不规则重复时隙ALOHA中的两步干扰消除与节能

Estefan´ıa Recayte*、Leonardo Badia†和Andrea Munari*
* 德国航空航天中心（DLR）通信与导航研究所，德国
† 帕多瓦大学信息工程系，意大利 电子邮件:
estefania.recayte@dlr.de,leonardo.badia@unipd.it, andrea.munari@dlr.de

arXiv:2601.00343v1 [cs.ET] 1 Jan 2026

摘要——**我们评估了对不规则重复时隙ALOHA（IRSA）的一种改进方案：部分节点在成功解码后进行中间解码并提前终止传输。此举旨在避免不必要的传输，从而降低能耗。我们预计，这种方法在低负载下尤为有用，因为此时大多数传输不会发生碰撞，因此可以避免这些冗余传输。为了验证这一方案，我们注意到，现有大多数关于IRSA的研究都考虑渐近的高负载情形；因此，我们还针对有限长度的帧和低提供负载，建立了能耗与成功概率模型。通过分析并结合仿真验证，我们表明，所提出的技术能够通过减少传输次数来降低IRSA的能耗，同时保留其相较于标准ALOHA的性能优势。例如，在不影响吞吐量的情况下，当提供负载约为33% 时，我们可实现10% 的节能。**

索引词—**能效；不规则重复时隙ALOHA；随机接入协议；物联网。**

I. 引言

不规则重复时隙ALOHA（IRSA） [1]是帧时隙ALOHA（FSA）的增强版本，其通过二部图优化实现竞争消解。该方法的基本思路是将接入组织在同步帧中，每帧包含已知数量的时隙。在每帧期间，用户按照特定分布选择若干时隙，从而形成用于用户/时隙关联的不规则二部图。用户在所选时隙中分别发送其数据包的一个副本。

如果考虑所有信源信号的叠加后，某个时隙中最终仅包含一个副本，则相应的数据包将被成功接收。此外，还可以利用编码和连续干扰消除（SIC）进一步解码数据包；该方法利用二部图的底层结构，类似于通过消息传递进行迭代解码的纠错方式 [2]。

IRSA 及其他编码时隙 ALOHA 技术应用于物联网（IoT）、卫星通信和无线传感器网络中的海量接入，以提高通信效率，即提升吞吐量和/或支持大量设备接入信道 [3], [4]。

E. Recayte 和 A. Munari 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。该联合项目为 6G-RIC，项目编号：16KISK022。

与此类海量接入技术相关的研究通常着重于说明如何避免传统 ALOHA 流程中的瓶颈[5], [6]。虽然这是必要的初步步骤，但物联网中的泛在通信，尤其是涉及能力有限和/或位于偏远地区的传感器时，也面临着对能效 [7]–[9]的迫切需求。

限制节点能量消耗的传统理由，在于电池更换的困难 [10]，或者通信往往依赖某种形式的能量采集，而这类能源有时可能十分稀缺 [11]。在卫星链路或应急通信等极端场景中，这一问题尤为突出[12], [13]。

本文旨在找出实用技术，降低发送端使用 IRSA 的能耗。归根结底，这意味着减少传输次数，同时不显著影响相较于标准 ALOHA 接入所带来的性能提升。具体而言，核心思路借鉴了能够提前停止无用传输的检测技术。例如，在 CSMA/CD 中，设备能够实时检测碰撞，并在碰撞发生时停止传输 [14]。这有助于避免将资源浪费在传输损坏的数据上。

我们的思路与此类似，但依据的是提前检测成功传输，而非检测失败。在 IRSA 中，成功解码数据包的用户可以在帧结束前停止发送后续副本，而不会造成任何影响。只需从非规则图中删去不必要的边，因为这类节点的后续副本会通过串行干扰消除（SIC）移除 [15]。传输次数的减少将使相关节点得以节省能量 [16]。

这种简化方法不能逐时隙采用，因为副本的成功解码需要遍历不规则图并进行消息传递。不过，可以进行一次中间检查。因此，我们将考虑一种 IRSA 变体：在帧进行到一半时尝试解码数据包，并且只执行一次前文所述的操作，即停止传输已成功解码数据包的用户。当然，也可以进行多次划分

但这需要在增加的控制开销与实际节能效果之间进行权衡。在每个时隙重复这一操作，会使系统变成普通的时隙 ALOHA。

现有文献中的大多数研究都考虑渐近长帧的饱和情况 [17], [18]。而在我们的研究中，必须考虑有限帧长度，因为我们需要纳入分裂式 SIC 对后续子帧的影响。在此类设置下，已有重要研究成果[19]，，但其重点仍是可靠性和丢包率。这促使我们克服 SIC 的大部分限制，同时推导出低信道负载下能耗的解析表达式和近似表达式。

通过分析和仿真验证的研究发现是，所提出的技术能够减少传输次数，从而降低能耗；这一点在低信道负载下尤为显著。例如，我们表明，对于一种常见的分布，在负载约为 0.1 [数据包/时隙]时，节能幅度超过 30%。

本文其余部分安排如下。第 II 节介绍系统模型，第 III 节推导平均能量消耗。第 IV 节提出一种适用于低至中等负载的近似能耗模型。第 V 节给出数值结果，第 VI 节总结全文。

符号说明：我们用大写字母（例如 X）表示随机变量，用其对应的小写字母（例如 x）表示随机变量的实现值。离散随机变量 X 的概率质量函数（pmf）记为 $\Pr\{X = x\} = P_X(x)$。此外，条件概率质量函数记为 $\Pr\{X = x|Y = y\} = P_{X|Y}(x|y)$，而 X 的期望记为 $\mathbb{E}[X] = \sum_x xP_X(x)$。

II. 系统模型

我们考虑一个包含 m 个非协调活动节点（用户）的系统，这些节点通过共享无线信道向公共接收机传输分组。时间被划分为等长时隙，每个时隙内传输一个数据包。介质访问控制（MAC）帧由 n 个连续时隙组成，用户之间实现时隙同步和帧同步。信道负载记为 G，定义如下

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

按照 IRSA协议 [1], 每个节点应将其数据包的 r个副本均匀地放置在 n 个可用时隙中。在实际中，每个用户独立地按照 IRSA概率分布抽取 r ，并且$r \in \{2, r_{\max}\}$。按照传统记法 [20], 我们可以将 IRSA分布写成多项式形式：

$$\Lambda(\mathsf{x}) = \sum_{r=2}^{r_{\max}} \Lambda_r \, \mathsf{x}^r \tag{1}$$

其中， Λ_r 表示节点发送 r个副本的概率。每个副本都包含一个指针，指向其他副本所在的时隙索引。[1] 接收机在解码过程中会使用这些信息。

[1]这可以通过将指针置于数据包头中来实现。例如，一种更高效的方法是使用数据包载荷作为发送方所用随机数生成器的种子，以放置其副本。因此，在解码其中一个副本后，接收机便可获取所有其他副本的位置。

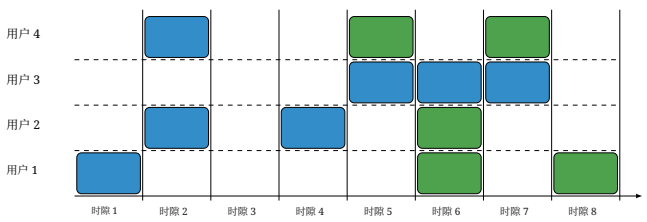


图 1. 在具有 n = 8 个时隙和 m = 4 个活跃用户的 MAC帧中，采用 IRSA分布 Λ(x) =x^{3}时的传输模式。

例如，图 1 展示了 IRSA 中采用 Λ(x) =x^3 时的帧结构，其中包含 m = 4 个用户和 n = 8 个时隙。

记与用户计划在整个帧中传输的副本数量相关的随机变量为 R，则每个用户传输的平均副本数量为

$$\mathbb{E}[R] = \sum_{r=2}^{r_{\max}} \Lambda_r \, r.$$

在整个讨论过程中，我们假设碰撞具有破坏性，因此接收机无法直接从多个用户传输的数据所在的时隙中提取信息。相反，仅由一个数据包占用的时隙（单例时隙）将导致解码。

在接收机侧执行串行干扰消除。该算法通过迭代解码无干扰的副本来运行。当一个副本被解码后，接收机便可获知同一数据包的其他副本所在的位置，并从入射信号中移除这些副本的贡献。假设采用理想的干扰消除。因此，其他用户的副本可能变为无干扰状态，从而可以被解码。该过程会重复进行，直到无法识别出无干扰副本，或达到预定义的迭代次数 [21]。

两步串行干扰消除方法

为提高 IRSA 的能效，我们考虑对该方案进行如下修改。每个节点仍在帧开始时抽取副本数量。不过，一开始只发送落在前 $\alpha \leq$n 个时隙中的副本。我们将最初的 α 个时隙称为帧的第一部分（或前段）。在接收机端，经过 α 个时隙后，会按照前文所述，对帧的第一部分应用 SIC 算法进行首次解码尝试。此后，接收机向所有用户发送反馈，告知哪些数据包（即节点）已成功接收。我们注意到，所提出的方案会产生额外成本，因为需要在 α 个时隙后传输反馈。这会增加设备的能量消耗，因为设备必须接收广播消息。不过，正如第五节的结果所示，这项成本可能会被节省的能量抵消。

沿着这一思路，我们注意到，反馈可以通过一条短消息提供。例如，一种可行的技术是传输长度为 α 比特的数据包，其中，如果第 i 个时隙中的分组已成功解码，则将第 i 个比特设置为 1，并且

否则设置为 0。通过检查反馈分组中的相关位置，每个节点都能够确定其副本是否已成功解码。

随后，SIC 方法进入第二阶段。在这种情况下，已译码的节点不再发送其他副本，而未编码节点则继续按原计划运行，并在剩余的 $\mathsf{n}-\alpha$ 个时隙中继续发送副本。帧结束时，译码器通过 SIC 算法处理全部 n 个时隙。

为说明这种方法，我们再次考虑图 1 所示的传输模型，并假设 SIC 在第一步处理 $\alpha=4$ 个时隙。第一步中，用户 1 在时隙 1 中被译码，因为该时隙是单例时隙。随后，用户 2 在时隙 4 中被译码，其在时隙 2 中的副本也被消除。接着，用户 4 不再受到干扰，因此也成功译码。接收机通知这三名用户停止传输，绿色标出的副本因此无需继续传输。

III. 平均能量消耗

我们用 p 表示传输功率，所有节点的传输功率均设为相同值；用 t 表示分组持续时间。每次数据包传输所消耗的能量为

$$\mathsf{e}=\mathsf{p}\cdot\mathsf{t}\quad[\text{joule}]. \tag{2}$$

令 K 为两步 SIC 方案中与节点发送的副本数量相关的随机变量。注意，$K=R$若节点在串行干扰消除的第一步未被解码，而 $K\le R$ 否则。我们旨在评估所提出方案中每个节点消耗的平均能量，其表达式为

$$\mathsf{E}=\mathbb{E}[K]\cdot\mathsf{e}\le\mathbb{E}[R]\cdot\mathsf{e}. \tag{3}$$

每个用户发送的平均副本数取决于系统在前 α 个时隙中的运行情况。具体而言，我们需要计算用户在帧的前半部分发送的副本数分布，以及该用户在第一步通过串行干扰消除被解析的概率。

我们按如下方式推导用户在 α 个时隙中的副本分布。令随机变量 T 表示发送的副本数。给定初始 IRSA 副本分布 Λ_r，并假设 $\alpha\ge r_{\max}$，用户可以在 α 个时隙中发送 $t\in[0,1,\dots,r_{\max}]$ 个副本。根据多项式表示法，帧的第一部分中的副本概率分布 $\Gamma(\mathsf{x})$ 为

$$\Gamma(\mathsf{x})=\sum_{t=0}^{r_{\max}}\Gamma_t\,\mathsf{x}^t$$

其中，$\Gamma_t=P_T(t)$ 的推导如下

$$\begin{aligned}\Gamma_t&=\sum_{r=2}^{r_{\max}}P_{T|R}(t|r)P_R(r) \qquad (4)\\&=\sum_{r=2}^{r_{\max}}\Lambda_r\binom{r}{t}\prod_{i=0}^{t-1}\frac{\alpha-i}{\mathsf{n}-i}\prod_{j=0}^{r-t-1}\frac{\mathsf{n}-\alpha-j}{\mathsf{n}-t-j}\end{aligned}$$

其中 $\Lambda_r=P_R(r)$。二项式系数涵盖了从 r 中选择 t 副本进行传输的所有可能方式。在此基础上，第一个乘积表示将 t 副本放置在帧的前半部分的概率，而第二个乘积表示将 $r-t$ 副本放置在帧末尾的概率。在该比值中，分母表示可用于放置副本的所有潜在时隙，而分子表示在所考虑的帧部分中用于放置副本的可用时隙数量（正例）。

为了便于理解，请评估以下数值示例。

例 1。 假设帧长为 $\mathsf{n}=200$，且分布由 $\Lambda(\mathsf{x})=\mathsf{x}^3$, 给出，在帧的前半部分执行串行干扰消除，即执行于 $\alpha=100$ 个时隙。对概率的评估得到 $\Gamma_0=0.1231$、$\Gamma_1=0.3769$、$\Gamma_2=0.3769$和 $\Gamma_3=0.1231$。多项式分布变为

$$\Gamma(\mathsf{x})=0.1231\,\mathsf{x}^0+0.3769\,\mathsf{x}^1+0.3769\,\mathsf{x}^2+0.1231\,\mathsf{x}^3. \tag{5}$$

请注意，当只考虑帧的一部分时，副本分布还包括严格为正的概率，即用户在帧的第一部分中放置零个或一个副本的概率，即 Γ_0 和 Γ_1。在此数值示例中，$\Gamma_0=\Gamma_3$ 和 $\Gamma_1=\Gamma_2$，这是由于$\alpha=\mathsf{n}/2$。另一个特殊情况是当 $\alpha=\mathsf{n}$时，此时显然可归结为 $\Gamma(\mathsf{x})=\Lambda(\mathsf{x})$。

用户总共发送 K 个副本的概率（已知从原始分布中选取了 R 个副本，并在帧开始时发送了T 个副本）表示为

$$P_{K|R,T}(k|r,t)=\begin{cases}\mathsf{P}_{\mathsf{dec}}(t) & \text{for } k=t\\ 1-\mathsf{P}_{\mathsf{dec}}(t) & \text{for } k=r.\end{cases} \tag{6}$$

这里，$\mathsf{P}_{\mathsf{dec}}(t)$表示用户在连续干扰消除过程的第一步被解码的概率，条件是该用户在前α 个时隙中发送了 $T=t$ 个副本。我们有

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[K]&=\sum_k k\,P_K(k)\\&=\sum_k k\sum_{r=2}^{r_{\max}}\sum_{t=0}^{r}P_{K|R,T}(k|r,t)P_{T|R}(t|r)P_R(r)\end{aligned}$$

并且，根据（6），我们计算得

$$\mathbb{E}[K]=\sum_{r=2}^{r_{\max}}\Lambda_r\Big\{\sum_{t=0}^{r}\Gamma_t\big[t+(r-t)\,(1-\mathsf{P}_{\mathsf{dec}}(t))\big]\Big\}. \tag{7}$$

将（4）、（7）和（2）代入（3），可得（9）中给出的每个节点消耗的平均能量表达式（见下一页页首）。我们进一步评估数据包成功传输量与总能耗之间的关系。为此，我们定义能耗归一化吞吐量 η如下：

$$\eta=\frac{\mathsf{G}[1-\mathsf{PLR}(\mathsf{G})]}{\mathsf{E}}\quad[\text{bit/joule}] \tag{8}$$

其中，PLR(G) 为丢包率，表示数据包在帧中未能成功解码的概率，其为信道负载 G 的函数。我们还将节点在帧的第一部分发送 t 个副本时的丢包定义为 $\mathsf{P}_{\mathsf{L}}(t)=1-\mathsf{P}_{\mathsf{dec}}(t)$。下一节将给出一种适用于低信道负载的丢包近似方法，用于评估（7）和（8）。

$$\mathsf{E}=\sum_{r=2}^{r_{\max}}\Lambda_r\left\{\sum_{t=0}^{r}\sum_{h=2}^{r_{\max}}\Lambda_h\binom{h}{t}\prod_{i=0}^{t-1}\frac{\alpha-i}{\mathsf{n}-i}\prod_{j=0}^{h-t-1}\frac{\mathsf{n}-\alpha-j}{\mathsf{n}-t-j}\left[t+(r-t)\left(1-\mathsf{P}_{\mathsf{dec}}(t)\right)\right]\right\}\mathsf{p}\,\mathsf{t}. \tag{9}$$

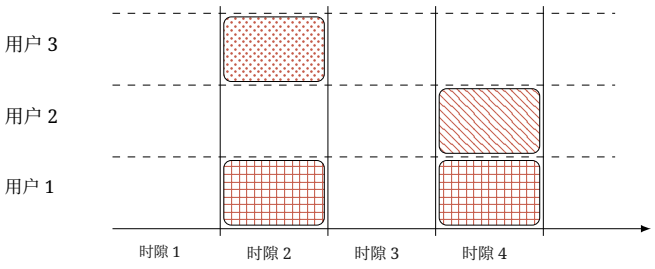


图2. 三个用户在两个时隙中发送其副本的停止集示例。停止集轮廓为 $\boldsymbol{\nu}(s)=[0,2,1,0]$。这代表两步串行干扰消除方法中一种无法继续处理的情况。

IV. 低至中等信道负载下的分组丢失近似

前文给出的平均能量和能效评估需要计算帧第一部分的分组丢失概率 $\mathsf{P}_{\mathsf{L}}(t)$，以及整体丢包率 PLR(G)。由于难以追踪连续干扰消除过程的行为，推导这些量的解析表达式颇具挑战。现有工具（如密度演化）只能在假设无限用户群体的节点将副本放置在无限帧中的情况下使用，如 [17] 所示。

另一方面，这种技术无法应用于有限长度帧的情况。然而，在信道负载较低至中等的情况下，可以通过处理所谓的停止集 [19], [21],[22]来近似计算 SIC 的丢包。这些配置中，多个用户在相同时隙发送其副本，形成一种循环，导致接收机无法解码，因为所有副本都受到干扰。停止集 s 由四个元素定义

(i) 所涉及用户的数量 $\omega(s)$；(ii) 所涉及时隙的数量 $\mu(s)$；(iii) 同构的数量 $c(s)$；以及 (iv) 集合轮廓，记为 $\boldsymbol{\nu}(s)$。

s 的集合轮廓表示为

$$\boldsymbol{\nu}(s)=[\nu_0(s),\nu_1(s),...,\nu_{r_{\max}}(s)]$$

其中，$\nu_y(s)$ 表示参与停止集 s 并传输 y 个副本的用户数量。给定一个集合轮廓，停止集的同构是所有可能使该集合轮廓出现的用户与时隙组合。上述所有元素均可通过枚举计算得出。为通过示例更好地理解，请看下面的实际案例。

例2。 考虑图*2*所示的停止集。这里，用户1 在时隙*2*和*4*中传输两个副本；用户2在时隙*4*中传输一个副本，而用户3在时隙*2*中传输一个副本。这构成一个停止集，因为译码器无法成功解析其中任何一个用户。只有在处理帧的一部分时，这个停止集才会出现在两步串行干扰消除方案中。在传统方案中不会出现这一特定停止集，因为如分布(1)所示，用户始终传输多个副本。在这个停止集中，用户数量为 $\omega(s)=3$，时隙数量为 $\mu(s)=2$，集合轮廓为 $\boldsymbol{\nu}(s)=[0,2,1,0]$，同构数量为 $c(s)=2$。事实上，另一种同构对应的传输模式是：用户2 和3 分别在时隙2 和3中发送副本。

若以 $\mathcal{S}$ 表示处理 α 个时隙时可能出现的停止集集合，那么在低至中等信道负载下，采用分布 Γ(x)的用户′未能在帧的第一部分中解码的概率可近似为 [19]所示

$$\mathsf{P}_{\mathsf{a}}(\alpha,\Gamma(\mathsf{x}))\approx\sum_{s\in\mathcal{S}}\phi(s)\omega(s)c(s)\binom{\alpha}{\mu(s)}\prod_{t=1}^{r_{\max}}\frac{\Gamma_t^{\nu_h(s)}}{\nu_h(s)!}\binom{\alpha}{t}^{\nu_t(s)} \tag{10}$$

where $\phi(s)=\sum_{i=0}^{\omega(s)-1}(-1)^{\omega(s)-1+i}\frac{(\omega(s)-1)!}{i!}(\mathsf{n}\mathsf{G})^i$.

一般而言，评估式（3）需要计算在前 α 个时隙中恰好发送了 $T=t$个副本的条件下，用户未能解码的概率。为简单起见，我们依据式（10）对此量进行近似，即采用给定分布 Γ(x)时的平均丢失率。接下来我们将考虑

$$\mathsf{P}_{\mathsf{L}}(t)=1-\mathsf{P}_{\mathsf{dec}}(t)\simeq\mathsf{P}_{\mathsf{a}}(\alpha,\Gamma(\mathsf{x})).$$

该近似的紧密程度将在第V节中验证。

另请注意，对于 $\alpha=$n，这意味着若 Γ(x) = Λ(x)，则用户在整个帧中未能解码的概率可写为

$$\mathsf{PLR}(\mathsf{G})=\mathsf{P}_{\mathsf{a}}(\mathsf{n},\Lambda(\mathsf{x})).$$

V. 数值结果与讨论

本节展示了两步连续干扰消除方案的数值结果。该方案通过仿真评估了从低到高的信道负载情况，并通过解析方法评估了从低到中等的信道负载情况。

在所有结果中，我们考虑长度为 $\mathsf{n}=200$ 时隙的帧，以及整个帧内由 $\Lambda(\mathsf{x})=\mathsf{x}^3$ 给出的 IRSA 副本分布。我们在两种

表 I 所考虑停止集的参数

s	$\nu(s)$	$\mu(s)$	$c(s)$	$\omega(s)$	s	$\nu(s)$	$\mu(s)$	$c(s)$	$\omega(s)$
1	$[0,2,0,0]$	1	1	2	12	$[0,2,0,2]$	4	24	4
2	$[0,0,2,0]$	2	1	2	13	$[0,1,2,1]$	4	24	4
3	$[0,2,1,0]$	2	2	3	14	$[0,1,2,1]$	4	24	4
4	$[0,0,0,2]$	3	1	2	15	$[0,1,1,2]$	4	48	4
5	$[0,1,1,1]$	3	3	3	16	$[0,0,3,1]$	4	24	4
6	$[0,0,3,0]$	3	6	3	17	$[0,0,4,0]$	4	72	4
7	$[0,0,2,1]$	3	6	3	18	$[0,0,3,1]$	4	144	4
8	$[0,3,0,1]$	3	6	4	19	$[0,0,2,2]$	4	48	4
9	$[0,2,2,0]$	3	12	4	20	$[0,0,2,2]$	4	48	4
10	$[0,0,1,2]$	4	12	3	21	$[0,3,1,1]$	4	72	5
11	$[0,0,0,3]$	4	24	3	22	$[0,2,3,0]$	4	144	5

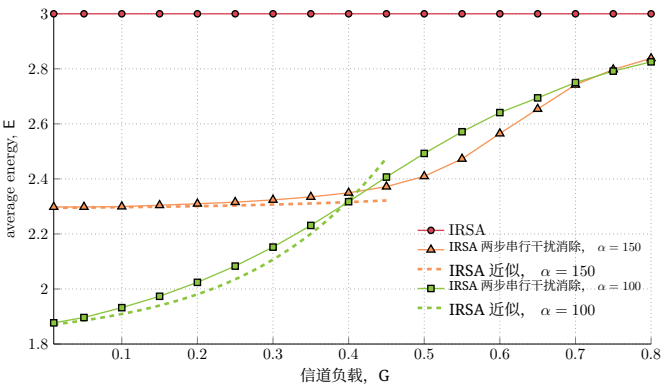


图 3. IRSA分布 $\Lambda(x) = x^3$, IRSA 在 $\alpha = 100$ 和 $\alpha = 150$ 时隙条件下，采用两步连续干扰消除时，节点平均能量消耗 E 随信道负载 G 的变化。带标记的曲线表示仿真结果，虚线表示解析近似所得结果。

情景下评估两步SIC过程，即 $\alpha = 100$ 时隙和 $\alpha = 150$时隙。$\alpha = 100$ 时隙的情况遵循例 1，因此其在帧初始部分的副本分布由式（5）给出；而对于 $\alpha = 150$ 时隙的情况，该分布遵循

$$\Gamma(x) = 0.0149\,x^0 + 0.1399\,x^1 + 0.4254\,x^2 + 0.4198\,x^3.$$

我们将分组持续时间 t 和传输功率 p 均设为单位值。这样，我们便专注于每个分组持续时间内的能耗，并忽略计量单位（焦耳）。

我们首先评估用户平均能量消耗 E 随信道负载 G 的变化情况，如图 3 所示。带标记的曲线表示通过蒙特卡洛仿真得到的结果，而虚线表示通过所提出的近似方法得到的结果。用于近似式 (10) 中 $P_a(\alpha, \Gamma(x))$ 的停止集均列于表 I，并附有各参数的对应值。

在 IRSA 方案中，由于每个用户始终发送其数据包的三个副本，因此每个用户的能耗与信道负载无关，且始终保持不变。采用两步SIC技术的方案能显著降低能耗。

具体而言，对于所考虑的每个信道负载值，译码器处理前 $\alpha = 150$ 个时隙的方案都显著节能，

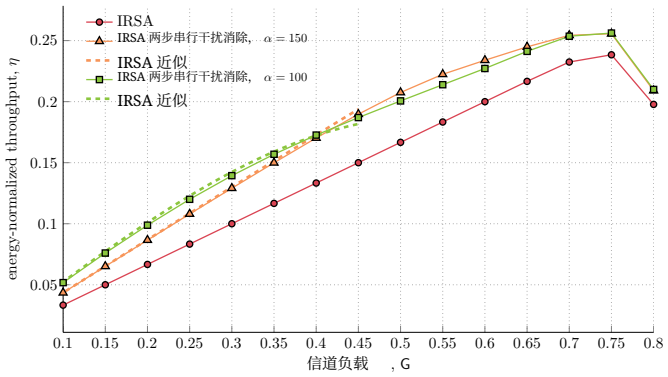


图4. 能耗归一化吞吐量 η 随 IRSA分布 $\Lambda(x) = x^3$, IRSA 在采用两步 SIC、 $\alpha = 100$和 $\alpha = 150$ 个时隙时随信道负载 G 的变化曲线。带标记的曲线表示仿真结果，虚线表示解析近似给出的结果。

在低信道负载下，节能效果尤为明显，接近 25%。当信道负载低于 $G = 0.40$ [数据包/时隙]，时，若译码器处理 $\alpha = 100$ 个时隙，节能效果会更高。在这种情况下，只需对协议设计进行简单修改，即可实现超过 33% 的节能。

值得注意的是，两步SIC 方法的能耗会随信道负载变化。这是因为随着系统中的用户数量增加，由于停止集出现得更加频繁，译码器在帧的第一部分无法解码某个用户的概率会更高。在SIC初始步骤中未能解码用户，需要发送额外的副本，从而增加平均能耗，并使性能趋近于基本的 IRSA操作。就能耗而言， α 与 G 之间存在权衡。在初始步骤中处理更多时隙可以提高成功解码用户的概率，因为出现的停止集可能更少。然而，较大的α 也会导致发送更多副本。

最后，虚线曲线证实，在低负载和中等负载下，解析近似能够准确表示所提方案的实际行为，表明该近似具有很高的拟合度。

图4绘出了能耗归一化吞吐量 η 随信道负载 G 的变化关系。同样在此图中，虚线表示所提出的近似，带标记的曲线表示仿真结果。对于每种方案，在低业务流量时，η的值较低，这是因为 G[1 −PLR(G)]决定的吞吐量较低。[2] 正如预期，对于所考虑的每一种信道负载，两步 SIC 方案的能耗归一化吞吐量均优于传统IRSA协议。每种方案的η 最大值均出现在分布$\Lambda(x) = x^3$ 所能达到的最大吞吐量处；在本例中，该点对应的信道负载约为 $G = 0.75$ 数据包/时隙。该图还证明了所给近似的有效性——

[2]我们指出，整个帧上的丢包率 PLR(G) 近似值是通过式（10）计算的，其中仅考虑停止集 $s = 4$ 和 $s = 11$，即涉及发送三个副本的用户的停止集。事实上，在考察整个帧时，仍未解码的用户已经发送了全部三个副本，因为考虑了 $\Lambda(x) = x^3$ 。

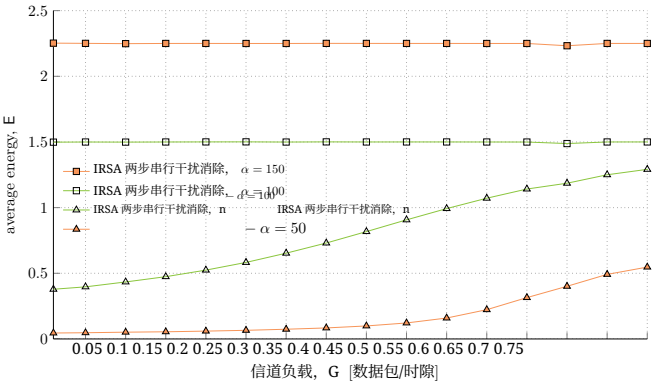


图 5. IRSA 两步方案在帧的第一部分和第二部分中，每个节点的平均能量消耗 E 随信道负载 G 的变化。

通过展示该近似值与实际性能紧密吻合。

此外，我们强调，所提出的两步连续干扰消除在丢包率方面保持了原有性能，因此其吞吐量与传统方法相同。事实上，很容易证明，使用 IRSA 协议成功解码的节点，也能通过两步连续干扰消除成功解码；反之，IRSA 中未能解码的节点也同样如此。

最后，图 5 展示了两步连续干扰消除方案中，帧的每个部分里每个节点的平均能量消耗 E 随信道负载的变化。我们再次比较第一步分别考虑 $\alpha = 100$ 或 $\alpha = 150$个时隙的情况，并比较帧的第一部分和第二部分的能耗（分别用方形和三角形标记表示）。帧初始部分的能耗与所考虑的信道负载无关。这是因为，当α 固定时，用户在 α 个时隙内传输的副本平均数量也保持不变。在这种情况下，对于 $\alpha = 100$，$E = 1.50$ 每个分组持续时间；而对于 $\alpha = 150$，$E = 2.25$。正如预期的那样，帧第二部分的能耗会随着信道负载的增大而上升。这是因为信道越拥塞，初始阶段成功解码的概率就越低，因此需要传输额外的副本。

VI. 结论

本文研究了适用于 IRSA 系统的两步干扰消除方法。我们的研究重点是修改协议，以提高系统整体能效。我们推导了能耗的近似表达式和精确公式。结果证实，该方法显著提升了节能效果，尤其适用于信道负载较低至中等的系统。所提出的技术为实际部署提供了切实可行的解决方案，有助于持续推动无线通信网络朝着更加可持续、高效的方向发展。

参考文献

[1] G. Liva，“基于图的竞争解决多样性时隙ALOHA分析与优化”，IEEE通信汇刊，第59卷，第2期，第477–487页，2011年。 [2] K. R. Narayanan和H. D. Pfister，“时隙ALOHA的迭代碰撞消解：一种最优非协调传输策略”，载于ISTC会议论文集，2012年，第136–139页。 [3] L. Badia和A. Munari，“现代随机接入系统中信息年龄的博弈论方法”，载于IEEE Globecom研讨会论文集，2021年。 [4] V. Tralli和E. Paolini，“高斯信道上的基于IRSA的随机接入”，IEEE信息论汇刊，2024年。 [5] E. Nisioti和N. Thomos，“用于提升不规则重复时隙ALOHA有限长度性能的快速Q学习”，IEEE认知通信与网络汇刊，第6卷，第2期，第844–857页，2019年。 [6] L. Badia、A. Zanella和M. Zorzi，“带捕获效应的时隙ALOHA年龄博弈”，IEEE移动计算汇刊，第23卷，第5期，第4878–4889页，2024年。 [7] Z. Chen、Y. Feng、Z. Tian、Y. Jia、M. Wang和T. Q. S. Quek，“面向基于不规则重复时隙ALOHA的海量接入的能效优化”，IEEE无线通信快报，第11卷，第5期，第982–986页，2022年。 [8] L. Badia和A. Munari，“受限设备网络的折扣信息年龄”，载于IEEE MedComNet会议论文集，2022年，第43–46页。 [9] E. Faddoul、G. M. Kraidy、C. Psomas、S. Chatzinotas和I. Krikidis，“能量检测空间调制：分集分析与实验评估”，IEEE绿色通信与网络汇刊，第8卷，第1期，第35–49页，2024年3月。 [10] W. Tian、Y. Zhao、R. Hou、M. Dong、K. Ota、D. Zeng和J. Zhang，“用于提高水下声学传感器网络能效的基于集中控制的聚类方案”，IEEE绿色通信与网络汇刊，第7卷，第2期，第668–679页，2023年。 [11] D. Ma、G. Lan、M. Hassan、W. Hu和S. K. Das，“能量采集物联网的感知、计算与通信：综述”，IEEE通信调查与教程，第22卷，第2期，第1222–1250页，2019年。 [12] L. Zhen、A. K. Bashir、K. Yu、Y. D. Al-Otaibi、C. H. Foh和P. Xiao，“面向低轨卫星辅助的6G远程物联网的高能效随机接入”，IEEE物联网期刊，第8卷，5128，2020年7月，5114号，第–页。[13] T. Do-Duy、L. D. Nguyen、T. Q. Duong、S. R. Khosravirad和H. Claussen，“无人机辅助灾害应急通信的实时部署与资源分配联合优化”，IEEE通信选定领域期刊，第39卷，第11期，第3411–3424页，2021年。[14] F. Xu 、 L. Feng 、 J. Yang 、 H. Liang 和 Y.-T. Chang，“ 物联网环境下新型碰撞通知方案的设计与分析”，超级计算期刊，第78卷，第16期，第18 130–18 152页，2022年。 [15] L. Toni和P. Frossard，“通过基于图的分析优化优先随机MAC”，IEEE通信汇刊，第63卷，第12期，第5002–5013页，2015年。 [16] R. V. Da Silva、O. L. A. L´opez和R. D. Souza，“通过分布式用户采样和多信道ALOHA实现能量感知联邦学习”，IEEE通信快报，第27卷，第10期，第2867–2871页，2023年。[17] J. Haghighat和T. M. Duman，“一种高能效的反馈辅助不规则重复时隙ALOHA方案及其渐近性能分析”，IEEE无线通信汇刊，第22卷，第12期，第9808–9820页，2023年。 [18] S.-L. Shieh和S.-H. Yang，“逐次干扰消除受限条件下的增强型不规则重复时隙ALOHA”，IEEE通信汇刊，第70卷，第4期，第2268–2280页，2022年。 [19] E. Sandgren、A. Graell i Amat和F. Br¨annstr¨om，“关于帧异步编码时隙ALOHA：渐近分析、有限长度性能与时延分析”，IEEE通信汇刊，第65卷，第2期，第691–704页，2017年。 [20] E. Paolini、G. Liva和M. Chiani，“编码时隙ALOHA：一种用于非协调多址接入的基于图的方法”，IEEE信息论汇刊，第61卷，第12期，第6815–6832页，2015年。 [21] M. Ivanov、F. Br¨annstr¨om、A. Graell i Amat和P. Popovski，“分组擦除信道上的编码时隙ALOHA误码平层分析”，IEEE通信快报，第19卷，第3期，第419–422页，2015年。 [22] E. Paolini、G. Liva和A. Graell i Amat，“一种具有低误码平层的结构化不规则重复时隙ALOHA方案”，载于IEEE国际通信大会论文集，2017年。