

# 基于多对一匹配理论的 LoRa 网络吞吐量优化方法

张帅<sup>1</sup> 李艳<sup>2\*</sup> 陈琼<sup>1</sup> 陈佳<sup>1</sup>

1. 武汉第二船舶设计研究所; 2. 武汉晴川学院

DOI: 10.12238/jpm.v5i11.7437

**[摘要]** 本文提出了基于多对一匹配理论的 LoRa 网络吞吐量优化方法并进行仿真分析。首先对网络平均吞吐量最优扩频因子分配问题进行建模, 接着提出了一种基于匹配理论的扩频因子分配方法, 最后对多对一匹配理论优化算法下扩频因子分配情况、网络平均吞吐量进行仿真分析。本文通过建立终端节点和 LoRa 参数 SF 的偏好列表, 设计匹配交换方法, 建立匹配交换的收敛条件, 构建基于匹配理论的 LoRa 网络吞吐量优化算法, 解决 LoRa 扩频因子的分配问题。

**[关键词]** LoRa; 多对一匹配; 网络吞吐量;

## LoRa network throughput optimization method based on many to one matching theory

Zhang Shuai<sup>1</sup> Li Yan<sup>2\*</sup> Chen Qiong<sup>1</sup> Chen Jia<sup>1</sup>

1. Wuhan Second Ship Design and Research Institute; 2. Wuhan Qingchuan College

**[Abstract]** This article proposes a throughput optimization method for LoRa networks based on many to one matching theory and conducts simulation analysis. Firstly, the optimal spreading factor allocation problem for network average throughput is modeled. Then, a spreading factor allocation method based on matching theory is proposed. Finally, the spreading factor allocation and network average throughput under the many to one matching theory optimization algorithm are simulated and analyzed. This article establishes a preference list for terminal nodes and LoRa parameter SF, designs a matching exchange method, establishes convergence conditions for matching exchange, and constructs a LoRa network throughput optimization algorithm based on matching theory to solve the allocation problem of LoRa spreading factors.

**[Key words]** LoRa; Many to one matching; Network throughput;

### 1 网络平均吞吐量最优 LoRa 扩频因子分配问题建模

随着 LoRa 网络中终端节点不断增多, 半径不断增大, 平均 PSP 和吞吐量均会降低, 网络性能随之降低。以 N=300, R=10 km 为例, 在已有的典型分配方式中, 网络吞吐量不足 3000 bit/s。因此本文探索一种新的 SF 分配方式以使得 LoRa 网络平均吞吐量能够随着网络中终端节点和半径改变而动态变化, 从而一直保持较高状态, 以提高 LoRa 网络的可扩展性。

本文中的 LoRa 网络和吞吐量模型均已确定, 并且保证在标准 ALOHA 协议下数据包传输过程中受到聚合干扰影响。因此, 本文的优化问题的目标函数及约束条件为式 (1)~(3)。

$$\max_{\phi_s} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{b,i}(s) \cdot p_{ne,i}(s_i, r_i) \cdot p_{nc,i}(s_i, r_i, r_j) \quad (1)$$

$$SIR_s^n \geq R_{th\_s} \quad \forall \hat{s} \in S \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N X_i^n = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

其中, 式 (1) 描述了本文终目标, 即在为每个节点分配好 SF 后, 整个 LoRa 网络的平均吞吐量能够实现动态最优; 式 (2) 保证了每个参考节点的 SIR 要大于其 SIR 阈值以此保证其可以成功被网关捕获; 式 (3) 保证了每一个节点只能与唯

一一 SF 匹配。

选取不同 SFs 调制影响终端节点的捕获概率、在噪声影响下的数据包到达率以及数据包速率, 进而影响到 LoRa 网络平均数据包到达率和吞吐量。每个终端节点的 SF 变化都会影响其他节点的数据包到达率和吞吐量, 因此选取适当的 SF 分配方法, 使得 LoRa 网络平均吞吐量的动态最优具有一定的复杂度。

### 2 基于多对一匹配理论的扩频因子分配方法

将每个终端节点与其对应的吞吐量最大时选取的 SF 进行配对, 会使得 LoRa 网络的平均吞吐量动态最大, 整个网络的扩展性较好。因此, 本文利用多对一 Gale-Shapley 匹配理论将终端设备与 SF 进行多对一匹配以实现提高数据包网络吞吐量的效果。匹配理论原理如下:

将 SF 用  $m$  表示,  $m \in M, M = \{7, 8, \dots, 12\}$ ; 终端设备数量  $n \in N$ 。将二者假设为两组玩家, SF 组的每个玩家都寻求与终端设备组的玩家匹配, 组成匹配对  $(m, n)$ 。其中, 终端设备更喜欢与提供最高效用的 SF 匹配, 而每个 SF 更喜欢与效用最高的一组终端设备匹配, 设计终端设备偏好列表使其在不断迭代中全部与最最好的 SF 匹配成功成为关键。每个终端设备选择产生最高吞吐量所对应的 SF, 从而完成每一

个终端设备分配。初次匹配后，网络中会存在阻塞对  $(m, n)$ ，即若匹配对  $(m, n)$  与匹配对  $(k, j)$  交换后产生的效用大于当前两个匹配对的效用，则二组进行交换，组成最优解。依次将每个匹配对进行交换测试，消除所有阻塞对，最终实现 SF 最优分配。

本文算法流程图如图 1 所示：网络中终端节点随机分配，已知所有节点与网关之间的距离，利用 EAB 方案对 SF 进行初始分配。建立终端节点和 SF 之间的偏好列表。每个终端节点根据选取不同 SF 时的吞吐量建立偏好列表，偏好列表中每行的第一个值具有最高的偏好值。偏好列表中每行的第一个值具有最高的偏好值。表 1 展示了三个终端节点的偏好列表。其中，

第二个终端节点最佳匹配对象为 SF=8。

表 1 终端节点偏好列表

终端节点 (索引值)	偏好级别					
	1	2	3	4	5	6
1	7	8	9	10	11	12
2	8	9	7	10	12	11
3	12	11	10	8	9	7

每个终端节点与吞吐量最大时的 SF 进行配对，即每个节点与其在表 1 中对应的偏好级别为 1 的 SF 组成匹配对。计算此时网络平均吞吐量  $S_1$ 。

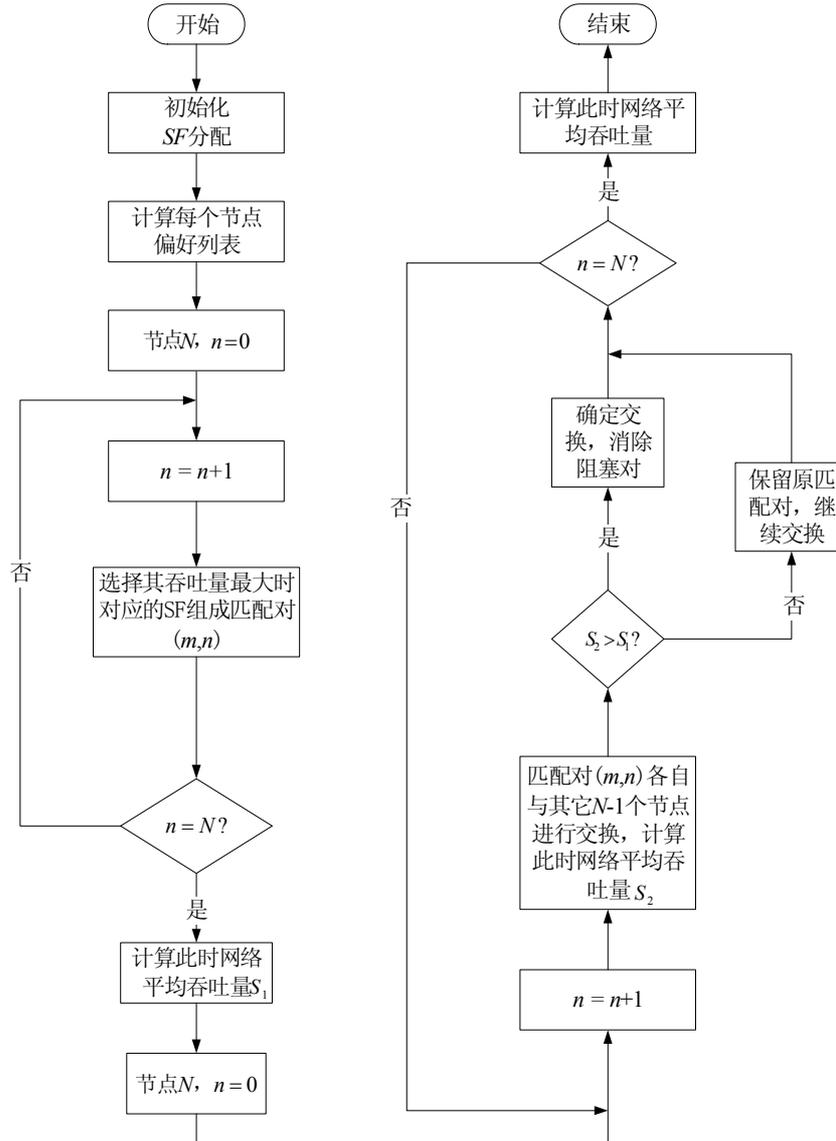


图 1 匹配理论优化算法流程图

将此时的  $N$  个匹配对进行交换，由于选取相同 SF 的终端节点进行匹配交换对 LoRa 网络平均吞吐量无影响，且增加系统复杂度。因此对于任一节点  $(m, n)$ ，本文算法仅考虑选取最佳匹配 SF 不等于  $n$  的终端节点进行交换。

每个节点交换一次，计算一次平均吞吐量  $S_2$ ，若  $S_1 > S_2$ ，则维持当前匹配对  $(m, n)$ 、 $(k, j)$  不变，否则则交换当前两对匹配对的 SF，组成新的匹配对  $(m, j)$ 、 $(k, n)$ 。

依次遍历所有满足条件的节点，计算此时的 LoRa 网络平均吞吐量。

### 3 仿真结果及分析

根据本文提出的多对一 Gale-Shapley 匹配理论对 LoRa 网络中的 SF 进行重新分配，以网络中有 200 个终端节点为例，进行匹配交换后的结果如图 2 所示。

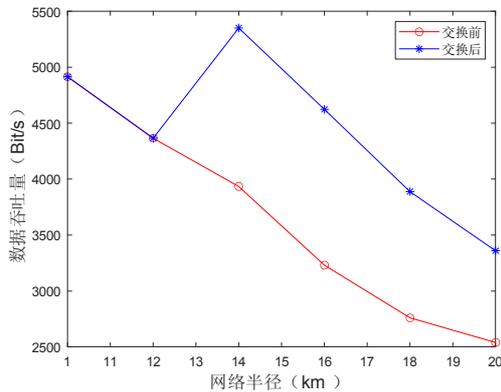
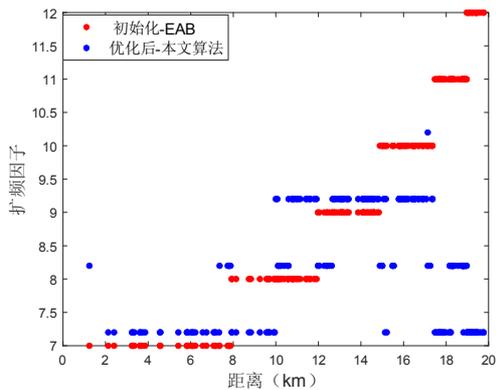


图 2 多对一匹配理论吞吐量变化图

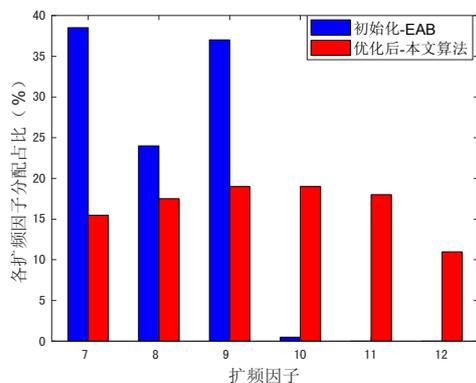
根据图 2，在  $R=12$  km 之前，所有节点最优配对的 SF 均相同，LoRa 网络平均吞吐量随网络半径增加呈下降趋势；而网络半径大于 12 km 时，终端节点所分配的最优 SF 变化，不同 SFs 的节点进行交换，网络中的阻塞对不断被消除，网络平均吞吐量总体提高，且仍呈下降的总趋势。

于是，这里便以  $R=20$  km,  $N=200$  为例对此时 LoRa 网络的 SF 分配情况与初始化时的 SF 分配进行了仿真分析，对比图如图 3 (a)、(b) 所示。

根据 3 (a)、(b) 所示，采用传统的 EAB 方案对 LoRa 网络的终端节点的 SF 进行初始化分配，每种 SF 分配的终端节点数量相对均匀。而本文算法中规定每个节点与网络平均吞吐量最优时对应的 SF 进行配对，因而每一种 SF 所分配的终端节点数相差较大。



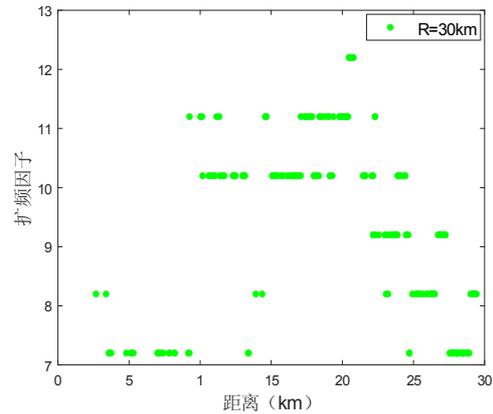
(a) SF 分布图



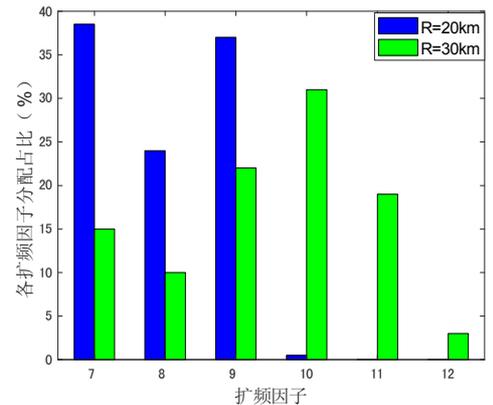
(b) SF 分配占比图

图 3 本文算法优化前后 SF 分配图

关于 SF 分布与网络半径的关系，本文进行了进一步分析，以  $N=200$  为例，SF 分布与 LoRa 网络半径关系如图 4 (a)、(b) 所示。



(a)  $R=30$  km 时 SF 分布图



(b) 不同网络半径下 SF 分配占比图

图 4 SF 分配与 LoRa 网络半径关系图

根据图 4 (a)、(b)，随着 LoRa 网络半径不断增大，较大的 SF 分配到的终端节点数量增多，终端节点分配逐渐均匀。这是由于随着 LoRa 网络半径增大，较远的节点需要较大的 SF 以提高数据包灵敏度，减少噪声干扰，从而保持网络平均吞吐量较高；但距离网关较远时，数据包碰撞概率增大，因而需要较小的 SF 以减少碰撞时间，从而减少碰撞概率，提高吞吐量。

#### 4 总结

本文主要对 LoRa 网络吞吐量最优扩频因子分配问题进行建模，提出了基于多对一匹配理论的扩频因子分配方法。首先对详细分析了本文需要解决的主要问题，并以数学表达式形式进行了详细说明，接着提出了基于多对一匹配理论的扩频因子分配方法，提出建立每个节点的偏好列表，并不断进行匹配交换以消除 LoRa 网络中阻塞对，使网络中平均吞吐量始终保持较高状态。仿真实验证明本文算法得到的平均吞吐量一直处于较高状态，在网络半径为 20 km，节点数量为 100 条件下，仍能保持近 3800 bit/s 的吞吐量，远远大于其他算法的最高值 2200 bit/s，能够有效改善 LoRa 网络可扩展性问题。

作者简介：张帅 (1987-)，男，内蒙古巴彦淖尔人，博士研究生，2010 年于武汉大学获得学士学位，2015 年于武汉大学获得博士学位，同年于武汉第二船舶设计研究所任职工作，主要从事高速模拟电路设计、数据传输、信号完整性和通信方面的研究。