

卫星物联网系统的新型多址接入技术

白伟¹, 张钰婕¹, 康绍莉^{1,2}, 缪德山^{1,2}, 孙韶辉^{1,2}, 陈山枝²

(1. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100083;
2. 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 面向传播时延大、需要服务更大规模用户数的卫星物联网场景, 首先分析 IoT NTN 在技术方案方面的不足, 进而提出非协调的随机接入和非正交多址传输 (Uncoordinated Random Access and NOMA Transmission, URAT) 新型多址接入解决方案。非协调指终端从随机接入到多址传输的过程中不需要专门的网络协调信令; 非正交多址传输指所有终端在接入和传输过程中共享基站的时频资源实现非正交多址传输; URAT 还实现了多址接入和 NOMA 传输的融合。理论分析和数值仿真结果表明, 所提方案能够降低多址接入时延, 提高系统效率, 增加可以服务的终端数量, 将是面向 6G 卫星物联网场景的潜在解决方案。

关键词: 卫星物联网; IoT NTN; 多址接入; URAT

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023028

New Multiple Access Technologies for Satellite Internet of Things System

BAI Wei¹, ZHANG Yujie¹, KANG Shaoli^{1,2}, MIAO Deshan^{1,2}, SUN Shaohui^{1,2}, CHEN Shanzhi²

1. CICT Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communication, China Information and Communication Technologies Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

Abstract: For satellite internet of things (IoT) scenarios with high propagation delay and the need to serve a larger number of users, firstly the shortcomings of IoT NTN in terms of technical solutions were analyzed, and then a new type of multi access solution called uncoordinated random access and NOMA transmission (URAT) was proposed. “Uncoordinated” refers to the process where a terminal does not require specialized network coordination signaling; “NOMA transmission” refers to the sharing of base station time-frequency resources by all terminals; URAT also achieves the integration of multiple access and NOMA transmission. Theoretical analysis and numerical simulation results indicated that the proposed scheme could reduce multi access latency, improve system efficiency, and increase the number of devices that could be served. It will be a potential solution for the 6G satellite IoT scenarios.

Keywords: satellite IoT, IoT NTN, multiple access, URAT

0 引言

3GPP 自 R14 阶段开始进行基于 5G 新空中接口 (New Radio, NR) 的非地面网络 (Non-Terrestrial Network, NTN) 的研究, 输出了一系列的成果, 包括梳理典型用例并形成报告 TR 38.822^[1], 探讨技术方案并形成报告 TR 38.811^[2] 和 TR 38.821^[3]。随后开启标准制定工作并于 2022 年 6 月

R17 阶段形成第 1 版透明转发卫星通信标准^[4-10], 支持宽带互联网业务和窄带物联网业务。IoT NTN 代表卫星物联网系统, 其在技术方案上最大化复用 NR 的卫星互联网系统 (简称 “NR NTN”), 涉及的关键技术方案包括链路预算、时频同步、定时关系、用户面协议增强、控制面协议增强等, 能够达到的系统性能优化^[11]有: 克服卫星通信远距离传输路径损耗较大、链路预算较差的问题, 600 km

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2020YFB1807900)

Foundation Item: National Key Research & Development Program of China (No. 2020YFB1807900)

高度低轨卫星在 45°倾角情况下连接密度可以达到每平方米约 0.0114 个 IoT NTN 终端设备；很大程度地减小了由于传输时延大造成的吞吐量或系统效率的损失。

针对 6G，国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）已经完成了未来技术趋势报告^[12]和框架报告^[13]，其中空天地一体化已经成为业界共识，预期为 6G 带来全域覆盖的泛在连接。以移动物联网应用为例，相对于 5G 支持的接入用户数目，6G 将会有十到百倍的提升。面向传播时延大、需要服务更大规模用户数的卫星物联网场景，现有的 IoT NTN 技术难以满足场景需求，由此需要进行方案的优化^[14-24]。本文提出非协调的随机接入和非正交多址传输（Uncoordinated Random Access and NOMA Transmission, URAT）新型多址接入解决方案，简化 IoT NTN 的多址接入流程，从而降低多址接入时延、增加可以服务的终端数量，预计可满足 6G 空天地一体化系统的卫星物联网应用需求。

NOMA 技术在 3GPP NR R14 阶段研究项目（SI）期间进行了研究和讨论，SI 的结论为至少对于 eMBB 支持上行正交多址；至少对于 mMTC，除了正交方案，目标支持上行非正交多址。最终，NOMA 并未被包含在 3GPP NR R15 工作项目（WI）的立项内容之内。

2017 年 3 月 RAN（Radio Access Network）全会通过了 3GPP NR R15 NOMA SI，继续研究上行非正交多址技术，但为了给其他 NR WI 更多的时间，NOMA SI 直到 2018 年 2 月才开始在 RAN1 进行讨论，项目也推迟到 3GPP NR R16。NOMA SI 于 2018 年 12 月结项，没有达成一致结论^[25]。

1 IoT NTN 技术方案和问题分析

1.1 3GPP IoT NTN 技术方案

自 2020 年，3GPP 在 R17 阶段开始对 IoT NTN 进行研究与标准化^[4-10]，研究了时间频率同步补偿、定时增强、HARQ 增强、连接态的移动性管理、寻呼和空闲态管理等协议中潜在的问题，制定了基于星历信息和终端的位置信息的时间频率同步补偿，通过引入偏移量修正定时关系，增大 HARQ 进程数量，通过允许禁用 HARQ 反馈和允许配置非重传模式等增强 HARQ，基于卫星移动规律使用条件切换机制，引入新的同步块测量时序配置，引入软跟踪区域更新码等关键技术方案，最终形成了 IoT NTN 技术标准。

自 2022 年，3GPP 在 R18 阶段继续对 IoT NTN 进行技术增强，目前仍在进行中，主要内容包括继续解决 R17

阶段遗留的问题，包括 HARQ 反馈关闭、GNSS 测量触发等。还包括 4 个新的问题：覆盖增强，考虑 NR 覆盖增强方案在 NTN 系统中的适用性，实现智能手机直联卫星的目标；UE 位置的网络验证，提高 IoT NTN 的安全性；移动性和业务连续性增强，设计和完善 TN-NTN 之间的移动性方案；10 GHz 以上频谱的支持，研究和确定 NTN 示例频段，包括相邻信道共存的场景和规则。

分析 3GPP R17 阶段和 R18 阶段的工作内容发现，NR NTN 标准是在尽可能重用 NR 标准的原则基础上形成的，IoT NTN 标准是在尽可能重用 NR NTN 标准的原则基础上形成的，R17 阶段和 R18 阶段的目标均是解决一些卫星场景下直接使用 NR 标准无法解决的问题，解决问题的标准是使得 IoT NTN 终端能够在卫星场景下进行通信。卫星距离终端远，传播时延大，导致 IoT NTN 终端接入卫星时时延大、系统效率低、可服务的终端数量少等问题，需从多址接入和传输的角度去优化 IoT NTN 标准。

1.2 问题分析

接下来，分析基于目前 IoT NTN 标准的多址接入和传输流程，这个复杂的流程非常不适合 IoT NTN 系统，需要在 6G 中进行简化和优化。

目前 IoT NTN 标准的多址接入和传输流程非常复杂。当 UE 需要向网络发送数据时，UE 将先后经过以下基本流程：接入 gNB、向网络注册、接受网络鉴权、接受网络安全配置、上报 UE 能力、与 gNB 建立 RRC 连接、与 UPF 建立 PDU 会话连接、调度请求、接受上行传输调度、数据传输、得到确认信息等，具体流程如图 1 所示，图中的 26 次空中接口信令简单解释在图下方标注（1）~（26）中^[26]。从图 1 中可以看出，UE 和 gNB 之间将进行至少 26 次空中接口传输，当有重传发生时，空中接口传输次数会更多。

如此复杂的多址接入和传输流程不适合 IoT NTN 系统。卫星的传播时延非常大，假设卫星距离地面的高度分别为 600 km（LEO）、1 200 km（MEO）、35 786 km（GEO），假设卫星有效覆盖的最小俯仰角为 10°，根据地球半径约 6 371 km，可以计算出卫星到终端设备的最远距离分别为 1 924 km、3 125 km、40 567 km。对于透传类型的卫星，仅由距离引起的单程传播时延分别达到 12.83 ms、20.83 ms、270.45 ms。在不考虑 IoT 终端和卫星的处理时间、不考虑空中接口的重传时间等条件下，26 次空中接口信令传输需要的时间分别为 334 ms、542 ms、7 000 ms。如此大的传播时延将会导致 3 个主要的问题：LEO 卫星的移动速度快（7.5 km/s）、波束直径小（20 km），卫星服

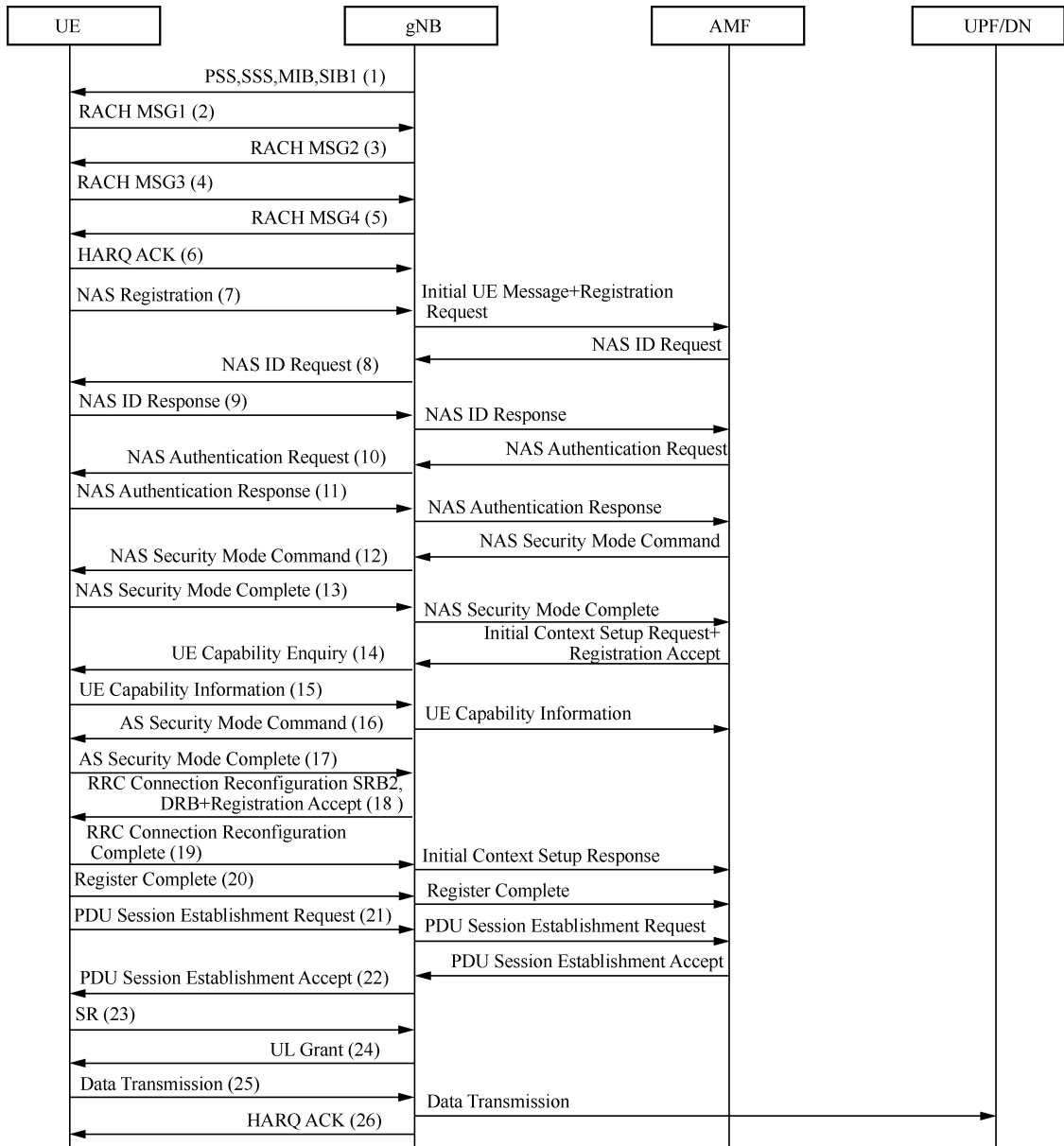


图 1 IoT NTN 标准中的多址接入和传输流程

务时间不超过 2.7 s，卫星覆盖边缘位置的服务时间更小，将有一定比例的 IoT 终端获得的服务时间小于信令交互时延 334 ms，这些 IoT 终端是无法得到 IoT NTN 服务的；IoT 终端通常会发送一些小数据包，图 1 的多址接入流程中各种开销对 IoT NTN 场景的小数据包来说非常大，导致系统效率非常低；复杂的多址接入流程，使得每个 IoT NTN 终端都会长期占用资源，因此限制了 IoT NTN 系统可以服务的终端数量。

因此，需要对 IoT NTN 场景引入新型多址接入和传输流程，目标包括简化流程，降低时延，提高系统效率，增加可以服务的终端数量等。

(1) 通过解析 PSS、SSS、MIB、SIB1，UE 获得下行时频同步、帧定时、小区识别、初始接入参数等。

(2) UE 选择和发送 Preamble，即 RACH MSG1。

(3) gNB 检测到 Preamble 后，向 UE 发送 RAR 消息，即 RACH MSG2。

(4) UE 向 gNB 发送 RRC Setup Request 消息，即 RACH MSG3。

(5) gNB 向 UE 发送 RRC Setup 消息，即 RACH MSG4，用于竞争解决和建立 SRB1。

(6) UE 向 gNB 反馈 HARQ ACK，表示收到 RACH MSG4。

(7) UE 根据 RRC Setup 消息建立 SRB1 后, 在 SRB1 上向 gNB 发送 RRC Setup Complete 消息, 携带的信息包括注册的 AMF ID、切片类型和第一条 NAS 消息, 其中 NAS 消息可能为 NAS Registration 消息。

gNB 收到 RRC Setup Complete 消息后, 根据其中的 AMF ID 选择 AMF, 向 AMF 发送 Initial UE Message 消息, 同时转发 UE 的 NAS Registration Request 消息。

AMF 经过 gNB 向 UE 发送 NAS ID Request 消息。

(8) gNB 向 UE 发送 NAS ID Request 消息。

(9) UE 经过 gNB 向 AMF 发送 NAS ID Response 消息, 消息中包含 UE 的 SUCI 信息。

(10) AMF 经过 gNB 向 UE 发送 NAS Authentication Request 消息, 包含鉴权参数。

(11) UE 使用鉴权参数和 UE 的 SUCI 等运算后得到鉴权响应, 经过 gNB 向 AMF 发送 NAS Authentication Response 消息。

(12) AMF 经过 gNB 向 UE 发送 NAS Security Mode Command 消息, 包含加密和完整性保护算法, 同时还会携带 ngKSI、Replayed UE Security capabilities 等信息。

(13) UE 经过 gNB 向 AMF 发送 NAS Security Mode Complete 消息, 对上述 SMC 消息进行确认, 可能还携带完整的初始 NAS 消息。

(14) AMF 向 gNB 发送 Initial Context Setup Request 和 Registration Accept 消息, 在 gNB 上建立 UE 上下文。

gNB 通过 UE Capability Enquiry 消息向 UE 查询其无线能力。

(15) UE 经过 gNB 向 AMF 发送 UE Capability Information 消息。

(16) gNB 向 UE 发送 AS Security Mode Command 消息, 包括 AS 层安全激活参数。

(17) UE 通过 SIM 卡中的用户数据完成安全激活, 并向 gNB 发送 AS Security Mode Complete 消息, 告知 gNB 完成了安全激活。

(18) gNB 向 UE 发送 RRC Connection Reconfiguration 消息来建立 SRB2 和 DRB, 同时携带 Registration Accept 信息。

(19) UE 向 gNB 回复 RRC Connection Reconfiguration Complete 消息, gNB 收到后, 通过 Initial Context Setup Response 消息向 AMF 报告。

(20) UE 经过 gNB 向 AMF 发送 NAS Register Complete 消息, 完成 UE 在核心网的注册流程。

(21) UE 经过 gNB 向 AMF 发送 NAS PDU Session

Establishment Request 消息。

(22) AMF 经过 gNB 向 UE 发送 NAS PDU Session Establishment Accept 消息。

(23) UE 向 gNB 发送调度请求消息 SR。

(24) gNB 向 UE 发送上行调度许可 UL Grant 消息。

(25) UE 向 gNB 发送数据, gNB 发送给 UPF 和 DN。

(26) gNB 向 UE 反馈 HARQ ACK 信息。

2 非协调的随机接入与非正交多址传输方案

URAT 从网络架构、协议栈、数据流、接口、安全机制、多址接入流程等多方面进行了设计。在网络架构方面, URAT 方案在 gNB 上增加了应用代理, 该应用代理为 gNB 服务的 IoT 终端提供 NAS 功能, 向 gNB 服务的 IoT 终端提供上行数据转发功能, 使用该应用代理后 IoT 终端不需要直接与核心网交互信令和数据。针对新的网络架构, 协议栈、数据流、接口等做了相应调整。在安全机制方面, 应用代理把 IoT 终端使用的完整性保护密钥和数据加密密钥的生命周期延长。新的多址接入和传输流程如图 2 所示, 终端接入 gNB 后, 图 1 中向网络注册、接受网络鉴权、接受网络安全配置、上报 UE 能力、与 gNB 建立 RRC 连接、与 UPF 建立 PDU 会话连接等步骤, 用图 2 中的 UE 和 gNB + App Proxy 之间的信令 (7)~(9) 代替, 通过使用低复杂度的安全机制简化流程; 图 1 中的调度请求、接受上行传输调度、数据传输等步骤, 用图 2 中的 UE 和 gNB + App Proxy 之间的信令 (10)~(11) 代替, 使用低复杂度的传输机制简化流程。图 2 中信令 (10)~(11) 两个流程, 在完整性保护密钥和数据加密密钥的生命周期内可以进行任意次。本文将聚焦图 2 中最重要的步骤即信令 (10)(URAT Transmission) 的设计和性能分析。

图 2 中 UE 和 gNB + App Proxy 之间的信令 (10)~(11) 可以有多种实现方案, 包括借用 5G 中的 3 种方案^[26], 如图 3 中左边 3 种方案, 简称方案 1~3。方案 1 为 4-Step RACH + UL grant + Data, 该方案的时延最大, 需要通过优化多址接入流程, 降低时延。方案 2 为 2-Step RACH + UL grant + Data, 该方案相比方案 1 减少了两次空中接口交互, 时延较小。方案 3 为 2-Step RACH based SDT, 该方案将数据传输与接入进行了融合, 相比方案 2 减少了 4 次空中接口交互, 进一步降低了时延。为了进一步降低空中接口上的多址接入时延, 本文提出图 3 中的方案 4。方案 4 为 1.5-Step RACH based SDT, 也可以称为 one-shot 方案, 该方案相比方案 3 减少了一次空中

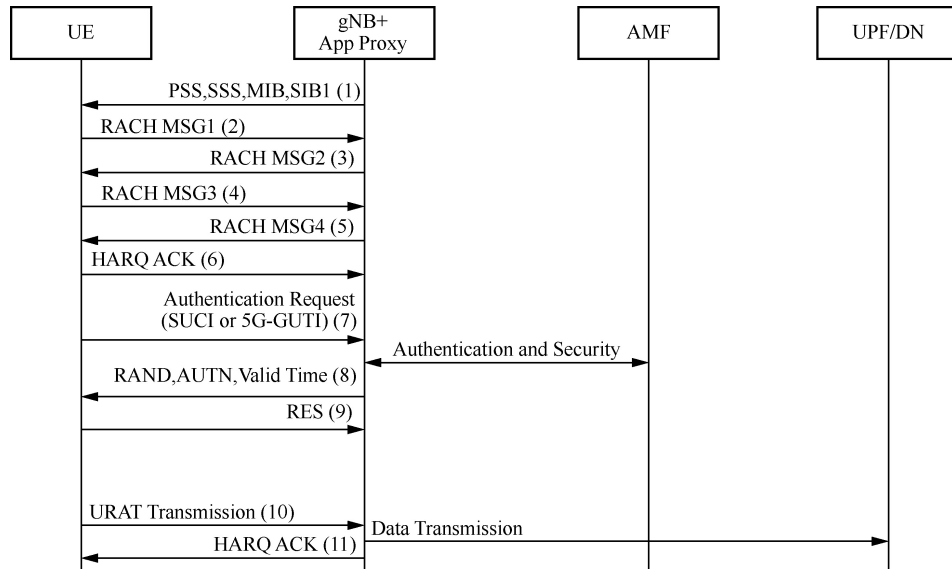


图2 新的多址接入和传输流程

接口交互,是时延最低的方案。1.5-Step RACH based SDT 方案的流程如图4所示。

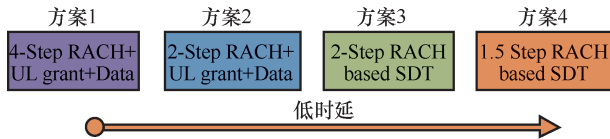


图3 4种URAT方案

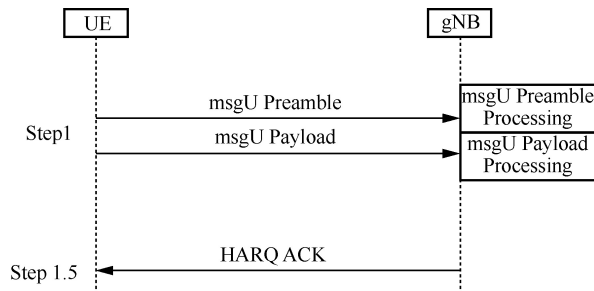


图4 1.5-Step RACH based SDT 的流程

Step 1.5是指gNB仅需要根据msgU Payload的检测结果,向UE反馈HARQ ACK,不是通常的gNB对接入过程完成的确认。1.5-Step RACH based SDT方案不需要通过信令交互UE在空中接口上的ID,而是使用由待传输数据产生的内生比特作为数据发送和数据反馈确认的身份信息,这是该方案与方案1~3之间的不同之处。msgU的帧结构如图5所示,其中,前导Preamble和数据Payload联合发送,前导起到随机接入和控制数据格式的功能,数据部分使用NOMA传输。



图5 msgU的帧结构

1.5-Step RACH based SDT 方案的通信流程如下。

(1) 包括 RRC_IDLE 态 UE, UE 可以发起 1.5-Step RACH 传输,其中上行传输的信道资源是由 gNB 通过系统信息配置给 UE 的。

(2) Preamble 的选择不再是随机的,而是根据 Payload 内生比特(16或24比特)的取值确定。

(3) Preamble 的数量增加到 64K 个或 16M 个,这些数量的 Preamble 是根据 RACH 配置信息通过多个较短 Preamble 组合产生的。

(4) Payload 上传的控制面数据和用户面数据包括: UE-Identity、resume MAC-I、用户面数据,其中 UE-Identity 是 5G-S-TMSI 的后 39 比特, resume MAC-I 是 UE 基于 UE 存储的安全 Key 及之前 RRC 消息中的 NCC 值产生的,当 UE 发生切换时需要更新安全密钥,控制面数据和用户面数据的大小在几字节到几百字节之间。

(5) Payload 使用的多址方式可以为 NOMA,所有的 UE 将共享信道资源, Payload 的发送方式,包括交织、加扰、分集、RV 等,由 Payload 的内生比特决定和指示。

(6) HARQ-ACK 反馈所使用的 UE ID 为 Payload 内生的 UE ID,可以使用 PDCCH Type 2-2 中类似 TPC 进行传输,可以同时向多个 UE 发送。

3GPP 曾经考虑了非正交多址技术在 mMTC、uRLLC、eMBB 3 种场景下的应用^[25], 但是还没有考虑在 IoT NTN 场景下的应用, 可以从各家公司向 3GPP 提交的 17 种 NOMA 方案中选择适合 IoT NTN 场景的 NOMA 方案, 进行进一步的评估, 主要是应用 IoT NTN 信道、考虑小数据包传输、考虑大量 IoT NTN 终端等新的评估条件。大唐电信科技产业集团提出的 PDMA 方案, 最早引入了不等分集度的设计思想, 非常适合大量终端的场景。PDMA 可以继续演进, 包括支持更多的终端数量、适用于 IoT NTN 信道、适用于小数据包传输等, 主要涉及以下几个方面的演进。

(1) 产生更多的 PDMA 序列

为了支持更多的终端同时接入网络, PDMA 方案需要产生更多的 PDMA 序列, 同时, PDMA 序列的长度也会更长, 以支持更多终端同时接入网络所需的低码率。更长的 PDMA 序列长度, 允许有更多的 PDMA 序列备选。

(2) 扩展 PDMA 序列的元素

PDMA 序列包含元素 $\{0, \pm 1, \pm j\}$, 相当于对星座点数据进行 0° 、 $\pm 90^\circ$ 和 180° 的旋转操作, 其性能可以进一步增强。对于 PDMA 序列包含的元素, 不再局限于 $\{0, \pm 1, \pm j\}$, 可以扩展到 $\{0, \pm 1, \pm j, \pm 1 \pm j, \pm 3 \pm j, \pm 1 \pm 3j, \dots\}$ 。扩展 PDMA 序列的元素, 可以增强 PDMA 序列自身的性能, 还可以获得更多的 PDMA 序列数量。

(3) 设计导频

终端从导频池中随机选择一个导频, 通过导频和扩频码/多址码之间的绑定关系, 可以确定得到扩频码/多址码。通过该设计, 可以有效解决导频污染问题。这个增强的导

频设计, 不需要网络的协调, 而是由终端自主选择, 所以能够支持更多的终端接入。

3 性能分析与评估

鉴于本文提出的新多址接入和传输流程 (图 2) 相对于 IoT NTN 标准中的多址接入和传输流程 (图 1) 明显简化了步骤, 从 26 次信令交互减小到 11 次信令交互, 增益是可见的, 限于篇幅, 本文不再进行定量分析。下面重点对比分析 4 种 URAT 方案的性能, 给出 1.5-Step RACH based SDT 方案在降低时延、提高系统效率、增加可以服务的 IoT 终端数量等方面的增益。这是因为在图 2 中, 认证和安全步骤进行一次, 而 URAT 可以发生很多次, 也就是说, URAT 的性能决定了新多址接入和传输流程的性能。

性能评估方法采用数值分析仿真的方法, 针对 4 种 URAT 方案, 得到具体的流程步骤及其对应的时延大小, 再给出一套典型参数, 最后得到 4 种方案的时延性能。

4-Step RACH+UL grant+Data 方案的时延分析见表 1, 共有 7 个步骤, 如果不算重传的话则共有 6 个步骤。该方案的步骤最多, 时延是最大的。

2-Step RACH+UL grant+Data 方案的时延分析见表 2, 共有 5 个步骤, 如果不算重传的话则共有 4 个步骤。该方案相比上一个方案, 时延会降低。

2-Step RACH based SDT 方案的时延分析见表 3, 共有 4 个步骤, 如果不算重传的话则共有 3 个步骤。该方案相比上一个方案, 时延进一步降低。

1.5-Step RACH based SDT 方案的时延分析见表 4, 共

表 1 4-Step RACH+UL grant+Data 方案的时延

步骤	时延大小	解释
发送 MSG1	1 slot	第一次传输
等待 MSG2	ra-Response Window	RAR 窗口在 RO 的最后一个符号之后, 从用于接收 Type1-PDCCH CSS 的最早 CORESET 的第一个符号开始
可能重发 MSG1	$(N_{T,1}+0.75) \text{ ms}+1 \text{ slot}$	在 RAR 窗口的最后一个符号之后或者 PDSCH 接收的最后一个符号之后的 $(N_{T,1}+0.75) \text{ ms}$ 内进行 PRACH 重传, 最大重传次数为 Preamble Trans Max
发送 MSG3	$(N_{T,1}+N_{T,2}+0.5) \text{ ms}+1 \text{ slot}$	所接收的、承载 RAR 的 PDSCH 的最后一个符号与该 RAR 调度的 MSG3 的 PUSCH 传输的第一个符号之间的最小时间等于 $(N_{T,1}+N_{T,2}+0.5) \text{ ms}$
等待 MSG4	ra-Contention Resolution Timer	从发送 MSG3 的最后一个符号之后开始, 启动计数器, 到接收到 MSG4
发送 HARQ-ACK	$(N_{T,1}+0.5) \text{ ms}+1 \text{ slot}$	发送包含 HARQ-ACK 信息的 PUCCH 的第一个符号与所接收的相应 PDSCH 的最后一个符号之间的最小时间等于 $(N_{T,1}+0.5) \text{ ms}$
发送 SR、等待 UL grant、发送数据、等待 HARQ 确认、重传	$(n+1) \times (T_0+T_1+T_2+T_3)$	n 是重传次数, T_0 是发送调度请求的时间, T_1 是等待 UL grant 的时间, T_2 从 UE 发送数据的时间, T_3 是等到 HARQ 反馈的时间

表 2 2-Step RACH+UL grant+Data 的时延

步骤	时延大小	解释
发送 MSGA	2 slot	第一次传输
等待 MSGB	ra-Response Window	RAR 窗口在 RO 的最后一个符号之后，从用于接收 Type1-PDCCH CSS 的最早 CORESET 的第一个符号开始
可能重发 MSGA	$(N_{T,1}+0.75) \text{ ms}+2 \text{ slot}$	在 RAR 窗口的最后一个符号之后或者 PDSCH 接收的最后一个符号之后的 $(N_{T,1}+0.75) \text{ ms}$ 内进行 PRACH 重传，最大重传次数为 Preamble Trans Max
发送 HARQ-ACK	$(N_{T,1}+0.5) \text{ ms}+1 \text{ slot}$	发送包含 HARQ-ACK 信息的 PUCCH 的第一个符号与所接收的相应 PDSCH 的最后一个符号之间的最小时间等于 $(N_{T,1}+0.5) \text{ ms}$
发送 SR、等待 UL grant、 发送数据、等待 HARQ 确认、重传	$(n+1) \times (T_0+T_1+T_2+T_3)$	n 是重传次数， T_0 是发送调度请求的时间， T_1 是等待 UL grant 的时间， T_2 从 UE 发送数据的时间， T_3 是等到 HARQ 反馈的时间

表 3 2-Step RACH based SDT 的时延

步骤	时延大小	解释
发送 MSGA	2 slot	第一次传输
等待 MSGB	ra-Response Window	RAR 窗口在 RO 的最后一个符号之后，从用于接收 Type1-PDCCH CSS 的最早 CORESET 的第一个符号开始
可能重发 MSGA	$(N_{T,1}+0.75) \text{ ms}+2 \text{ slot}$	在 RAR 窗口的最后一个符号之后或者 PDSCH 接收的最后一个符号之后的 $(N_{T,1}+0.75) \text{ ms}$ 内进行 PRACH 重传，最大重传次数为 Preamble Trans Max
发送 HARQ-ACK	$(N_{T,1}+0.5) \text{ ms}+1 \text{ slot}$	发送包含 HARQ-ACK 信息的 PUCCH 的第一个符号与所接收的相应 PDSCH 的最后一个符号之间的最小时间等于 $(N_{T,1}+0.5) \text{ ms}$

表 4 1.5-Step RACH based SDT 的时延

步骤	时延大小	解释
发送 msgU	2 slot	第一次传输
等待 HARQ 反馈确认信息	$(N_{T,1}+N_{T,2}+0.5) \text{ ms}+1 \text{ slot}$	所发送的 msgU 的最后一个符号与该 msgU 的反馈 HARQ 的第一个符号之间的最小时间等于 $(N_{T,1}+N_{T,2}+0.5) \text{ ms}$
可能重发 msgU	$(N_{T,1}+0.5) \text{ ms}+2 \text{ slot}$	在 RAR 窗口的最后一个符号之后的 $(N_{T,1}+0.5) \text{ ms}$ 内进行 msgU 重传，最大重传次数为 Preamble Trans Max

有 3 个步骤，如果不算重传的话则共有 1.5 个步骤。该方案相比上一个方案，时延进一步降低。

接下来，给出一套典型参数取值的示例，具体见表 5。

表 5 典型参数取值

参数	取值
1 slot	1 ms
$N_{T,1}$	10/14 ms
$N_{T,2}$	12/14 ms

在没有重传发生时，可以得到 4 种多址接入技术方案的时延数值，如图 6 所示。可以看出，第 4 种 1.5-Step RACH based SDT 的时延相比其他 3 种方案有明显的降低，方案 4 的时延是方案 3 时延的约 36%、方案 2 时延的约 25%、方案 1 时延的约 7%，可以作为 IoT NTN 场景甚至 6G 中的新型多址接入技术方案。

接下来分析系统效率、可以服务的终端数量、碰撞概率方面的性能。

假设所有信令交互占用资源近似相同、IoT 终端需要发送一个小数据包，在没有重传的情况下，4-Step

RACH+UL grant+Data 方案的 6 个步骤需要进行 9 次信令交互，系统效率为 11%，而 1.5-Step RACH based SDT 方案的 1.5 个步骤仅需要进行 2 次信令交互，系统效率为 50%。对于 IoT 终端通常发送一些小数据包的 IoT NTN 场景来说，相比 4-Step RACH+UL grant+Data 方案，1.5-Step RACH based SDT 方案可以明显提升系统效率。

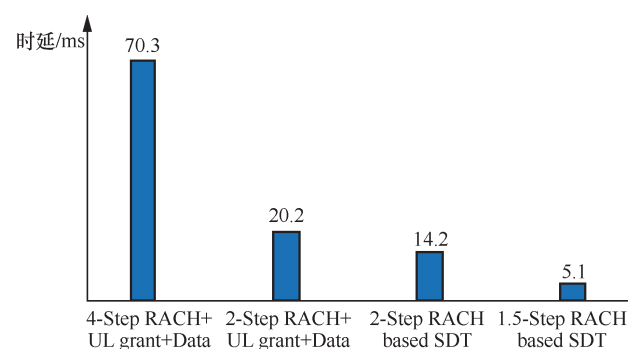


图 6 4 种方案的时延性能比较

假设所有信令交互占用资源近似相同，IoT 终端需要发送一个小数据包，在没有重传的情况下，从可以服务的

IoT 终端数量的角度看, 4-Step RACH+UL grant+Data 方案服务一个 IoT 终端, 1.5-Step RACH based SDT 方案可以服务 4.5 个 IoT 终端。因此相比 4-Step RACH+UL grant+Data 方案, 1.5-Step RACH based SDT 方案能明显增加可以服务的 IoT 终端数量。

关于碰撞概率性能, 方案 1~3 中, 所有用户共享最大 64 个 Preamble, 方案 4 中, 所有用户共享最大 64 K 个 Preamble。那么, 方案 4 的每用户多址接入碰撞概率为方案 1~3 的每用户多址接入碰撞概率的 1/1 000。数据部分使用 NOMA 技术共享所有资源, 检测成功率取决于所采用的 NOMA 方案和多用户检测技术。

4 需要进一步研究的问题

本文提出了 URAT 新型多址接入解决方案, 并且针对其中最为核心的 URAT 过程, 提出了 1.5-Step RACH based SDT 交互流程, URAT 方案能够降低多址接入时延, 提高系统效率, 增加可以服务的 IoT 终端数量, 但是仍然存在一些问题需要进一步的研究。

首先是 URAT 方案的实现复杂度问题。一方面, URAT 需要较为复杂的 NOMA 接收进行多用户信号的接收和检测; 另一方面, 6G 需要支持更多的终端同时接入网络, 这个数量可能是 5G 的 10 倍到 100 倍, 网络需要同时检测非常多的终端信号, 因此, URAT 方案将需要较高或极高复杂度的接收机。URAT 低复杂度接收机的实现方案是一个需要进一步研究的问题, 考虑到人工智能 (AI) 技术的普及, 基于 AI 的 URAT 接收机将会是一个潜在的解决方案。

其次是 URAT 方案的工作鲁棒性问题。URAT 方案相对于 IoT NTN 标准中的多址接入和传输流程明显简化了步骤, 这可能会降低 URAT 方案的工作鲁棒性, 为此 URAT 方案提供了回退机制, 即当网络或网络在正确接收到 URAT 的交互信令 A 后一直无法正确接收 URAT 的交互信令 B, 则终端或网络将回退到 IoT NTN 标准中的多址接入和传输流程, 从 URAT 的交互信令 A 对应的 IoT NTN 标准中的交互信令的下一条交互信令开始交互。URAT 中回退方案的具体实现是一个需要进一步研究的问题。

最后是接入安全性问题。一方面, 大多数卫星物联网终端对可靠性的要求可能不如智能手机等终端对可靠性的要求那么高, 这主要是由物联网终端的成本属性决定的; 另一方面, URAT 方案从网络架构、安全机制等方面探索了适合大量卫星物联网终端场景下的低复杂度安全性保证方案, 但仍然需要继续在安全性和复杂度之间进行权衡。URAT 方案的安全性是一个需要进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] 3GPP. Study on using satellite access in 5G(Stage 1): TR 22.822 V1.0.0[S]. 2018.
- [2] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 V15.4.0[S]. 2020.
- [3] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821 V16.1.0[S]. 2021.
- [4] 3GPP. Physical channels and modulation: TS 38.211 V17.2.0[S]. 2022.
- [5] 3GPP. Multiplexing and channel coding: TS 38.212 V17.2.0[S]. 2022.
- [6] 3GPP. Physical layer procedures for control: TS 38.213 V17.2.0[S]. 2022.
- [7] 3GPP. Physical layer procedures for data: TS 38.214 V17.2.0[S]. 2022.
- [8] 3GPP. Physical layer measurements: TS 38.215 V17.2.0[S]. 2022.
- [9] 3GPP. Radio resource control (RRC); Protocol specification: TS 38.331 V17.2.0[S]. 2022.
- [10] 3GPP. Medium access control (MAC) ; Protocol specification: TS 38.321 V17.2.0[S]. 2022.
- [11] CCSSA. 基于 IoT NTN 的卫星物联网系统技术研究[R]. 2023.
CCSSA. Research on satellite IoT system technologies based on IoT NTN[R]. 2023.
- [12] ITU-R. Future technology trends of terrestrial IMT systems towards 2030 and beyond[Z]. 2022.
- [13] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[Z]. 2023.
- [14] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021.
IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G overall vision and potential key technologies white paper[R]. 2021.
- [15] IMT-2030(6G)推进组. 6G 典型场景和关键能力白皮书[R]. 2022.
IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G typical scenarios and key capabilities white paper[R]. 2022.
- [16] IMT-2030(6G)推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G network architecture vision and key technologies outlook white paper[R]. 2021.
- [17] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications

Science, 2020, 36(6): 1-13.

- [18] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向 6G 的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报, 2021, 33(6): 891-901.

SUN S H, DAI C Q, XU H, et al. Research on integrated networking of satellite earth integration for 6G[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021, 33(6): 891-901.

- [19] 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. Satellite network architecture and key transmission technologies for heaven earth integration[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 2-10.

- [20] 王胡成, 徐晖, 孙韶辉. 融合卫星通信的 5G 网络技术研究[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 535-542.

WANG H C, XU H, SUN S H. Research of network technologies of 5G integrating satellite communication[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(5): 535-542.

- [21] SUN S H, HOU L M, MIAO D S. Beam switching solutions for beam-hopping based LEO system[C]//Proceedings of 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.

- [22] 侯利明, 韩波, 缪德山, 等. 基于 5G 及演进的星地融合空中接口传输技术[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 21-29.

HOU L M, HAN B, MIAO D S, et al. Research of air-interface technologies for 5G based integrated satellite-terrestrial communication[J]. Information and communications Technology and policy, 2021, 47(9): 21-29.

- [23] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.

- [24] CHENS Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218-228.

- [25] 3GPP. Study on non-orthogonal multiple access (NOMA) for NR: TR 38.812 V16.0.0[S]. 2018.

- [26] 王映民, 孙韶辉. 5G 移动通信系统设计与标准详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.

WANG Y M, SUN S H. Design and standard explanation of 5G mobile communication system[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2020.

作者简介



白伟 (1976—), 男, 中信科移动通信技术股份有限公司物理层协议研究资深工程师, 主要研究方向为 6G、移动通信系统设计、多址接入。



张钰婕 (1996—), 中信科移动通信技术股份有限公司无线技术研究工程师, 主要研究方向为多址接入。



康绍莉 (1974—), 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室工程师, 中信科移动通信技术股份有限公司移动系统研究高级技术专家, 主要研究方向为多址接入、频谱共享、卫星通信及 6G 等。



缪德山 (1978—), 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室工程师, 中信科移动通信技术股份有限公司高级工程师, 主要从事 3GPP NTN、卫星通信以及星地融合空中接口传输方面的研究工作。



孙韶辉 (1972—), 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室教授级高级工程师, 中信科移动通信技术股份有限公司副总经理, 长期从事移动通信新技术研究与标准制定工作, 主要研究方向为移动通信系统设计及多天线技术、卫星通信、定位等。



陈山枝 (1968—), 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室主任, 负责 4G 和 5G 移动通信、C-V2X 车联网技术与标准研究及产业化工作, 主要研究方向为 B5G 和 6G、车联网、卫星移动通信等。