

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.021

LoRaWAN 中的公平数据速率分配和传输功率控制

林浩男¹, 王海², 郭雅娟², 孙云晓², 朱道华², 毛明禾¹

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:文中对 LoRaWAN 单元内节点之间的数据速率公平性进行了研究。LoRaWAN 数据提取速率不公平的原因在于:(1) 分配给节点的数据速率不合理;(2) 距离问题, LoRa/LoRaWAN 表现出捕获效果, 仅提取冲突信号中的较强信号。为解决上述问题, 文中提出一种公平自适应数据速率分配和功率控制方案。通过在一个单元内部署每个数据速率的最公平比率并控制传输功率, 降低捕获效果, 无论其与网关之间的距离如何, 都可以进行公平的数据提取。数值仿真结果表明, 与现有的最新技术相比, 文中方法在数据提取速率上实现了更高的公平性。同时, 该方法可以不使用过高的传输功率来维持节点的生命周期, 从而降低整个传输系统的整体能耗, 符合绿色通信的理念。

关键词: LoRaWAN; LoRa; 公平自适应数据速率; 传输功率控制; 扩频因子

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)04-0150-07

0 引言

LoRa/LoRaWAN 被认为是低功耗广域网^[1-3]之一, 允许以简单的星形拓扑结构连接大量低成本无线设备或节点, 每个单元有数千个这样的拓扑结构。节点以低能耗运行, 并且数据可以长距离传输。LoRaWAN 的覆盖范围广是由于其独特的调制方式, 即远程(long range, LoRa)调制, 具有很大的链路预算。LoRa 提供了多种传输参数: 扩频因子(spreading factor, SF)、带宽(band width, BW)、编码速率(coding rate, CR)和传输功率(transmission power, TP), 可以对其进行调整以改变数据速率来交换范围、功耗或灵敏度。

LoRa 是 Semtech 公司专有的啁啾扩频(chirp spread spectrum, CSS)调制的低成本实现, 可提供具有低功耗特性的远程无线通信^[4-6], 并表示 LoRaWAN 堆栈的物理层。CSS 使用叫做 Chirps 的宽带线性调频脉冲对符号进行编码。LoRa 符号覆盖整个带宽, 从而使调制对信道噪声具有鲁棒性, 并且对频移不敏感。

LoRaWAN^[7]是使用 LoRa 调制的开源媒体访问控制(media access control, MAC)层、系统架构和区域规范。LoRaWAN MAC 基于简单的 Aloha, LoRa 无线电只要遵守频谱规定, 就可以在任何时间传输。LoRaWAN 工作在工业科学和医学(ISM)频带(欧洲为 868 MHz), 该频带对不采用先听后说的无线电设备施加不超过 1% 的占空比。LoRaWAN 系

统架构是一种简单的星型拓扑, 其中节点直接与连接到公共网络服务器的一个或多个网关进行通信。LoRaWAN 网关通常配备有多个 LoRa 收发器, 从而能够同时所有传输参数组合上接收多个传输。因此, LoRa 设备可以使用任何传输参数组合将数据传输到网络服务器, 而无需任何预先配置。

关于 LoRa / LoRaWAN^[8]的最新研究主要集中在 LoRa 性能评估方面, 包括覆盖范围、容量、可扩展性和寿命。使用文献[9]中的实际部署, 文献[10-11]中的数学模型或文献[3, 12]中的计算机仿真来进行研究。尽管在文献[6]中表明这不是一个有效的假设, 但几乎所有这些工作都假设了完全正交的 SF。

此外, 最近的研究提出了具有不同目标的用于 LoRaWAN 的传输参数分配方法。例如, 文献[13]提出一种用于 LoRa 的传输参数选择方法, 以实现特定链路可靠性下的低能耗。其中, LoRa 节点使用传输参数组合来探测链路, 以确定链路可靠性。然后, 根据新组合是否在保持至少相同的链路可靠性的同时实现更低的能耗, 才决定是否选择下一个探测器组合。最后, 从能耗的角度来看, 当达到最佳组合时, 该方法将终止。

文献[14]提出 2 种 SF 分配方法, 即 EXP-SF 和 EXP-AT, 以帮助 LoRaWAN 实现较高的总体数据速率。EXP-SF 根据接收信号强度指示符(received signal strength indicator, RSSI)将 SF 平均分配给 N 个节点, 其中 RSSI 最高的前 $N/6$ 个节点分配 SF7, 然后下一个 $N/6$ 个节点分配 SF8, 依此类推。EXP-AT 比 EXP-SF 更具有动态性, 后者 SF 分配在理论

收稿日期: 2020-03-17; 修回日期: 2020-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61701167)

上等于节点的 BW 占用时长。文献[13—14]都是假设完全正交的 SF, 这导致比实际情况具有更高的总体数据速率。

文中首先制定一般最公平的数据速率分布, 以实现 LoRaWAN 单元中所有已部署数据速率之间的公平冲突概率。然后, 基于此分布, 提出一种数据速率分配和 TP 控制算法, 即公平自适应数据速率 (fair adaptive data rate, FADR), 以实现独立于距网关距离的公平数据速率, 同时避免过高的 TP, 以减少能耗。文中提供了详细的结果、比较和讨论, 并通过数值仿真结果证明了 FADR 优于目前最新技术。

1 LoRa/LoRaWAN 系统不公平原因

LoRa 调制由 2 个主要参数定义: 扩频因子 $s_f \in S_f\{7, \dots, 12\}$ 会影响每个符号编码的位数, 而带宽 $b_w \in B_w\{125, 250, 500\}$ kHz 会影响符号占用的频谱。一个 LoRa 符号由 2^{s_f} 个脉冲组成, 其脉冲速率等于带宽。LoRa 支持前向纠错, 其编码速率 $c_r \in C_r\{4/(4+n)\}$, 其中 $n = 1, 2, 3, 4$ 以提高弹性。LoRa 的理论比特率 R_b 计算如下^[4]:

$$R_b = s_f c_r b_w / 2^{s_f} \quad (1)$$

此外, LoRa 收发器允许调整 TP。由于硬件限制, 调整范围以 1 dB 的步幅限制在 2 dBm 至 14 dBm 之间。

可以使用 SF、BW、CR 和 TP 的恒定组合来发送 LoRa 数据包, 从而可以产生 900 多种可能的组合。调整这些参数将直接影响比特率, 进而影响 BW 占用时长, 从而影响可靠性和能耗。SF 每增加一次, 比特率几乎减半, BW 占用时长和能量消耗翻倍, 但由于传输速度变慢, 链路可靠性得到了提高。BW 每增加一次, 比特率就会增加 1 倍, BW 占用时长和能耗减少一半, 但会增加噪声, 从而降低了链路可靠性。

LoRa 的 BW 占用时长计算器可以准确计算 LoRa 数据包的 BW 占用时长。图 1 为 SF 和 BW 在 $c_r = 4/5$ 时, 对传输 80 字节数据包长度的 BW 占用时长的影响。如图所示, 最快的组合具有最高的 BW 和最低的 SF, 而最低的 BW 和最高的 SF 则组成了最慢的组合。图 2 为编码速率 $c_r = 4/5$ 和带宽 $b_w = 500$ kHz 时, SF 和 TP 组合传输 80 字节数据包的能耗。如图所示, SF 对能耗的影响比 TP 高得多, 增加 SF 比增加 TP 消耗更多的能量, 特别是对于大的 SF。

LoRa 调制可以利用 SF 的伪正交性实现并发传

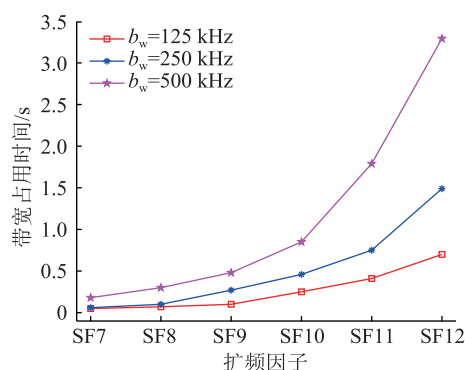


图 1 不同 SF 和 BW 组合对 BW 占用时长的影响

Fig.1 Effect of different SF and BW combinations on BW occupation time

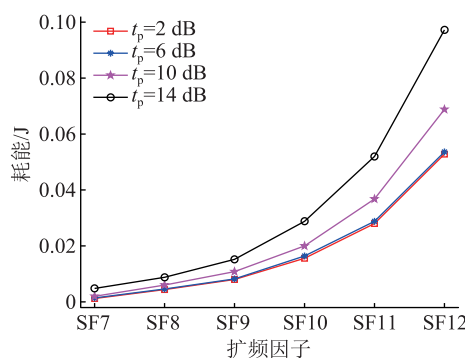


图 2 不同 BW 和 TP 组合对能耗的影响

Fig.2 Effect of different BW and TP combinations on energy consumption

输, 但需满足没有一个同时传输的功率明显高于其他^[2]。如果功率差高于较弱 SF 的同信道干扰抑制 (co-channel interference rejection, CIR), 则最强传输会抑制较弱的传输。在相同 SF 的情况下, 所有同时传输都将丢失, 除非以比 SF 的 CIR 更高的功率接收到其中一种传输。最强的信号对较弱信号的抑制称为捕获效应^[3]。所有 SF 对应的 CIR 已使用文献[5]中的仿真进行了计算, 并通过文献[6]中的实际 LoRa 链路测量进行了验证。

LoRaWAN 定义一种自适应数据速率 (adaptive data rate, ADR) 方案来控制 LoRa 设备的上行链路传输参数。LoRa 设备通过在任何上行链路 MAC 标头中设置 ADR 标志来表达对使用 ADR 方案的兴趣。启用 ADR 方案后, 网络服务器可以使用 LinkADRReq MAC 命令控制 LoRa 设备的传输参数。通常, 网络服务器从节点收集 20 个最近的传输, 包括信噪比和接收每个传输的网关的数量。根据该历史记录, 网络服务器会分配传输参数, 以提高 BW 占用时长和能源效率。为了减少 LinkADRReq 命令的长度, 并非所有传输参数都可用, 仅 7 个 SF 和 BW 的参数组合 (即 SF12/125 kHz, SF11/125 kHz,

SF10/125 kHz, SF9/125 kHz, SF8/125 kHz, SF7/125 kHz, SF7/250 kHz, 其相应比特率分别为 250 bit/s, 440 bit/s, 980 bit/s, 1 760 bit/s, 3 125 bit/s, 5 470 bit/s, 11 000 bit/s) 和 5 个传输功率 $t_p \in T_p \{2, 5, 8, 11, 14\}$ 参数可以设置^[7]。

LoRa 中与 SF 相关的扩频码是伪正交的, 因此, 只要接收到的功率没有一个明显高于其他接收到的功率, LoRa 就可以支持使用不同 SF 进行同时传输^[2], 否则最强的信号会抑制较弱的信号。同样, 当多个同时发送的信号具有相同的 SF 时, 如果功率差足够高, 则最强的信号将会抑制较弱的信号^[3], 即捕获效果。

由于距离问题, 捕获效果尤其是 SF 的不完美正交性会使 LoRaWAN 成为不公平的系统。距离网关较远节点的传输与距离网关较近节点的传输发生冲突, 并且其接收功率明显低于距离网关较近节点的接收功率时, 将不会接收到远离网关节点的传输。LoRaWAN 的大量链路预算会导致远近节点之间的传输存在较大的功率差异, 从而放大了这种影响。因此, 控制所有节点的接收信号功率对于实现公平性很重要。

另一个不公平的原因是分配给节点的数据速率。由 SF、BW 和 CR 组合定义的每个数据速率会经历不同的 BW 占用时长, 因此冲突概率也不同。使用慢数据速率组合时, 冲突概率较高; 而使用快数据速率组合时, 冲突概率较低。基于这些考虑, 文中提出一种名为 FADR 的数据速率分配和 TP 控制算法, 以实现 LoRaWAN 单元内所有节点的公平数据速率, 同时实现能源效率。

文献[15]提出一种在 LoRaWAN 单元中实现数据速率公平性的功率和 SF 控制方法, 而其他作者并未很好地研究分配数据速率和 TP 来实现 LoRaWAN 中数据速率公平性的问题。虽然文献[16—17]已经对蜂窝系统和 WiFi 进行了很好的数据速率和功率控制方法研究, 但这些解决方案并不适用于 LoRaWAN 等受限系统。原因是基于蜂窝的方法需要快速反馈和高数据速率才能工作, 而这在 LoRaWAN 中是不可用的。

2 FADR 算法

文中提出 FADR 以实现 LoRaWAN 单元中节点之间的数据速率公平性。具体如下: 首先得出公平的数据速率分布, 试图对所有已部署的数据速率实现相等的冲突概率; 然后提出 TP 控制算法方案, 旨在减轻捕获和 SF 的非正交效应。

2.1 数据速率分配

每个传输参数组合(SF、BW 和 CR)导致不同的数据速率, 从而导致不同的 BW 占用时长, 不同的冲突概率, 引起单元内节点之间数据速率的不公平。因此, 找到一个单元内公平的数据速率部署比率至关重要。

文献[15]指出 SF 公平分配比率为:

$$p_{s_f} = \frac{s_f}{2^{s_f}} \bigg/ \sum_{i=7}^{12} \frac{i}{2^i} \quad (2)$$

式中: p_{s_f} 为使用特定扩频因子 s_f 的节点比例。考虑所有概率之和 $\sum_{s=7}^{12} p_{s_f} = 1$ 的约束条件来均衡每个 SF 的冲突概率, 可以得出式(2)。

然而, 式(2)没有考虑 BW 和 CR 对冲突概率的影响。假定并非所有情况下都将使用相同的 BW 和 CR 部署 SF, 因为网络运营商可能会考虑为同一 SF 分配不同的 BW 和 CR, 以实现不同的数据速率、可靠性或灵敏度。因此, 将式(2)扩展到式(3)中, 以考虑 BW 和 CR 的影响, 具体如下:

$$p_{s_f, b_w} = p_{s_f} b_w \bigg/ \sum_{i \in B_w} i \quad (3)$$

式中: p_{s_f, b_w} 为使用特定扩频因子 s_f 和带宽 b_w 组合的节点比例。由约束条件 $\sum_{i \in B_w} p_{s_f, b_w} = p_{s_f}$ 可得出式(3)。为了考虑 CR 的影响, 将式(3)最终扩展为式(4):

$$p_{s_f, b_w, c_r} = p_{s_f, b_w} c_r \bigg/ \sum_{i \in C_r} i \quad (4)$$

式中: p_{s_f, b_w, c_r} 为使用特定扩频因子 s_f 、带宽 b_w 和编码速率 c_r 组合的节点比例。

由约束条件 $\sum_{i \in C_r} p_{s_f, b_w, c_r} = p_{s_f, b_w}$ 可导出式(4)。式(4)是式(2)的广义形式, 其中, 如果以相同的 BW 和 CR 部署所有 SF, 则式(4)表示的值等于式(2)得出的值。因此, 使用已有的 LoRaWAN 数据速率而不考虑 CR 的公平比率为: $p_0 = 0.024, p_1 = 0.044, p_2 = 0.080, p_3 = 0.144, p_4 = 0.257, p_5 = 0.090$ 和 $p_6 = 0.359$ 。

通过观察式(4)分配 LoRaWAN 单元内的数据速率, 确保了每个节点具有相同的冲突概率。但是, 在一个单元内通过 RSSI 分配数据速率的标准并不清晰, BW 和 CR 完全正交, 而 SF 则不然, 这取决于接收功率。因此, 文中区域概念作为在 LoRaWAN 单元内分配 SF 的一种方式。为此, 将 LoRaWAN 单元划分为多个区域, 其中每个区域均包含多个节点, 这些节点根据其 RSSI 分配给该区域。应该使用式(2)中的公平 SF 比率分配每个区域的节点, 并建议区域的最小值应等于最小的公平比率, 对于

SF12,其等于 2%,以便更好地表示一个区域中的所有比率。因此,建议最小区域值应等于 50 个节点,这意味着一个区域中只有一个节点使用 SF12。

为了验证公平数据速率分布的影响,文中比较了公平数据速率。假设所有节点都在一个区域内,文献[6,14]考虑了节点之间的 SF 分配相等,而文献[18]中提出的分配表明 28%的节点应使用 SF12。公平性是使用文献[19]的公平性指数计算得出的:

$$\zeta = \left(\sum_{i=1}^N r_{\text{DER},i} \right)^2 / \left(N \sum_{i=1}^N r_{\text{DER},i}^2 \right) \quad (5)$$

式中: $r_{\text{DER},i}$ 为具有 N 个节点的单元中的节点 i 的数据提取速率(data extraction rate, DER)。在文献[3]中引入了 DER 度量,作为一段时间内接收到的数据包与已发送的数据包之比。公平指数从 0 到 1 不等,其中较高的指数表示较高的公平性。结果如图 3—图 5 所示,对于不同数量的节点,假设其 SF 完全正交并忽略了捕获效果。不管分配的 TP 如何,都能洞悉单元内的公平性。

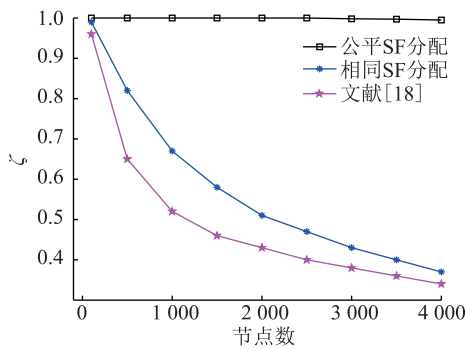


图 3 不同节点下的公平性指数

Fig.3 Fairness index under different nodes

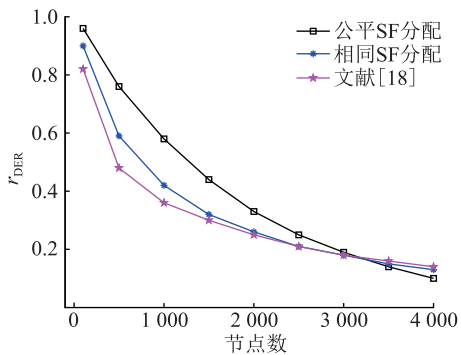


图 4 不同节点下的 DER 值

Fig.4 Data extraction rate under different nodes

图 3 为不同节点下的公平性指数,其中公平分配几乎是 1,而与节点数无关。但是,由于冲突的增加,在其他分配中,随着节点数量的增加,公平性指数会明显降低。由图 4 可知,公平分配的总体 DER 优于其他 2 个分配,最多约 3 200 个节点。此后,冲

突总数变高,这意味着与其他分配相比,DER 要低一些,以使每个 SF 的 DER 均等,如图 5 所示。图 5 清楚展示了分配的影响,显示了 4 000 个节点的单元中 DER 与 SF 的关系。根据文献[18],使用低 SF 的节点的 DER 高于使用相同 SF 分配以及使用 SF 分配的高 SF 的节点的 DER。对于 SF10、SF11 和 SF12,DER 几乎为零,代表相同 SF 分配的一半节点。这意味着有一半的节点由于冲突而无法传送任何数据包,而公平分配的 DER 对于所有 SF 几乎都相等。

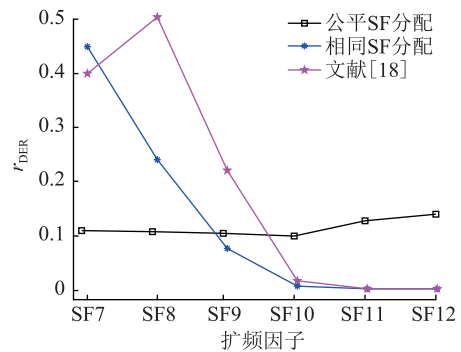


图 5 4 000 节点下不同 SF 对 DER 的影响

Fig.5 Effect of different SF on data extraction rate under 4 000 nodes

2.2 TP 控制

在 LoRaWAN 中造成不公平的另一个原因是距离问题,这会影响到捕获效果,尤其是在不完全正交的 SF 的情况下。这些特性有利于近节点,因为其接收功率比远节点高。因此,需要平衡所有节点的接收功率,以实现所有节点之间的公平数据速率,而不论其与网关的距离如何。

文中提出了一种 TP 控制算法。该算法需要节点列表和相应的 RSSI 列表,可以分配的可用传输功率 TP 参数列表,以及所有 SF 对的 CIR 矩阵作为输入,并将 TP 分配给每个节点作为输出。为了避免 RSSI 不稳定,在网络服务器收集了一定数量的数据包之后运行该算法,以计算平均 RSSI。文献[20]对 RSSI 的稳定性进行了研究,结果表明,靠近网关的节点的 RSSI 标准偏差小于 3 dBm,但是对于远端的节点,该偏差增加到了 20 dBm。该算法不对收集到的数据包的初始 TP 分配进行假设,但建议在运行算法之前使用相同的 TP 启动节点,以使 RSSI 具有一般参考性。

该算法首先按照节点的 RSSI 对其进行排序,然后计算 CIR 的最小值,测量 RSSI 的最大值和最小值,这代表了所有 SF 的安全范围。随后,该算法找到最大 TP,可以将 RSSI 极限值之间的差异减小到安全范围以内,其中最小 TP 是 TP 参数的最小值。

如果最大 TP 小于 TP 参数的最大值,则 TP 参数中较高的值将从列表中删除,因为其将不被使用,从而减少能耗,延长节点的寿命。接下来,该算法将最小 TP 分配给具有最大 RSSI 的节点,并将最大 TP 分配给具有最小 RSSI 的节点,然后相应地重新计算最小 RSSI 和最大 RSSI。随后,该算法开始分配 TP 参数,可分为 3 个步骤。(1) 只要新的 RSSI 不低于最小 RSSI,就将最小 TP 分配给高 RSSI 节点,符合此方法的最后一个节点的索引保存在最小功率索引中。(2) 只要新的 RSSI 加安全范围不高于最小 RSSI,就将最大 TP 分配给低 RSSI 节点,符合此方法的最后一个节点的索引保存在最大功率索引中。(3) 只要每个 TP 的分配符合新 RSSI 加安全范围不低于使用相同 TP 的第一个节点的规则,该算法就会将剩余的 TP 从低到高分配给最小功率索引和最大功率索引之间的节点。

该算法的运行时间是线性 $O(N)$,其中 N 为每个单元的节点数。该算法仅对所有节点进行一次迭代,因为 LoRaWAN 每个单元可能支持大量节点。因此,该算法非正式地增加了运行时间,与节点数成线性关系。

3 评估与讨论

为了评估这个想法,文中在 LoRaSim^[4] 中实施了 FADR。LoRaSim 是一个开放源代码的 LoRa 仿真器,仅考虑了来自同一 SF 的捕获效果,除此之外,还假定是完全正交的 SF。为了更全面地对冲突建模,根据文献[6],将 LoRaSim 扩展为包括 SF 的非完美正交性,这为所有 SF 对增加了保守的 6 dBm CIR 门限。通过多次实验,文中将 FADR 与目前最新方法^[15] 进行了比较。

文中考虑一个 LoRaWAN 单元,该单元由一个位于单元中心的网关和随机放置在该网关周围的 N 个节点组成,使用不同的节点分布研究了各种单元半径和各种数量的节点。节点使用传输速率 $\lambda = 60$ 生成长度为 $L = 80$ 字节的数据包。只要网关的并发传输使用不同的 SF 并且在安全范围之内,网关就可以在相同的载波频率上基于其 LoRa 收发器的数量来接收可配置数量的并发信号。对于给定的 SF 和 BW 组合,仅当数据包的 RSSI 高于相应的灵敏度时,才由网关解码数据包。

文中使用了基于对数距离传播模型的 LoRaSim 传播模型来计算传输节点的 RSSI。在文献[6,21] 中使用了相同的传播模型。文献[6] 假设使用任何传输参数组合的任何节点都可以到达网关,而不论

其与网关的距离如何。为了实现相同的假设,LoRaSim 中所有 SF 和 BW 组合的最低灵敏度降低到 -155 dBm,因此所有节点都可以通过所有组合到达网关。

图 6—图 8 为这项研究的总体结果。图 6 为使用式(5)的公平指数,图 7 为整体 DER,图 8 为整体能耗。文中用 2 种区域配置评估 FADR。其一是整个单元被视为一个区域。其二,先根据节点的 RSSI 对节点进行排序,然后将其分为 50 个节点的组。每个区域的数据速率均基于式(4) 进行分配,而 TP 分配则基于文中 TP 算法。

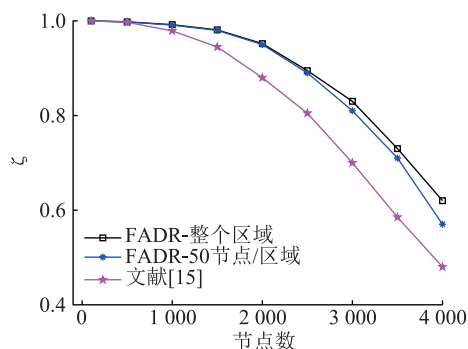


图 6 不同分配方法的公平指数

Fig.6 Fairness index for different allocation methods

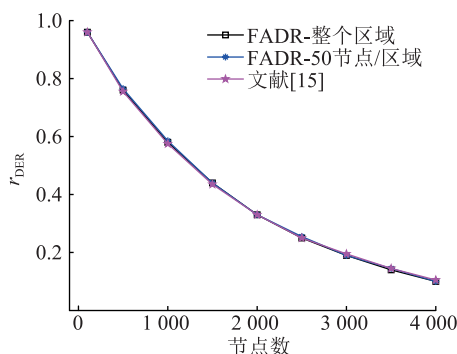


图 7 不同分配方法的总体 DER

Fig.7 Overall data extraction rate for different allocation methods

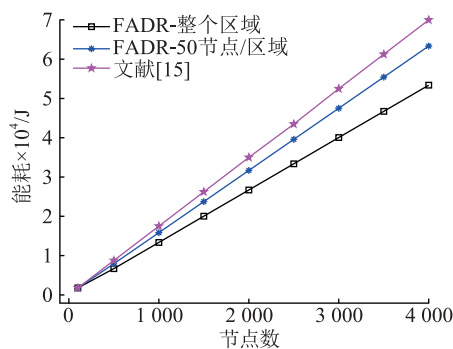


图 8 不同分配方法的总体能耗

Fig.8 Total energy consumption by different allocation methods

总体而言,2种 FADR 区域大小方法均在公平性方面优于文献[15]中的方法,并且不牺牲整体 DER;2种 FADR 区域大小方法比文献[15]中方法总体消耗的能量更少。另外,区域规模对公平性和整体能源消耗有显著影响,但对整体 DER 几乎没有影响。减小区域大小,一方面使所有 SF 混合在一起,而 RSSI 的变化很小;另一方面,SF 分布在单元中的各处,而不仅仅是单区域部署中的连续区域,其将低 SF 分配给高 RSSI,将高 SF 分配给低 RSSI。因此,小区域通过降低 SF7 相对于高 SF 的不完美正交效应,更好地为高 SF 服务,从而损害较低的 SF,尤其是 SF7。但是,小区域部署会增加捕获效果的影响,尤其是 SF7,因为现在具有相同 SF 的节点的 RSSI 差异很大。如图 6 所示,带有 SF7 的整体节点代表了一个单元中的大多数节点,小区域部署会导致公平性指数降低。从分析中排除 SF7 并重新计算公平性指数表明,小区域部署相比单个区域部署能实现更高的公平性。

在能耗方面,FADRTP 控制算法将高 TP 分配给低 RSSI,反之亦然,这导致单区域部署比小区域部署消耗更多的能量。其原因是,在单个区域部署中,具有低 RSSI 的节点被分配了较高的 SF,即较高的 BW 占用时长,并使用较高的 TP 进行传输,但是在小区域部署中,SF 分布在整个单元中,因此 BW 占用时长也分布在 TP 上。

4 结语

文中 FADR 方法通过部署可实现相等冲突概率的最公平数据速率比并控制 TP,使其在安全的范围内平衡所有节点的接收功率,从而在 LoRaWAN 单元中实现公平的数据提取速率,并降低捕获效果。无论节点与网关的距离如何,FADR 都能为所有节点实现几乎统一的数据提取速率,并且通过不使用过高的 TP 来维持节点的生命周期。经过与其他相关的最新技术进行比较证明了 FADR 的优势。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019051)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 王坤龙. 基于 LoRa 的低功耗广域网 MAC 协议实现与优化[D]. 重庆:重庆邮电大学,2018.
WANG Kunlong. Implementation and optimization of LoRa-based low-power WAN MAC protocol[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications,2018.
- [2] 姚舜禹. LoRa 网络并发传输控制技术研究[D]. 西安:西北大学,2019.
YAO Shunyu. Research on LoRa network concurrent transmission control technology[D]. Xi'an:Northwest University,2019.
- [3] GEORGIU O,RAZA U. Low power wide area network analysis: can LoRa scale? [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017,6(2):162-165.
- [4] ABDELFADEEL K Q, CIONCA V, PESCH D. Fair adaptive data rate allocation and power control in LoRaWAN [C]// WOWMOM,2018.
- [5] GOURSAUD C, GORCE J M. Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges[J]. Macromolecules,2015,1(1):150597.
- [6] WARET A,KANEKO M, GUITTON A, et al. LoRa throughput analysis with imperfect spreading factor orthogonality[J]. IEEE Wireless Communications Letters,2019,8(2):408-411.
- [7] SENEVIRATNE P. Introduction to LoRa and LoRaWAN[M]// Beginning LoRa Radio Networks with Arduino. 2019.
- [8] 代贤忠,韩新阳,董益华,等. 能源互联网多源多层次协调优化方法研究[J]. 电力工程技术,2019,38(2):7-15.
DAI Xianzhong,HAN Xinyang,DONG Yihua, et al. Research on multi-source multi-level coordination and optimization method of energy internet [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019,38(2):7-15.
- [9] SØRENSEN R B, RAZMI N, NIELSEN J J, et al. Analysis of LoRaWAN uplink with multiple demodulating paths and capture effect[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications. 2019.
- [10] BANKOV D,KHOROV E, LYAKHOV A. On the limits of LoRaWAN channel access[C]//International Conference on Engineering & Telecommunication. IEEE,2017.
- [11] BOR M C, ROEDIG U, VOIGT T, et al. DoLoRa low-power wide-area networks scale [C]//Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. 2016(9):59-67.
- [12] 魏素盼,时生乐. LoRaWAN 技术在智慧社区环境监测中的应用研究[J]. 卫星电视与宽带多媒体,2019(16):13-14.
WEI Supan,SHI Shengle. Research on application of LoRaWAN technology in environmental monitoring of smart community[J]. Satellite TV and Broadband Multimedia,2019(16):13-14.
- [13] 赵全,徐光,郝龙,等. 基于 LoRa 的无线多参数环境监测节点设计[J]. 电子测量技术,2019,42(5):119-122.
ZHAO Quan,XU Guang,HAO Long, et al. Design of wireless multi-parameter environmental monitoring node based on LoRa [J]. Electronic Measurement Technology, 2019,42(5):119-122.
- [14] CROCE D, GUCCIARDO M, MANGIONE S, et al. Impact of LoRa imperfect orthogonality: analysis of link-level performance [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(4):796-799.
- [15] REYNDERS B, MEERT W, POLLIN S. Power and spreading factor control in low power wide area networks [C]// ICC 2017-2017 IEEE International Conference on Communications. IEEE,2017.

- [16] JI H, HUANG C Y. Non-cooperative uplink power control in cellular radio systems [J]. *Wireless Networks*, 1998, 4 (4): 233-240.
- [17] 孙大松, 郁正纲, 伏祥运, 等. 多通信方式联合组网下的海岛微电网控制方法[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(2): 16-23. SUN Dasong, YU Zhenggang, FU Xiangyun, et al. Island micro-grid control method in multi-communication mode combined networking[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(2): 16-23.
- [18] FERRAN, ADELANTADO, XAVIER, et al. Understanding the limits of LoRaWAN [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(9): 34-40.
- [19] NEMHAUSER G. Optimization theory for large systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 17 (2): 277-278.
- [20] VANGELISTA L, ZANELLA A, ZORZI M. Long-range IoT technologies: the dawn of LoRa [M] // *Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures*. Springer International Publishing, 2015.
- [21] SANCHEZ-IBORRA R, SANCHEZ-GOMEZ J, JUAN B, et al. Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions [J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 772.

作者简介:



林浩男

林浩男(1994),男,硕士在读,研究方向为无线携能通信、多跳中继等(E-mail:171828195@qq.com);

王海(1976),男,学士,高级工程师,从事无线专网、电力信息通信等技术研究工作;

郭雅娟(1975),女,硕士,研究员级高级工程师,从事电力信息通信技术研究工作。

Fair data rate allocation and transmission power control in LoRaWAN

LIN Haonan¹, WANG Hai², GUO Yajuan¹, SUN Yunxiao², ZHU Daohua², MAO Minghe¹

(1. School of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Fairness of data rates among nodes within a LoRaWAN cell is studied. The reasons why the LoRaWAN data extraction rate is unfair are: firstly, the data rate allocated to the nodes is unreasonable; secondly, because of the distance problem, LoRa / LoRaWAN shows a capture effect, where only the stronger signal in the collision signals is extracted. In order to solve the above problems, a fair adaptive data rate allocation and power control scheme is proposed. By deploying the fairest ratio of each data rate and controlling the transmission power in a cell, the capture effect is reduced, and fair data extraction is possible regardless of the distance between them and the gateway. Numerical simulation results show that compared with the latest technology, the method in this paper achieves higher fairness in data extraction rate. At the same time, the proposed method can maintain the life cycle of the node without excessive transmission power, thus reducing the overall energy consumption of the entire transmission system, in line with the concept of green communication.

Keywords: LoRaWAN; LoRa; fair adaptive data rate; transmission power control; spreading factor

(编辑 方晶)