

低轨卫星物联网体系架构及关键技术研究

丁晓进^{1,3}, 洪涛^{2,3}, 刘锐^{2,3}, 彭文滔^{2,3}, 张更新^{2,3}

- (1. 南京邮电大学物联网学院, 江苏 南京 210003 ;
2. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003 ;
3. 南京邮电大学卫星通信研究所, 江苏 南京 210003)

摘要: 首先分析低轨卫星物联网的系统组成和需求特征, 并设计低轨卫星物联网的体系架构; 其次, 研究电磁和传播环境感知方法, 通过构建神经网络模型智能提取电磁环境和信道特征; 再次, 探究活跃终端身份辨识方法, 以检测异步接入活跃终端身份; 最后, 考虑多输入多输出技术作为地面移动通信系统提升容量的主要手段, 探索两种卫星空间域资源挖掘算法, 以实现低轨卫星物联网终端碰撞减缓和容量提升。仿真结果表明, 所设计的空间域资源挖掘方法可有效减缓终端间信号碰撞, 显著提升低轨卫星物联网终端并发接入容量。

关键词: 低轨卫星物联网; 活跃终端辨识; 空域资源挖掘; 碰撞减缓

中图分类号: TP927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021038

Research on Architecture of LEO Satellite Internet of Things and Key Technologies

DING Xiaojin^{1,3}, HONG Tao^{2,3}, LIU Rui^{2,3}, PENG Wentao^{2,3}, ZHANG Gengxin^{2,3}

- 1.College of Internet of Things, Nanjing University of Post and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2.College of Telecommunications, Information Engineering, Nanjing University of Post and Telecommunications, Nanjing 210003, China
3.Satellite Communication Research Institute, Nanjing University of Post and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: First, we analyzed the composition and demand characteristics of LEO satellite IoTs, and designed an architecture of LEO satellite IoTs. Second, to extracted characteristics of electromagnetic environment and channel, we studied electromagnetic environment and channel sensing methods through constructing neural network model. Then, we investigated an active terminal-identification method for detecting active terminals. Finally, considered multiple-input multiple-output as the main approach to improved the capacity of terrestrial mobile communication systems, we explored a pair of algorithms of mining satellite spatial resources for realizing the collision mitigation and capacity improvement of LEO IoT terminals. Simulation results showed that the designed method sofmining spatial-domain resources could mitigated effectively signal collisions among IoT terminals, and improved significantly the concurrent accessing number of LEO satellite IoT terminals.

Keywords: low earth orbit satellite internet of things, active terminal identification, spatial resource mining, collision mitigation

1 引言

国家发展和改革委员会在2020年4月正式将卫星互联网与5G、物联网、工业互联网一起列入新型基础设施

建设范围, 标志着我国卫星互联网建设正式提上议事日程。低轨卫星物联网是未来我国卫星互联网的重要组成部分, 是实现“万物互联”目标的重要手段之一。

收稿日期: 2021-09-08; **修回日期:** 2021-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62171234, No.91738201, No.61971440, No.U21A20450); 江苏省前沿引领技术基础研究专项 (No.BK20192002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62171234, No.91738201, No.61971440, No.U21A20450), Jiangsu Province Basic Research Project (No.BK20192002)

目前,地面通信网只能覆盖我国陆地面积的20%左右,通过建立低轨卫星物联网,使之成为地面物联网的补充和延伸,则能够有效克服地面物联网在海洋、山区、沙漠等区域覆盖能力不足的问题,可实现全球无缝覆盖,在地面发生自然灾害、突发事件时依然能正常工作,也易于向大范围运动目标(飞机、舰船等)提供无间断的网络连接。低轨卫星物联网是国家的重大需求,在国民经济和国防领域有着广泛的应用前景^[1]。因此,低轨卫星物联网受到了国内外的广泛关注,也是当前研究的热点。

但是,与利用地面基站实现物联网相比,采用低轨卫星实现物联网具有一些特殊性。其主要包括:一个地面基站的覆盖区半径一般是千米量级,而一颗卫星的覆盖区半径通常在上千千米量级,虽然单颗卫星服务的终端数量巨大,但其单位面积支持的连接密度却远低于地面基站,主要适合广域低连接密度的应用场景;由于低轨卫星围绕地球做高速运动,卫星波束将以每秒数千米的速度掠过地面,不仅会引起较大的多普勒频移,而且导致网络连接关系和服务终端数快速动态变化;地面物联网终端的通信距离一般是千米量级,而卫星物联网终端的信号传播距离通常是上千千米量级,会导致较大的传播损耗和时延,对终端低功耗和通信协议设计带来不利影响;受限于其体积、重量和能源供给,卫星的频率、功率资源和处理能力极其受限,难以安装大口径天线和支持非常复杂的星上处理任务。

在低轨卫星物联网系统构建方面,国外已经建成、正建设或计划建设的低轨卫星通信系统有数十个,其中大多数都能提供物联网服务,比较有代表性的有:轨道通信(Orbcomm)系统,是专门针对双向短数据传输的低轨卫星通信系统^[2],用户可基于其开展包括远程数据采集、系统监控、车辆船舶及移动设施的跟踪定位、短报文的传递、收发电子邮件等方面的应用,应用领域涉及交通运输、油气田、水利、环保、渔船和消防报警等;一网(OneWeb)系统,其目前在轨卫星数已达110颗^[3],计划部署总计达4.8万颗的卫星,首期计划发射648颗,轨道高度大约为1 200 km,可提供石油天然气管道监控、车联网等服务;“星链”(Starlink)系统,其目前在轨卫星数已达1 082颗^[4],计划部署总计达4.2万颗的低轨卫星,首期计划发射4 408颗,形成一个庞大的卫星星座,可为未来物联网接入提供巨大网络支撑。国内正建设或计划建设的低轨卫星通信系统有十几个,其中绝大多数计划提供卫星物联网服务。

在低轨卫星物联网体系架构方面,高空平台(High Altitude Platform Station, HAPS)被引入空间信息网络,构成GEO+中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)+低

地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)+HAPS+地面网络的5层体系架构,结合5G网络研究成果和先进技术,建立卫星/HAPS/地面一体化信息网络结构^[5],为全球用户提供宽带接入、移动通信、导航定位等服务。通过业务和控制信息的分离,一种基于软件定义网络的协议架构被提出^[6],以隔离空间信息网络异构动态的影响,并建立了网络服务模型,通过软件无线电技术寻找可用资源,改善网络服务质量。

在空间域资源利用方面,基于大规模天线阵的波分多址接入技术已吸引了广泛的关注^[7-8]。针对地面物联网上行非正交接入场景,以蜂窝内所有设备的遍历可达速率加权和目标求得下界。基于此,分析不分簇情况下的接收机设计准则,并设计分簇算法和参数设计方法^[9]。上述多天线非正交多址接入策略需要基站具有完全的信道状态信息。然而在实际系统中,基站位于下行信道的发射端,很难获得完全的信道状态信息。如果基站没有任何信道状态信息,则无法利用波束成形消除簇间干扰。在这种情况下,一种在接收端进行迫零波束成形的方案被提出^[10]。但这一方案需要每个移动终端的天线数大于基站天线数,这在实际系统中是很难做到的。不同于单星多天线方式,基于波束成形的多颗卫星协作接收方式被提出用于协同检测碰撞信号^[11],以缓解传统多星协作接收所发生的“死锁”现象^[12]。

近年来,低轨卫星物联网成为物联网研究方向新的热点,面临如何解决海量终端在有限时频资源下的并发接入问题。借鉴地面5G网络中的多输入多输出技术,充分挖掘空域资源,提升系统容量是一种有效解决方案。但与地面负反射环境信道不同,卫星信道是直射分量占主体的欠散射信道,采用基于多天线收发时空编码技术并不能取得理想的分集增益。

2 低轨卫星物联网体系架构

随着对6G网络研究的深入,未来的物联网需要能够提供接近100%的覆盖。将物联网基站部署到天上,建立卫星物联网是提升覆盖广度的有效手段之一,其中采用低轨卫星实现物联网,具有较小的传播时延和传输损耗,将有助于提高消息时效性和实现终端小型化。所考虑的低轨卫星物联网体系架构如图1所示,包括接入网络段、终端用户段和物联应用段3部分。其中,接入网络段包含低轨卫星接入网和地面接入网,本文重点关注低轨卫星接入网,其由多颗通过星际链路相连的低轨卫星组成,共同支撑海量物联网终端随机接入。终端用户段为低轨卫星物联网中需要服务的海、陆、空物联终端用户。物联应用段向用户提供服务,满足多类海量物联应用需求。

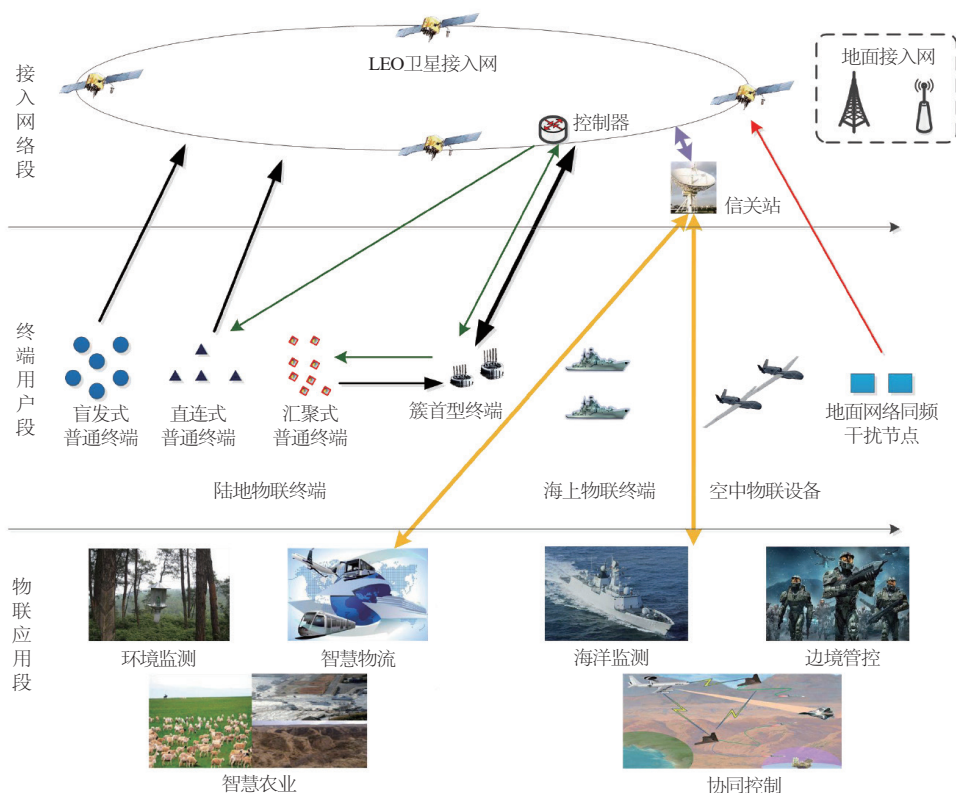


图1 低轨卫星物联网体系架构

如图1所示,在终端用户段,由于空中、海上包括偏远陆地区域与地面接入网相对独立,因此部署在上述区域的终端需要通过低轨卫星接入网传输其业务数据;而部署于地面接入网与低轨卫星接入网重叠覆盖区域的终端,可通过自身环境感知、业务需求、终端能力等因素,灵活地选择合适的接入网进行业务传输。由于低轨卫星覆盖范围是传统地面基站的约3个数量级,通常所需服务的盲发式和直连式普通物联网终端数量巨大。此外,考虑簇首型终端可视为高性能终端,其可采用面向连接的方式接入低轨卫星中,这些不在本文的研究范围内。

盲发式和直连式普通物联网终端接入处理框架如图2所示,包括电磁、传播环境感知与业务建模、控制中心、接收信号处理和数据中心等模块。其中电磁、传播环境感知与业务建模模块实现对电磁、传播环境的特征提取,低轨卫星物联网空时二维业务模型建模,为控制中心生成资源调度决策和接收信号处理奠定基础;控制中心模块基于电磁、传播环境特征和业务模型生成负载均衡决策,以实现终端间碰撞减缓和系统终端容量提升;接收信号处理模块实现碰撞终端的身份辨识和碰撞信号的检测,并最终将数据传输给数据中心,以便后续处理。相比于参考文献[21-24],本文侧重于对低轨卫星

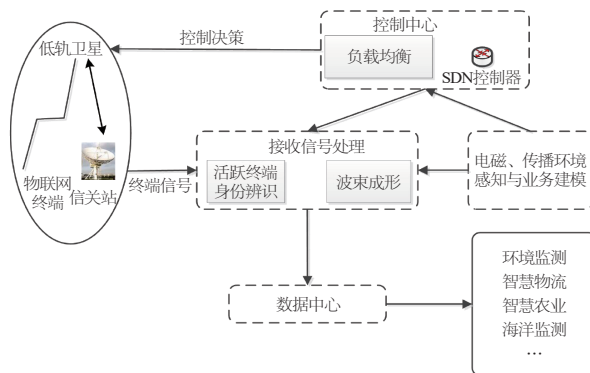


图2 物联网终端接入处理框架

物联网终端随机接入过程的处理,通过挖掘空间域资源来减缓信号碰撞和检测碰撞信号,以提升物联网用户容量。限于篇幅,体系架构中所涉及的网络协议^[21-22]和网络管控平面部署^[23-24]等未展开描述。

3 电磁、传播环境感知和业务建模

由于卫星物联网暂无专用频谱,需与其他通信设备共享频谱。因此,需要感知频谱占用状态,以减缓物联网设备与其他通信设备间的同频干扰。此外,低轨卫星物联网系统中星地传输时延大,星地单程传播时延达到

数十毫秒量级，并且低轨卫星处理能力有限，难以获得完美的瞬时信道状态信息。低轨卫星相对于地面高速运动以及地面终端的随机移动又造成信道状态非常多样和快速变化，使统计信道信息具有准确度低、生存周期短的特征。为此，基于机器学习设计了电磁和传播环境感知及预测理论方法，具体如下。

(1) 电磁环境态势感知

频谱感知过程可以看成二元假设模型^[13]，频谱感知设备接收到的信号可表示为

$$y(t) = \begin{cases} n(t), & H_0 \\ hs(t) + n(t), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $y(t)$ 表示频谱感知设备接收到的信号， $n(t)$ 表示噪声信号， $s(t)$ 代表用频设备的发送信号， h 为频谱感知设备与用频设备间的瞬时信道状态信息。 H_0 和 H_1 分别表示被检测频段未被占用与被占用的事件。

能量感知方法被用于获取频谱占用状态^[14]。然而，不同区域、不同时间、不同频率上用频信号的差异，导致低轨卫星感知的信号底噪动态起伏，动态起伏底噪会严重影响感知性能。为此，结合奈曼-皮尔逊定理^[15]，时域卷积网络被设计用于计算频谱感知信号的检验统计量，以实现频谱占用状态的判决^[13]。在频谱感知的基础上，针对不同空间、频点和时间等维度上的频谱占用状态存在一定的相关性，一种基于卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）与双向长短时记忆（Long Short Term Memory, LSTM）神经网络相结合的方法被提出，用于刻画干扰态势演变规律，所设计的方法不仅可以提前获取频谱占用状态，还可以预测频谱占用程度^[16]。

(2) 传播环境感知

针对难以获得精确的统计或瞬时信道状态信息的问题，深度神经网络被研究用于提取区域化栅格信道长短时信道特征。根据前期研究的卫星物联网空时二维业务模型^[17]，以及路侧固定站提供的信道信息，将低轨卫星波束覆盖区进行区域化栅格划分，对海洋、沙漠、山谷等典型的地理环境进行栅格划分，并结合低轨卫星星历来获得不同栅格区域内长短时统计信道特征。在区域栅格划分的基础上辅以低轨卫星星历和重访性特征，设计一种卷积神经网络和长短时记忆神经网络相结合的短时和长时信道特征提取方法，所设计的框图如图3所示。

此外，相比于地面物联网相对成熟的研究和应用环境，低轨卫星物联网业务特征的研究仍处于起步阶段。为了刻画网络在大时空尺度下种类繁多且时空分布不均的各类业务特征，需研究其业务统计模型。首先探索低轨卫星场景下的物联网业务分布、强度与地理环境、气



图3 信道特征提取框图

候特征、人类行为等因素的内在联系，进而以地理栅格为基础分析全球卫星物联网业务生成趋势。此外，结合对应网络构型及资源分配方式，建立基于随机变参分析的卫星物联网空时二维业务模型，从时间、空间维度描绘和预测低轨卫星物联网业务全球分布情况^[17]。

4 活跃终端身份辨识

低轨卫星物联网具有终端海量、业务短猝发、网络结构时变、星上资源受限、星地传播时延较大等特点，固定分配正交多址接入技术中过多的信令交互将使其十分低效，同时由于正交资源块（时、频、码）有限，导致其难以满足低轨卫星物联网中海量终端的连接需求。目前，学术界提出物联网终端可以基于免协调方式接入（grant-free）^[18]，这显著简化了接入流程。然而，低轨卫星物联网中海量终端以免协调方式接入将造成终端间的碰撞不可避免，使得不仅帧头间会发生碰撞，帧头与数据间亦会发生碰撞，导致终端身份辨识成为需要研究的问题。

利用Hadamard编码器对终端身份序列进行编码，以获得编码后的终端身份序列；并基于所接收的终端身份序列进行相关运算，以辨识活跃终端身份。假设有 M 个终端并发传输，则接收到的信号可以表示为

$$y(l) = \sum_{m=1}^M h_m \times C_{l-\delta_m}^m + n \quad (2)$$

其中， h_m 为第 m 个终端与接收机间的瞬时信道状态信息， $C_{l-\delta_m}^m$ 是第 m 个终端的Hadamard身份序列中的第 $l-\delta_m$ 个符号， $\delta_m \leq l \leq \delta_m + 2^r - 1$ ， δ_m 是第 m 个终端的接入时延值， $\delta_m \geq 0$ ， r 是Hadamard序列的阶数， n 为噪声。利用迭代干扰消除方法进行终端序列检测，可以表示为

$$y(\delta_m : 2^r + \delta_m - 1) = y(\delta_m : 2^r + \delta_m - 1) - \bar{h}_m \times \bar{C}^m \quad (3)$$

其中， $\bar{h}_m$ 表示估计的第 m 个终端所对应的信道状态信息； $\bar{C}^m$ 表示当前检测到的第 m 个终端身份序列，可通过将接收序列与Hadamard矩阵相乘后的峰值位置来确定。然后计算抵消后接收序列能量，并与判决门限比较，以确定

是否继续迭代干扰消除。

5 低轨卫星物联网场景下单星多波束负载均衡

相比于地面物联网基站的覆盖范围,卫星物联网单星覆盖范围大,覆盖范围内终端数量多,传统的单波束卫星通信系统因时频资源受限难以满足海量终端的接入需求。尽管多波束卫星通信系统可通过复用频资源来提升系统终端容量,但低轨卫星广域覆盖区内终端业务种类多样,且不同覆盖范围内终端部署密度差异大,导致卫星波束覆盖范围内节点业务模型在空间和时间维度上呈现不均匀性和时变性。针对这一特征,本节提出一种面向卫星物联网业务空时二维不均的单星多波束负载均衡方法,通过控制波束的指向、赋形等实现空时二维不均的业务在多波束空间域的负载均衡。图4给出了低轨卫星物联网场景下单星多波束覆盖接入场景。

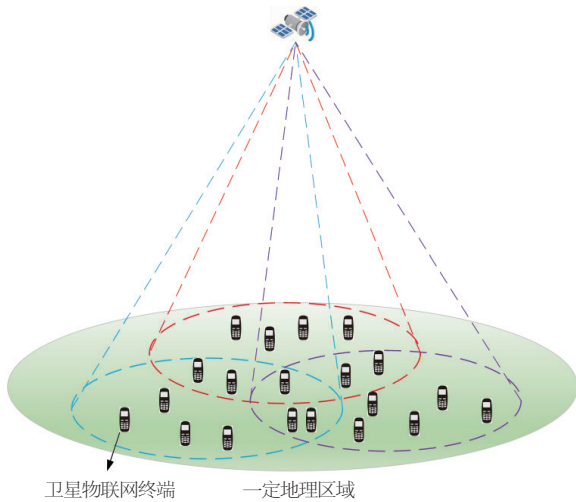


图4 单星多波束覆盖接入场景

在空间维度上,地理环境差异性导致终端分布密度不均,对某一地理区域进行网格划分并进行业务分析,确定网格内终端部署密度。在时间维度上,考虑多样性业务的到达时间差异,建模每个时隙下产生的新业务数量。假设物联网终端总数为 M ,终端在 $t=0$ 到 $t=T$ 间的某一个时间节点被触发,则第 i 个时隙中被触发的终端数目为

$$M_i(i) = M \int_{t_i}^{t_{i+1}} p(t) dt \quad (4)$$

式中, t_i 表示第 i 个随机接入时隙, $p(t)$ 表示Beta分布的概率分布函数, $p(t) = (t^{\alpha-1}(T-t)^{\beta-1}) / (T^{\alpha+\beta-1} \text{Beta}(\alpha, \beta))$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\text{Beta}(\alpha, \beta)$ 表示Beta函数,当 $\alpha=3$, $\beta=4$ 时, $p(t) = (60t^2(T-t)^3) / T^6$ 。

为使业务能够均匀分布在每个波束内,进一步将产生

新业务的终端进行加权k-means分簇处理,具体描述如下

$$\min_{\{T^1, T^2, \dots, T^K\}} \sum_{k=1}^K \sum_{m \in T^k} d(X_m, C_{T^k}) \left(\frac{\sum_{m \in T^k} b_m}{\sum_{k=1}^K \sum_{m \in T^k} b_m} \right) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \bigcup_{k=1}^K T^k = M \quad (5a)$$

$$T^i \cap T^j = \emptyset, \forall i \neq j \quad (5b)$$

$$T^i \neq \emptyset, \forall i \quad (5c)$$

$$C_{T^k} = \frac{1}{\sum_{m \in T^k} b_m} \sum_{m \in T^k} b_m X_m \quad (5d)$$

其中,目标函数最小化每个簇内终端到簇中心的加权距离,添加权重是为了平衡不同波束间的业务量; $d(X_m, C_{T^k})$ 表示终端 m 到簇中心的距离; X_m 表示终端 m 的位置; T^k 表示第 k 个簇内的终端数目; K 表示簇的数量; b_m 表示终端 m 的业务量。约束(5a)保证所有要发送业务的终端都能被覆盖;约束(5b)保证每个终端只被一个波束服务;约束(5c)保证每个波束内都至少有一个终端;在约束(5d)中, C_{T^k} 是第 k 个集群的加权聚类中心位置。通过加权k-means对终端实现分簇,即同簇的终端在同一波束内。为实现对目

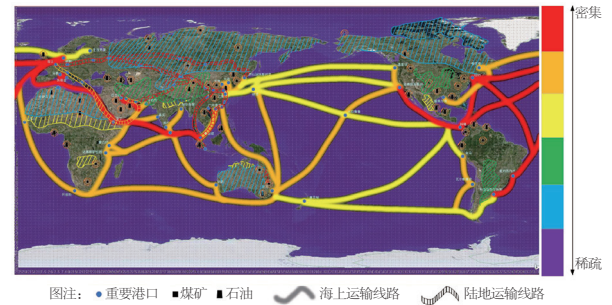


图5 卫星物联网终端部署密度等级

表1 仿真参数

参数	参数值
划分区域	北纬26° ~ 北纬38°、东经100° ~ 东经115°
网格划分精度	纬度间隔2°、经度间隔2.5°
波束个数	4个
总节点数	20 000 ~ 30 000个
节点业务到达模型	服从Beta分布
产生新业务的时间	100个时隙
可用前导码个数	128个
前导码冲突的节点退避方式	均匀退避算法
退避窗口长度	50个时隙
时隙长度	16 ms

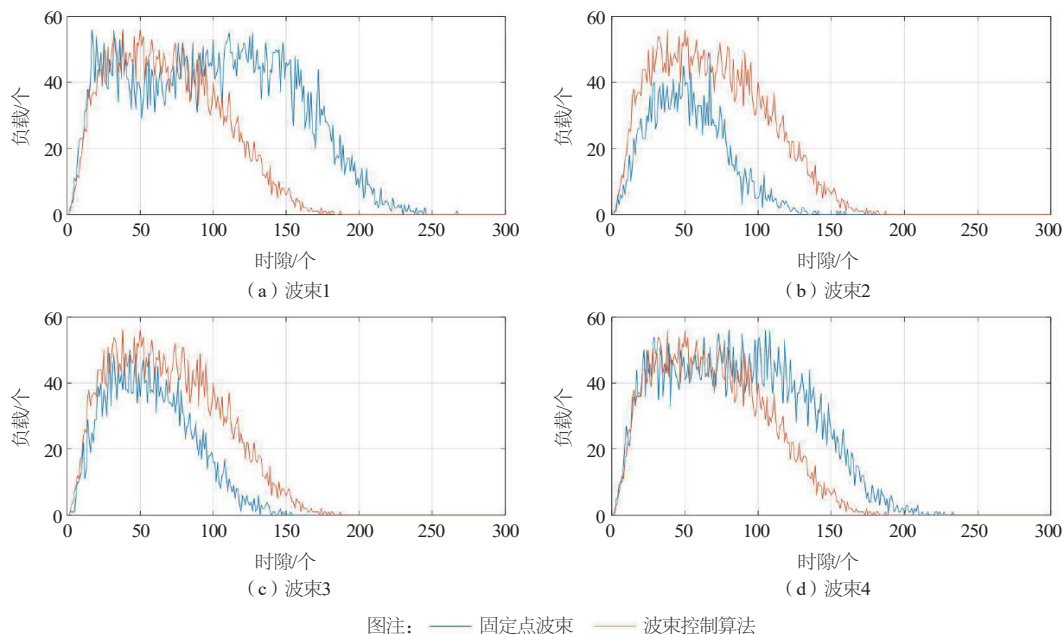


图6 不同波束内的业务量变化曲线

标区域全覆盖，可使用泰森多边形图算法获得每个波束的覆盖边界，从而确定每个波束的指向及宽度。

本文初步评估了本文所提单星多波束负载均衡算法性能，其中传统固定点波束算法作为对比算法，且终端业务类型为事件驱动型突发业务，对地球表面以纬度间隔 2° 、经度间隔 2.5° 为标准进行网格划分，具体的仿真参数见表1。卫星物联网终端的部署密度等级如图5所示，图中将终端部署密度由高到低划分为红、橙、黄、绿、蓝、紫6个等级，等级的高低与世界主要运输交通线的繁忙程度、土地的荒漠化程度以及重要自然资源（煤、石油）的分布密度成正相关。具体仿真时取中国范围内的北纬 $26^\circ \sim 38^\circ$ 、东经 $100^\circ \sim 115^\circ$ 作为代表性区域进行研究，并采用4个卫星波束对该区域实行覆盖。

不同波束内的业务量变化曲线如图6所示。可以看到，由于低轨卫星物联网的空时二维分布不均匀性，传统的固定点波束模式会造成不同波束内的忙闲不均，导致资源利用率低下；而采用本文提出的负载均衡算法，通过控制波束的指向、赋形等实现不同波束内业务的负载均衡，从而能够缓解不同波束内的忙闲不均问题，提高资源利用率。

图7评估了两种算法的平均接入时延随接入规模变化的情况。随着接入规模的增加，虽然两种算法的平均时延均有增加，但所提算法的平均时延增长速度明显低于固定点波束算法，且在高负载情况下，平均时延只有固定点波束算法的1/2左右。

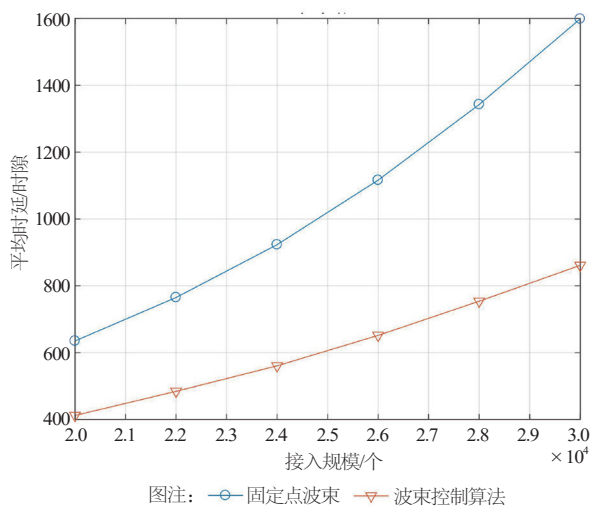


图7 两种算法的平均接入时延随接入规模变化的情况

图8给出了两种算法的平均吞吐量随接入规模的变化曲线。随着接入规模的提升，固定点波束算法的平均吞吐量在略有提升后迅速下降。然而，本文所提算法的平均吞吐量一直处于上升趋势，且在高负载情况下，相比于固定点波束算法，该算法的平均吞吐量最大提升了约65.8%。

6 基于多星稳健波束成形的物联随机接入

多颗低轨卫星可视时物联随机接入场景如图9所示，包括一个地面信关站、 M 个低轨卫星和 N 个地面终

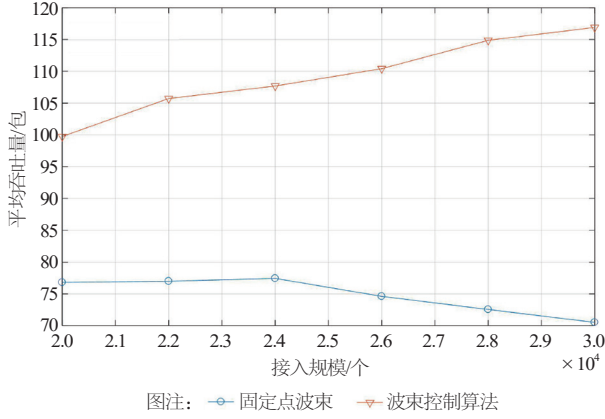


图8 两种算法的平均吞吐量随接入规模的变化曲线

端等，且低轨卫星将所接收到的终端信号透明转发给信关站，由其负责处理。不失一般性，假设物联网负载在一个数据包传输持续时间内服从泊松分布，一个数据包持续时间内到达信关站的数据包相应可被建模为泊松过程。为此，这些数据包可能会在转发窗口中发生重叠，即数据包间发生碰撞。在多星可视场景下同一终端发送的数据包在多个卫星转发窗口中可能处于不同的状态，这种多样性状态可以视作数据包的空间副本。为实现对同一终端数据包的多个空间副本的联合处理，本文提出了一种基于多星协作波束成形的随机接入（Cooperative Beamforming Aloha, CBA）算法。

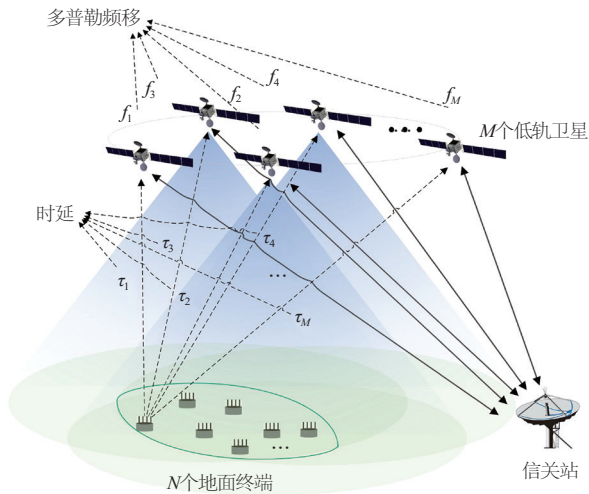


图9 多颗低轨卫星可视时物联随机接入场景

当两个或两个以上的数据包发生碰撞时，将其中能够被检测出前导序列的数据包信号作为主信号，其他数据包信号视作干扰信号。利用主数据包信号中的导频

序列进行信道估计，信关站采用基于稳健线性约束最小方差（Linearly Constrained Minimum Variance, LCMV）准则的波束成形技术来抑制干扰信号功率。根据捕获效应，只要信号的信干噪比大于信号解调的阈值，主信号的数据包就可以被成功接收，进一步利用串行干扰消除（Successive Interference Cancellation, SIC）技术可检测出更多的碰撞数据包，具体步骤如下。

步骤1：数据包状态检测。信关站利用检测出的导频序列完成时频同步和信道估计^[19]，并利用滑动相关技术和前导序列定位数据包副本；然后根据信号的功率差异性对数据包信号进行译码和循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check, CRC）检测，进入步骤2。

步骤2：数据包解碰撞。根据CRC的结果，可将碰撞分为3种情况：所有协作接收机处均未发生碰撞，此时继续处理下一个数据包信号，进入步骤1；在接收方至少有一个接收机处成功接收数据包，此时进行数据包信号的SIC处理，进入步骤4；所有接收机处未能成功接收数据包信号，形成死锁情况，进入步骤3中执行稳健多星协作波束成形。

步骤3：稳健多星协作波束成形。由于环境、设备和卫星长距离传播时延造成的阵列方向向量误差的影响，无法准确估计主信号的波达角，导致主信号协方差矩阵、干扰加噪声协方差矩阵和方向矢量的采样值与实际值失配。在失配严重时，利用传统LCMV准则难以有效抑制干扰信号功率，影响碰撞信号检测性能。为提升当存在波达角估计误差时的传统LCMV算法性能，本文设计了一种最坏情况下的稳健LCMV算法。假设接收到的主信号协方差矩阵采样值为 $\hat{R}_s$ ，干扰加噪声协方差矩阵采样值为 $\hat{R}_{in}$ ，目标信号方向向量采样值为 $\hat{a}_s$ 。采样值和实际值之间的误差表示如下

$$\begin{aligned}\hat{R}_s &= R_s + \sigma_s \\ \hat{R}_{in} &= R_{in} + \sigma_{in} \\ \hat{a}_s &= a_s + \delta\end{aligned}\quad (6)$$

其中， R_s 是采样信号协方差矩阵的实际值， R_{in} 是干扰加噪声协方差矩阵的实际值， a_s 是假设目标信号方向矢量的实际值。 σ_s 、 σ_{in} 和 δ 是未知的误差矩阵，三者最大误差的范围可由F-范数表示。为此，优化问题可被建模如下

$$\begin{aligned}\min \quad & w^H \hat{R} w \\ \text{s.t.} \quad & w^H a_s \geq \zeta \|w\| + 1\end{aligned}\quad (7)$$

其中， w 期望接收终端的接收向量， ζ 迭代步长。利用牛顿方法^[20]，优化后的 w 为

$$w_{opt} = \left(\hat{R} + \frac{\zeta}{\|w_{opt}\|} I \right)^{-1} a_s \quad (8)$$

其中, I 是单位矩阵。如果进行稳健多星协作波束成形后主信号的信干噪比大于设定的阈值, 则该数据包能够被成功解调。

步骤4: 连续干扰消除。如果一个数据包在步骤2或步骤3中被成功解调, 则SIC技术可以用来解决某些接收窗口中的碰撞数据包。重建的数据包可被用于消除其碰撞的空间副本, 从而将与其空间副本碰撞的数据包恢复到无碰撞状态。当这种碰撞被消除后, 就会产生一个新的无碰撞数据包, 从而可以重复执行步骤1。

与传统的ALOHA和时隙ALOHA随机接入方法相比, 本文提出的CBA随机接入方法结合了信关站多星协作波束成形和串行干扰消除对数据包进行迭代, 算法复杂度为 $O(n^3)$ 。

初步评估的吞吐量与负载的关系如图10所示, 其中数据包采用QPSK调制, 长度为100 bit。仿真信道为AWGN信道, 编码率 $r=0.5$ 。数据包泊松到达参数 $\lambda=[0,2]$, 对应于系统归一化负载 G 。不失一般性, 仿真中所有物联网终端的发射功率 P_s 相同, 发射天线都是全向的。系统的最大迭代次数 $N_{\text{iter}}=10$ 。CBA算法和传统CRDSA (Contention Resolution Diversity Slotted, ALOHA) 算法的吞吐量曲线在低负载区呈线性增加, 然后在高负载区迅速下降。吞吐量近似线性增长的原因是: 当归一化负载较低时, 数据包到达的数量较少, 碰撞概率较小, 因此信关站几乎可以完全解调到达的数据包。对于CRDSA算法, 使用两个和三个副本, 最大归一化吞吐量分别达到0.54 bit/symbol和0.70 bit/symbol。其中, CRDSA三副本方案在0.7 bit/symbol负载之后吞吐量性能陡降的原因是: 当负载提升时, 其副本同样发生碰撞, 无法提供额外增益却增加了网络总负载。然而, 对于CBA算法, 分别使用两颗和三颗接收卫星, 最大归一化吞吐量分别达到0.58 bit/symbol和1.02 bit/symbol。总体而言, 在相同

的副本数量下, 与CRDSA算法相比, CBA算法系统吞吐量性能更高, 且保持较高吞吐量的负载范围更大。

参考文献:

- [1] 吴巍, 张更新. 天基物联网技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
WU W, ZHANG G X. Space-based IoT technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2021.
- [2] HARA T. ORBCOMM low earth orbit mobile satellite communication system: us Armed Forces applications[C]//Proceedings of Proceedings of MILCOM '93 - IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 1993: 710-724.
- [3] PACHLER N, DEL P I, CRAWLEY E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [4] CHAUDHRY A U, YANIKOMEROGLU H. Laser intersatellite links in a starlink constellation: a classification and analysis[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(2): 48-56.
- [5] ORDONEZ-LUCENA J, AMEIGEIRAS P, LOPEZ D, et al. Network slicing for 5G with SDN/NFV: concepts, architectures, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 80-87.
- [6] ZHU L P, ZHANG J, XIAO Z Y, et al. Joint tx-rx beamforming and power allocation for 5G millimeter-wave non-orthogonal multiple access networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(7): 5114-5125.
- [7] YOU L, LI K X, WANG J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1851-1865.
- [8] JIA R D, CHEN X M, QI Q, et al. Massive beam-division multiple access for B5G cellular Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(3): 2386-2396.
- [9] DING Z G, ADACHI F, POOR H V. The application of MIMO to non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 537-552.
- [10] DE S M, CIANCA E, ARANITI G, et al. Satellite communications supporting Internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(1): 113-123.
- [11] WANG X D, XI B, SHI X Y, et al. Cooperative beamforming aloha for asynchronous LEO satellite IoT networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.

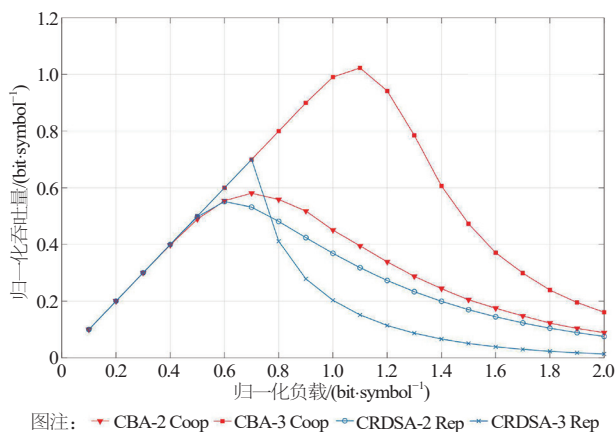


图10 初步评估的吞吐量与负载的关系

- [12] LI P X, HE Y Z, CUI G F, et al. Asynchronous cooperative aloha for multi-receiver satellite communication networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1321-1324.
- [13] NI T, DING X J, WANG Y F, et al. Spectrum sensing via temporal convolutional network[J]. China Communications, 2021, 18(9): 37-47.
- [14] JIA M, LIU X, GU X M, et al. Joint cooperative spectrum sensing and channel selection optimization for satellite communication systems based on cognitive radio[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2017, 35(2): 139-150.
- [15] KAY S. Fundamentals of statistical signal processing, volume II: Detection Theory[M]. Prentice Hall, 1998.
- [16] DING X J, FENG L J, ZOU Y L, et al. Deep learning aided spectrum prediction for satellite communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 16314-16319.
- [17] 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 G X, WANG Y F, DING X J, et al. Research on several key technologies of satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 1-14.
- [18] WANG B C, DAI L L, ZHANG Y, et al. Dynamic compressive sensing-based multi-user detection for uplink grant-free NOMA[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(11): 2320-2323.
- [19] AMOR S B, AFFES S, BELLILI F, et al. Multi-node ML time and frequency synchronization for distributed MIMO-relay beamforming over time-varying flat-fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(4): 2702-2715.
- [20] ZARIFI K, SHAHBAZPANAHI S, GERSHMAN A B, et al. Robust blind multiuser detection based on the worst-case performance optimization of the MMSE receiver[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(1): 295-305.
- [21] LI J, XUE K P, LIU J Q, et al. An ICN/SDN-based network architecture and efficient content retrieval for future satellite-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(1): 188-195.
- [22] CHIEN W C, LAI C F, HOSSAIN M S, et al. Heterogeneous space and terrestrial integrated networks for IoT: architecture and challenges[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 15-21.
- [23] SHI Y P, CAO Y R, LIU J J, et al. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 29-35.
- [24] GUO J M, YANG L, RINCÓN D, et al. SDN controller placement in LEO satellite networks based on dynamic topology[C]// Proceedings of 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1083-1088.

[作者简介]



丁晓进 (1981-), 男, 南京邮电大学物联网学院副教授, 主要研究方向为空间信息网络、卫星物联网、频谱智能认知等。



洪涛 (1982-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 主要研究方向为卫星通信、卫星物联网等。



刘锐 (1998-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星通信。



彭文滔 (1998-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星物联网。



张更新 (1967-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等。