号时误比特率很高。本方案中非合作方无法正确解调有安全传输需求的扩频信号，提高了系统的安全传输能力。

3.4 接收端信号分离仿真分析

3.4.1 仿真参数设置

以 SA 与 SSA 两重碰撞为例对本文所提的接收端信号分离方案进行仿真，仿真参数设置如表 3 所示。

3.4.2 仿真结果分析

对 2 个信号叠加进行了初步仿真，信号 1 代表 SA 信号，信号 2 代表 SSA 信号。图 11 为信号 1、信号 2 及叠加信号示意图。

经自适应滤波将信号 1 分离，将分离抵消后的信号 2 进行解扩解调，并将原发送信号 2 与解调后的序列进行比较，分离后的信号及比较结果如图 12 所示。

上述仿真结果表明，接收端信号分离方案能将混合信号进行分离。

4 结论

本文基于低轨卫星物联网的场景，提出了一种新的混合随机接入方案。该方案利用重叠传输来实现容量提升并保证了传输信号的安全性，利用扩频码对瞬时功率谱密度的控制能力，构造功率域非正交接入条件，通过接收端的迭代分离实现信号的稳健接收。经过对所提方案的吞吐量性能进行闭式解推导分析与计算机仿真，结

表 3 仿真参数

Table3 Simulation parameters	
parameters	values
packet length/bits	100
transmission rate/kbps	10
spreading gain	7
channel	AWGN
modulation system	BPSK
sample frequency/kHz	140
rolloff-factor	0.35
$(E_b/N_0)/dB$	0~8

果表明：与传统随机接入协议相比，这种接入方式提高了系统吞吐量，减小了丢包率。同时，相较于常用信号隐藏方法，该方案利用常规接入数据包的功率优势强化了波形隐藏效果，提升了特种信息接入的安全性。该混合随机接入方案工程成熟度高，适用于未来卫星物联网的高并发业务场景，可有力支撑卫星物联网系统提供多样化的服务能力，具有广泛应用前景。

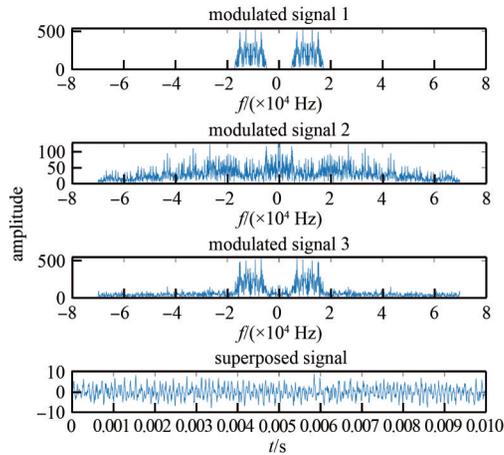


Fig.11 Signal 1,2 and superimposed signal
图 11 信号 1、信号 2 及叠加信号

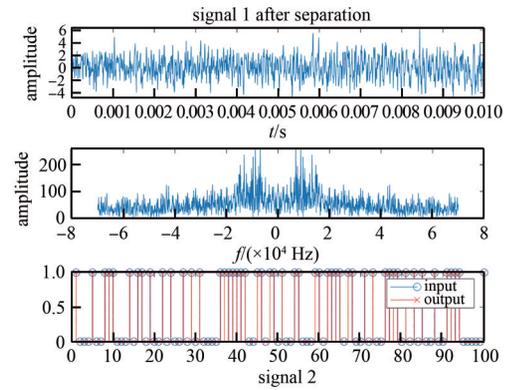


Fig.12 Signal after separation and demodulation
图 12 分离后信号及解调结果

参考文献：

- [1] 沈俊,高卫斌,张更新. 低轨卫星物联网的发展背景、业务特点和技术挑战[J]. 电信科学, 2019,35(5):113-119. (SHEN Jun, GAO Weibin,ZHANG Gengxin. The development background, business characteristics and technical challenges of low-orbit satellite IoT[J]. Telecommunication Science, 2019,35(5):113-119.)
- [2] 张更新,王运峰,丁晓进,等. 卫星互联网若干关键技术研究[J]. 通信学报, 2021,42(8):1-14. (ZHANG Gengxin,WANG Yunfeng,DING Xiaojin,et al. Research on some key technologies of satellite Internet[J]. Journal of Communication,2021,42(8):1-14.)
- [3] 张志丽,王力权,王艳君,等. 卫星物联网系统随机接入前导序列设计[J]. 无线电通信技术, 2020,46(5):534-540. (ZHANG Zhili,WANG Liquan,WANG Yanjun,et al. Design of random access leading sequence for satellite Internet of Things system[J]. Radio Communication Technology, 2020,46(5):534-540.)
- [4] 张更新,揭晓,曲至诚. 低轨卫星物联网的发展现状及面临的挑战[J]. 物联网学报, 2017,1(3):6-9. (ZHANG Gengxin,JIE Xiao, QU Zhicheng. The development status and challenges of low-orbit satellite IoT[J]. Journal of Internet of Things, 2017,1(3):6-9.)
- [5] FERRER T,CÉSPEDES S,BECERRA A. Review and evaluation of MAC protocols for satellite IoT systems using nanosatellites[J]. Sensors. 2019,19(8):1947.
- [6] MENG X. Summary on content networking[J]. China Science and Technology Information, 2018(23):46-47.
- [7] 李鹏绪. 卫星物联网系统中多址接入技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019. (LI Pengxu. Research on multiple access technology in satellite Internet of Things system[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.)
- [8] DING Zhiguo,YANG Zheng,FAN Pingzhi,et al. On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014,21(12):1501-1505.
- [9] TAKEDA T,HIGUCHI K. Enhanced user fairness using non-orthogonal access with SIC in cellular uplink[C]// 2011 IEEE Vehicular Technology Conference. San Francisco,CA:IEEE, 2011:1-5.
- [10] KHANSA A A,CHEN X,YIN Y,et al.Performance analysis of power-domain NOMA and NOMA-2000 on AWGN and Rayleigh fading channels[J]. Physical Communication, 2020,43(12):101185. doi:10.1016/j.phycom.2020.101185.
- [11] NADAI F,BERTHET A O,SARI H. Further results on channel overloading using combined TDMA/OCMA with iterative interference cancellation[C]// 2004 IEEE 15th International Symposium on Personal,Indoor and Mobile Radio Communications. Barcelona:IEEE, 2004:2463-2467.
- [12] MAATOUK A,CALISKAN E,KOCA M,et al. Frequency-domain NOMA with two sets of orthogonal signal waveforms[J]. IEEE Communications Letters, 2018,22(5):906-909. doi:10.1109/LCOMM.2018.2810118.
- [13] 赵波. 卫星物联网随机接入系统关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020. (ZHAO Bo. Research on key technologies of satellite IoT random access system[D]. Xi'an,Shaanxi,China:Xidian University, 2020.)

- [14] 徐誉,郭庆. 面向6G卫星物联网的帧内干扰消除随机接入技术研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021,2(4):27-33. (XU Yu, GUO Qing. Research on random access technology of intra-frame interference cancellation for 6G satellite IoT[J]. Heaven and Earth Integrated Information Network, 2021,2(4):27-33.)
- [15] SAITO Y, BENJEBBOUR A, KISHIYAMA Y, et al. System-level performance evaluation of downlink Non-Orthogonal Multiple Access(NOMA)[C]// 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). London:IEEE, 2013:611-615.
- [16] PARIDA P, DAS S S. Power allocation in OFDM based NOMA systems:a DC programming approach[C]// 2014 IEEE Globecom Workshops(GC Wkshps). Austin, TX:IEEE, 2014:1026-1031.
- [17] SARI H, VANHAVEBEKE F, MOENECLAHEY M. Multiple access using two sets of orthogonal signal waveforms[J]. IEEE Communications Letters, 2000,4(1):4-6.
- [18] SARI H, MAATOUK A, CALISKAN E, et al. On the foundation of NOMA and its application to 5G cellular networks[C]// 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). Barcelona:IEEE, 2018:1-6.
- [19] 曲至诚. 天地融合低轨卫星物联网体系架构与关键技术[D]. 南京:南京邮电大学, 2020. (QU Zhicheng. Architecture and key technologies of the Internet of Things for low-orbit satellite[D]. Nanjing, Jiangsu, China: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.)
- [20] 李文. 卫星通信、导航和遥感融合系统的关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (LI Wen. Research on key technologies of satellite communication, navigation and remote sensing fusion system[D]. Chengdu, Sichuan, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)
- [21] 靳聪, 和欣, 谢继东, 等. 低轨卫星物联网体系架构分析[J]. 计算机工程与应用, 2019,55(14):98-104. (JIN Cong, HE Xin, XIE Jidong, et al. Analysis of low-orbit satellite IoT architecture[J]. Computer Engineering and Applications, 2019,55(14):98-104.)
- [22] 朱天天, 刘子威, 张更新. 卫星物联网接入技术综述[C]// 第十六届卫星通信学术年会. 北京:[s.n.], 2020:72-80. (ZHU Tiantian, LIU Ziwei, ZHANG Gengxin. Overview of satellite Internet of Things access technology[C]// The 16th Annual Conference on Satellite Communication. Beijing:[s.n.], 2020:72-80.)
- [23] 沈俊, 高卫斌, 张更新. 低轨卫星物联网的发展背景、业务特点和技术挑战[J]. 电信科学, 2019,35(5):113-119. (SHEN Jun, GAO Weibin, ZHANG Gengxin. The development background, business characteristics and technical challenges of low-orbit satellite IoT[J]. Telecommunication Science, 2019,35(5):113-119.)
- [24] 林莉, 左鹏, 张更新. 美国OneWeb系统发展现状与分析[J]. 数字通信世界, 2018(9):22-23, 18. (LIN Li, ZUO Peng, ZHANG Gengxin. Development status and analysis of OneWeb system in the United States[J]. Digital Communication World, 2018(9):22-23, 18.)
- [25] 梁桂林, 魏畅, 周晓纪, 等. "一带一路"高通量卫星市场需求评估与分析[J]. 卫星应用, 2021(1):50-57. (LIANG Guilin, WEI Chang, ZHOU Xiaoji, et al. Market demand assessment and analysis of "Belt and Road" high-throughput satellite[J]. Satellite Application, 2021(1):50-57.)
- [26] 韩慧鹏. 国外高通量卫星发展概述[J]. 卫星与网络, 2018(8):34-38. (HAN Huipeng. Overview of the development of high throughput satellites abroad[J]. Satellite and Network, 2018(8):34-38.)
- [27] WU K. Classification of queueing models for a workstation with interruptions:a review[J]. International Journal of Production Research, 2014,52(3):902-917.

作者简介:

万 茜(1998-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信 .email:335415532@qq.com.

蒋丽凤(1983-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、航天器辐射强化、星载数字信号处理.

刘子威(1989-), 男, 讲师, 主要研究方向为卫星通信、阵列信号处理、信号分离.

张更新(1967-), 男, 教授, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等.