

融合NB-IoT的低轨卫星物联网随机接入研究

刘昊东¹, 郑 重², 王闻今¹, 尤 力¹, 高西奇^{1,3}

(1. 东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京 211189 ;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100094 ;

3. 紫金山实验室, 江苏 南京 211111)

摘 要：窄带物联网技术被广泛应用于海量低速率和低功耗设备的数据通信，但其受制于地面网络的覆盖范围，无法为偏远地区提供服务。低轨卫星星座具有支持全球覆盖的特点，可以补充和扩展地面NB-IoT基础设施，这为天基物联网提供一种有效解决方案。面向天基物联网应用需求，在回顾NB-IoT系统体系架构的基础上，分析融合NB-IoT技术的低轨卫星物联网所面临的信道环境高动态时延和频偏等挑战。针对上行随机接入过程，设计有效的用户检测与定时同步方法，该方法具有高性能、低复杂度等优点，能有效解决融合NB-IoT的低轨卫星物联网中的高效随机接入问题。

关键词：NB-IoT；低轨卫星；随机接入；定时同步

中图分类号：TP393

文献标识码：A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021041

Research on the NB-IoT Random Access in LEO Satellite IoT

LIU Haodong¹, ZHENG Zhong², WANG Wenjin¹, YOU Li¹, GAO Xiqi^{1,3}

1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

3. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

Abstract: Narrowband internet of things (NB-IoT) technology is widely used in data communications for a large number of low-speed and low-power devices, but it is difficult to provide services for remote areas that cannot be covered by terrestrial networks. With its global coverage and low cost, the LEO satellite constellation can supplement and expand the terrestrial NB-IoT infrastructure, providing an effective solution for the space-based internet of things. Facing the application requirements of space-based internet of things, on the basis of reviewing the NB-IoT system architecture, the challenges of channel environment high dynamic delay and frequency offset faced by the application of NB-IoT technology in the LEO satellite constellation scenario were analyzed. For the uplink random access process, an effective user detection and timing synchronization method was designed, which had the advantages of high performance and low complexity, and provided an efficient receiving method for the LEO satellite NB-IoT uplink random access synchronization.

Keywords: NB-IoT, LEO, random access, timing synchronization

1 引言

当前，包括Sigfox、远距离无线电（Long Range Radio, LoRa）和窄带物联网（Narrow Band Internet of Things, NB-IoT）等各种地面广域物联网解决方案和标准正在被积极推广应用。Sigfox具有10~40 km的覆盖范围和每天140条消息的传输能力。LoRa是一种开放的低功

耗、远距离物联网技术，每个LoRa网关可以管理多达数百万个节点。NB-IoT构建于蜂窝网络，它能够以更低的节点成本和更低的功耗实现广域通信^[1]。然而，地面物联网难以部署到偏远地区或地形复杂地区，例如沙漠、海洋、森林等。此时可以利用非地面节点进行辅助通信，以支持全球范围的物联网运营。

收稿日期：2021-09-09；**修回日期：**2021-11-05

基金项目：国家重点研发计划项目（No. 2019YFB1803102）；江苏省前沿引领技术基础研究专项（No. BK20192002）

Foundation Items: National Key R&D Program of China (No. 2019YFB1803102), Jiangsu Province Basic Research Project (No. BK20192002)

相比于地球静止轨道 (Geostationary Orbit, GEO) 卫星, 低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星星座构建的通信系统具有更高的效率、更低的传播损耗和更广的覆盖面积。许多公司 (例如OneWeb、SpaceX和Kepler) 已经开展了低轨卫星的部署^[2], 构建全球覆盖的星链。采用LEO星座与物联网融合可以提供更广的覆盖范围、更广泛的连接和更高的无线通信可靠性, 节省了构建地面网络的成本, 不受地理环境、气候条件的限制, 将促进智慧农业、环境监测、医疗监测^[3]等若干技术广泛应用。

低轨卫星物联网领域目前已有部分解决方案, 例如Orbcomm、ARGOS等系统已经进入该领域并具有成熟的天基物联架构^[4]。Myriota、Kepler等公司设计了一种以CubeSats为基础的卫星物联网, 使用软件定义网络和网络功能虚拟化加以支持, 有良好的时延和吞吐量性能^[2-5]。卫星物联网公司Lacuna Space基于LoRa技术, 提供一种低成本、低速率的全球连接服务, 且允许其他运营商在系统中共存^[2]。相比于上述独立设计和组网的体系架构, 融合地面 NB-IoT技术的卫星物联网拥有完备的网络架构和成熟的运营模式, 在与卫星集成时无须对核心功能进行重大修改, 有助于缩短上市时间, 目前已被3GPP纳入标准协议进行研究。3GPP将在R17中研究NB-IoT支持非地面网络 (Non-Terrestrial Network, NTN) 的可行性^[6-7], 旨在支持全球任何地方的物联网连接。

将NB-IoT技术集成到低轨卫星星座系统中会受信道环境高动态时延和频偏的影响^[8], 给系统物理层与链路层带来了诸多挑战, 需要为协议兼容、频谱分配、时频偏补偿等问题提供有效的解决方案^[9-10], 否则很容易导致通信过程的失败。特别是NB-IoT的上行随机接入 (Random Access, RA) 过程, 当前协议的时频资源和信令交互设计并没有考虑卫星信道极端通信环境的影响, 给用户检测和定时同步带来很大困难, 急需一种有效的随机接入接收策略^[12-13]。

本文拟开展NB-IoT在低轨卫星通信系统应用的可行性研究, 分析系统集成的兼容性架构和面临的挑战, 并给出针对性的解决方案。之后重点围绕大频偏、长时延、广覆盖场景下的多用户上行随机接入问题, 设计合适的用户检测和定时同步方案。

2 NB-IoT与低轨卫星融合

在本节中, 首先对NB-IoT的技术特点、物理层信道和高层协议进行分析。随后说明NB-IoT集成到低轨卫星中的系统架构和兼容性适配, 针对低轨卫星信道特征分析通信过程的主要挑战, 并给出可能的解决方案。

2.1 NB-IoT技术

NB-IoT是大规模低功耗广域 (Low Power Wide Area, LPWA) 技术的一种, 具有低吞吐量、低功耗、偶尔传输和深度覆盖等特点, 预期应用包括公用设施计量、环境监测、资产跟踪等。目前共已覆盖了近100个国家和地区^[14-15]。NB-IoT可通过独立模式、带内模式和保护带模式在授权的频带内部署^[14]。

为了更好地和现有的长期演进 (LTE) 蜂窝通信系统共存, NB-IoT系统采用兼容采样率1.92 MHz, 拥有较窄的工作带宽180 kHz^[16]。NB-IoT下行链路采用正交频分多址 (OFDMA) 技术, 包含12个子载波, 子载波间隔为15 kHz, 帧结构与长期演进技术的配置相同。相比LTE, NB-IoT去掉了物理多播信道 (PMCH), 不提供多媒体广播或组播服务; 而其上行链路传输基于单载波频分多址 (SC-FDMA) 技术, 主要采用单音传输, 支持3.75 kHz和15 kHz两种子载波间隔, 最多分别支持48个和12个子载波^[16]。为了缩小信道带宽并简化流程, 在协议中删除了物理上行链路控制信道 (PUCCH), 需使用随机接入来指示调度请求。

上行随机接入过程是系统初始化的最重要一环, 通过窄带物理随机接入信道 (NPRACH) 在特定子帧中周期性启动。其主要包括以下两个基本功能^[13-17]: 系统初始化时检测活跃用户和到达时间 (Time of Arrival, ToA), 并建立定时同步; 建立独有的终端标识以区分不同用户, 并请求网络分配给终端上行链路资源。由于3GPP规范中NB-IoT系统不支持在无线电资源连接模式下小区选择或重选的功能, 所以随机接入的发生没有LTE中连接状态辅助定位和小区切换的场景。在基于竞争的随机接入过程中, 用户和基站发送4次消息 (Msg1 ~ Msg4) 握手, 具体流程和功能与LTE相同。

NB-IoT高层同样基于LTE协议栈^[8], 分为用户面 (User Plane, UP) 和控制面 (Control Plane, CP), 设计目标为支持低速和不频繁的数据传输。UP管理数据传输, 包括无线链路控制 (Radio Link Control, RLC)、媒体访问控制 (Medium Access Control, MAC) 协议等。CP负责信令传输, 由无线电资源控制 (Radio Resource Control, RRC) 协议定义, 可以通过信令无线承载 (Signalling Radio Bearers, SRB) 技术在控制面传输少量数据。

为了实现更长的待机时间和更高的电池利用效率, NB-IoT设计了省电模式 (Power Saving Mode, PSM) 并随后提出了扩展不连续接收 (extended DRX, eDRX) 低功耗技术^[14]。PSM模式初始为空闲状态, 用户侧的设备单元完全关闭, 下行链路不可访问。只有当用户设备有

消息要发送时,才返回到后续的连接状态。eDRX机制由一组定时器控制,允许用户设备在预先配置的时间段内唤醒而不是连续地监视下行控制信道,避免了不必要的数据传输。

2.2 NB-IoT与低轨卫星融合的系统架构

非地面网络(卫星)将成为5G的一个新的关键特性,3GPP已系统地研究了将5G NR整合到NTN中的方案^[18],在R17中将研究NB-IoT支持NTN的可行性^[6-7]。该研究着眼于处理卫星场景中经历大时延所需的修改,特别是对随机接入同步、混合自动重传请求(Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)操作和RRC连接过程的影响。工业界已开始着手解决NB-IoT与低轨卫星集成带来的问题。Sateliot、OQ和MediaTek等公司正积极推进NB-IoT的标准化进程。欧洲航天局(ESA)也在促进构建基于卫星的NB-IoT网络^[9]。基于标准协议,图1给出了NB-IoT融合低轨卫星的系统架构,主要包含3个部分。

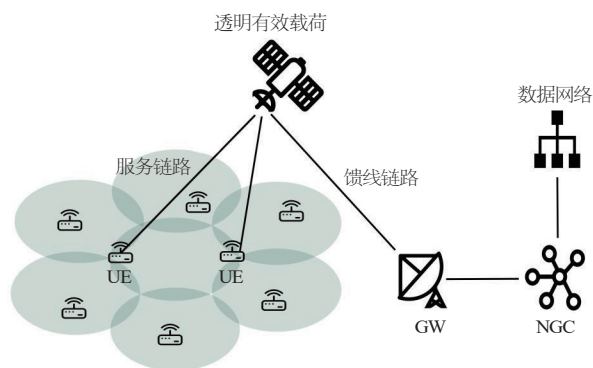


图1 NB-IoT融合低轨卫星的系统架构

(1) 多个NB-IoT用户设备(User Equipment, UE)。用户设备均匀分布在当前小区中,通过服务链路与卫星连接。

(2) 具有弯管结构的卫星转发器,将NB-IoT与具有透明有效载荷的卫星集成,加速商业化;卫星中继节点通过馈线链路与地面网关(GateWay, GW)通信,支持馈线链路到服务链路频带的频率切换,不考虑卫星间的链接。

(3) 下一代地面核心(Next Generation Core, NGC)和数据网络。演进分组核心(Evolved Packet Core, EPC)从R13开始支持NB-IoT,从R16开始,将由NGC支持NB-IoT,预计将使用NGC来支持未来部署。

在图1所示的系统架构中,若直接将当前NB-IoT协议部署到低轨卫星中会带来诸多的兼容性问题,需要两

者对当前架构进行适配。

系统运行时,可以将NB-IoT设备配备全球导航卫星系统(GNSS)。结合使用GNSS位置信息与卫星星历数据,以支持系统移动性、时频偏的补偿。卫星星历信息可以存储在设备的全球用户识别模块(Universal Subscriber Identity Module, USIM)中,并由卫星广播信息进行更详细的补充^[8];地面终端也需要实现卫星侦听的功能。然而,GNSS额外的数据处理会缩短设备的电池寿命,实际系统中需要进行持续性和实用性的权衡。例如只为某小区特殊位置(中心点和边界点)的用户配备GNSS模块,GNSS和NB-IoT的操作不同时进行。

低轨卫星NB-IoT系统同样要设计为支持在功率受限的条件下运行,而星地通信显著增加的链路损耗会对上行链路预算余量造成极大影响。为了尽量实现低功耗,第一种方案可以通过带宽变化来提高发射功率谱密度,例如将传输带宽降低到15 kHz来提高上行的信噪比。此外,如果要有有效地支持180 kHz上行传输,设备可以配备高效定向天线,提供更显著的增益。卫星物联网连接所需的总功率必须大于传感器所需的阈值功率、路径上的功率损耗、噪声容限和系统余量之和。

系统的容量与能够接入网络并对服务满意的用户设备数量有关。在上行链路中发送NP-RACH资源的频率越高,可以访问网络的设备数目就越多。然而,卫星过顶通信期间地面站性能指数(G/T)不足会导致在频域中可以使用的资源变少,降低NP-RACH的发送频率,无线电帧会被其他用户长时间的窄带上行共享信道(NP-USCH)占用,大大限制可以接入的设备数量。为了改善这一问题,同样可以在地面设备中配备定向天线,提供更高的增益,并在卫星端使用相控阵天线,通过对空间域信号的处理实现对更多用户的接入支持。

2.3 NB-IoT集成低轨卫星的挑战与解决方案

在图1所示的场景中,选取两个在小区边缘与卫星通信的用户,针对卫星信道长时延、大频偏、高移动性3个方面问题,分析低轨卫星信道特征和对系统集成的挑战,并给出可能的解决方案。

(1) 长通信时延

星地通信的时延远大于地面系统,且不同仰角对应的时延变化很大,卫星过顶期间的时延在2~5 ms,如图2所示。现有的一些研究工作显示,长时延特别对通信过程中的定时同步、随机接入和HARQ产生很大的影响^[19]。在NB-IoT应用于GEO卫星的系统中,长时延场景下上行随机接入过程和数据传输过程有很高的失败率^[20]。

NB-IoT在R15中已经支持时分双工(Time Division

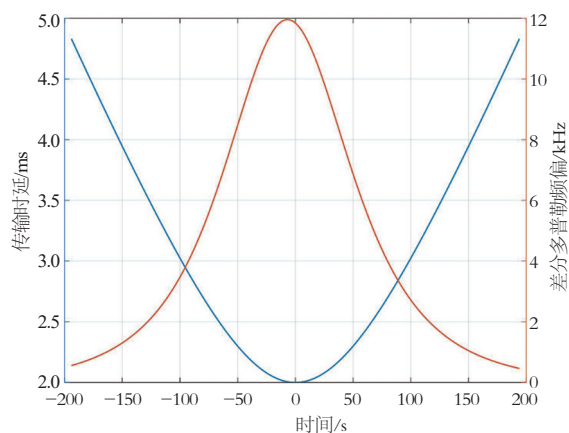


图2 通信时延和差分多普勒频偏变化

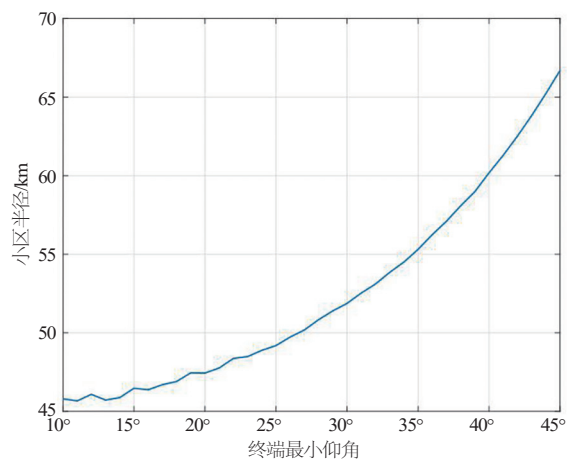


图3 小区半径与仰角的关系

Duplex, TDD), 但TDD需要一定的保护时间, 在长通信时延的场景下会导致效率低下。在低轨卫星场景下, 频分双工 (Frequency Division Duplex, FDD) 的模式是一种更好的选择, 可以最大限度地利用资源。

为了完成NB-IoT集成低轨卫星系统的初始化工作, 首先在已知的固定子帧 (SF) 上发送负责下行链路同步的NPSS/NSSS 信号, 用户的NPRACH将在系统信息块 (System Information Block, SIB) 中得到固定的子帧索引并发起随机接入过程。下行链路的子帧时移加上在上行链路中信号的传播时延将导致用户和基站之间时频资源的不匹配。基站会根据NPRACH配置的索引处理错误的子帧序号, 这将导致基站持续停留在等待Msg1的状态。

当用户设备发起RA过程时, 它会为前导分配一个特定的随机接入网络临时标识符 (Random Access-Radio Network Temporary Identifier, RA-RNTI), 用于生成前导传输的时频资源^[16]。在随后的通信过程中, 另一个问题是, 由于用户和基站之间时频资源的SF索引

偏移, Msg1传输的RA-RNTI将不同于Msg2接收的RA-RNTI, 用户将丢弃接收Msg2中基站返回的随机接入响应 (Random Access Response, RAR) 消息, 并认为它属于另一个用户。这样, RAR窗口的大小总是过期, 导致系统停留在Msg1与Msg2两个过程间循环, 所以应该设计精确的时偏补偿方案, 确保上行定时同步成功。

为了基于当前架构进行上行定时同步, 可以结合卫星星历数据并使用GNSS预先估计某用户服务链路的传播时延, 避免对当前的NPRACH 设计进行更改。若要成功完成同步, 用户之间的往返时延 (Round Trip Delay, RTD) 差异不能超过循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 长度^[13]。因此, LEO NB-IoT场景下应该尽量选择循环前缀长度更长的前导码进行随机接入传输, 并单独考虑一个小区内的用户随机接入情况。利用位置信息, 在随机接入之前对当前小区中心用户的RTD进行估计和预补偿, 接收机只需要处理较小的残余定时误差, 即一个小区内用户间的差分通信时延。

在图1小区边界的两个用户具有最大差分时延, 为了保证其小于RTD, 在当前用户允许的最小仰角的条件下, 限制最大差分时延在循环前缀边界范围内的小区半径大小, 从而达到定时同步的要求。仰角与小区半径的关系如图3所示, 卫星高度设为600 km。在此设置下, 系统经历的最大时间偏移为CP长度, 之后利用上行随机接入Msg1中的前导码来估计到达时间, 从而实现定时同步。

同时, 此系统中RAR窗口应该足够大, 并在补偿时偏后延时启动, 以便允许在基站成功处理前导码信息并发送响应。若解决了Msg1和Msg2传输的问题, 进一步, 可以利用随机接入响应消息中发送的定时提前量 (Timing Advance, TA) 信息来支持双向定时, 校正GNSS的测量。当用户在Msg3发送RRC连接请求后, 它将通过Msg4解决可能的随机接入竞争。显然, RTD越高, 随机接入的同步过程就进行的越慢, 总体系统的吞吐量下降是不可避免的。

NB-IoT最多支持两个混合自动重传请求 (HARQ) 进程, 初始传输和接收确认之间的最短时间由RTD确定, 在卫星场景中, 这样的交互会使系统等待的时间过长并持续消耗能量。一种解决方案是允许禁用MAC层的HARQ, 减少用户和基站之间的消息交换, 让RLC层的ARQ管理失败传输的重传^[8]。RLC层支持在需要发送反馈应答之前就传输多个数据块, 因此可以带来比HARQ更高的数据传输速率。为了保持与HARQ过程相同的链路可靠性, 应该根据SNR适当动态调整误块率 (Block Error Rate, BLER) 和重复次数的目标。

NB-IoT多数通信过程由MAC、RRC层中定义的各种定时器控制, 通过连续信令交互访问信息。在低轨卫

星NB-IoT长时延的场景中,为了进一步扩展覆盖范围,定时器的设计标准应适当宽松,或者延时启动并重新设计开始时间。例如MAC争用解决计时器、调度请求禁止计时器、RLC重排序定时器和DRX启动计时器等,以支持需要较长传输时间间隔(Transmission Time Interval, TTI)的操作。

(2) 多普勒频偏大

与地面系统相比,LEO卫星的高速运动会造成NB-IoT信号显著的多普勒频偏,实际系统中的频偏会达到 ± 40 kHz。一些学术文献已经研究了相关的问题。参考文献[19]对5G NTN中NB-IoT场景的转变,综述性地分析了多普勒频偏对通信的影响。参考文献[21]提出了一种基于卫星NB-IoT系统的资源分配技术,显著降低了LEO卫星所经历的差分多普勒频偏。在参考文献[22]中,作者分析了大多普勒频偏对NB-IoT系统的影响,并给出一种频偏补偿方案。

对于多用户接入过程,虽然每个用户设备经历的多普勒频偏不同,但其主要部分是一个小区内的经验常数。实际影响系统性能的是特定小区范围内用户之间的差分多普勒频偏。卫星接收机看到的频偏是用户间差分多普勒频偏和载波频偏之和,后者取决于下行频率同步误差、频率跟踪误差和振荡器稳定性。采用图3中 30° 仰角的小区半径和600 km卫星高度的设置,卫星过顶期间的差分多普勒频偏仿真结果如图2右侧所示。此时最大频偏在12 kHz左右,而NB-IoT随机接入前导码的子载波间隔仅为3.75 kHz,很容易受到频偏的影响,子载波间的正交性会受到破坏,引起严重的用户(子载波)间干扰。存在大频偏的情况下,随机接入前导码的检测性能急剧下降,并且频偏以类似于定时偏移的方式对接收复信号的相位旋转产生影响,导致ToA的估计精度降低。

利用GNSS模块和卫星星历提供的位置信息,可以简单地支持公共多普勒频偏和多普勒频偏变化率的预测和补偿。为了保持NB-IoT终端简易性的结构,应尽量避免在用户端进行过于复杂的信令交互。频偏变化率在卫星过顶的短时间内接近线性变化,可以使用数学算法来粗略估计频偏,根据TTI更新频率补偿。此外,不同的频率偏移也可以组合在一起形成更准确的频偏估计,例如使用卡尔曼滤波器等最优估计方法。经过小区公共多普勒频偏的补偿后,用户间的差分频偏可以进一步在下行链路的网关中预补偿或在上行链路中通过初始下行同步信息进行后补偿^[22-23]。为了满足NB-IoT系统低速零星数据传输和功率节约的特点,补偿可以仅在 N 个传输单元块内进行,要保证此时预补偿在 N 个时间单位的块内没有变化。进一步,需要解决进行新的预补偿时子帧边界的

不连续性,具有不同TA块之间的信号重叠,时偏速率造成的相干时间限制等问题。在现有工作的基础上,将当前场景的最大残余载波频偏(Residual Carrier Frequency Offset, RCFO)设置为600 Hz。

由于更高频段不同用户和小区之间的频偏和干扰更明显,链路损耗更大,需要方向性更好的天线支持,所以NB-IoT更适合以独立模式部署在较低的频段。参考文献[8]提出使用频率复用的方案来降低干扰,同时多次使用相同的频谱。但因为高频段下卫星天线相对较小,频率复用通常使用在Ka频段,此场景下并不适用。

(3) 高小区移动性

在LEO NB-IoT场景中,由于卫星的高速运动,用户很容易失去时间同步,直接影响用户的接入数目。为了补偿卫星高移动性,设备可以基于卫星星历信息自主重复RA过程以获得TA值更新。但频繁的通信会产生大量的控制消息,以维持连接和跟踪终端的位置信息,直接影响了系统的整体吞吐量。为控制该场景下随机接入的信息拥塞,可以迫使RA过程尽快传输上行数据,从而避免基站和用户之间的额外消息交换。NB-IoT R15已经在随机接入过程的Msg3中引入早期数据传输(Early Data Transmission, EDT)技术,这有助于改善高小区移动性问题。

卫星波束覆盖跟踪的区域越广,跟踪区域更新(Tracking Area Update, TAU)越不频繁,但寻呼信令负载可能很高(与跟踪区域中的设备数量相关)。LEO卫星支持固定性小区(波束)和移动性小区(波束)。在前一种情况下小区的位置不变,小区内所有用户只有一定的卫星通信时长,卫星可以通过波束成形技术来增加覆盖时间。而移动性小区中用户的位置动态变化,不断有新用户进出小区。由于NB-IoT不支持RRC连接模式下的小区重选,在小区移动的情况下频繁的小区切换将迫使设备在RRC空闲和RRC连接状态之间来回变化。为了避免这种信令冗余并保持地面系统的简易性,应优先考虑固定小区的架构,减少卫星高速运动频繁触发的TAU。在进入下一个计划的跟踪区域时,需要基站广播更新后的跟踪区域码(Tracking Area Code, TAC),如果进入了新的跟踪区域,将触发用户的移动性更新进程。

在RCC空闲时间的小区选择过程中,小区高移动性会导致用户处参考信号接收功率(Reference Signal Received Power, RSRP)的测量分辨率较低。不同小区之间的功率估计相近,可能难以确定要驻留的最佳小区。一种可能的解决方法是让用户提供一些辅助信息,例如区域服务的时间、目标小区的TA值和仰角来辅助小区选择^[10],并同时让卫星提供星历辅助信息(不连续的服务始末时间),该信息可通过系统信息块广播。此外,后

续NPRACH的配置依赖于接收信号功率的质量，为此可在下行控制信息（Downlink Control Information, DCI）中包括一些新的字段，包含有关卫星有效载荷和轨道高度等信息，帮助用户配置NPRACH中合适的重传次数和RAR窗口大小。

在地面NB-IoT系统中，核心网和用户之间使用DRX和PSM技术来节省能量。在低轨卫星NB-IoT场景中，因卫星位置的快速变化，用户可能较长时间不在覆盖范围内。为适配这种场景，用户可以在覆盖范围之外使用PSM模式，然后在卫星覆盖范围内改变为DRX模式^[1]。

3 上行随机接入用户检测与定时同步

NB-IoT上行随机接入过程受低轨卫星信道环境的影响很大，给用户检测和定时同步带来很大困难，而这些都是整个系统能够成功运行的关键。本节将针对低轨卫星NB-IoT多用户大频偏、长时延场景下的上行随机接入过程，给出一种有效的用户检测与定时同步方案。

在随机接入过程Msg1中，前导码作为上行同步信号发送。为了减少前导码信号中循环前缀（CP）相对于信号的开销，NB-IoT将OFDM符号重复5次，然后添加一个循环前缀，将复合后的信号称为符号组。为支持更大的小区范围，在低轨卫星场景下使用NB-IoT的CP格式1（具有266.7 μ s的较大长度）。随机接入前导码在时域上由4个符号组构成基本单元^[16]。为了覆盖不同范围的终端，可以根据目标信噪比（SNR）和最大耦合损耗（Maximum Coupling Loss, MCL）进行不同次数的重复传输。

与LTE不同，当前的NB-IoT NPRACH使用了一种新的单音跳频前导码。每个用户在发送前导码时占用一个子载波，其中不同符号组产生不同的跳频模式，从而

占用不同索引的子载波。如图4所示，相同的色块属于同一用户的前导码。前导码基本单元内部使用固定大小的跳频（3.75 kHz和22.5 kHz），前导码之间使用伪随机跳频^[16]。基于跳频的前导设计允许不同用户在时间和频率上相互正交，无须设置保护间隔。

发射端执行DFTS-OFDM调制然后进行上采样以获得时域信号。根据NB-IoT技术规范，发射的初始信号值为1，而不是ZC序列。这样的设计可以让前导码的峰均比功率（Peak to Average Power Ratio, PAPR）几乎为零，减轻功率放大器的回退现象，利于NB-IoT终端扩展覆盖范围并延长电池寿命。

加入CP后，信号通过卫星信道传输，受大时延、多普勒频偏和用户干扰的影响和链路损耗的衰减，在接收端得到多用户混合的信号。由于基站知道用户占用哪个特定的子载波以及在哪个时隙分配资源，所以可将信号转换到频域来近似提取当前用户。接收端去除CP，并对每个符号组的每个OFDM信号进行DFT变换，在相同的符号组中合并信号得到当前用户的频域接收信号。

3.1 活跃用户检测

本小节进行活跃用户检测方案的设计，大频偏场景下多用户的前导码检测存在较严重的干扰问题，跳频图案不是严格相互正交的。3GPP尚未为NTN中的NB-IoT定义性能指标，本文采用与地面系统相同的指标。检测的性能用达到99%前导码检测率的最小信噪比来衡量^[24]。对于每一个可能的信号，NB-IoT系统要求虚警率 $P_{FA} \leq 0.1\%$ ，检测率 $P_D \geq 99\%$ （即漏检率低于1%）。

在设置频偏范围内（ ± 600 Hz），当前用户能量远大于其余用户能量。所以，可以将叠加的NPRACH用户检测问题近似解耦为并行的单用户检测问题。计算频域接收信号的能量，测试统计量可以用所有符号组的平均功率表示；检测时用平均功率与预先设定的阈值进行比较，如果平均功率大于阈值则说明当前存在活跃用户。

对于阈值的设定，在只有噪声和干扰的情况下，多次仿真接收前导并计算平均功率的累积分布函数（Cumulative Distribution Function, CDF）；之后通过观测值99.9%的概率（对应于虚警率0.1%）的度量标准来确定阈值，满足对虚警率的要求。本文将仿真环境设置为12个用户的干扰和0 dB信噪比的噪声以获得严格的阈值。

3.2 上行定时同步

时偏、频偏和用户间干扰对系统定时同步精度的影响很大，传统基于相位差的时偏估计算法难以满足当前场景的定时要求。实际中时偏、频偏和信道均未知，需

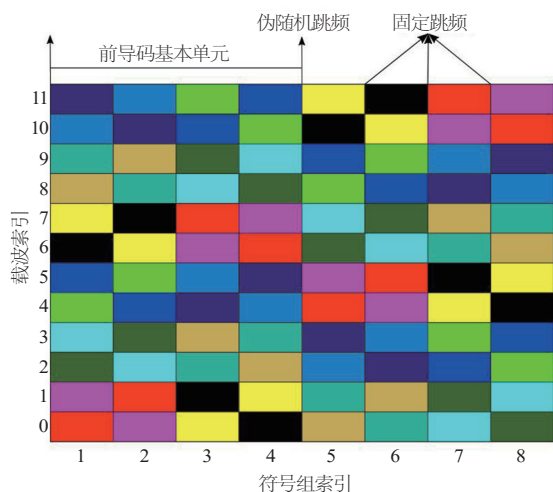


图4 12个用户的NPRACH时频资源分配

要进行联合估计。由于卫星无法获知信道系数的先验概率，基于最大似然准则，将信道估计值设为基于时偏和频偏的表达式。通过这种方式，定时同步问题转化为时偏和频偏的联合优化问题，优化目标即为最大对数似然比。

对于频偏，由于多普勒频偏在时间上是幅值连续且有限的，可以认为频偏是在一定区间 $[\epsilon_1, \epsilon_2]$ 中均匀分布的随机变量。利用NB-IoT前导码的特殊结构，设计一种基于相位差分（Phase-Difference, PD）的算法来粗略估计每个被检测用户的频偏参数。对于接收的频域信号，将具有相同子载波频率的符号进行前后共轭复乘，此结果中的相位只包含频偏的影响；再使用相位轨迹解绕操作来获取差分符号的近似相位差并进行平均化处理，从而得到频偏的估计值和当前频偏的近似范围 $[\epsilon_1, \epsilon_2]$ 。

对于时偏，通过概率推导，可以将对时偏的联合优化问题近似为对频偏求积分后再估计时偏的问题。频偏估计的范围 $[\epsilon_1, \epsilon_2]$ 越小，则近似程度越高，时偏估计越精确。将此积分表达式频偏部分写为矩阵的形式，对其进行特征值分解，分解后的特征向量元素符合离散长球面序列（Discrete Prolate Spheroidal Sequences, DPSS）的形式^[25]。对应的特征值具有如下重要性质：前面少数特征值接近1，其余大部分特征值接近0^[26]，因此在计算时可以舍弃接近于0的特征值来大幅减小计算复杂度。

最后，对分解后优化问题产生的等效同步序列执行

FFT，找到结果平方幅度值的峰值及所对应的频点，进而得到对应的时偏估计。另外，可以通过对目标函数的二次插值来提高估计精度^[27]，实现精确的定时同步。用户检测与定时同步方案流程如图5所示。

为了评估该方案定时同步的可行性，下面仿真了不同数目用户同时接入情况下的到达时间估计误差。同时接入的活跃用户数设置为3个和12个，前导码重复次数为4次，SNR设置为1 dB。其他仿真参数见表1。ToA估计误差的CDF如图6所示。

仿真结果表明，随着用户的增多，定时误差会有增大，良好的算法性能可以保证更多的用户完成定时同

表1 仿真参数

参数	值
最大差分往返时延	266.7 μ s
TOA仿真范围	[0, 266.7] μ s均匀分布
RCFO仿真范围	[-600, 600] Hz均匀分布
工作频率	3.5 GHz
发射机天线增益	15 dBi
接收机品质因数	1.1 dB/K
大气损耗	0.07 dB
阴影损耗	3 dB
信道	AWGN

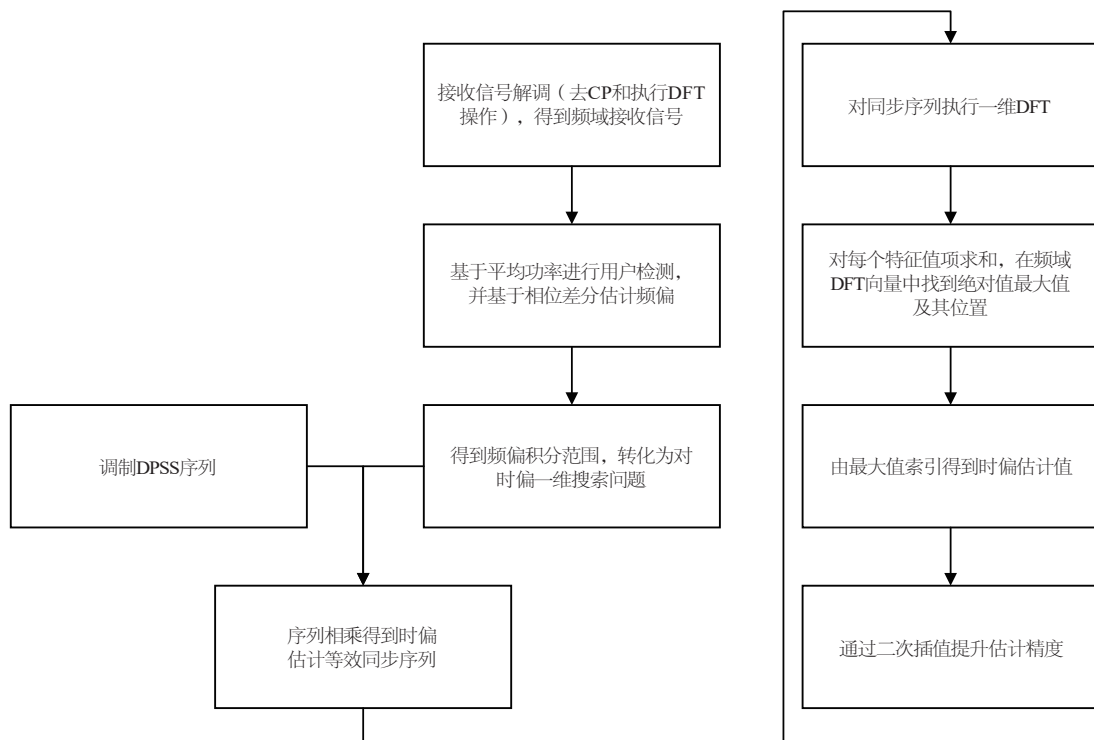


图5 用户检测与定时同步方案流程

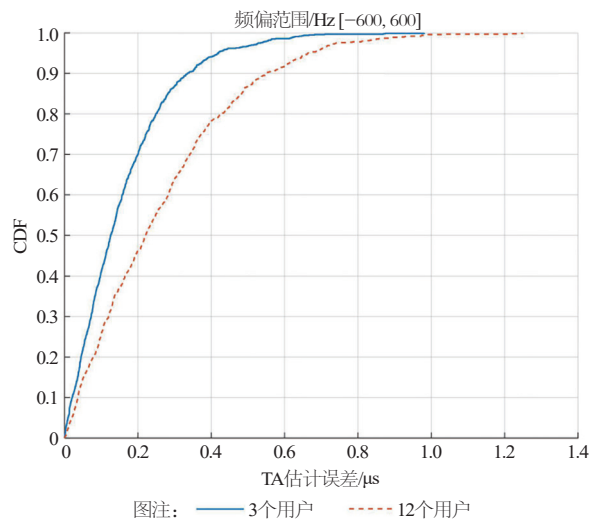


图6 ToA估计误差的CDF

步。在当前仿真设置下,定时误差在 $1.2\ \mu\text{s}$ 内有很高的置信度,满足NB-IoT对误差范围的要求,对低轨卫星大频偏场景表现出很强的稳健性,具有可行性。实际系统中可以增大前导码的重复传输次数以获得更好的性能。

4 结束语

未来工作可以进一步研究在卫星端使用相控阵天线的场景,通过空间域信号的处理实现对更多用户的接入支持。

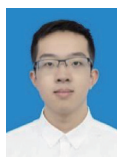
参考文献：

- [1] MEKKI K, BAJIC E, CHAXEL F, et al. Overview of cellular LPWAN technologies for IoT deployment: sigfox, LoRa WAN, and NB-IoT[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2018: 197-202.
- [2] CENTENARO M, COSTA C E, GRANELLI F, et al. A survey on technologies, standards and open challenges in satellite IoT[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(3): 1693-1720.
- [3] CHIPPALKATTI V S. Review of satellite based internet of things and applications[J]. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT), 2021, 12(12): 758-766.
- [4] 张更新, 丁晓进, 曲至诚. 天地一体化物联网体系架构及干扰分析研究[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 22-33.
ZHANG G X, DING X J, QU Z C. Research on space-based integrated internet of things architecture and interference analysis[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 22-33.
- [5] AKYILDIZ I F, KAK A. The internet of space things/CubeSats: a ubiquitous cyber-physical system for the connected world[J]. Computer Networks, 2019, 150: 134-149.
- [6] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020 1(2): 2-10.
XU H, MIAO D S, KANG S L, et al. Network architecture and key technologies for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 2-10.
- [7] 3GPP. New study WID on NB-IoT/eTMC support for NTN: RP-202689[S]. 2020.
- [8] 3GPP. Study on narrow-band internet of things(NB-IoT) /enhanced machine type communication(eMTC) support for non-terrestrial networks(NTN): TR36.763[S]. 2021.
- [9] LIBERG O, LÖWENMARK S E, EULER S, et al. Narrowband internet of things for non-terrestrial networks[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2020, 4(4): 49-55.
- [10] QU Z C, ZHANG G X, CAO H T, et al. LEO satellite constellation for internet of things[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18391-18401.
- [11] KHAN T A, LIN X Q, LÖWENMARK S E, et al. Internet of things from space: transforming LTE machine type communications for non-terrestrial networks[EB]. 2021.
- [12] BRANDBORG S R, KROGH M H, KOCH P. 5G NB-IoT via low density LEO Constellations[EB]. 2021.
- [13] MANNONI V, BERG V, CAZALENS S, et al. NB-IoT for satellite communications: physical layer analysis and performance[C]//Proceedings of 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1595-1600.
- [14] KODHELI O, MATURO N, CHATZINOTAS S, et al. On the random access procedure of NB-IoT non-terrestrial networks[C]//Proceedings of 2020 10th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 16th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [15] WANG Y P E, LIN X Q, ADHIKARY A, et al. A primer on 3GPP narrowband Internet of Things[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(3): 117-123.
- [16] CHEN J M, HU K, WANG Q, et al. Narrowband internet of things: implementations and applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(6): 2309-2314.
- [17] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation: TS 36.211[S]. 2021.
- [18] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and

- evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN): TS 36.300[S]. 2021.
- [19] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TS 38.211[S]. 2019.
- [20] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CONTI M, et al. Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2624-2639.
- [21] BARBAU R, DESLANDES V, JAKLLARI G, et al. NB-IoT over GEO satellite: performance analysis[C]//Proceedings of 2020 10th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 16th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [22] KODHELI O, ANDRENACCI S, MATURO N, et al. Resource allocation approach for differential Doppler reduction in NB-IoT over LEO satellite[C]//Proceedings of 2018 9th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 15th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2018.
- [23] CONTI M, ANDRENACCI S, MATURO N, et al. Doppler impact analysis for NB-IoT and satellite systems integration[C]//Proceedings of ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [24] Huawei HiSilicon. Discussion on doppler compensation, timing advance and RACH for NTN: R1-1908049[S]. 2019.
- [25] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); base station (BS) radio transmission and reception: TS 36.104[S]. 2017.
- [26] WANG W J, TONG Y S, LI L X, et al. Near optimal timing and frequency offset estimation for 5G integrated LEO satellite communication system[J]. IEEE Access, 2019, 7: 113298-113310.
- [27] SLEPIAN D. Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis, and uncertainty—V: the discrete case[J]. The Bell System Technical Journal, 1978, 57(5): 1371-1430.

- [28] ABE M, SMITH J O. Design criteria for simple sinusoidal parameter estimation based on quadratic interpolation of FFT magnitude peaks[C]//Proceedings of the 117th Audio Engineering Society Conventions and Conferences (AES'04). [S.L.: s.n.], 2004.

[作者简介]



刘昊东（1999—），男，东南大学信息科学与工程学院硕士生，主要研究方向为物联网与非地面网络融合通信。



郑重（1990—），男，博士，现就职于中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部，主要研究方向为卫星抗干扰通信、卫星与5G融合等。



王闻今（1980—），男，博士，东南大学移动通信国家重点实验室教授，主要研究方向包括未来移动通信和宽带低轨卫星通信系统关键技术与算法设计，基于无线大数据与机器学习的无线通信理论与技术，移动通信试验平台研发与关键算法实验验证。



尤力（1987—），男，博士，东南大学移动通信国家重点实验室副研究员，当前研究方向为大规模MIMO无线通信、空天地海一体化无线通信以及智能通信等。



高西奇（1967—），男，东南大学教授，博士生导师，长江学者特聘教授，东南大学信息科学与工程学院副院长，移动通信国家重点实验室副主任，主要研究方向为宽带无线通信、大规模无线通信、无线通信信号处理等。