



研究与开发

双模介质通信 mesh 网络吞吐量分析与优化

苏展¹, 文博², 朱晓荣¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京熊猫电子股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 面向低压配电网的双模介质通信系统, 凭借电力线载波与无线通信介质在传输特性上的互补优势, 有望承载新型智慧电网业务的容量需求。然而, 配电网复杂的层级拓扑结构、双模介质的传输协作机制和资源公平性分配的多重约束等, 使精确建立容量分析模型面临诸多挑战。因此, 针对以上挑战开展双模介质通信的大规模配电 mesh 网络上行负载能力研究。首先, 根据 mesh 子网中设备层级结构建立多跳信息流吞吐量模型, 引入跳频机制、设备半双工机制等约束, 提出解决信息流的资源分配不公平问题的满意度函数, 形成单子网吞吐量优化问题。其次, 结合多子网间干扰约束, 形成整数约束的多子网吞吐量优化问题, 所得最优解为大规模 mesh 网络的上行负载能力。仿真结果表明, 双模通信较单模通信网络吞吐量有 50% 以上的提升, 所提的资源分配算法较传统资源分配算法吞吐量提升了 10%, 且通过提升网络并发能力和主控节点接收能力可获得较大的网络负载能力增益。

关键词: 配电物联网; 双模通信; 资源分配; 跳频; mesh 网络

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025131

End-to-end throughput evaluation model and optimization method for dual-mode mesh network

SU Zhan¹, WEN Bo², ZHU Xiaorong¹

1. School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Nanjing Panda Electronics Co., Ltd., Nanjing 210000, China

Abstract: The requirements of the emerging smart grid pose a challenge for power line carrier communication systems in low-voltage networks. However, a large-scale dual-mode communication mesh network, with its advantages, such as high reliability and throughput, holds promise for widespread application in power communication systems.

收稿日期: 2024-12-28; 修回日期: 2025-05-11

通信作者: 朱晓荣, xrzhu@njupt.edu.cn

基金项目: 国家科技重大专项 (No.2024ZD1300400); 国家自然科学基金资助项目 (No.92367102); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (No.KYCX23_1013)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project (No.2024ZD1300400), The National Natural Science Foundation of China (No.92367102), The Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No.KYCX23_1013).

Prior to constructing the new network, it is essential to perform a capacity pre-assessment. Yet, building an accurate analytical model for capacity analysis is complicated because of numerous interrelated factors. To address these challenges, the uplink capacity of dual-mode communication in large-scale mesh networks was investigated. Firstly, a throughput model for multi-hop transmission was established based on the device hierarchy structure within the sub-net mesh. Constraints such as frequency hopping and device half-duplex mechanism were then introduced into the model, and a satisfaction function was proposed to address the issue of unfair resource allocation for information flows, forming a convex optimization problem for throughput in one sub-net. Then, considering the constraints of sustained coefficients between multiple subnets, an integer-constrained optimization problem for throughput in multiple sub-nets was formulated, and the optimal solution represented the uplink capacity of the network. The simulation results show that the network throughput of dual-mode communication is at least 50% higher than that of the single mode communication. The proposed resource allocation algorithm improves throughput by 10% compared with traditional resource allocation algorithms. By improving the network concurrency ability and the receiving ability of the master node, a significant gain in network load capacity can be achieved.

Key words: distribution IoT, dual-mode communication, resource allocation, frequency hopping, mesh network

0 引言

随着我国智能电网建设的推进, 分布式电源大规模并网, 电网调度运行模式向源网荷储协调控制、输配微网多级协同转变, 催生出分布式光伏调控、精准负荷控制、配网保护等新型配电网业务应用^[1-2]。此外, 随着智能电网的建设逐步接入用户家庭, 面向用户侧的低压配电台区能够实现现代智能家居、智能集中式抄表、峰谷时段智能电力调度和搭建家庭用电综合服务平台, 不仅加快了居民的“数智化”生活进程, 为用户提供了更优质、便捷的服务, 提高了生活质量, 还能实现能源的高效利用与节能减排, 服务国家“三网融合”战略。因此, 面对“新能源、新业务”大规模接入、“响应”由骨干向末梢延伸、故障自治自愈等新的业务应用特点, 新型低压侧配电网系统需要构建一种大规模的 mesh 网络, 这种网络需要具有调用灵活和按需互联的特性, 满足海量终端设备随遇感知接入、微调度业务的性能需求, 优化配电网调控管理, 提升电网可观、可测、可控和可调能力。

由于配电台区的覆盖面积较大, 所处的环境极其复杂, 现行的电力线载波通信网络不能完全

满足巨量设备的接入、广域覆盖和可靠的信息传输。因此, 低压配电网络需要构建由电力线载波通信与无线射频通信双模介质融合的大规模 mesh 网络, 解决新型配电物联网的接入与传输问题。该双模融合网络通过融合电力线载波与无线射频两种传输媒介, 结合多种传输模式、多种制式和多种传输手段, 形成多维度多形式的本地异构通信网络, 不仅能够提供广域的物联网通信服务覆盖, 还可以支持多种不同类型的物联网设备接入, 将打破复杂物联网场景中碎片化和差异化的通信壁垒, 构成智能物联网的“最后一英里”网络。为了推进异构双模通信技术发展, 2019 年, 国家电网和中国电科院引领电力行业各厂商和专家针对异构双模网络物理层通信技术进行研究, 经过提案、可行性分析、仿真和台区实测等工作, 最终形成了国家级电力网络双模通信标准^[3]。这种双模介质的高可靠性、灵活组网性能和更高的吞吐量能给配电物联网带来极简的网络结构、更低的建设成本和高效的运维策略^[4-5], 因此, 对这种高效可靠的新型大规模双模 mesh 网络的吞吐量研究与评估是很有价值的。

目前, 国内外研究学者针对低压配电网的通信网络已进行了广泛的研究^[6-7]。在链路容量方



面, 基于高斯白噪声与脉冲噪声的混合噪声建模^[8], 文献[9-11]对电力线载波通信中的单跳链路容量与误码率性能进行理论分析与仿真验证。进一步地, 文献[12-13]对采用电力线载波与无线射频两种通信介质的双跳通信系统做出了初步的性能分析。虽然当前关于双模介质传输容量分析已经较为成熟, 但仍停留在链路级的研究, 鲜有关于大规模 mesh 配电物联网的容量分析。与链路容量不同, 网络容量不仅与传输环境有关, 还与网络资源分配算法、路由传输算法等有关。经典的资源调度算法有轮询算法、最大载干比算法^[14]、比例公平算法^[15]等, 但在长距离多跳的场景中, 由于多跳中继传输导致的传输效率下降会使优化算法的效能恶化, 因此需要设计新的资源公平性分配算法。

在无线 mesh 网络容量研究中, 文献[16]针对多信道与多接口的协作无线 mesh 网络, 提出了最优的中继接口配置机制来实现单向流与双向流的网络容量最大。文献[17]研究了基于全球微波接入互操作性 (world interoperability for microwave access, WiMAX) 的 mesh 网络上行链路容量, 在该资源调度算法中引入了用户实际流量需求, 兼顾了网络总吞吐量与用户接入站的公平性。文献[18-19]均对多跳 mesh 网络的端到端容量进行分析与优化。以上研究将网络容量视为所有链路/节点的速率之和, 而 mesh 网络的容量分析应以端到端的信息流为中心, 端到端信息流的速率取决于路径中速率最小的一跳, 研究对象应为网络中所有信息流的速率之和。因此, 以上研究仅将所有链路的速率之和视为网络容量, 可能导致所分析的系统网络容量与实际的网络容量之间存在较大的误差。

另外, 目前的 mesh 网络容量研究工作还没有对分布式配电物联网场景中的双模通信系统进行深入的探讨。配电台区的双模介质通信相较单模通信更有灵活性, 能够在链路状况发生改变时

灵活选择传输链路, 保障链路传输的可靠性。当两种介质均有较好的通信质量时, 可以通过两种介质链路的协作传输, 合理地分配网络资源来提升端到端信息流的吞吐量。但两种介质的通信结合, 将提高资源优化的维度, 尤其对于节点数目较多的大规模配电物联网, 海量节点之间相互影响的程度随之倍增。因此, 复杂的路由与多模通信介质、动态多变的噪声, 以及异构网络中的时频资源合理分配、接入设备的公平性管理等诸多因素增加了双模网络吞吐量分析的计算复杂度。随着电力系统中配网运检的业务采集接入、“新能源、新业务”的大规模接入、“响应”由骨干向末梢延伸、故障自治自愈等新的业务特点的出现, 对网络容量提出了更高的要求, 因此有必要评估与优化这种新型双模通信网络的吞吐量负载能力。

基于上述对研究现状的分析, 本文的主要研究工作如下。

(1) 以网络内端到端的信息流为中心, 结合双模通信的 mesh 网络中多种工作机制约束, 如节点半双工机制、跳频机制等, 形成单个 mesh 子网的网络容量模型。

(2) 针对 mesh 网络中多跳传输信息流之间存在的时频资源分配不公平问题, 综合考虑信息流的资源需求量, 提出一种基于满意度函数的资源分配方法, 解决时频资源分配的公平性问题。

(3) 针对多个大规模 mesh 子网并存时的场景, 由单 mesh 子网吞吐量与驻留时间的离散数据关系, 结合驻留时间的约束关系, 建立具有整数约束的多个子网的网络容量模型。

(4) 仿真结果表明, 双模通信较单模通信有显著的吞吐量提升, 本文所提的基于满意度函数的资源分配算法相较轮询算法和比例公平算法获得了吞吐量的提升。通过提高跳频的驻留时间和中心主控节点的接收能力可以带来单子网络吞吐量的增益, 且在多子网并存的场景中, 存在最优的信道数量使多子网的负载能力达到最大。

本文主要分析了双模低压配电 mesh 网络内的各种复杂约束关系,提出了一种新的基于满意度的资源分配方法,形成了单个 mesh 子网的吞吐量模型;通过分析多个 mesh 子网之间的影响约束关系,形成了多子网络吞吐量优化模型,对整个配电台区吞吐量负载进行有效评估。该优化与评估模型能得到资源分配公平和高效利用的大规模双模 mesh 配电网络资源分配方案,对新型网络建设前的网络性能预评估有指导作用。

1 系统模型

配电 mesh 网络模型如图 1 所示,在单个 mesh 子网络内,一个中心主控节点 (master node, MN) 通过层级的方式与多个路由汇聚节点 (route node, RN)、末端节点 (end node, EN) 相连,其中, RN 主要为路由转发设备, EN 为配电台区各类传感、检测设备,不断产生感知类数据上传的业务需求。在整个低压配电台区,并存着多个 mesh 子网络, mesh 子网络内部与网络间采用跳频机制规避网络内部与网络间的干扰,共同构成大规模双模 mesh 网络,存在着复杂的交互关系。

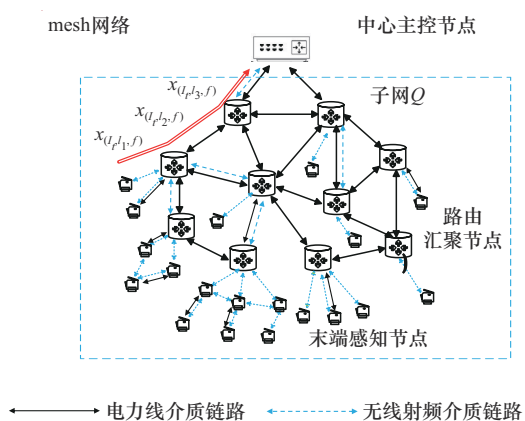


图1 配电mesh网络模型

假设设备之间可以通过电力线载波和无线射频介质进行双模通信,通过统一设计介质访问控制 (media access control, MAC) 层协议,能够

大幅度地简化系统协议栈的设计与实现^[20]。在大规模智慧配电物联网中通信器件成本不可忽视,因此,EN与RN通常采用性能较低的通信模块,MN与RN/EN使用单个全向天线进行信号的发射与接收,信号处理芯片仅能同时在一个频段上处理一种通信介质的信号。

当采用电力线载波 (power line carrier, PLC) 介质通信时, RN/EN 并联接入输电线, 形成总线型拓扑结构, 且根据实测数据, 90% 以上的时间电力线载波通信都采用某一个频段进行竞争接入通信, 因此本文假设电力线载波通信为单信道通信模式。当采用无线射频 (radio frequency, RF) 介质通信时, 假设网络内将时间与频率划分成多个时频资源块, RN/EN 通过在链路中占用时频资源块获得通信能力。为了在环境复杂的配电台区抵抗无线通信多径衰落, 规避无线干扰, mesh 子网内设备只能在一个信道上进行通信且只能有一个 RN/EN 在某频段上传输信息, 该 RN/EN 通信完毕后才能开始下一个 RN/EN 的通信, 即单信道模式。跳频模式与单信道模式示意图如图 2 所示, 该模式提升了配电台区的信道资源利用率。使用这种跳频技术时, 若 RN_1 正在某个频段上通信, 未在通信的 RN_2 可以在一个时隙后跳变到另一正交的工作频段上开始通信, 而 RN_1 可以在原有信道中保持传输直至传输完成。因此, 该跳频技术允许多个 RN/EN 同时在正交的跳频子信道上传输而不产生干扰, 实现无干扰的并发上报信息。本文定义驻留时间 J 来表征每个 RN/EN 在跳频模式中传输所占用的时隙长度, 如图 2 中 EN_1 驻留时间为 4。在驻留时间合理选择时, 采用跳频机制的单个网络内可以完全避免同频干扰, 合理规划多个子网络的跳频序列也可以完全避免多个 mesh 子网络间的同频干扰。由于配电区域的环境复杂, 常存在无线信号阻隔现象, 当子网内两个设备无法检测到彼此的干扰信号时, 便可以认为设备采用相同频率通信时彼此间不产生干扰, 即

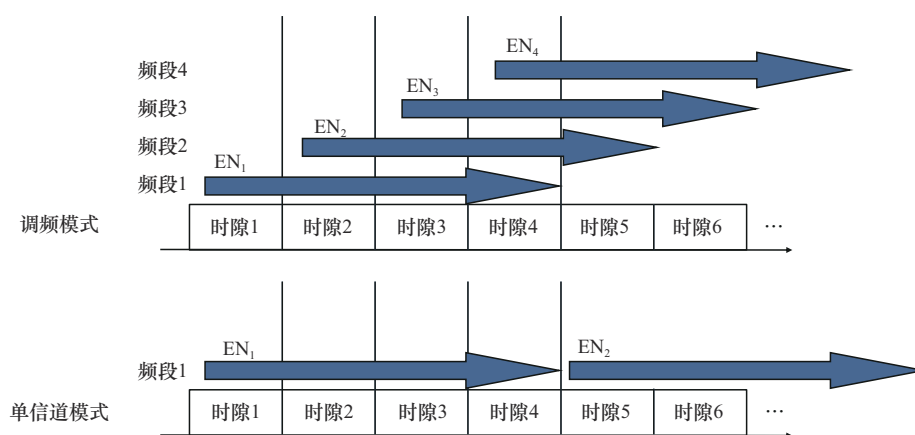


图2 跳频模式与单信道模式示意图

存在频率的复用机制。因两种介质的通信过程在不同的频段上，所以两种介质通信过程之间不存在干扰。

EN作为末端感知节点分散在配电台区的各个位置，通常不能直接与MN通信，因此，EN从环境中采集到多模态感知数据后，生成的信息流需要经过多个EN或RN的层级中继传输才能到达MN。RN作为路由汇聚节点，负责数据的中继转发，本身并不会产生新的信息流。MN作为中心主控节点，负责从RN和EN处接收信息并回传至互联网。假设传输过程中的丢包率和接入时延为恒定值且已知。

2 单子上行吞吐量分析

2.1 信息流的传输模型

如图1所示，在由单个MN组成的mesh子网 Q 中，存在多个EN与相应需要上传的信息流，存在多条通信链路或多个频段的信道。定义子网 Q 内所有的RN/EN集合为 $\mathcal{T}$ ，所有需要传输的信

息流集合为 $\mathcal{I}$ ，所有链路集合为 $\mathcal{L}$ ，所有信道集合为 $\mathcal{F} = \{\mathcal{F}_{\text{RF}}, f_{\text{PLC}}\}$ ，其中， $\mathcal{F}_{\text{RF}}$ 为无线信道集合， f_{PLC} 为电力线载波信道。在这样的网络中，信息流需要经过多条链路，通过多个层级连接的RN/EN中继作用多跳传输至MN。

对于这样的系统，认为信息流在一条链路中通过占用某个信道一定数量的时隙，即占用一定数量的时频资源块来传输数据。本文设计变量 $x_{(I,l,f)}$ 来表示源于 EN_i 的信息流 I_i 单位时间内在链路 l 、信道 f 上占用的归一化时间资源。例如，图1中子网 Q 所示的一条信息流，分别需要在 l_1 、 l_2 和 l_3 链路上占用一定的时频资源进行信息的传输。认为链路 l 上信道的传输速率 $C_{l,f}$ 与信息流相应的资源占用量的乘积对所有频段求和 $\sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I,l,f)} C_{l,f}$ 为信息流 I_i 在链路 l 上的实际传输速率。本文假设电力线载波通信的信道系数服从对数正态分布，射频通信的信道系数服从瑞利分布^[13]，考虑固定的链路丢包率和无线通信接入时延，某条链路的某个信道上传速率可以写为：

$$C_{l,f} = \begin{cases} B_f \text{lb} \left(1 + \frac{E_b |\hat{h}_l^{\text{PLC}}|^2}{n_b + n_i} \right), & f \in \mathcal{F}_{\text{RF}} \\ B_f \left(1 - \frac{\text{td}_a}{Jt_0} \right) \text{lb} \left(1 + \frac{P_{\text{EN/RN}} G^{\text{RF}} |\hat{h}_l^{\text{RF}}|^2 d_l^{-\alpha_{\text{RF}}}}{n_0} \right), & f = f_{\text{PLC}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, B_f 表示信道带宽, n_b 与 n_i 分别表示电力线载波信道中的高斯背景白噪声与脉冲噪声功率, n_0 表示无线射频信道的高斯背景白噪声功率, h_i^{PLC} 和 h_i^{RF} 分别为电力线载波与无线射频信道的衰落增益, td_a 表示无线通信接入时延, t_0 为单个时隙的长度, J 为后文表征跳频机制所用参数, $(1 - td_a/(Jt_0))$ 为当链路按跳频序列分配得到通信资源块时, 无线接入时延会占据通信的时间长度, 双模通信时频资源示意图如图 3 所示, 表征了无线接入时延对链路传输速率的影响。 E_b 表示电力线载波通信平均能量, P 为 EN 或 RN 的无线发射功率, d 为链路 l 的长度, α 为射频通信的信道衰落系数, G^{RF} 表示天线增益。

假设信息流在每次中继传输时会有一定的链路损耗率, 损耗率记为 E 。使用 $H_{I_t, l}$ 表示信息流 I_t 从信源开始到链路 l 上的跳数。对于一条多跳传输的信息流 I_t , 其端到端的吞吐速率取决于路由中链路传输速率的最小值, 即:

$$R_{I_t} = \min \left\{ \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l, f)} C_{l, f} (1 - E)^{H_{I_t, l} - 1} \mid l \in \mathcal{L}^{I_t} \right\} \quad (2)$$

其中, $\mathcal{L}^{I_t}$ 为信息流 I_t 在传输路径中包含的链路集合。

2.2 跳频机制与设备半双工约束分析

图 3 为某种跳频序列下单个子网内的时频资源示意图, 图 3 中每个独立的色块被定义为一个时频资源块。对于跳频机制, 每隔一个时隙后子网跳变到另一个频点上, 从而使用新的资源块进行传输, 因此整个子网在一段时间内拥有一定数

量的不同信道的资源块。一个 RN/EN 在发生跳频后仍然可以保持一定的时间继续传输, 在图 3 中体现为资源块的长度大于单个时隙的长度, 因此定义通信资源块的时长与单个时隙的长度之比为驻留时间 J 。由于正交的资源块在时间上发生了重叠, 因此, 单子网内可以并发上报数据, 重叠的正交资源块越多意味着子网内并发传输能力越强, 而所定义的驻留时间能够表征单子网内的信息并发传输能力。驻留时间为 1 时, 跳频模式退化为单信道传输模式, 此时网络中没有并发传输的效果。随着驻留时间的提升, 每个时隙内有多个正交的跳频子信道能够用于传输, 并发传输的能力因此得到提升。

单子网内, 频段的使用次序由跳频序列规定, 因此, 某时隙中可使用的频段已知, 且某个频段 f 在单位时间内占有的时间比例也由跳频序列所决定, 记为 τ_f 。此外由于 RN/EN 通信能力有限, 网络中还存在设备半双工通信机制的约束, 同一时刻仅能发送或接收一条信息流。因此时频资源的分配需要满足如下的规则。

(1) 资源分配规则 1: 存在同频干扰的链路集合 $\mathcal{L}^f$ 中传输的信息流在信道 f 上可占用的归一化时频资源之和小于 τ_f , 即:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^f} \sum_{I_t \in \mathcal{I}} x_{(I_t, l, f)} f_l(I_t, l) \leq \tau_f \quad (3)$$

$\mathcal{L}^f$ 中的链路通常距离较近且无障碍物阻隔, 它们之间通常存在严重的同频干扰而不能同时传输。 $f_l(I_t, l)$ 为示性函数, 当信息流 I_t 在传输路径中包含链路 l 时函数值为 1。式 (3) 能够描述跳

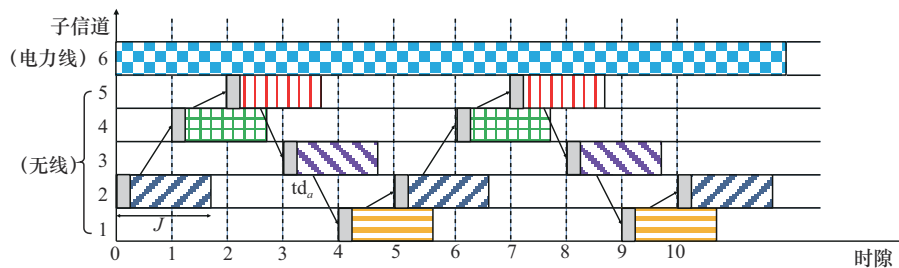


图3 双模通信时频资源示意图



频机制对时频资源分配的约束。

(2) 资源分配规则2: 任一RN/EN所连接的链路集合 $\mathcal{L}^t$ 上占用的归一化时频资源之和小于1, 即:

$$\sum_{I_t \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}^t} \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l, f)} f_l(I_t, l) J \leq 1 \quad (4)$$

其中, $\mathcal{L}^t$ 表示连接在同一个设备 t 上的链路集合, 设备在同一时刻仅能发送或接收, 式(4)描述了RN/EN半双工机制对资源分配的约束。

考虑电力线载波通信共用一个信道且大多数情况工作在某个特定频段上, 可以将载波通信视为单信道传输模型, 与射频信道无干扰但与射频介质通信共同受到RN/EN半双工机制的约束。

2.3 信息流的端到端传输约束分析

本文对单子网的上行负载能力做出以下定义, 每个生成信息流的EN都有其各自的传感信号到达数据量, 这些数据为EN所采集的需要上传的配电运检数据, 周期性地产生且需要在一定传输时延要求内将数据传输至MN, 该时延要求通常为数分钟至数十分钟。这些数据经过多跳链路传输至MN, MN最终有效接收到的某条信息流的传输速率为该信息流的上行吞吐速率, 所有信息流上行吞吐速率之和为单子网的吞吐速率, 因此定义子网吞吐速率在某种资源分配方案下的最大值为该子网的上行负载能力。

由于同一时刻MN只能在一个信道上接收一条链路上的数据, 因此, 当子网把所有时频资源集中在一跳直连至MN的信息流上时, 子网吞吐速率最大, 这也是子网络的上行负载能力, 但是这并不是想要的结果。为了避免陷入上述资源分配问题, 本文对信息流的传输速率加以约束, 认为每条信息流都有一定的数据传输需求, 定义信息流 I_t 需要传输的数据量为 A^{I_t} 。此外, 信息流的传输时间存在限制, 即信息流在单跳链路内应在 $T_{\min}$ 内完成传输, 因此各条信息流在链路上的传输速率应大于 $A^{I_t}/T_{\min}$ 。结合以上分析, 可以写出

以下资源分配规则。

(1) 资源分配规则3: 信息流在多跳传输的每跳链路中都有相应的传输速率, 速率最小跳的吞吐速率视为该条信息流的吞吐速率。显然每跳链路上的传输速率均相等才能保证子网资源被最优利用, 且传输速率范围应当大于 $A^{I_t}/T_{\min}$, 则可得到:

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l, f)} C_{l, f} J (1-E)^{H_{l, l'}-1} > \frac{A^{I_t}}{T_{\min}}, \forall I_t \in \mathcal{I}, \forall l \in \mathcal{L}^{I_t} \quad (5)$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l, f)} C_{l, f} J = \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l', f)} C_{l', f} J, \forall l, l' \in \mathcal{L}^{I_t}, \forall I_t \in \mathcal{I} \quad (6)$$

(2) 资源分配规则4: 所设计的资源分配参数 x 为时频资源归一化占用量, 因此取值范围应为0到1的连续区间。电力线载波通信存在三相轮询切换的接入限制, 单条信息流在某跳链路上可使用的电力线载波信道的时频资源不超过1/3。此外, 定义拓扑不可用性矩阵 $\mathbf{K}=[k_{(I_t, l, f)}]_{|\mathcal{I}| \times |\mathcal{L}| \times |\mathcal{F}|}$ 约束链路不可用时的资源分配关系。因此可以得到以下约束:

$$x_{(I_t, l, f)} \geq 0, x_{(I_t, l, f)} \leq \begin{cases} 1, & f \in \mathcal{F}_{\text{RF}} \\ \frac{1}{3}, & f \in \mathcal{F}_{\text{PLC}} \end{cases}, I_t \in \mathcal{I}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (7)$$

$$x_{(I_t, l, f)} \cdot k_{(I_t, l, f)} = 0, \forall f \in \mathcal{F}, \forall I_t \in \mathcal{I}, \forall l \in \mathcal{L}^{I_t} \quad (8)$$

2.4 单子网上行负载能力的问题描述与求解

由式(2)可得, 在跳频机制下单mesh子网络mesh Q 内的吞吐量表达式为:

$$R_Q = \sum_{I_t \in \mathcal{I}} R_{I_t} = \sum_{I_t \in \mathcal{I}} \min \left\{ \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l, f)} C_{l, f} J (1-E)^{H_{l, l'}-1} \mid l \in \mathcal{L}^{I_t} \right\} \quad (9)$$

结合以上所有时频资源分配规则, 若以 R_Q 为优化目标, 则为最大载干比资源分配方案, 可以形成关于子网络 Q 中吞吐量的最优化问题如下。

$$\begin{aligned}
P_1: & \max_x R_Q \\
\text{s.t. } & C_1: \sum_{l' \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}^f} x_{(I_t, l, f)} f_l(I_t, l) \leq \tau_f, \forall f \in \mathcal{F}, \forall \mathcal{L}^f \in \mathcal{L} \\
& C_2: \sum_{l' \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}^f} \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l, f)} f_l(I_t, l) J \leq 1, \forall \mathcal{L}^f \in \mathcal{L} \\
& C_3: \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l, f)} C_{l, f} J (1-E)^{H_{l, l'}-1} = \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l', f)} C_{l', f} J (1-E)^{H_{l, l'}-1}, \forall l, l' \in \mathcal{L}^{l'}, I_t \in \mathcal{I} \\
& C_4: x_{(I_t, l, f)} \geq 0, x_{(I_t, l, f)} \leq \begin{cases} 1, & f \in \mathcal{F}_{\text{RF}} \\ \frac{1}{3}, & f = f_{\text{PLC}} \end{cases}, I_t \in \mathcal{I}, \forall l \in \mathcal{L} \\
& C_5: x_{(I_t, l, f)} \cdot k_{(I_t, l, f)} = 0, \forall f \in \mathcal{F}, \forall I_t \in \mathcal{I}, \forall l \in \mathcal{L}^{l'} \\
& C_6: \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(I_t, l, f)} C_{l, f} J (1-E)^{H_{l, l'}-1} > \frac{A^{l'}}{T_{\min}}, \forall I_t \in \mathcal{I}, \forall l \in \mathcal{L}^{l'}
\end{aligned} \tag{10}$$

该最优化问题以网络吞吐量最大化为优化目标，而由于子网内总的时频资源是有限的，该方案更倾向将通信资源分配给对网络吞吐量提升效益高的信息流。相比于跳数少的信息流，跳数多的信息流通常需要在网络中重复传输多次相同的数据，因此，在占用相同时频资源的情况下，对单子网络的吞吐量提升小，导致其在资源分配中处于劣势，出现资源分配的公平性问题。

为了解决资源分配公平性问题，通过引入各信息流的传输需求 $A^{l'}$ ，利用比例公平算法，引入约束：

$$C_7: \frac{R_{l_t}}{A^{l_t}} = \frac{R_{l_t'}}{A^{l_t'}}, \forall I_t, I_t' \in \mathcal{I}, I_t \neq I_t' \tag{11}$$

则可以为每条信息流分配完全根据其传输需求的时频资源。然而，低压配电网络中的信息流通常具有较长的中继链路，每次中继传输都会降低网络传输效率，传输跳数过高的链路若按照强制公平分配资源，则会出现网络性能恶化。因此，本文提出了一种以满意度函数为优化目标的最优化问题，叫做满意度最大 (satisfaction max, SFM) 优化方案，满意度函数兼顾信息流的传输需求与网络传输效率。其中，信息流分配所得的吞吐速率与传输需求比值越高，则认为信息流越“满意”。相比于最大载干比算法与比例公平算法，

SFM 方案下的信息流之间的满意程度是随传输效率非线性变化的，而最大载干比算法仅使传输效率最高的信息流满意，比例公平算法使所有信息流具有相同的满意程度。满意度函数将信息流分配资源与其需求资源的比值输入单调递增但一阶导数急剧下降函数的形式，所以信息流的满意程度能够随其传输效率灵活调整，但在分配资源与需求资源比值较低时会有较大的满意度下降惩罚，保证在以满意度为网络优化目标时，每条信息流分配得到的吞吐速率与其速率需求的比值相近，弥补了最大载干比算法下不同信息流因跳数不同而导致的资源分配巨大差异。因此，SFM 方案兼顾了信息流公平性与网络吞吐量，采用几种常用函数设计满意度函数如下。

$$\begin{aligned}
S_1(x) &= -e^{-a_1 x} \\
S_2(x) &= \ln(x - a_2) \\
S_3(x) &= (x - a_3)^{-1} \\
S_4(x) &= (x - a_4)^{-2}
\end{aligned} \tag{12}$$

其中，输入的自变量为信息流分配资源与需求资源的比值， a_1 为正数， a_2 、 a_3 和 a_4 为常数，对满意度函数的均衡性产生影响。由于第一种函数形式具有更尖锐下降的一阶导数，本文将采用 $S_1(x)$ 作为满意度函数。SFM 优化方案的最优化问题可以表示为：



$$\begin{aligned}
P_2: \max_x & \\
\sum_{l_i \in \mathcal{I}} S & \left[\frac{\min \left\{ \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(l_i, l, f)} C_{l, f} J (1-E)^{H_{l_i, l}-1} \mid l \in \mathcal{L} \right\}}{A^l} \right] \\
\text{s.t.} & \quad C_1, C_2, C_3, C_4, C_5
\end{aligned} \quad (13)$$

当满意度函数为线性形式时, SFM 则退化为最大载干比方案。

对于 P_1 问题的求解, 可以使用约束 C_3 将目标函数 R_Q 改写为:

$$R_Q = \sum_{l_i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{f \in \mathcal{F}} x_{(l_i, l, f)} C_{l, f} (1-E)^{H_{l_i, l}-1} J \quad (14)$$

其中, $\mathcal{L}^1$ 为一跳接入 MN 的链路集合。这是由于约束 C_3 规定了信息流在流经路径上的吞吐速率均相同, 则信息流在其最后一跳接入 MN 的链路上分配得到的吞吐速率与其每一跳链路上的吞吐速率均相同, 因此目标函数可以改为一跳接入 MN 的链路上信息流吞吐速率之和。同理, P_2 问题可以将优化目标函数改为一跳接入 MN 的链路上信息流满意度之和。示性函数 $f_l(l_i, l)$ 为基于拓扑结构与路由的已知条件, 代入后 P_1 问题可以转换为线性规划问题。通过在 P_1 问题中引入松弛变量, 易知该线性规划问题的约束维数始终小于变量的维数, 则一定存在最优解, 所得最优解为最大载干比方案下的单子网上行吞吐量负载能力。对于 P_2 问题, 约束 C_3 将目标函数转化为一个凹函数的线性组合, 可行域为非空紧集, 因此, 该优化也存在最优解, 所得最优解为 SFM 方案下的单子网上行吞吐量负载能力。

通过给定的网络拓扑连接、跳频序列、各个信道的平均可达速率和各条数据流的传输需求, 经过以上最优化问题求解后, 能够得到以上资源分配情况下由单个 MN 构成的单个网络的上行负载能力。

3 多子网上行吞吐量分析

3.1 多子网上行负载能力的问题分析

整个 mesh 网络由多个 mesh 子网构成, 其负载能力可以视为多个子网的负载能力之和。为避免多网络间的无线信道串扰, 采用跳频机制实现多个 mesh 子网络共同运行的信道规避策略, 这种多信道规避下的网络吞吐量可以利用前文所定义的驻留时间来表征。对于载波通信, 由于多个子网络间的电力线是隔离的, 因此不需要考虑多子网间的电力线载波干扰。而无线射频通信存在子网间干扰, 当跳频机制被合理运用时, 为多个子网络分配不同的驻留时间能规避多子网络间的干扰且使吞吐量最优。其中, 子网络间驻留时间的约束能够根据干扰的规避关系得出。对于不同的拓扑结构、路由和信道速率的单子网, 其负载能力会随驻留时间的提高而增长, 因此, 可以将多个单子网吞吐量之和作为目标函数, 驻留时间作为决策变量, 结合无干扰运行条件下的约束, 形成一个关于多子网并存时网络吞吐量的最优化问题。

3.2 多子网上行负载能力的问题描述与求解

为避免多子网间干扰, 多子网中所有子网的驻留时间之和应小于总的信道数量, 记为 n_{channel} , 因此增加信道的划分数能够提高驻留时间的取值上限。此外, 单子网络的吞吐量会随驻留时间提升, 进而使网络吞吐量增长。然而, 实际网络中的无线射频通信的带宽资源是有限的, 跳频子信道划分数量的增加会降低单个信道上的传输速率, 继而影响子网内的资源分配, 降低网络吞吐量。因此, 子网络的吞吐量与子网络驻留时间和整体网络的信道划分数之间的关系需要进一步明确。将子网络 Q 在信道划分数和驻留时间分别为 n_{channel} 和 J^Q 时的吞吐量写为 $R_{J^Q, n_{\text{channel}}}^Q$, 根据多子网络中驻留时间的约束, 形成一个关于多子网

络吞吐量的最优化问题如下。

$$\begin{aligned}
 P_3: & \max_{J, n_{\text{channel}}} \sum_{Q \in \mathcal{H}} R_{J, n_{\text{channel}}}^Q \\
 \text{s.t.} & C_8: J^Q > 0, \forall Q \in \mathcal{H} \\
 & C_9: \sum_{Q \in \mathcal{H}_c} J^Q \leq n_{\text{channel}}, \forall \mathcal{H}_c \subseteq \mathcal{H} \\
 & C_{10}: n_{\text{channel}} > |\mathcal{H}|
 \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\mathcal{H}$ 为 mesh 网络中所有单子网的集合, 将可能会产生同频干扰的单子网写入集合 $\mathcal{H}_c$, $\mathcal{H}_c \subseteq \mathcal{H}$, 集合 $\mathcal{H}_c$ 内的单子网通常是空间上相邻的网络。通过对该问题求解, 可以得到多子网络的最优吞吐量, 即多子网上行负载能力。但是该问题的目标函数并没有解析解, 无法对问题进行求解, 因此, 可以利用优化问题 P_1 或 P_2 解出相应子网络的吞吐量与驻留时间、信道划分数的离散数值关系, 记离散的驻留时间和信道划分数取值集合分别为 $\mathcal{D}_J$ 与 $\mathcal{D}_n$ 。因此, 形成具有整数变量约束的最优化问题如下。

$$\begin{aligned}
 P_4: & \max_z \sum_{Q \in \mathcal{H}} \sum_{J \in \mathcal{D}_J} R_{J, n_{\text{channel}}}^Q z_{J, n_{\text{channel}}}^Q \\
 \text{s.t.} & C_{11}: z_{J, n_{\text{channel}}}^Q \in \{0, 1\}, \forall J \in \mathcal{D}_J, \\
 & \forall n_{\text{channel}} \in \mathcal{D}_n, \forall Q \in \mathcal{H} \\
 & C_{12}: \sum_{n_{\text{channel}} \in \mathcal{D}_n} \sum_{J \in \mathcal{D}_J} z_{J, n_{\text{channel}}}^Q = 1, \forall Q \in \mathcal{H} \\
 & C_{13}: \sum_{Q \in \mathcal{H}_c} \sum_{J \in \mathcal{D}_J} (J \cdot z_{J, n_{\text{channel}}}^Q) \leq n_{\text{channel}}, \\
 & \forall n_{\text{channel}} \in \mathcal{D}_n, \forall \mathcal{H}_c \subseteq \mathcal{H}
 \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $z_{J, n_{\text{channel}}}^Q$ 为取值 0 或 1 的整数变量, 将每个网络 Q 的吞吐量与其离散的驻留时间、信道划分数的取值分成单个组, 每组在 C_{12} 约束下只取一个吞吐量 $R_{J, n_{\text{channel}}}^Q$, 子网间无干扰的驻留时间约束变形为 C_{13} , 所有组的吞吐量之和为多子网络的吞吐量。易知该整数约束的优化问题存在最优解, 则最优解下的吞吐量视为多子网络的负载能力。

4 仿真分析

仿真网络拓扑如图 4 所示, 本节利用数学软件 MATLAB 对图 4 所示拓扑图的单个子网与多个

子网并存时的网络进行仿真分析。该拓扑结构由位置固定的 1 个 MN、185 个 RN/EN 和 418 条链路组成。仿真中共有 3 种链路, 单有线和单无线链路分别只能使用电力线载波链路和无线射频链路, 双模链路则可以使用两种介质通信。在子网的双模通信模式中, 网络内所有链路均为双模链路, 单有线和单无线通信模式中链路分别只有单有线和单无线链路, 而混和通信模式中存在以上 3 种链路。混合通信链路的链路使用情况如图 4 所示, 划线为双模链路, 实线为单无线链路, 点划线为单有线链路。其中, 电力线载波采用 0.78~5.61 MHz 的频段, 带宽为 4.83 MHz, 无线射频采用低功耗 H 类设备频段范围内总计 0.56 MHz 带宽的频段。将单位时间划分为 100 个时隙, 即每个时隙 10 ms, RN/EN 采用时分的方式接入网络中。假设网络中信息流由特定 EN 产生, 并非所有 EN 都有通信需求, 并采用最短路由算法选择路径进行数据传输, 且每条信息流的数据到达量相同。本文认为在产生信息流的 EN 不同时, 具有相同拓扑结构的多个单子网可被视为不同的单子网。因此, 在分析多子网负载能力时, 采用同一种拓扑结构对多子网络分析。关键系统参数见表 1。

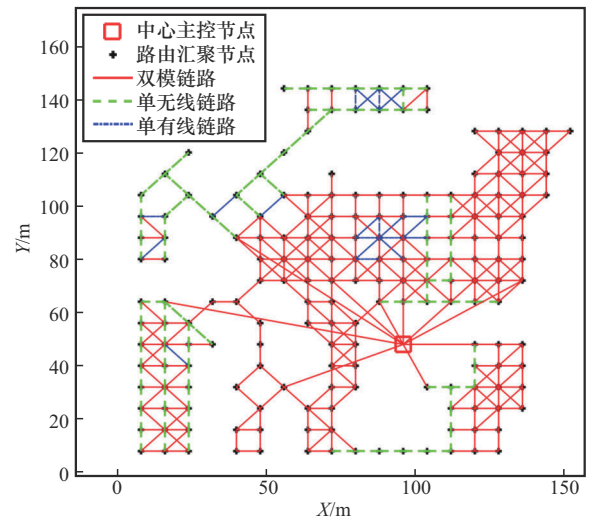


图4 仿真网络拓扑



表1 关键系统参数值

参数	含义	值
E_b	PLC链路信号平均能量	1.5
$ h_l^{\text{PLC}} ^2$	PLC链路信道衰落增益	0.15
$ h_l^{\text{RF}} ^2$	RF链路信道衰落增益	1
n_b	电力线白噪声功率	0.01 mW
n_i	电力线脉冲噪声功率	0.02 mW
n_0	射频白噪声功率	0.01 mW
td_a	无线接入时延	2 ms
G^{RF}	天线增益	7
α_{RF}	信道衰落系数	3
$P_{\text{EN}}/P_{\text{RN}}$	EN/RN发射功率	2/5 mW
n_{channel}	跳频信道数	40
T_{min}	信息流传输最小时间限制	100 s
B_{RF}	无线射频总频谱宽度	0.56 MHz
$E_l^{\text{RF}}/E_l^{\text{PLC}}$	无线射频/电力线链路损耗率	0.05

4.1 单子上行负载能力仿真分析

首先通过调整式(12)所使用的4种满意度函数的均衡性因子,可以得到4种形式的满意度函数在不同资源分配均衡性下的单子网吞吐量。不同满意度函数性能对比如图5所示,显示了使用指数形式的满意度函数在信息流标准差相同时具有最高的单子网吞吐量,因此本文采用指数形式函数作为SFM算法的满意度函数。

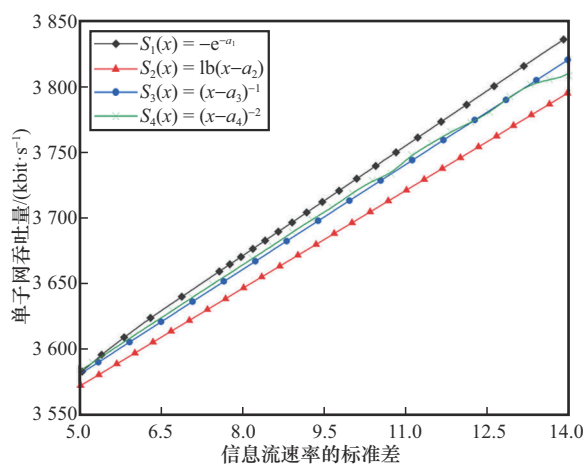


图5 不同满意度函数性能对比

当网络参数固定时,多种资源分配算法下信息流吞吐速率的分布如图6所示。仿真所用算法分别为轮询算法、最大载干比算法^[14]、比例公平算法^[15]和本文所提的SFM算法。其中,最大载干比算法所得的分配结果极度不均衡,网络资源集中在少数信息流中,但也得到了最高的信息流吞吐量和。而轮询算法是一种强制公平算法,将资源平均分给网络中所有的链路,因此轮询算法下所有信息流的吞吐速率相等。比例公平算法与SFM算法考虑了信息流对资源的需求,按需分配网络资源。

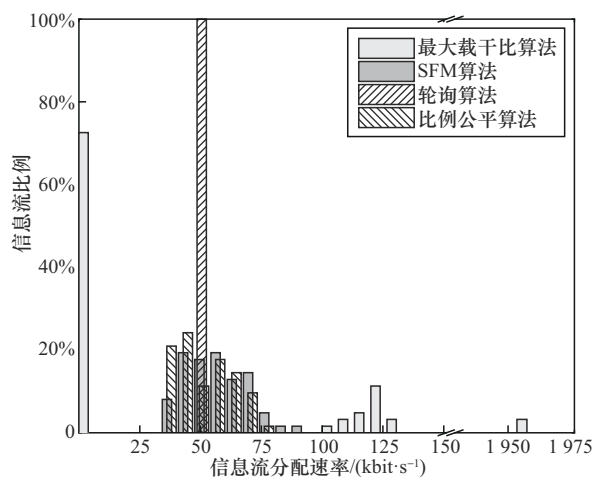


图6 多种资源分配算法下信息流吞吐速率的分布

不同吞吐量算法下信息流数量对信息流平均吞吐速率的影响如图7所示。随着网络中信息流的增加,信息流的平均吞吐速率呈现下降趋势,且下降的趋势逐渐平缓。仿真结果显示,最大载干比算法由于忽略了信息流分配的公平性,所得平均吞吐速率始终高于其他算法。对于本文所提的SFM算法,在信息流数量较多时,相较轮询算法和比例公平算法的平均吞吐速率约有10%的提升。其中,轮询算法和比例公平算法均为强制公平算法,所得的平均吞吐速率结果几乎一致,区别仅在于比例公平算法分配信息流资源时考虑了信息流的需求。此外,仿真结果还显示了双模通信在3类公平性算法下均有40%以上的吞吐量提

升,这是由于双模介质通信相较单模通信更灵活,可以通过两种介质链路的协作传输,合理分配网络资源来提升多跳中继的端到端信息流的吞吐量,体现了双模通信的优越性。

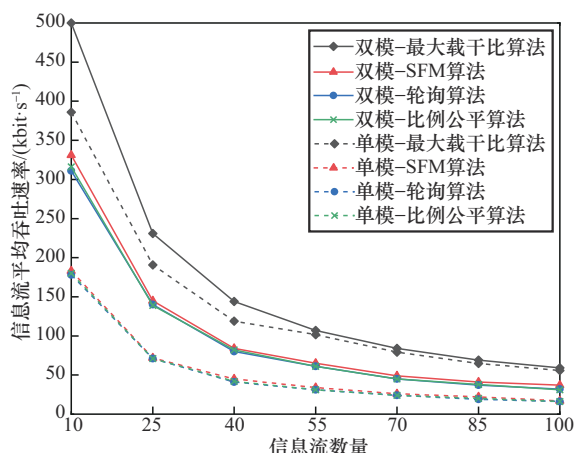


图7 不同吞吐量算法下信息流数量对信息流平均吞吐速率的影响

驻留时间对单子网吞吐量的影响如图8所示。驻留时间表征了单子网内信息并发传输的能力,驻留时间越长则网络中越多的链路能够同时进行传输,增加了时间维度的通信资源。仿真结果显示,随着驻留时间的增加,各算法下得到的单子网吞吐量均呈现先增长后趋于稳定的趋势。这是由于驻留时间的增长带来了时间资源的提升,进而提高了单子网内的吞吐量。而单子网的吞吐量并不能无限制地带来网络吞吐量的提升,这是由于MN处链路分配到的时间资源直接影响单个子网内的吞吐量,而MN只能同时处理一条信息流,因此,当与MN直连的链路能够分配到充足的时间资源时,MN将处于时间资源饱和的工作状态,此时网络中时间资源的提升并不能使网络吞吐量增加。在单模通信时,较低的驻留时间便使MN达到饱和的工作状态。而在双模通信时,通过电力线载波与无线射频通信的协作,单子网络可以实现更高的吞吐量的增长。

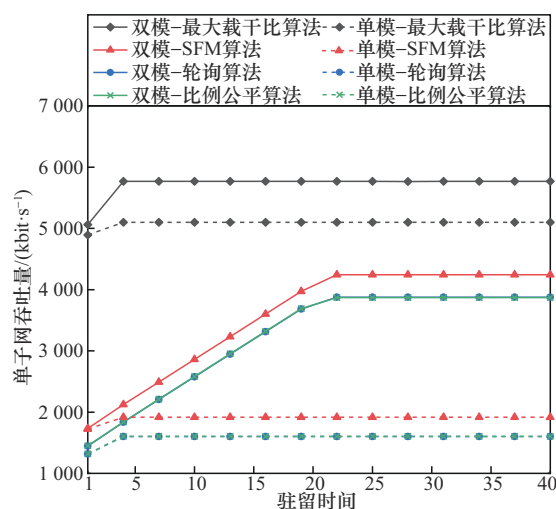


图8 驻留时间对单子网吞吐量的影响

因此,可以通过不改变EN/RN的收发能力,仅提高MN的接收能力,实现网络吞吐量的提升。MN接收能力对单子网吞吐量的影响如图9所示。仿真结果显示,MN的接收能力与驻留时间对单子网吞吐量的影响具有相似的趋势,均为先增长后不变的趋势。这是由于网络驻留时间与MN接收能力相辅相成,较高的驻留时间会导致MN进入饱和工作状态,而较高的MN接收能力会使MN缺少时间资源,进入空闲工作状态,因此,在网络设计时需要均衡考虑两者参数的选定,使资源利用率达到最优。MN接收能力的提升难度易于提升网络中所有EN/RN的接收能力,是提升网络吞吐量的高效低成本方法。

链路损耗率对单子网吞吐量的影响如图10所示,随着链路损耗率的增加,单子网吞吐量逐渐降低,且呈现出一定的门限效应。当损耗率低于某阈值后,单子网吞吐量显著下降。这是由于多跳中继传输会放大链路损耗,每中继传输一次,链路传输速率就会乘以该损耗系数,最终导致了门限效应。此外,仿真结果还显示了所提的SFM算法对链路损耗率具有抵抗性,在较高的链路损耗率时能够保持较高的单子网吞吐量,且双模通信在所有链路损耗率下均有70%以上的单子网吞吐量提升。

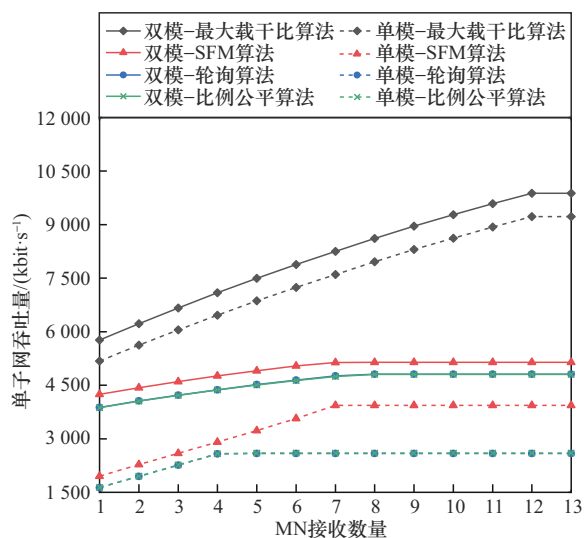


图9 MN接收能力对单子网吞吐量的影响

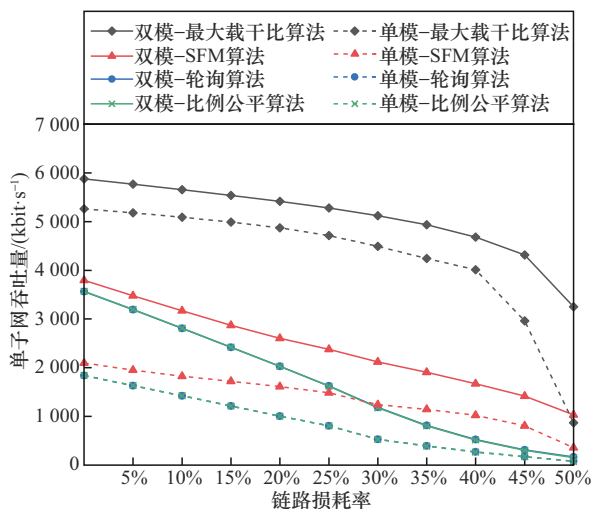


图10 链路损耗率对单子网吞吐量的影响

资源分配算法与数据到达量有关,当数据到达量发生改变时,会影响信息流对资源的需求,进而使单子网吞吐量变化。到达速率与单子网吞吐量关系如图11所示,显示了最大载干比算法下单子网吞吐量随EN数据到达量缓慢下降,SFM算法下网络吞吐量随之提升,而两种强制公平算法下网络吞吐量不变。这是由于最大载干比算法的资源分配极其不平衡,几乎不受信息流的需求增加而改变。SFM算法的资源分配结果与信息流的需求有关,信息流需求的大小会影响各信息流在资源分配中的权重,需

求越高时,会使SFM算法趋于不均衡,但该算法仍是按需分配的,较高需求的信息流将被分配更多的资源。而轮询和比例公平算法为强制公平算法,整体的速率需求改变不会影响资源分配的结果。

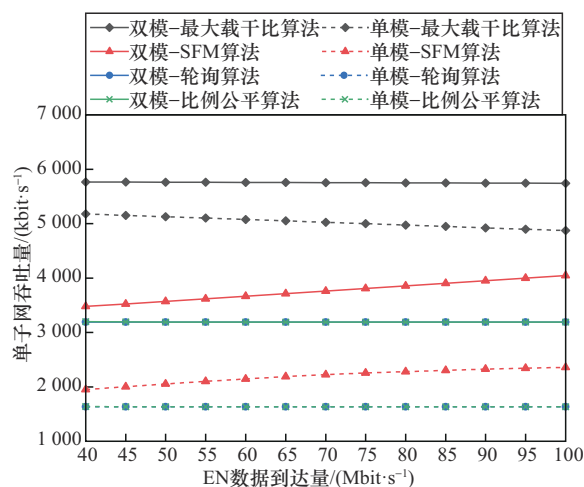


图11 到达速率与单子网吞吐量关系

4.2 多子网上行负载能力仿真分析

本节对mesh网络中多个子网并存时的网络吞吐量进行仿真分析。单子网吞吐量与驻留时间和信道数量的关系如图12所示。由于无线频段的总量有限,增加信道的数量时会使单个信道的带宽变小,使链路速率下降,进而降低单子网的吞吐量。此外,驻留时间越长,单子网吞吐量随信道数量下降得越平缓。但是为了避免多网络间干扰,单子网驻留时间的取值存在上限,该上限与信道数有关。随着信道数量的增加,单子网可以在无干扰的情况下取更高的驻留时间。因此,虽然信道数量的增长会降低单子网的吞吐量,但是多子网的吞吐量可能随信道数量而提升。信道数对多子网吞吐量的影响如图13所示。仿真结果显示,无论单模、双模或各资源分配算法,均存在最优的信道数量,使多个子网并存时的吞吐量之和达到最高。其中,双模通信的最优信道数量高于单模通信,随着信道数量的增加,电力线载波与无线射频

通信能够更好地协作,提高了多网络下的吞吐量。且在信道数量较低时,双模通信与单模通信下的吞吐量差别不大,双模通信的优势体现在信道划分较高的情况下。此外,本文所提的SFM算法兼顾了信息流分配的公平性和网络的吞吐量,能够在按需满足信息流的资源需求下尽可能提升网络吞吐量。

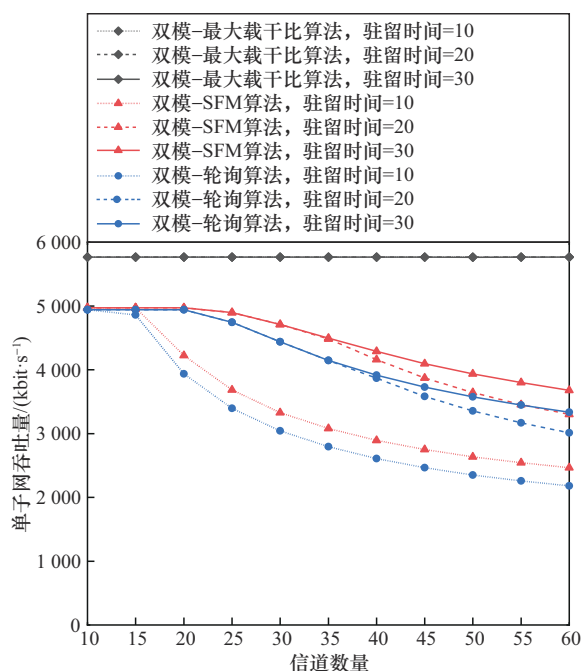


图12 单子网吞吐量与驻留时间和信道数量的关系

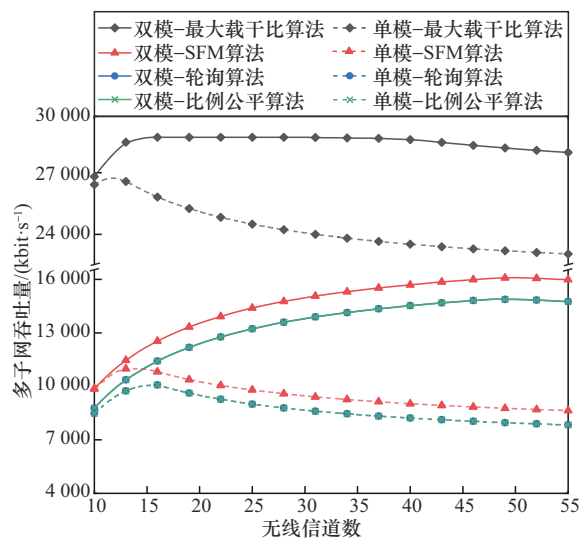


图13 信道数对多子网吞吐量的影响

5 结束语

本文对双模通信的mesh网络吞吐量进行建模分析与优化。通过构造表征时频资源归一化占用程度的变量,结合子网内多种传输机制与约束,形成关于单子网与多子网吞吐量的最优化问题。仿真结果显示,网络并发能力和MN接收能力的提升均可以提高单子网吞吐量,且双模介质传输的吞吐量高于两种单模传输网络吞吐量之和,体现了双模通信的优越性。本文所提的双模通信优化算法相较于传统单模通信算法的吞吐量有所提升。综上所述,本文通过建立多跳中继网络的吞吐量优化模型,分析了大规模双模配电mesh网络的负载能力,对未来配电网的规划设计与建设提供了指导意义。

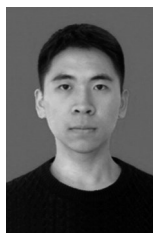
参考文献:

- [1] 季润阳. 基于智慧城市建设的电网大数据发展技术研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(5): 73-75.
JI R Y. Research on big data development technology for power grid based on smart city construction[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(5): 73-75.
- [2] 高山. 新型电力系统与智网设备发展[J]. 中国电力企业管理, 2023(21): 68-69.
GAO S. Development of new power systems and smart grid equipment[J]. China Power Enterprise Management, 2023, (21): 68-69.
- [3] Q/GDW-11612.41-2018, 低压电力线高速载波通信互联互通技术规范. 第4-1部分:物理层 通信协议[S]. 2018.
Q/GDW-11612.41-2018. Technical specification for interconnection and interoperability of high-speed power line communication for low voltage power grid - Part 4-1: physical layer communication protocol[S]. 2018.
- [4] 陈光胜. 异构双模通信技术的分析与展望[J]. 电子技术, 2024, 53(1): 100-103.
CHEN G S. Analysis and prospect of heterogeneous dual-mode communication technology[J]. Electronic Technology, 2024, 53(1): 100-103.
- [5] 付志达, 闫冠峰, 丁浩, 等. 高速电力线载波和微功率无线双模通信在配电台区的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021,



- 19(6): 50-56.
- FU Z D, YAN G F, DING H, et al. Application of HPLC and RF dual-mode communication in distribution transformer area[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(6): 50-56.
- [6] 徐肃, 王飞, 刘永胜, 等. 基于宽带电力线载波的工控系统通信网络设计[J]. 内蒙古电力技术, 2023, 41(5): 19-27.
- XU S, WANG F, LIU Y S, et al. Design of Industrial control system communication network based on broadband power carrier[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2023, 41(5): 19-27.
- [7] KOSHKOU EI M J, KAMPERT E, MOORE A D, et al. Evaluation of an in situ QAM-based power line communication system for lithium-ion batteries[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2022, 12(1): 15-25.
- [8] GOTZ M, RAPP M, DOSTERT K. Power line channel characteristics and their effect on communication system design[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(4): 78-86.
- [9] VARMAM K, JAFFERY Z A. Broadband power line communication: The channel and noise analysis for a power line network[J]. International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), 2019, 11(1): 85-92.
- [10] SHLEZINGER N D R. On the capacity of narrowband PLC channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(4): 1191-1201.
- [11] LIN H, SIOHAN P. Capacity analysis for indoor PLC using different multi-carrier modulation schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 25(1): 113-124.
- [12] AHIA DORMEY R K, ANOKYE P, JO H S, et al. Performance analysis of two-way relaying in cooperative power line communications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 97264-97280.
- [13] YANG L, YAN X, LI S, et al. Performance analysis of dual-hop mixed PLC/RF communication systems[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 16(2): 2867-2878.
- [14] MUSHTAQ A S, HAIDER A Z, OREST L, et al. Improving QoS in MAX C/I scheduling using resource allocation type 1 of LTE[C]//Proceedings of the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. [S.l.:s.n.], 2015: 12-14.
- [15] ZHANG M, GUO Y, SALAÜN L, et al. Proportional fair scheduling for downlink mmWave multi-user MISO-NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(6): 6308-6321.
- [16] 李群, 任天宇, 王小虎, 等. 一种实现无线 Mesh 网络最大化容量的新机制[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 201-208.
- LI Q, REN T Y, WANG X H, et al. New mechanism to maximize capacity of wireless Mesh networks[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 201-208.
- [17] 艾明, 李正民. 基于最大吞吐量目标的 WiMax 网状网络的公平调度[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 122-129.
- AI M, LI Z M. Fair scheduling for WiMax mesh network based on maximum throughput goal[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(11): 122-129.
- [18] AL-JARRAH M A, ALSUSA E, AL-DWEIK A, et al. Performance analysis of wireless mesh backhauling using intelligent reflecting surfaces[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(6): 3597-3610.
- [19] HO T M, NGUYEN K-K, SHABAH A. Self-organizing internet of multi-RAT robotic things mesh network[C]//Proceedings of the 2022 14th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC). Sousse, Tunisia, 2022: 1-6.
- [20] 安春燕, 李建岐. 面向电力线与无线通信网络融合的统一 MAC 协议研究[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(5): 7-12.
- AN C Y, LI J Q. Research on Unified MAC Protocol for Power Line and Wireless Communication Network Fusion[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(5): 7-12.

[作者简介]



苏展 (1999-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院博士生, 主要研究方向为工业互联网、智慧电网容量分析等。



文博 (1980-), 男, 南京熊猫电子股份有限公司正高级工程师、副总工程师, 主要研究方向为嵌入式软硬件、边缘计算、数据安全、人工智能、区块链、工业互联网。



朱晓荣 (1977-), 女, 博士, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为 5G/6G 通信系统、物联网、区块链等关键技术与系统。