arXiv:2601.00317v1 [cs.ET] 1 Jan 2026

NOMA-不规则重复时隙ALOHA的错误地板评估

Estefan´ıa Recayte，*IEEE*会员

摘要——**本文针对基于非正交多址接入（NOMA）的不规则重复时隙ALOHA（IRSA）方案，给出了误差平台区域内分组丢失率的简洁且精确的解析近似。考虑物联网（IoT）场景，用户根据设计的度分布随机选择副本数量，并从预设的功率等级中选择传输功率，同时在接收机处执行连续干扰消除（SIC）。我们推导出的有限长度区域内分组丢失率表达式可迅速求得。通过蒙特卡洛仿真验证了该表达式的准确性，结果表明其在不同信道负载下均与仿真高度吻合，包括超出低负载区域的情况。**

索引词——**非正交多址接入、不规则重复时隙ALOHA、错误地板评估、有限长度**

I. 引言

物联网（IoT）、大规模机器类通信（mMTC）和6G技术的融合有望彻底改变连接方式，使大量低成本设备能够无缝交换数据 [1]。物联网和mMTC的一个关键方面是实现高效的介质接入方法，以处理海量设备的随机传输。现代随机接入协议在这一背景下发挥着关键作用 [2],，为管理物联网部署中动态且通常不可预测的连接需求提供灵活且可扩展的解决方案。这些协议使设备无需预先协调即可接入网络，在确保可靠、及时的数据传输的同时优化资源利用率。

现代随机接入方案的一项重要贡献是在 [3], 中提出的非规则重复时隙ALOHA（IRSA）。该协议将分组分集与连续干扰消除（SIC）相结合，从而能够解决碰撞。在IRSA中，用户根据预先设计的分布，在一个帧中传输数量可变的副本。随后，研究人员在 [4]–[5] 中将每个用户的功率分集以及在 [6], [7]中将每个副本的功率分集引入IRSA协议。功率分集的优势在于能够利用捕获效应，使SIC算法即使在多个用户于同一时隙传输时，也能解决碰撞。

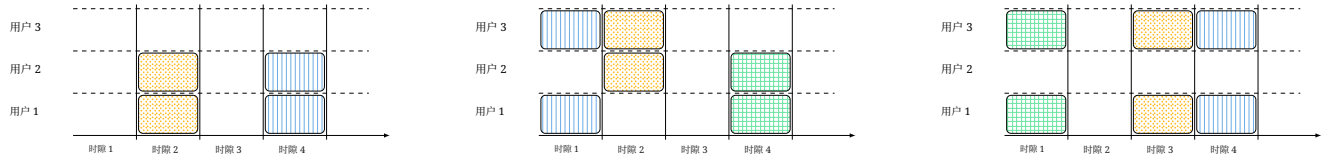
与此同时，最初为下行传输提出的基于NOMA的方案，也在开创性工作 [8] 中被引入随机接入。NOMA方案依赖于准确定义一组供用户选择的功率级别。这种方法确保涉及不同功率级别数据包的碰撞能够得到有效解决。因此，SIC算法兼具发送多个数据包所带来的分集增益和功率级别带来的分集增益。在此背景下，基于NOMA的随机接入方案近年来受到广泛研究。

文献 [9], 给出了 NOMA-ALOHA方案吞吐量的界限，并分析了稀疏用户活动的大规模物联网场景下的最优负载。文献 [10]评估了衰落信道中 NOMA方案的吞吐量及成功概率界限，研究对象包括采用两次传输的 CRDSA 和 IRSA。文献 [11], 的作者研究了采用 NOMA 的时隙ALOHA方案的渐近性能，以预测其吞吐量表现。该分析假设用户可以将副本放置在无限长帧内。这一假设有助于有效运用密度演化来理解系统行为。同样，文献 [12]也通过密度演化对 IRSA 的一个特例，即竞争解决多样性时隙ALOHA（CRDSA），进行了渐近分析。文献 [13],在渐近条件下，利用密度演化联合优化了 NOMA编码时隙ALOHA的副本度分布和功率分布。这种现代随机接入协议将分组级擦除纠错码与串行干扰消除技术相结合。同样，文献 [14] 针对 NOMA-IRSA 进行了渐近分析，重点优化度分布和功率级别。

在现有文献中，大多数研究都假设帧长无限，考察NOMA 随机接入方案的性能 [9], [11]–[14], ，主要评估高信道负载下的系统行为。然而，据我们所知，这些方案在非渐近区间的性能尚未得到探究。为弥补这一空白并补充现有文献，本文研究了更具实际意义的有限帧长情况下NOMA-IRSA 方案的性能。具体而言，我们针对低至中等信道负载（即误差平台区域）推导了分组丢失率的紧解析近似。

不同于 [15] 和 [16], 提出的精确但复杂的近似，我们在此基于球入箱（BiB）问题，给出一种计算高效的一次性表达式。在 [16]中，作者在帧非常短的假设下，为IRSA 方案提出了一种近似，其适用范围仅限于最多 50 个时隙。相比之下，本文评估了 NOMA-IRSA 方案，并证明其即使在帧长显著增加时仍然有效。此外，我们提出了一种简化的误差平台评估方法，具有一种

Estefan´ıa Recayte 任职于德国航空航天中心（DLR）通信与导航研究所，地址为德国韦斯林，邮编 82234。电子邮箱：{estefania.recayte}@dlr.de。版权所有 (c) 2025 IEEE。允许将本材料用于个人用途。但如需将本材料用于任何其他用途，必须向 IEEE 发送请求至 pubs-permissions@ieee.org，以取得许可。



(a) $\mathcal{S}_1$, $\mu_1 = 2$ 个时隙, $\nu_1 = 2$ 个用户　(b) $\mathcal{S}_2$, $\mu_2 = 3$ 个时隙, $\nu_2 = 3$ 个用户　(c) $\mathcal{S}_3$, $\mu_3 = 3$ 个时隙, $\nu_3 = 2$ 个用户

图1. NOMA-基于 d IRSA 中具有相应数量用户和时隙的停止集。填充颜色图案表示不同的功率级 ls.

紧凑且便于解析处理的形式，与 [15], [17], [18]相比所需的运算次数显著更少。

本文还扩展了 [19]，中提出的研究，该研究针对低信道负载条件下的多分组检测场景以及特定度分布，估算分组丢失率。在结果部分，我们表明，与 [19] 中给出的评估相比，本文提出的解能够为 NOMA-IRSA 方案提供更准确的结果。

最后，我们通过蒙特卡洛仿真验证了所提出的表达式，结果表明，即使对于在中等信道负载下运行的系统，该表达式也能与仿真结果高度吻合。

本文其余部分安排如下。第二节介绍系统模型，第三节推导分组丢失率的近似表达式。第四节给出数值结果，第五节总结全文。

II. 系统模型

我们考虑这样一个系统： m 个未协调的物联网活跃节点（用户）通过共享上行无线信道向同一接收机发送数据包。一个媒体接入控制（MAC）帧由 n 个连续时隙组成，每个时隙的时长等于一个数据包的传输时长。用户之间在帧和时隙级别保持同步。系统信道负载 G 为

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

本文考虑一种 NOMA-IRSA 方案。按照 IRSA 协议，每个用户发送所生成数据分组的 r 个副本，并将其均匀地放置在一帧中 n 个可用时隙内。要发送的副本数 r 由预定义的度分布决定。IRSA 度分布的多项式表达式可写为 [3]

$$\Lambda(x) = \sum_{r=2}^{r_{\max}} \lambda_r x^r, \text{ with } \sum_{r=2}^{r_{\max}} \lambda_r = 1, \tag{1}$$

其中， λ_r 表示用户发送 r个副本的概率。每个副本都带有一个指针，用于指示其副本在帧中的放置位置。接收机在解码过程中会使用这些信息。

确定要传输的副本数量后，用户按照 [8] 中的建议，从 L 个可用选项中均匀选择每个副本的发射功率级。我们将功率级别记为

$$p_1 > ... > p_L > 0, \text{ with } p_k = \gamma(I_k + 1),$$

其中， γ 是目标信干噪比（SINR）， $I_k = \sum_{j=k+1}^{L} p_j$ ，且 $I_L = 0$。经过简单变换，第 k 个功率级别可写为

$$p_k = \gamma(\gamma+1)^{L-k}. \tag{2}$$

在接收端执行串行干扰消除（SIC）。假设使用容量逼近码， [3], 接收机能够解码信干噪比（SINR）达到或超过预定义阈值的副本，信干噪比记为 Γ，即 $\Gamma \geq \gamma$。请注意，功率级别的定义确保无干扰副本始终可以解码。此外，可以通过迭代消除时隙中功率最高的副本，来解析包含不同功率级别所发送副本的时隙。一旦某个副本被解码，接收机便可确定其副本的位置，并从帧中减去这些副本的贡献 [3]。解码器可以对每个时隙以及整个帧进行多轮迭代，直到所有副本均被解码，或不再存在满足 $\Gamma > \gamma$ 的副本。

下面通过一个简单的例子说明SIC算法的行为，重点讨论同一时隙接收到多个副本的情况。

例*1*：我们来看一个例子，以说明解码失败的情况。假设有 $L = 3$ 个功率级别，且两个用户使用相同的功率级别在同一时隙发送，例如 $p_2 = \gamma(\gamma+1)$。要成功解码一个副本，其信干噪比必须至少达到 γ。如果两个副本以相同的功率级别在同一时隙发送，则任一副本的信干噪比为

$$\Gamma = \frac{\gamma(\gamma+1)}{1+\gamma(\gamma+1)}.$$

该值严格小于 γ，因此接收机在这种情况下会解码失败。反过来，考虑三个用户在同一时隙以不同功率级别发送各自副本的情况。功率值为 $p_1 = \gamma(\gamma+1)^2, p_2 = \gamma(\gamma+1)$ $p_3 = \gamma$。以 p_3 发送的用户的信干噪比为

$$\Gamma = \frac{\gamma(\gamma+1)^2}{1+\gamma(\gamma+1)+\gamma} = \gamma.$$

由于这满足解码阈值 γ，因此成功解码了发射功率为 p_3 的副本。随后，通过串行干扰消除抵消该副本的贡献，发射功率为 p_2 的用户的信干噪比变为

$$\Gamma = \frac{\gamma(\gamma+1)}{1+\gamma} = \gamma$$

这再次足以进行解码。第二个副本被消除后，剩余的副本不受干扰，并以 γ 的信噪比进行解码。

III. 分组丢失率近似

本节将利用球入箱问题（BiB）的结果，推导丢包率（PLR）的紧致单次公式近似。

A. 球入箱问题

一般的球入箱问题，参见例如 [20], , 由将 $\bar{m}$ 个球独立地投入 b 个箱中构成。该设置可映射到 NOMA-IRSA 场景，其中每个球代表一个发送其副本的用户，而 b 个箱代表用户可放置副本的所有可能时隙组合。

按照这一对应关系，多个球落入同一个箱，对应于多个用户在相同的时隙中发送其副本。球入箱问题使我们能够评估包含 t 个球的箱数分布。令Y_t 为表示恰好包含 t 个球的箱数的随机变量（rv）。那么，根据 [20],, 我们有

$$\Pr\{Y_t = y_t\} = \frac{\bar{m}!}{\bar{b}^{\bar{b}}} \sum_{k=0}^{\bar{b}-y_t} (-1)^k \binom{y_t+k}{y_t} \frac{(\bar{m}-k)^{\bar{m}-y_t}}{(t!)^k(\bar{m}-kt)!}.$$

如 [20], 所示，对于 $\bar{m} \to \infty$，随机变量 Y_t 可近似为参数为 β_t的泊松随机变量，即

$$Y_t \sim \mathcal{P}(\beta_t) \text{ and } \beta_t = \frac{\bar{b}}{t!}\Big(\frac{\bar{m}}{\bar{b}}\Big)^t.$$

B. 将分组丢失率表示为 BiB

分组丢失率（PLR）定义为用户在串行干扰消除过程结束时未能成功解码的概率。在 IRSA 中，可以通过分析所谓的停止集 [15]来近似误差平台区域内的 PLR。停止集是一种配置：多个用户在相同的时隙中发送副本，导致解码器陷入停滞，无法解码其中任何一个用户。停止集由ν（涉及的用户数）和 μ（涉及的时隙数）来表征。引入功率分集后，例如在 NOMA-IRSA 方案中，如果以下两个相互独立的事件同时发生，采用串行干扰消除的接收机便无法在误差平台区域内解码用户：(i) 用户的副本属于某个停止集；(ii) 该停止集中的每个时隙都包含以相同功率级别发送的数据包。为考虑副本以相同功率发送的情况，我们作如下处理。我们用 $\sigma(\mu)$表示这样一个事件：停止集的每个 μ时隙都包含发生碰撞且以相同功率发送的副本。若总共考虑 L 种不同的功率级别，则有

$$\Pr\{\sigma(\mu)\} = \frac{1}{L^\mu}.$$

我们通过考虑 NOMA-IRSA 中可能出现的三种概率最高的停止集来评估误差平台，分别记为 $\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2, \mathcal{S}_3\}$。图1展示了每种停止集的一个示例。停止集 $\mathcal{S}_1$ 由两个用户组成，每个用户都在相同的时隙以相同的功率发送两个副本。停止集 $\mathcal{S}_2$ 由三个时隙和三个用户组成，每个用户在不同的时隙发送两个副本，因而产生碰撞，且每个用户都干扰另外两个用户。同样在这种情况下，每个时隙都包含发生碰撞的副本，且功率相同。停止集 $\mathcal{S}_3$ 由两个用户组成，每个用户都在相同的三个时隙以相同的功率发送三个副本。注意，只有当 IRSA 分布 (1) 中用户发送两个副本的概率非零时，$\mathcal{S}_1$ 和 $\mathcal{S}_2$ 才可能出现，即 $\lambda_2 > 0$。同样，只有当 $\lambda_3 > 0$ 时，$\mathcal{S}_3$ 才可能出现。请注意，这些是所评估的 NOMA-IRSA方案中最具代表性的停止集。结果表明，它们足以准确评估性能。

表 I m 用户和 n 时隙下所考虑的停止集参数

i	μ_i	ν_i	$\bar{m}$	$\bar{b} = b(\mu_i,\ \nu_i)$
1	2	2	$\lambda_2 m$	$\binom{n}{2}$
2	3	3	$\lambda_2 m$	$\binom{n}{2}/\sqrt{2(n-2)}$
3	3	2	$\lambda_3 m$	$\binom{n}{3}$

我们将用户在相同时隙传输的情形建模为球入箱问题，从而推导停止集 $\mathcal{S}_i$ 出现的概率。

给定 m 个用户和 n 个时隙，停止集 $\mathcal{S}_i$ 在一帧内出现 u 次的概率为 $\Pr\{Y_{\nu_i} = u\}$。可参与停止集的用户平均数量（对应于球的数量）为：对于停止集 $\mathcal{S}_1$ 和 $\mathcal{S}_2$，为 $\bar{m} = \lambda_2 m$；对于停止集 $\mathcal{S}_3$，为 $\bar{m} = \lambda_3 m$。表 I 列出了每个停止集的参数值：$\bar{}$， ν_i，μ_i，$\bar{m}$ 和 $b = b(\mu_i, \nu_i)$。在附录部分，我们讨论并解释了推导过程 $b(\mu_2,\ \nu_2) = b(3,\ 3)$，这一情形与经典球入箱问题并无直接对应关系。

通过计算每个停止集中包含用户的概率，可以近似得到分组丢失率。该概率是参与碰撞的用户数（有利情况）与传输总数（所有情况）之比，以及同一时隙内副本以相同功率传输的概率，如下所示

$$\begin{aligned}\texttt{PLR} &\approx \sum_{\mathcal{S}_i \in \mathcal{S}} \Pr\{\sigma(\mu_i)\} \frac{\sum_{u=1}^{\infty} \nu_i u \Pr\{Y_{\nu_i} = u\}}{m} \\ &= \sum_{\mathcal{S}_i \in \mathcal{S}} \frac{1}{L^{\mu_i}} \frac{\nu_i}{m} \sum_{u=1}^{\infty} u \Pr\{Y_{\nu_i} = u\}.\end{aligned}$$

回想一下，Y_{ν_i}可以认为服从泊松分布，因此 $\Pr\{Y_{\nu_i} = u\} = \frac{(\beta_{\nu_i})^u}{u!} e^{-\beta_{\nu_i}}$ 我们可以将前面的表达式写为

$$\texttt{PLR} \approx \sum_{\mathcal{S}_i \in \mathcal{S}} \frac{1}{L^{\mu_i}} \frac{\nu_i}{m} \sum_{u=1}^{\infty} u \frac{(\beta_{\nu_i})^u}{u!} e^{-\beta_{\nu_i}}.$$

观察到

$$\sum_{u=1}^{\infty} u \frac{(\beta_{\nu_i})^u}{u!} e^{-\beta_{\nu_i}} = \beta_{\nu_i},$$

$$\text{PLR} \approx \frac{1}{L^2}\frac{2\,(\lambda_2)^2\,m}{n(n-1)} + \frac{1}{L^3}\frac{2(n-2)(\lambda_2\,m)^2}{n^2(n-1)^2} + \frac{1}{L^3}\frac{6\,(\lambda_3)^2\,m}{n\,(n-1)\,(n-2)}. \tag{5}$$

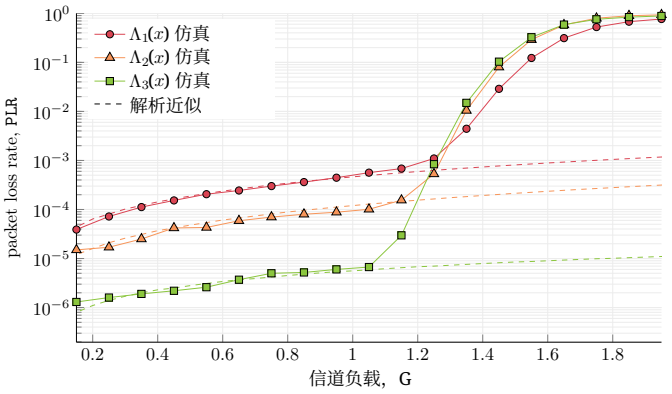


图 2. 当 NOMA-IRSA 采用 $n = 200$ 个时隙、 $L = 3$ 个功率级别以及 $\Lambda_1(x)$ 、 $\Lambda_2(x)$ 和 $\Lambda_3(x)$ 时，分组丢失率随信道负载的变化。带标记的曲线表示仿真结果，虚线对应式（5）给出的解析近似。

我们有

$$\begin{aligned}\text{PLR} &\approx \sum_{\mathcal{S}_i\in\mathcal{S}} \frac{1}{L^{\mu_i}}\frac{\nu_i}{m}\frac{\bar{b}}{\nu_i!}\left(\frac{\bar{m}}{\bar{b}}\right)^{\nu_i} \\ &\approx \sum_{\mathcal{S}_i\in\mathcal{S}} \frac{1}{L^{\mu_i}}\frac{1}{(\nu_i-1)!}\left(\frac{\bar{m}}{\bar{b}}\right)^{\nu_i-1}.\end{aligned} \tag{3}$$

最后，将表 I 中的数值代入式（3）中的各个停止集，并进行直接推导，即可得到式（5）给出的分组丢失率近似方程。

式（5）解决了处理更复杂表达式这一难题；在误差平台区域评估分组丢失率时，通常需要这类表达式，例如文献 [15]–[18] 中的做法。所提出的表达式通过紧凑且便于解析处理的形式降低了复杂度。

起初，人们或许会认为所提出的表达式是分组丢失率（PLR）的一个上界，因为它考虑了接收机有限次卡滞的情况，但这一说法无法得到严格证明。这一局限源于式（5）是基于近似得出的。首先，发送两个或三个副本的用户数分别通过平均值 $\bar{\text{m}} = \lambda_2\,\text{m}$ 和 $\bar{\text{m}} = \lambda_3\,\text{m}$ 进行估计。其次，恰好包含 ν_i 个用户的时隙数（记为 Y_{ν_i}）通过泊松随机变量进行近似。这两种近似使得最终的分组丢失率表达式无法被正式归类为上界。

IV. 数值结果

本节将检验所提出的丢包率近似的有效性。我们考察不同的设置，并将仿真结果与式（5）中给出的解析形式进行比较。

在第一个场景中，我们考虑帧长为 $n = 200$个时隙、目标信干噪比为 $\gamma = 3$dB，以及 $L = 3$ 种不同的功率级别。根据式 (2)，我们有 $p_1 = 17.9007$、 $p_2 = 5.9763$ 和 $p_3 = 1.9953$. 。对于 $n = 200$、 $\mu_2 = 3$ 和 $\nu_2 = 3$, 箱数由 $b(3,3) = 1000$ 给出。图 2 展示了 NOMA-IRSA 的分组丢失率（PLR）随信道负载变化的曲线。我们考虑了以下度分布；这些分布在文献中广泛使用，且已知具有良好性能 [3],

$$\begin{aligned}\Lambda_1(x) &= 0.50x^2 + 0.50x^3, \\ \Lambda_2(x) &= 0.25x^2 + 0.60x^3 + 0.15x^8, \text{ and} \\ \Lambda_3(x) &= x^3.\end{aligned}$$

标记曲线对应蒙特卡罗仿真，虚线则表示式（5）给出的分组丢失率近似。值得注意的是，在误差平台区域内，对于所有考察的 IRSA 度分布，推导出的丢包率都能准确预测仿真结果。需要注意的是，基于 NOMA 的 IRSA 方案的误差平台区域不仅包括低信道负载，也包括中等信道负载。若关注实际应用中有意义的丢包率，例如 10^{-3}，我们可以观察到，信道负载最高可达 1.20 [包/时隙]。

这些初步结果表明，所提出的表达式适用于评估 NOMA 基随机接入。该表达式可快速、简便地评估系统性能，即使在分组丢失率极低时仍能保持准确。

需要注意的是，推导出的近似在误差平台区域内有效，但如预期所示，在高信道负载下，也就是瀑布区内，会出现偏差。这种偏差源于高负载下 SIC算法的表现受到停止集以外因素的影响。具体而言，过高的业务流量可能导致串行干扰消除过程停滞。对于 NOMA-IRSA，假设帧无限长，即可对瀑布区进行解析评估；文献中已对此情形进行了广泛研究，例如 [9], [11]–[14]。

在图3所示的第二种场景中，我们绘制了度分布 $\Lambda_1(x) = 0.50x^2 + 0.50x^3$ 下分组丢失率随信道负载变化的曲线。分析针对所考虑的不同功率级别 L 进行，帧长为 $n = 200$ 个时隙，目标信干噪比为 $\gamma = 3$。这些结果旨在将我们的评估与 [19]提出的研究结果进行比较。正如预期，随着功率级别数量的增加，分组丢失率有所改善。这是因为更高的概率使接收机能够遇到功率级别不同的碰撞副本，从而解决更多碰撞。请注意，增加功率级别数量会带来更高能耗，因此系统性能与能耗之间存在权衡。这种平衡需要专门研究。虚线表示所提出的近似，对于所考虑的任意数量的功率级别，该近似在误差平台区域内仍然准确。点线表示仅考虑停止集 $\mathcal{S}_1$ 的结果，这与 [19]提出的方法一致。它

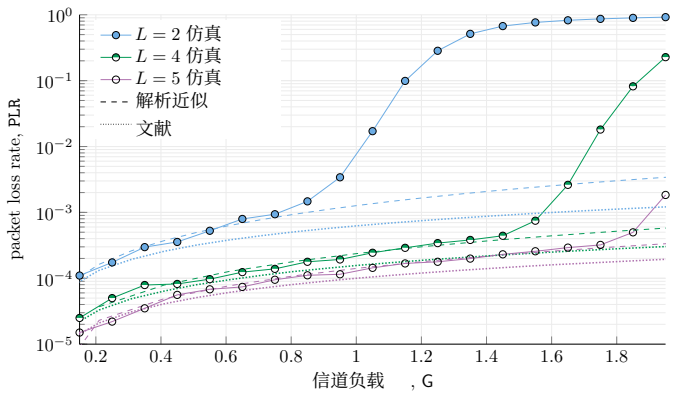


图3。NOMA-IRSA在$n = 200$ 个时隙、 $\Lambda_1(x)$ 以及不同功率级别下的分组丢失率随信道负载的变化。带有标记的曲线表示仿真结果，虚线表示式（5）给出的近似，点线表示文献 [19]中的结果。

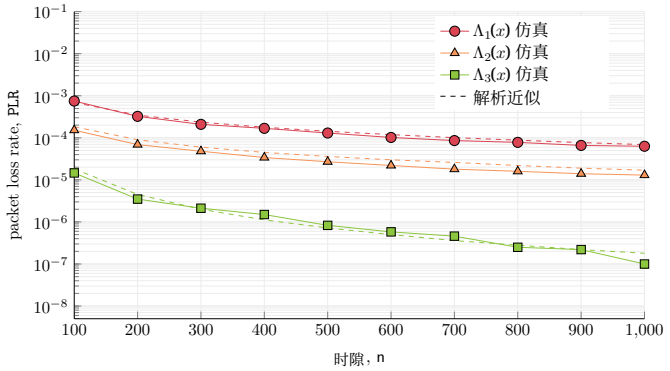


图 4 $= 0.80$ 。对于 [ ] $L = 3$ $\Lambda_1\ x$ $\Lambda_2\ x$ $\Lambda_3\ x$ NOMA-IRSA，在G包/时隙、功率级别、（） （）以及（）条件下，分组丢失率随帧长的变化。带有标记的曲线表示仿真结果，而虚线对应于式（5）给出的解析近似。

可以看出， [19] 中的近似仅在信道负载较低时效果良好；当信道负载升至中等水平时，其准确性会降低。这是因为对于许多度分布，随着发送用户数量增加， $\mathcal{S}_2$ 和 $\mathcal{S}_3$ 发生的概率会变得不可忽略。该图表明，对于L的任意取值，所提出的分析评估始终优于现有近似的性能。

最后，我们进一步评估了所提出的近似在不同媒体接入控制帧长下的表现。在最后一种场景中，我们考虑$\Lambda_1(x)$ $\Lambda_2(x)$， 以及 $\Lambda_3(x)$，其中包含 $L = 3$ 个功率级别，目标信干噪比为 $\gamma = 3$，固定信道负载G为 $= 0.80$ 包/时隙。如图4所示，对于帧中所考虑的 n 个时隙的每一个取值，以及所有IRSA分布，该近似均保持准确。增加可用时隙的数量会降低分组丢失率，因为用户经历锁定状态的概率会随之降低。

V. 结论

本文评估了 NOMA-IRSA 方案在有限帧长下、面向物联网和 mMTC 应用的分组丢失率。本文给出了丢包率性能的紧密近似，并通过蒙特卡罗仿真进行了验证。结果表明，对于不同的度分布、功率级别和帧长，分析结果均与仿真结果完美吻合。所提出的分析方法可快速、简便地评估系统性能，为物联网网络设计提供了有价值的参考。

此外，尽管以往研究聚焦于 NOMA-IRSA 方案的渐近分析，本研究通过评估误差平台区域内的有限长度行为，对这些研究进行了补充。

附录

¯对于停止集 $\mathcal{S}_1$ 和 $\mathcal{S}_2$，箱数 $b = b(\mu_i,\ \nu_i)$ 的评估很简单，因为这些情况符合球入箱问题。回想一下，球代表用户，而箱代表用户可以放置其副本的时隙组合。当两个球落入同一个箱时，这对应于用户在相同的¯时隙中发送其副本。相反，对于停止集 $\mathcal{S}_3$，不适用将 $b = b$ $(\mu_i,\ \nu_i)$ 作此解释，因为停止集涉及的时隙数（$\mu_i = 3$）不同于用户放置其副本的时隙数（两个）。

为了为这种情况找到与球入箱问题类似的表述，我们通过仿真经验性地推导出一种解法：首先确定仅由涉及停止集 $\mathcal{S}_3$ 所示情形的用户造成的分组丢失率，即 PLR($\mathcal{S}_3$, n)。在固定信道负载（例如 G $= 0.4$ [包/时隙）和一个功率级别 $L = 1$ 的情况下，针对不同的时隙数 n 进行仿真。],

要评估 $\bar{b}$，有两个关键观察至关重要。首先，根据公式（3），我们可以将 $\bar{b}^2$ 表示为

$$\bar{b}^2 = \frac{\bar{m}^2}{2\text{PLR}(\mathcal{S}_3, n)}.$$

其次，仿真结果表明， $\bar{b}^2$ 关于 n的变化趋势与 $\binom{n}{2}$的行为高度吻合。基于这一趋势，我们假设

$$\bar{b}^2 = \binom{n}{2}^2 \frac{1}{g(n)^2},$$

其中， $g(x)$是一个形式为 $g(x) = a_0 + a_1 x$的线性函数。接下来，我们使用拟合函数（例如 MATLAB 中的拟合函数）来确定系数 a_0 和 a_1，从而近似 b 与 n之间的¯关系。因此，我们得到数值$a_0 = -4$ 和 $a_1 = 2$，进而可以写出

$$b(\mu_2, \nu_2) = \bar{b} = \binom{n}{2} \frac{1}{\sqrt{2(n-2)}}.$$

致谢

Estefan´ıa Recayte 感谢德国联邦研究、技术与航天部（BMFTR）通过“主权数字化·互联”计划为其提供的资助。该计划中的联合项目为 6G-RIC，项目编号：16KISK0-PIN。

参考文献

[1] W. Saad、M. Bennis 和 M. Chen，“6G无线系统展望：应用、趋势、技术与未解研究问题”，*IEEE Network*，第34卷，第3期，第134–142页，2020年。[2] M. Berioli、G. Cocco、G. Liva 和 A. Munari，《现代随机接入协议》。NOW Publisher，2016年。[3] G. Liva，“基于图的竞争解决分集时隙ALOHA分析与优化”，*IEEE Transactions on Communications*，第59卷，第2期，第477–487页，2011年。[4] A. Mengali、R. De Gaudenzi 和 P.-D. Arapoglou，“增强竞争解决分集时隙ALOHA的物理层”，*IEEE Transactionson Communications*，第65卷，第10期，第4295–4308页，2017年。[5] I. Hmedoush、C. Adjih、P. M¨uhlethaler 和 L. Sala¨un，“异构物联网网络中的多功率不规则重复时隙ALOHA”，载于*2020*年第*9*届*IFIP*无线网络性能评估与建模国际会议（*PEMWN*），2020年。[6] S. Alvi、S. Durrani 和 X. Zhou，“通过发射功率分集增强面向机器类型通信的CRDSA”，*IEEE Trans. Veh. Technol.*，第67卷，第8期，第7790–7794页，2018年。[7] E. Recayte、T. Devaja 和 D. Vukobratovic，“面向物联网卫星系统的节能不规则重复时隙ALOHA”，载于*2024*年*IEEE*国际通信会议，2024年。[8] J. Choi，“基于NOMA的多信道ALOHA随机接入”，*IEEE Journal on Selected Areas in Communications*，第35卷，第12期，第2736–2743页，2017年。[9] W. Fan、P. Fan 和 Z. Ding，“稀疏活跃用户大规模物联网中NOMA-ALOHA的吞吐量”，*IEEE Communications Letters*，第13卷，第3期，第582–586页，2024年。[10] F. Babich、G. Buttazzoni、F. Vatta 和 M. Comisso，“面向下一代网络的能量受限非协调多址接入”，*IEEE Open Journal of the Communications Society*，第1卷，第1819页，2020年。[11] Y. Huang、S. Shieh、Y. Hsu 和 H. Cheng，“面向异构设备的 NOMA 时隙ALOHA迭代碰撞消解”，*IEEE Transactions on Communications*，第 69 卷，第 5 期，第 2948–2961 页，2021 年。[12] I. Ramatryana 和 S. Y. Shin，“面向下一代物联网网络的基于 NOMA 的 CRDSA 接入控制”，载于*2021*年信息与通信技术融合国际会议（*ICTC*），2021 年。[13] J. Su、G. Ren 和 B. Zhao，“面向机器类型通信的基于 NOMA 的编码时隙ALOHA”，*IEEECommun.Lett.*，第 25 卷，第 7 期，第 2435–2439 页，2021 年。[14] 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”，*IEEECommunications Letters*，第 23 卷，第 4 期，第 624–627 页，2019 年。[15] M. Ivanov、F. Br¨annstr¨om、A. Graell i Amat 和 P. Popovski，“广播编码时隙ALOHA：有限帧长分析”，*IEEE Trans. Commun.*，第 65 卷，第 2 期，第 651–662 页，2017 年。[16] M. Moro˘glu、H. G¨ursu、F. Clazzer 和 W. Kellerer，“IRSA 的短帧长近似”，*IEEE Wireless Communications Let- ters*，第 9 卷，第 11 期，第 1933–1936 页，2020 年。[17] M. Ivanov、F. Br¨annstr¨om、A. Graell i Amat 和 P. Popovski，“分组擦除信道上编码时隙ALOHA 的误码平台分析”，*IEEE Transactions on Communications*，第 19 卷，422，2015 3，419 期，第 – 页。[18] E. Paolini，“不规则重复时隙ALOHA（IRSA）接入协议的有限长度分析”，载于*2015*年*IEEE*国际通信会议研讨会（*ICCW*），2015 年，第 2115–2120 页。[19] I. Hmedoush、C. Adjih、P. M¨uhlethaler 和 V. Kumar，“不规则重复时隙ALOHA 多分组接收性能研究”，载于*2020*年国际无线通信与移动计算会议（*IWCMC*），2020 年。[20] N. Johnson 和 S. Kotz，抽签模型及其应用。纽约：Wiley，1977 年。