多卫星 NOMA 不规则重复时隙 ALOHA 用于物联网网络

Estefan´ıa Recayte*, Carla Amatetti†

* 通信与导航研究所，德国航空航天中心（DLR），韦斯林，德国
† 电气、电子与信息工程系，博洛尼亚大学，博洛尼亚，意大利

arXiv:2601.00341v1 [cs.NI] 1 Jan 2026

摘要——**随着从 5G 向 6G 的过渡不断推进，物联网（IoT）设备数量预计将大幅增加，从而为各种应用实现无缝且无处不在的连接。要应对这一增长并满足高容量需求，就必须引入非地面网络（NTN）。然而，与地面接收机相比，卫星的覆盖范围更广，这将导致大量用户同时尝试接入信道，从而增加碰撞概率。与此同时，巨型星座的部署使地面用户能够同时处于多个卫星的可见范围内，从而实现接收分集。因此，本文评估了在物联网节点按照非正交多址接入（NOMA）-不规则重复时隙 ALOHA（IRSA）协议共享信道的场景下，多接收机所带来的影响。考虑到卫星信道的损伤特性，我们推导出了系统性能的下界，可作为快速评估网络行为的工具。此外，我们还分析了网络设计参数中固有的权衡关系，重点关注丢包率和能效。值得注意的是，仅增加一个可见卫星作为接收机，就能显著提升整体系统性能。**

I. 引言

非地面网络（NTN）作为全球连接的关键组成部分，正稳步发展；它通过为偏远及其他无法接入的区域提供覆盖，补充了传统地面基础设施 [1]‚[2]。随着第三代合作伙伴计划（3GPP）标准自第17版起将其纳入，非地面网络已成为未来6G物联网生态系统不可或缺的一部分。与此同时，人们对海量机器类通信（mMTC）和物联网应用日益浓厚的商业兴趣带来了新的挑战，推动下一代网络的连接需求达到新的极限[3]。物联网应用的一个关键特征是部署大量低功率、低复杂度设备，

E. Recayte 感谢德国联邦教育与研究部通过“Souver¨an. Digital. Vernetzt.”计划提供的资金支持。联合项目 6G-RIC，项目编号：16KISK022。本研究由 6G-NTN项目资助，该项目获得了 SNSJU 在欧盟地平线欧洲研究与创新计划框架下提供的资金，资助协议编号为 101096479。文中所述观点仅代表作者，并不一定代表该项目。欧盟委员会不对其中所含信息可能被如何使用承担责任。

这些设备以零星且不可预测的方式启动，并通过共享信道传输小数据包。

在此背景下，现代随机接入方案 [4], 应运而生，旨在满足海量连接的需求，而无需在用户之间进行集中式协调。具体而言，不规则重复时隙 ALOHA（IRSA） [5] 协议已被证明是物联网应用的有效解决方案，能够支持较高的吞吐量并带来切实的性能增益。该协议依靠在媒体访问控制（MAC）帧中进行分组重复，并在接收机处采用迭代解码算法来解决碰撞，即执行连续干扰消除（SIC）。具体而言，当一个分组被正确接收后，便可消除其副本造成的干扰，从而恢复此前发生碰撞的分组。如今，IRSA 及其特例竞争解决分集时隙 ALOHA（CRDSA）已应用于数字视频广播（DVB）-RCS2 标准的回传信道 [6]。

为持续开发更高效的物联网接入方案，近期文献提出将非正交多址接入（NOMA）应用于随机接入的功率维度。开创性工作 [7] 研究了一种方案：物联网设备从一组预设功率等级中选择一个，以通过 ALOHA 信道发送分组。通过利用功率差异，该方法使接收机能够捕获更强的分组，从而提高正确接收的信息量。此后，研究人员进一步在支持功率分集的协议中考察了 NOMA 方法，例如 [8], [9],中的 CRDSA、 [10]中的 IRSA，以及 [11] 中面向卫星通信的方案。

另一条研究路线着重指出，在物联网中使用多个接收机来利用空间分集具有广阔前景。由于物联网设备与卫星之间的信道条件变化，卫星信道可能出现损耗，从而影响系统性能。利用大型星座并配备多个接收机，可以显著增强系统的整体鲁棒性。例如， [12]和 [13]研究了多个接收机对时隙 ALOHA 系统吞吐量的影响。此外，[14]中的作者探讨了多卫星协作如何提升现代随机接入协议中的分组检测能力。

与文献中的以往研究不同，本研究评估了

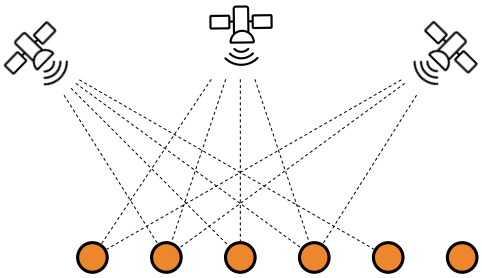


图 1：连接到 k 颗 = 3卫星的 m 个 = 6物联网节点示例。OOF信道模型表示为：用户与卫星之间未连接的链路表示一次擦除传输。

在采用 NOMA-IRSA 方案的物联网非地面网络中，多个接收机带来的影响。我们在考虑信道损伤并纳入多个接收机的基础上，扩展了 [11] 和 [15]的研究发现。我们从丢包率和物联网设备能效的角度评估网络性能。我们建立了一种分析方法，为渐近长 MAC 帧的解码失败概率给出下界，从而快速估计系统行为。此外，我们报告了考虑有限帧时长影响的详细仿真结果。本研究为理解参数设计相关的基本权衡提供了有价值的见解，助力持续推进更可持续、更高效的物联网网络发展 [16]。

本文其余部分安排如下。第二节介绍系统模型，第三节介绍性能指标的评估。第四节给出渐近分析。第五节提供数值结果，最后第六节总结结论。

II. 系统模型

我们考虑图 1 所示的上行场景，其中由 m 个未协调的物联网用户（节点）组成的群体 $\mathcal{U} = \{u_1, ..., u_m\}$ 通过共享介质向卫星发送分组，构成一个非地面网络。

A. 介质接入竞争

我们假设用户遵循 IRSA协议 [5]，其中时间被划分为时长固定的时隙，每个时隙对应分组时长 T。MAC帧由 n 个连续时隙组成，用户和接收机都知晓帧的起止时间以及每个时隙的时序。[1] 信道负载记为 G，定义如下：

$$G = \frac{m}{n} \quad [\text{packets/slot}].$$

每个物联网节点在可用的 n 个时隙中随机均匀地传输其数据分组的 ℓ 个副本在帧内。每个用户根据预定义的概率质量函数独立抽取副本数量 ℓ。按照传统的多项式表达形式，这可以表示为 [5]

$$\Lambda(x) = \sum_{\ell=2}^{\ell_{\max}} \Lambda_\ell \, x^\ell \text{ with } \sum_{\ell=2}^{\ell_{\max}} \Lambda_\ell = 1$$

其中，Λ_ℓ 表示节点发送ℓ 个副本的概率，而 $\ell_{\max}$ 表示节点在一帧内可发送的最大副本数。例如，IRSA分布 $\Lambda(x) = 0.25x^2 + 0.75x^3$ 表示用户以 0.25 的概率发送两个副本，以0.75的概率发送三个副本。我们还将每个用户平均发送的副本数定义为 $\bar{\ell} = \sum_{\ell=2}^{\ell_{\max}} \ell \Lambda_\ell$。

每个副本都包含其孪生副本所在时隙的索引。此信息可以通过例如在分组头中插入指针来获取。[2]

B. 副本功率多样性

我们考虑一种非正交多址方案，其中每个副本都可以采用不同的功率级别发送。确定副本数量后，每个用户会为每个副本选择一个发送功率级别。物联网设备受到峰值功率约束，[3] 记为 P。为有效管理功率分配，我们假设采用两个不同的功率级别，弱 和强 ，如 [17]所示。这些功率级别是峰值功率的若干比例，具体为

$$p_2 = (1-\alpha)\mathsf{P} \text{ and } p_1 = \alpha\mathsf{P}$$

其中，$0 < \alpha < 0.5$ 和 p_2，p_1 分别表示强和弱功率级别。参数 α 定义了所使用峰值功率的比例。副本可以按相同概率分配到强功率或弱功率。

按照 [7], 中介绍的方法，功率级别需要满足以下条件

$$p_k = \gamma(\gamma+1)^{2-k} \quad k \in [1,2] \tag{1}$$

其中，γ 表示接收机成功解码一个副本所需的目标信干噪比（SINR）。这一公式确保以强功率发送的副本即使在时隙内受到弱功率传输的干扰，也能被解码。此外，以弱功率发送的副本在无干扰时隙中也能成功解码。

通过结合（1）中的关系以及 p_1 和 p_2的定义，我们可以推导出该值

$$\alpha = (\sqrt{\mathsf{P}+1} - 1)/\mathsf{P}.$$

该表达式建立了峰值功率约束与传输中所用功率级别之间的关系，

[1]这通常通过信标消息来实现。

[2]一种高效的方法是将数据包载荷用作发送端放置其副本时所用随机数生成器的种子。这样，一旦解码出一个副本，接收机便能确定所有其他副本的位置。

[3]这一假设基于实际因素，例如功率放大器的性能限制以及频谱使用的监管要求。

确保两个功率等级均针对网络性能进行了优化。

C. 信道模型

为刻画非地面网络链路短期不可用所导致的显著信道损伤，我们假设节点发送的数据包会遭遇擦除。具体而言，我们采用 [18] 提出的开关衰落（OOF）信道框架。

在该模型中，数据包以概率 ϵ 被完全擦除，这意味着它不会在接收机处产生任何干扰，并且实际上已丢失。例如，严重的降雨天气或物理障碍都可能导致这种情况。或者，数据包也可能以概率 $(1-\epsilon)$ 成功到达接收机。用户之间的擦除相互独立且同分布 [12], ，同时假设同一用户在帧内的副本经历相同的开关信道状态。

此外，当考虑多个卫星作为接收机时，每个用户与每颗卫星之间经历的信道状态相互独立。这意味着，来自某个用户的副本可能在一个接收机处完全丢失，而在另一个接收机处成功接收。图 1 展示了这一情形，例如，左侧第一个用户连接到三颗卫星中的两颗。

D. 连续干扰消除译码

在接收端，卫星会对 MAC帧 [5] 执行连续干扰消除。该算法对时隙和帧进行迭代处理。每当副本的信干噪比（记为 Γ）超过阈值 γ，即 $\Gamma \geq \gamma$ 时，就会对该副本进行译码。

回顾（1），当一个副本在时隙内接收时未发生碰撞，不等式 $\Gamma \geq \gamma$ 便成立。在非正交多址方案中，接收机可以利用捕获效应，这意味着碰撞并非总是具有破坏性的。具体而言，如果一个时隙包含两个副本——一个功率较高，另一个功率较低——接收机可以先译码较强的信号，并将其从时隙中消除。这样，接收机随后也能译码较弱的信号。

当接收机对一个副本进行译码后，便能获知其对应副本的位置，并消除这些副本对接收信号的贡献。由于消除了干扰，其他用户的副本可能变得可译码。重复这一迭代过程，直至无法识别出更多满足 $\Gamma \geq \gamma$ 的副本。

E. 多接收机

我们旨在评估所提出场景在存在多个接收机时的性能。为此，我们考虑 $\mathrm{k} \geq 1$ 颗卫星。

经过 n 个时隙后，由于擦除相互独立，每颗卫星可能观测到不同版本的 MAC 帧。帧结束时，已有 m 个用户发送数据；由于不同用户可能被擦除，每颗卫星在各时隙中经历的干扰模式也可能不同。不过，MAC 帧之间存在相关性：未被擦除的用户所发送的副本，在所有卫星上都出现在相同的时隙中。

随后，每个接收机 $j = 1$、.....k 独立运行 SIC算法，从而解码出用户子集 $\mathcal{D}_j \subseteq \mathcal{U}$ 。在一个 MAC 帧内，整个系统总共解码出 d 个用户，其中 d

$$d = \left| \bigcup_{j=1}^{\mathrm{k}} \mathcal{D}_j \right|.$$

III. 多接收器性能指标

我们旨在刻画在所提出的 NOMA-IRSA 场景中假设存在多个接收机所带来的影响。为此，我们通过两个关键性能指标分析系统：分组丢失率 PLR 和能效 η。

A. 丢包率

令 PLR(G) 表示当信道负载为 G 时，用户未被系统解码的概率。该概率表示任意用户 u 未被纳入任何一颗卫星解码的用户子集中的可能性。因此，我们可以写为

$$\mathrm{PLR}(\mathrm{G}) = \Pr\left[\mathrm{u} \notin \bigcup_{j=1}^{\mathrm{k}} \mathcal{D}_j\right] \geq \prod_{j=1}^{\mathrm{k}} \Pr\left[\mathrm{u} \notin \mathcal{D}_j\right] = \mathrm{PLR}_{\mathrm{B}}(\mathrm{G}) \quad (2)$$

其中，不等式是由卫星观测到的 MAC帧之间的相关性得出的。因此，$\mathrm{PLR_B(G)}$ 表示一个下界。

项 $\Pr[\mathrm{u} \notin \mathcal{D}_j]$ 表示用户未被第 j 颗卫星解码的概率。出现这种情况的原因可能是用户的副本未被接收（被擦除），其概率为 ϵ；也可能是副本已被接收，其概率为 $1-\epsilon$，但 SIC算法未能解码该用户。将后一事件的概率记为 P_ϵ(G)，则可表示为

$$\Pr\left[\mathrm{u} \notin \mathcal{D}_j\right] = \epsilon + (1-\epsilon)\mathrm{P}_\epsilon(\mathrm{G}). \quad (3)$$

由于难以跟踪 SIC解码算法在有限帧长 [5] 下的行为，推导 P_ϵ(G) 颇具挑战性。然而，可以通过算法1进行评估，该算法输出考虑帧长趋于无穷时的 P_ϵ(G) 值。其推导细节将在下一节中给出。

最后，将 (3) 代入 (2)，可得

$$\mathrm{PLR}_{\mathrm{B}}(\mathrm{G}) = \left[(1-\epsilon)\mathrm{P}_\epsilon(\mathrm{G}) + \epsilon\right]^{\mathrm{k}}. \quad (4)$$

根据二项式定理，这也可以写为 $\mathrm{PLR_B(G)} = \sum_{i=0}^{\mathrm{k}} \binom{\mathrm{k}}{i} (1-\epsilon)^{\mathrm{k}-i} \mathrm{P}_\epsilon(\mathrm{G})^{\mathrm{k}-i} \epsilon^i$.

B. 能效

系统的能效反映了能量消耗与成功数据传输之间的平衡。了解这种关系有助于我们更好地评估网络的运行可行性，并找出延长设备使用寿命的潜在优化方案。

¯令 E 表示物联网节点在一个 MAC帧内传输其副本所消耗的平均能量。鉴于

以强功率或弱功率传输副本的概率相等，因此我们有

$$\begin{aligned}\bar{\mathsf{E}} &= \bar{\ell}\Big[\frac{1}{2}p_1 + \frac{1}{2}p_2\Big]\mathsf{T} \\ &= \frac{\bar{\ell}}{2}\Big[(1-\alpha)\,\mathsf{P} + \alpha\,\mathsf{P}\Big]\mathsf{T} = \frac{\bar{\ell}\mathsf{P}\mathsf{T}}{2}.\end{aligned}$$

令系统每个时隙成功解码的用户平均数量，即吞吐量，记为 $\mathsf{G}\big[1-\text{PLR(G)}\big]$。则系统的能效定义为以下比值

$$\eta = \frac{2\,\mathsf{G}\big[1-\mathrm{PLR}(\mathsf{G})\big]}{\bar{\ell}\,\mathsf{P}\,\mathsf{T}}. \tag{5}$$

η 表示单位能量消耗所实现的成功数据传输速率。

算法1： 用于推导 $\mathsf{P}_\epsilon(\mathsf{G})$ 的密度演化

输入： G ϵ， Λ_ℓ, ℓ, $\mathsf{I}_{\max}$

输出： $\mathsf{P}_\epsilon(\mathsf{G})$

$\mathsf{q}_0 = 1$
$\mathsf{p}_0 = 1$
$i = 1$
当 $i \le \mathsf{I}_{\max}$ **时**
  $\mathsf{q}_i = \sum_{\ell=1}^{\ell_{\max}} \Lambda_\ell\, \mathsf{p}_{i-1}^{\ell-1}$.
  $\mathsf{p}_i = 1 - e^{-\bar{\ell}\mathsf{G}(1-\epsilon)\mathsf{q}_i}\big[1 + \frac{\bar{\ell}}{2}\mathsf{G}(1-\epsilon)\mathsf{q}_i\big]$
  $i = i+1$
结束
$\mathsf{P}_\epsilon(\mathsf{G}) = \sum_{\ell=1}^{\ell_{\max}} \Lambda_\ell\, \mathsf{p}_{\mathsf{I}_{\max}}^{\ell}$

IV. 渐近分析

可以利用图上的编码理论工具来评估连续干扰消除译码过程的性能 [5], [4]。MAC帧可表示为一个二分图 $\mathcal{G} = \{\mathcal{U}, \mathcal{S}, \mathcal{E}\}$，由 $\mathcal{U}$ 个用户节点、$\mathcal{S}$ 个时隙节点和 $\mathcal{E}$ 条边组成。在图表示中，当且仅当用户 x 在第 y 个时隙中传输了其数据包的一个副本时，一条边 e 连接用户节点 x 和时隙节点 y。

接下来，我们考虑渐近场景，即帧持续时间无限增加，也就是说 $\mathsf{n} \to \infty$，同时用户数与时隙数之间保持成比例关系，即 $\mathsf{m} \propto \mathsf{n}$。这意味着用户将其副本分布到无限长的帧中。在此背景下，我们应用密度演化（DE）算法来预测迭代译码过程的性能。

通过 DE，我们可以针对给定的信道负载 G，通过迭代计算两个关键概率来估计用户解码失败概率 P_ϵ。第一个概率 q_i 表示在第 i 次 SIC 迭代开始时，随机选取的用户尚未被解码的概率。第二个概率 p_i 表示在第 i 次迭代开始时，随机选取的时隙尚未被解析的概率。

鉴于 q_i 反映了用户尚未解析的状态，它可以定义为连接用户节点与时隙节点的边 e 在第 i 次迭代中尚未被移除的概率。当上一次 SIC 步骤中没有任何一个 $\ell-1$ 副本成功解码时，就会出现这种情况，而每个副本成功解码的概率均为 p_{i-1}。因此，我们可以用以下方程表示这种关系

$$\mathsf{q}_i = \sum_{\ell=1}^{\ell_{\max}} \Lambda_\ell\, \mathsf{p}_{i-1}^{\ell-1}. \tag{6}$$

相反，p_i 反映了时隙尚未解决的状态，可表示为

$$\mathsf{p}_i = \sum_{t=1}^{\infty} \tau(t,\epsilon)\, \mathsf{p}_i^{[t]} \tag{7}$$

其中，$\tau(t,\ \epsilon)$表示一条边连接到度为 t 的时隙节点的概率；$\mathsf{p}_i^{[t]}$ 表示在该边连接到度为 t的时隙节点的条件下，该边在第 i次迭代时未被移除的概率。

换言之，$\tau(t,\ \epsilon)$表示时隙内存在 t个碰撞副本的概率；对于无擦除信道，该概率已在 [5]中推导。当考虑 OOF 信道的影响时，可得以下表达式

$$\tau(t,\epsilon) = \frac{[\bar{\ell}\mathsf{G}(1-\epsilon)]^{t-1}}{(t-1)!} e^{-\bar{\ell}\mathsf{G}(1-\epsilon)}. \tag{8}$$

此处，信道负载按因子 $1-\epsilon$ 缩放，以计入 OOF 信道引入的擦除，反映被擦除用户对有效信道负载的影响。

现在来看 $1-\mathsf{p}_i^{[t]}$，它表示包含 t个碰撞副本的时隙在第 i次迭代时被解出的概率。这由两个条件决定。首先，除一个副本外的所有副本，即 $t-1$，都已在该时隙中被消除。该事件发生的概率为$(1-\mathsf{q}_i)^{t-1}$。其次，当该时隙中除两个副本外的所有副本都已被移除，且这两个副本分别以弱功率和强功率发送时，也会解出该时隙。该事件发生的概率为 $1/2(t-1)\mathsf{q}_i(1-\mathsf{q}_i)^{t-2}$。其中，项 $1/2$ 表示具有两个功率等级的概率，而项$(t-1)\mathsf{q}_i(1-\mathsf{q}_i)^{t-2}$则表示从时隙中消除所有副本的所有可能方式。进一步将此结果和 (8) 代入 (9)，可得

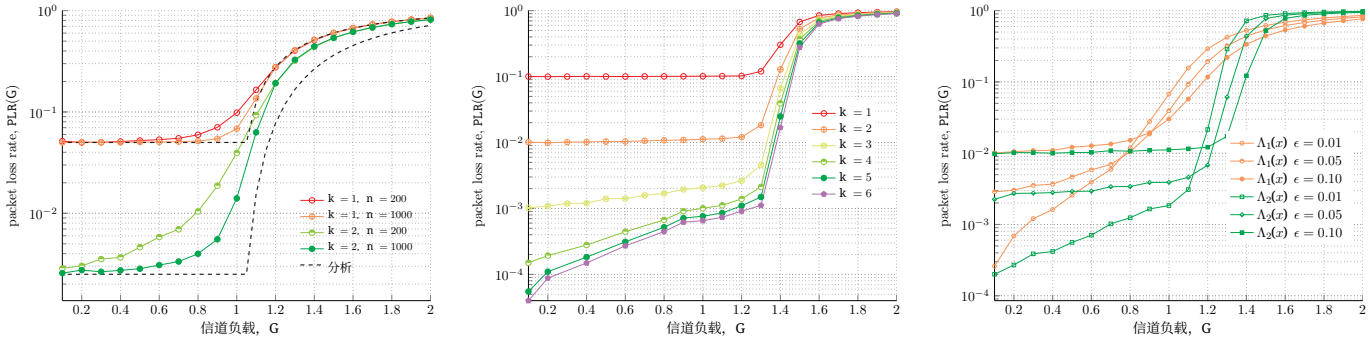
$$\begin{aligned}\mathsf{p}_i = \sum_{t=1}^{\infty} &\frac{[\bar{\ell}\,\mathsf{G}(1-\epsilon)]^{t-1}}{(t-1)!} e^{-\bar{\ell}\mathsf{G}(1-\epsilon)} \\ &\times \Big[1-(1-\mathsf{q}_i)^{t-1}\big(1+\frac{t-1}{2}\frac{\mathsf{q}_i}{1-\mathsf{q}_i}\big)\Big].\end{aligned}$$

经过简单变换，$\mathsf{p}^{(i)}$ 可表示为

$$\mathsf{p}_i = 1 - e^{-\bar{\ell}\,\mathsf{G}\,(1-\epsilon)\mathsf{q}_i}\Big[1 + \frac{\bar{\ell}\,\mathsf{G}(1-\epsilon)\,\mathsf{q}_i}{2}\Big] \tag{9}$$

注意到 $\sum_{t=1}^{\infty} \frac{x^t}{t!} = e^t$。

然后通过迭代方程（6）和（9）来执行 DE 算法。算法1提供了执行 DE 的伪代码算法。输入包括信道负载



(a) 度分布 $\Lambda_1(x)$，信道擦除概率 $\epsilon = 0.05$，适用于 k 个卫星和 n 个时隙

(b) 度分布 $\Lambda_2(x)$，信道擦除概率 $\epsilon = 0.10$，对于 k 颗卫星，共有 $n = 200$个时隙

(c) $n = 200$ 个时隙，k 个 $= 2$ 接收机，对应度 $\lambda(x)$分布和信道擦除概率 ϵ

图 2：分组丢失率 PLR 随信道负载 G 的变化。

G、信道擦除概率 ϵ、副本度分布参数 $\bar{}$ 和 Λ_ℓ，以及 DE 的最大迭代次数 I_{max}。初始条件设为 $q_0 = 1$ 和 $p_0 = 1$。该算法的输出是在所评估信道负载下的用户译码失败概率，表示为

$$P_\epsilon(G) = \sum_{\ell=1}^{\ell_{max}} \Lambda_\ell \, p_{I_{max}}^{\ell}. \tag{10}$$

在结果中，我们展示了由密度演化定义的式（4）中的分组丢失率，会随着帧持续时间的增加而变得更加准确。

V. 数值结果

现在，我们针对所提出的系统，在考虑以下度分布的情况下给出数值结果

$$\Lambda_1(x) = x^2 \text{ and } \Lambda_2(x) = 0.5465x^2 + 0.1623x^3 + 0.2912x^8.$$

文献中已经对分布 $\Lambda_2(x)$进行了研究，例如文献 [5],表明其性能较强。根据所提出的NOMA方案，只要按照第II-B节中的说明选择参数 α、p_1和 p_2，系统性能就与峰值功率 P[4] 无关。为简单起见，我们假设单位峰值功率$P = 1$和单位持续时间$T = 1$。每个节点消耗的平均能量和能效值仅随P和T简单缩放。

让我们利用$I_{max} = 100$时DE算法的输出，评估式(2)中推导出的丢包率上界的紧致性。例如，考虑$G = 1.2$、$\epsilon = 0.05$、$\bar{}$ 和 $\Lambda_1(x)$，则副本的平均数量为 $\ell = 2$。我们发现$p_1 = 0.7811$、$p_2 = 0.6815$、$p_3 = 0.6243$. 和$p_{100} = 0.4902$，由此根据式(10)得到$P_\epsilon(G = 1.2) = 0.2403$，该结果与仿真结果一致。

在图 2a 中，绘出了系统的 PLR(G) 随信道负载的变化曲线，对应于 $\Lambda_1(x)$ 分布、$k = \{1, 2\}$ 个接收机以及信道擦除概率 $\epsilon = 0.05$。图中显示，仿真中观察到的趋势（带标记的曲线）与分析结果（虚线）一致。

[4]请注意，PLR 和 P_ϵ 的表达式与峰值功率 P 无关。

显然，随着所考虑的每帧时隙数增加，仿真结果会逐渐趋近于推导出的解析值。正如预期，接收机数量每增加一个，系统性能便会显著提升：当信道负载达到 $G = 1$ [分组/时隙] 之前，分组丢失率会降低一个数量级。请注意，对于单个接收机，在低和中等信道负载下，分组丢失率主要受信道条件影响，因此会出现由 ϵ 决定的误差平台。接下来，我们将展示，在采用更多接收机或其他度分布时，这种影响如何减弱。

请注意，$\Lambda_2(x)$的比较分析和仿真结果与 $\Lambda_1(x)$更加吻合，这是因为该度分布表现出更优越的性能。然而，由于篇幅限制，我们不在此展示这些结果。

所推导的上界可以快速评估趋势以及参数设计对性能的影响。它还能揭示给定一组参数时所能达到的最佳结果的极限。

现在来评估接收机数量增加所带来的影响。在此情形下，我们考虑包含 $n = 200$ 个时隙的 MAC帧、OOF擦除概率为 $\epsilon = 0.10$、度分布为 $\Lambda_2(x)$，以及数量从 $k = 1$ 到 $k = 6$不等的接收机。图 2b 绘出了系统的仿真丢包率 PLR 随信道负载 G 变化的情况。正如预期，卫星接收机数量增加时，性能会有所提升。同样在此情形下，从一颗卫星增加到两颗卫星可带来显著的分集增益。不过，每增加一颗卫星所带来的收益都会递减，最终趋于平稳。事实上，$k = 6$ 个接收机相较于 $k = 5$ 个接收机的影响已微乎其微。这是因为接收分集有助于减轻信道造成的损失。然而，一旦克服了这些信道损失，进一步的损失主要源于连续干扰消除解码失败。随着接收分集增加，信道的影响会减弱，分组丢失主要由连续干扰消除的局限性造成。

在下一个场景中，我们展示了度分布 $\Lambda(x)$ 在不同信道条件下的影响，如图 2c 所示，接收机数量为 $k = 2$。带圆形标记的曲线

对应度分布 $\Lambda_1(x)$，而不带圆形标记的曲线表示度分布 $\Lambda_2(x)$。正如预期，度分布会显著影响丢包率性能。在实际信道负载下，$\Lambda_2(x)$ 的表现明显优于 $\Lambda_1(x)$。信道引入的擦除越少，这一优势就越明显，例如通过降低 ϵ 来减少擦除。然而，在信道损伤严重且信道负载较低的情况下（例如 $\epsilon = 0.10$ 且负载 $\mathsf{G} < 0.6$），两种分布的性能差异会变得微乎其微。这一发现有助于针对这些条件优化配置，并评估能效等其他关键性能指标。

在最后一种场景中，我们评估了不同网络配置下系统的能效，如图3所示。能效会随着信道负载线性增长，直至达到临界点；该点对应系统所能支持的最大吞吐量，之后能效便会下降。对于所考虑的每个信道擦除值和卫星数量，分布 $\Lambda_1(x)$ 的能效都高于 $\Lambda_2(x)$。这主要是因为采用 $\Lambda_1(x)$ 时，物联网设备平均发送的副本少于采用 $\Lambda_2(x)$时，即 $\ell = 2$ 与 $\ell = 3.3271$相比。尽管 $\Lambda_2(x)$实现了更高的吞吐量，但式(5)中平均发送副本数所受的影响更为显著。此外，对于固定的分布和单个接收机，能效趋势会随擦除率变化而改变。这是由于信道中的擦除传输导致吞吐量发生变化。正如预期的那样，增加第二个接收机可提升η，因为在固定信道负载下，能够成功解码的用户更多。在考虑多个接收机时，信道条件越差，能效提升越明显。这种效应在较高信道负载下尤为显著，此时解码失败受SIC算法的影响更大。信道条件恶化时，每个接收机捕获到的MAC帧视角各不相同，因此能够成功解码的用户数量更多。

VI. 结论

我们研究了非地面网络中采用 NOMA-IRSA 方案的物联网网络里，多卫星接收机所产生的影响。我们推导了丢包率和能效的表达式，并建立了密度演化分析，通过蒙特卡洛仿真对其进行了验证。我们的结果揭示了关键的权衡关系，突显了接收机数量、度分布和信道条件在评估网络性能中的作用。此分析为在严苛的非地面环境中设计更具韧性且能效更高的物联网网络提供了重要见解。

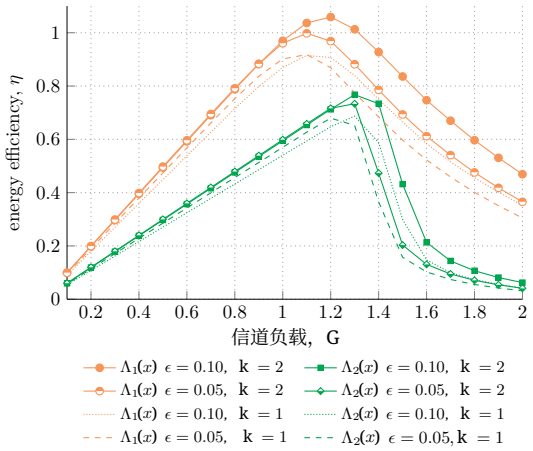


图3：物联网能效 η 随信道负载 G 的变化关系，适用于 $\mathsf{k} = 1$, 2 个接收机、 $\Lambda_1(x)$ 和 $\Lambda_2(x)$，对应不同的 OOF擦除概率，以及 $\mathsf{n} = 200$ 个时隙。

参考文献

[1] A. Vanelli-Coralli、A. Guidotti、T. Foggi、G. Colavolpe 和 G. Montorsi，“5G及后5G非地面网络：趋势与研究挑战”，载于*2020*年*IEEE*第三届*5G*世界论坛 *(5GWF)*，2020年。[2] C. Amatetti、A. Guidotti 和 A. Vanelli-Coralli，面向*6G*时代的物联网机器类通信与卫星融合，2024年，第37–66页。[3] D. Nguyen、M. Ding、P. Pathirana、A. Seneviratne、J. Li、D. Niyato、O. Dobre 和 V. Poor，“6G物联网：全面综述”，*IEEE*物联网期刊，第9卷，第1期，第359–383页，2022年。

[4] M. Berioli、G. Cocco、G. Liva 和 A. Munari，现代随机接入协议。NOW出版社，2016年。[5] G. Liva，“竞争解决分集时隙ALOHA的基于图的分析与优化”，*IEEE*通信汇刊，第59卷，第2期，第477–487页，2011年。[6] ETSI EN 301 545-2 V1.2.1，“数字视频广播（DVB）；交互式卫星系统”，2014年。[7] J. Choi，“采用多信道ALOHA的基于NOMA的随机接入”，*IEEE*通信选定领域期刊，第35卷，第12期，第2736–2743页，2017年12月。[8] I. Ramatryana 和 S. Y. Shin，“面向下一代物联网网络、带接入控制的基于NOMA的CRDSA”，载于*2021*年（*ICTC*），2021年。[9] S. Alvi、S. Durrani 和 X. Zhou，“利用发射功率分集增强机器类通信中的CRDSA”，*IEEE*车辆技术汇刊，第67卷，第8期，第7790–7794页，2018年。[10] Y.-C. Huang、S.-L. Shieh、Y.-P. Hsu 和 H.-P. Cheng，“采用NOMA的异构设备时隙ALOHA迭代碰撞消解”，*IEEE*通信汇刊，第69卷，第5期，第2948–2961页，2021年5月。[11] X. Shao、Z. Sun、M. Yang、S. Gu 和 Q. Guo，“面向卫星网络的基于NOMA的不规则重复时隙ALOHA”，*IEEE*通信快报，第23卷，第4期，第624–627页，2019年。[12] A. Munari、F. Clazzer、G. Liva 和 M. Heindlmaier，“多中继时隙ALOHA：性能分析与界”，*IEEE*通信汇刊，第69卷，第3期，第1578–1594页，2021年3月。[13] F. Formaggio、A. Munari 和 F. Clazzer，“基于免授权的机器类通信中的接收分集”，自组网，第107卷，文章编号102245，2020年。[14] B. Zhao、G. Ren 和 H. Zhang，“低地球轨道卫星网络中的多卫星协作随机接入方案”，*IEEE*系统期刊，第13卷，第3期，第2617–2628页，2019年9月。[15] C. Feng、X. Chen、Z. Chen、Z. Tian、Y. Jia 和 M. Wang，“分组擦除信道中采用多分组接收的不规则重复时隙ALOHA方案”，载于*2022*年（*ICAIIC*）。IEEE，2022年2月。[16] E. Recayte、L. Badia 和 A. Munari，“通过两步干扰消除实现不规则重复时隙ALOHA节能”，载于*2024*年全球通信会议——*2024*年*IEEE*全球通信会议，2024年。[17] E. Recayte、T. Devaja 和 D. Vukobratovic，“面向物联网卫星系统的节能型不规则重复时隙ALOHA”，载于*2024*年*IEEE*国际通信会议，2024年。[18] E. Perron、M. Rezaeian 和 A. Grant，“开关衰落信道”，载于*IEEE*国际信息论研讨会，*2003*年。会议录。，2003年，第244–244页。