

## ◆人工智能与无线网络◆

## 基于 5G 的无线携能通信技术研究与发展\*

李陶深<sup>1,2</sup>,朱晴<sup>1</sup>,王哲<sup>3</sup>,施安妮<sup>1</sup>,何璐<sup>1</sup>,卢明好<sup>1</sup>

(1. 广西大学计算机与电子信息学院,广西南宁 530004;2. 南宁学院信息工程学院,广西南宁 530200;3. 广西民族大学人工智能学院,广西南宁 530005)

**摘要:**无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)技术提高了频谱的利用率,同时可实现传统网络的节能减排,为网络提供了更智能的自治能力、更广泛的覆盖范围、更高度集成的系统能力等美好前景。针对这一新的研究领域,本文从资源优化分配和安全传输的角度,对 SWIPT 与 5G 新兴通信技术集成的现有相关研究进行总结回顾,并对进一步提高 SWIPT 系统性能的几个可能研究方向进行分析与讨论,旨在为无线携能通信网络研究发展提供参考。

**关键词:**无线携能通信 资源分配 5G 频谱效率 能量效率 无缝覆盖 安全

中图分类号:TP393 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2021)03-0229-13

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20210830.012

## 0 引言

由于个人通信领域蓬勃发展,预计在未来 5G 通信成熟时,将会有数以千亿的无线设备接入网络。5G 带给人们高质量用户体验的同时,也面临着一系列亟待解决的问题。随着连接设备的不断增加,频谱短缺、能耗高、碳排放量增高等问题愈发严峻,与此同时人们对数据传输速率、网络覆盖范围、连接可靠性等网络性能的要求进一步提高,这给传统的能量受限的无线网络带来了新的挑战。在增强移动宽带、海量物联网通信、超高可靠与低时延通信三大主要 5G 场景下,由于频谱短缺,降低能耗、实现绿色通信、提升

覆盖范围及覆盖能力是当前无线通信所面临的最亟待解决的问题。能量收集无线网络(Energy Harvesting Wireless Networks, EH-WN)是一种节点带有能量捕获装置的无线网络,它能够捕获各类环境能源并转换为电能,作为主要或辅助的电源方式供电给网络中的无线设备进行网络通讯<sup>[1]</sup>。在各种无线能量传输技术中,无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)是比较突出的技术,它利用射频(Radio Frequency, RF)信号同时携带能量与信息的特点在为无线设备提供绿色、可持续能量的同时进行信息传输,能够有效解决节点能量受限问题,提高频谱的利用率,受到了国内外众多

收稿日期:2020-12-15

\* 国家自然科学基金项目(61762010)资助。

## 【作者简介】

李陶深(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事无线网络、云计算与大数据、网络计算与安全等研究,E-mail:tshli@gxu.edu.cn。

## 【引用本文】

李陶深,朱晴,王哲,等. 基于 5G 的无线携能通信技术研究与发展[J]. 广西科学,2021,28(3):229-241.

LI T S, ZHU Q, WANG Z, et al. Research and Development of Simultaneous Wireless Information and Power Transfer Technology Based on 5G [J]. Guangxi Sciences, 2021, 28(3): 229-241.

学者的广泛关注<sup>[2-4]</sup>。

Varshney<sup>[5]</sup>最早提出 SWIPT 概念, 并对 SWIPT 的性能公式进行推导。然而作者假设了一个能够同时执行信息解码 (Information Decode, ID) 和能量收集 (Energy Harvesting, EH) 的理想接收机, 但现实中还没有硬件能够同时实现 ID 和 EH, 在无线携能通信中, 信息速率和能量收集水平之间的权衡是评估系统性能的重要因素之一。目前在接收机端, 常用的主要有时间切换 (Time Switching, TS) 和功率分流 (Power Splitting, PS) 2 种策略。TS 策略中, 发射端基于 TS 因子将传输块分成 2 个正交的时隙: 一个时隙用于数据传输, 另一个时隙用于电力传输。接收机可以在两个时隙之间周期性地切换其操作, 以实现更好的信息传输或能量收集。PS 策略中, 接收机通过使用 PS 比  $0 \leq \rho \leq 1$ , 将接收到的信号分成 2 个不同的功率流, 功率比为  $\rho$  的信号流用于信息解码, 其余部分用于能量收集。SWIPT 技术对于众多类型的现代通信网络中的能源和信息传输都至关重要。

随着通信及信息化的飞速发展, 5G 通信对无线通信的容量、速率、覆盖范围以及安全都提出了更高要求, 对高服务质量以及绿色可持续发展的要求迫使人们关注无线通信网络的优化问题。一些新兴的 5G 关键技术, 例如, 对毫米波 (Millimeter Wave, mm-Wave) 频段的开发, 扩展了通信频谱的可用范围; 非正交多址接入 (Non-orthogonal Multiple Access, NOMA) 技术、认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 网络、全双工 (Full Duplex, FD) 等技术能够有效提升频谱的利用率; 协作中继 (Cooperative Relay, CoR)、大规模多输入多输出 (Massive Multi-input Multi-output, mMIMO)、超密集异构通信网络 (Ultra-dense Heterogeneous Networks, UDHN) 等技术, 对提高系统容量以及网络的覆盖范围等性能有显著作用。这些 5G 新兴技术与 SWIPT 的集成对促进无线网络的进一步发展具有重要作用。然而, SWIPT 的发展仍存在诸多挑战: ①由于无线信道的开放性, 安全是无线通信网络中普遍存在的问题。随着计算能力的大幅度提升, 传统的上层加密技术无法满足安全传输的需求, 如何利用无线信道的固有特性, 通过波束成形 (Beamforming, BM)、人工噪声 (Artificial Noise, AN) 等安全技术提供安全通信引起了人们的兴趣。②无线设备数量的持续增加以及用户服务质量要求的不断提高, 加剧了对能源和频谱等有限资源的消

耗。在绿色可持续通信的要求下, 如何通过资源分配以实现最大化地利用有限资源提升系统效益并降低能耗, 也是非常值得深入研究的问题。

基于上述主要问题, 本文针对提升频谱效率、能量效率以及实现无缝覆盖这 3 个方面, 从资源优化分配和安全传输的角度, 对 SWIPT 与 5G 新兴通信技术集成的现有相关研究进行总结回顾, 并讨论进一步提高 SWIPT 系统性能的几个可能研究方向。

## 1 频谱效率优化

### 1.1 优化频谱资源

由  $v = f \cdot \lambda$  可知, 波长  $f$  和频率  $\lambda$  成反比, 较低的频率要求较大尺寸的物理天线。然而, 未来无线通信网络中无线设备趋于小型化, 接收天线将受限于设备的大小。假设天线尺寸大于波长, 孔径将与实际物理横截面积成比例, 接收功率可表示为<sup>[6]</sup>

$$P_r = \frac{P_t A_t}{R^2 \lambda^2} A_r \quad (1)$$

式(1)中:  $P_t$  和  $P_r$  表示发射功率和接收功率,  $A_t$  和  $A_r$  分别表示发射天线和接收天线的面积。用  $\lambda$  和  $R$  表示波长以及收发器之间的距离。公式(1)表明, 在具有尺寸限制的收发机中使用更高频率是有益的。

由于毫米波 (mmWave) 段高频具有丰富且干净的频谱资源, 可以显著提升移动网络吞吐量和频谱效率, 毫米波成为未来 5G 通信的关键候选技术之一。Ladan 等<sup>[7]</sup>开发了一个 2.4 GHz 整流天线原型, 证明了利用毫米波进行无线能量收集和信息传输的可行性。Khan 等<sup>[8]</sup>和 Wang 等<sup>[9]</sup>分别将 Sub-6GHz 和 mmWave 这 2 个频段的无线能量传输和无线信息传输的性能进行比较, 结果表明在收集能量以及网络吞吐量方面, mmWave 比 Sub-6GHz 获得更好的效果。Tu 等<sup>[10]</sup>分析了 mmWave 蜂窝网络中 SWIPT 的性能, 结果表明 mmWave 蜂窝网络比传统的微波蜂窝网络具有更好的性能。Tran 等<sup>[11]</sup>考虑了更贴合实际的非线性 EH 模型, 数值分析指出 EH 电路的规格会严重影响网络性能。Zhai 等<sup>[12]</sup>关注具有 5G 新频率下的 SWIPT 网络设计和优化, 通过研究测量 5G 低频和高频信道在室外和室外到室内场景中的传播特性, 设计了一个双频 SWIPT 网络。Liu 等<sup>[13]</sup>考虑了一个典型的高低频混合组网的 mmWave 小型蜂窝小区, 以及 2 种经典的波束对准方法, 并讨论了 2 种方法的基本性能, 最后给出为该场景设计的几个波束对准方案。

超密集网络的部署缩小了每个小区的大小,可以实现频谱在地理空间上的复用,也在一定程度上提升了频谱利用率。考虑到未来空天地一体化的万物互联需求,Wang 等<sup>[14]</sup>考虑了无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)辅助的毫米波蜂窝 SWIPT 网络的性能,采用泊松簇过程对用户位置建模,并综合考虑视线、非视线传输的不同路径损耗模型,研究不同层级 UAV 与地面基站的关联概率和能量覆盖范围。Sun 等<sup>[15,16]</sup>则分别对 UAV 辅助毫米波网络和超密集毫米波网络的安全保密性能进行了相关研究。肖楠等<sup>[17]</sup>提出一种新的在强干扰蜂窝小区中进行能量与信息传输的设计方案。

## 1.2 提升频谱利用率

尽管毫米波扩展了通信可用的频谱范围,但相比日益增长的无线设备数量及流量需求,频谱资源仍显得十分有限,一些学者从提升频谱利用率的角度进行了相关研究。NOMA 技术可以利用相同的无线资源同时服务多个用户,达到提升频谱利用效率的目的<sup>[18]</sup>。Liu 等<sup>[19]</sup>首次将 NOMA 与 SWIPT 技术相结合,把 SWIPT 应用于邻近用户,以提高远程用户的可靠性,且不会耗尽相邻用户的电池寿命,作者指出通过选择恰当的网络参数可以获得相应的系统增益。Kader 等<sup>[20]</sup>在 Nakagami-m 衰落信道条件下,提出了基于 TS 和 PS 的 2 种协议,分析了在 2 种协议下的遍历总容量和中断概率,并通过分析和仿真证明所提协议的有效性。Li 等<sup>[21]</sup>在相同的信道条件下,考虑了残余硬件损耗、信道估计错误以及不完善的连续干扰消除对系统性能的影响,并指出与残余硬件损耗相比,信道估计错误对系统中断性能的影响更大。Zhao 等<sup>[22]</sup>考虑发射端通过在功率域中建设性地叠加信号,提出了在符号块级别上的能量交织器和基于星座旋转的调制器的联合设计,并提出一种发射功率分配方案保证误码率。Wang 等<sup>[23]</sup>提出了一种无人机辅助的 NOMA 方案,在实现 SWIPT 的同时满足地面接收器的安全传输,仿真结果表明所提方案有效。Li 等<sup>[24]</sup>研究 NOMA 用户节点配对问题,得出在放大转发(Amplify-and-forward,AF)和解码转发(Decode-and-forward,DF)中继协议下的用户成对错误概率的闭式解析式。Ma 等<sup>[25]</sup>提出了 2 种用户配对算法,并通过合适的功率分配方案保证用户性能。Wu 等<sup>[26]</sup>提出了一种具有较高通信可靠性和用户公平性的用户协作协议。笔者构建了一种 SWIPT-NOMA 机会中继系统模型,提出一种联合信号功率

和时间分配的优化方案,提高了系统中断性能<sup>[27]</sup>。徐勇军等<sup>[28]</sup>针对用户终端带能量收集的 2 层异构 NOMA 接入网络,基于有界信道不确定性建立联合稳健功率分配和时间切换的混合资源分配模型,提出了一种基于能效最大的稳健资源分配算法。

### 1.2.1 发展全双工技术

全双工技术具有同时同频传输信号的特点,理论上可以使频谱效率提高 1 倍。造成全双工技术发展缓慢的主要原因在于同时同频收发信号所产生的自干扰会对系统性能造成影响,因此,针对自干扰消除(Self-interference Cancellation,SIC),许多学者在硬件及算法层面都做了很大努力。Nawaz 等<sup>[29]</sup>提出了一种基于两元素的双极化单层贴片天线阵列,实现了收发端口之间较高的隔离度。Le 等<sup>[30]</sup>提出了一种基于波束的自适应滤波器结构,该结构可模拟最小均方环路,可显著降低全双工多输入多输出(Full Duplex Multi-input Multi-output,FDMIMO)系统中 SIC 的复杂性。Ayesha 等<sup>[31]</sup>提出了使用扩展卡尔曼滤波器的 SIC 技术,对信干噪比(Signal-to-interference-and-noise-ratio,SINR)的改善达到 90 dB。Fouda 等<sup>[32]</sup>提出了一种改进的快速独立分量分析算法,与最小二乘 SIC 相比,SINR 的增益高达 6 dB。研究表明,基于良好 SIC 的全双工技术可以显著提高频谱效率。

### 1.2.2 引入认知无线电

为进一步提高频谱效率,引入了认知无线电。传统无线通信将频谱静态地分配给用户使用,尽管有利于保证用户的信号质量,但导致了宝贵频谱资源的浪费,造成频谱效率低下。CR 网络包含可以智能地识别空闲通信信道的发射机和接收机,能够感知周围的无线电环境,通过判断智能地做出频谱接入或切换的决策,充分利用频谱资源。CR 网络允许主次用户共享授权频谱,与 SWIPT 相结合可以有效解决当前频谱短缺、频谱利用率低的问题。Lee 等<sup>[33]</sup>首次提出次级用户可以通过主用户发射机的 RF 信号收集能量,并在 2 个网络的中断概率约束下分析了次级发射机传输成功的概率以及由此产生的次级网络空间吞吐量。Hu 等<sup>[34]</sup>研究了认知 SWIPT 网络中能量收集最大化的最优资源分配问题,并得到最优的功率和子信道分配方案。Singh 等<sup>[35]</sup>推导了具有不完备信道状态信息(Channel State Information,CSI)的 CR-SWIPT 网络保密中断概率的封闭表达式,并分析了路径损耗对系统的影响。为保证主用户尽量不受干

扰,确保次级用户对可用频谱的使用;Song等<sup>[36]</sup>提出一种基于二分法的联合功率分配与感知时间优化算法;Li等<sup>[37]</sup>考虑了主次用户之间的协作频谱共享,仿真结果表明通过适当的参数配置,主次用户之间可以公平高效地共享频谱;Tang等<sup>[38]</sup>提出了一种能量收集和传输协议,导出主次级网络中断概率的确切表达式,并通过仿真实验验证了所提方案在提升两级网络系统性能上的优势;王哲等<sup>[39]</sup>基于非线性能量收集模型,提出了面向多用户MIMO认知无线供电通信网络的overlay和underlay情景下的吞吐量优化数学模型。

### 1.3 存在的问题

从已检索的近几年文献来看,当前对基于非线性能量收集模型的SWIPT系统的研究较少,考虑实际电路的非线性特性,未来可以对这方面开展进一步的研究。由于路径损耗和健康问题,当前许多设置不能直接用于更高频率,现有的SWIPT研究主要集中在小继电器和传感器等低功耗设备上,SWIPT在mm-Wave网络中的商业化还需要信息处理和硬件开发的支持。尽管NOMA能够显著提升频谱效率,但NOMA系统的整体性能取决于接收机的干扰消除能力和复杂性,其是以牺牲接收机的复杂度为代价。未来在接收机的设计中,既要满足5G和SWIPT的要求,又需要尽量降低接收机的复杂度。自干扰消除对全双工通信至关重要,因此有关自干扰消除仍然可以深入研究。此外,由于无线信道中噪声的存在及其固有的衰落特性,用户接收到的频谱特征复杂,确切的频谱感知以及如何选用合适的决策方案实现频谱选择、信道占用概率和可实现能量收集方面的权衡仍然是CR-SWIPT网络中一个具有挑战性的问题。

## 2 能效优化

一般无线通信网络中的性能指标以[比特/秒]为单位进行测量,而且取决于通信链路的信干噪比。在SWIPT系统中,信息与能量同时传输,因此需要新指标来更好地衡量系统性能。Buzzi等<sup>[40]</sup>将通信链路的能效定义为

$$EE = \frac{Tf(\gamma)}{T(\mu p + P_c)} = \frac{f(\gamma)}{\mu p + P_c}, \quad (2)$$

式中,EE为系统能效, $f(\gamma)$ 代表系统效益, $P_c$ 为系统的发射功率。函数 $f$ 是根据具体的系统优化目标制定。由公式(2)可知,系统能效取决于系统效益和能耗之间的关系,可以通过尽量减少能耗或者最大

限度地提高系统效益2种手段提升系统能效。

### 2.1 密集化和异构化

为满足5G通信需求,未来通信网络不可避免地朝着密集化和异构化的方向发展,并逐步演化为超密集异构网络。虽然UDHN缩小了每个小区的大小,可以实现频谱在地理空间上的复用,但是大大增加了每单位区域的基础设施节点数,因此密集异构网络中必须要考虑的问题是能量效率的优化。目前主要通过合理的网络规划部署或资源分配提高能量效率。

基站的密集部署有助于提升系统容量,但基站密度的持续增加也会导致系统的能量消耗增大。Cao等<sup>[41]</sup>研究了最佳网络密度水平,并确定了小基站的运行成本阈值。赵拓等<sup>[42]</sup>针对齐次泊松点过程下的异构蜂窝网络的能效进行了研究,指出通过合理设置微基站密度能够有效提升系统能效。此外,由于密集异构网络中基站的能耗所占比例极大,当系统处于低负载或业务流量低的时候,使用休眠模式可以降低系统功耗。Xu等<sup>[43]</sup>利用博弈论的方法指出,可以通过不同移动网络运营商之间的基础设施共享,增加休眠模式下基站的百分比来节省大量能源。Liu等<sup>[44]</sup>从小区负载的角度研究了空单元现象对系统性能的影响。此外,采用基站休眠策略时,必须要考虑到覆盖范围以及用户的服务质量等性能。Kim等<sup>[45]</sup>研究了系统中微小区基站的休眠率对能效的影响。Chen等<sup>[46]</sup>研究了中继辅助蜂窝网络中最佳基站休眠策略,通过动态规划方法得到中继的最佳睡眠比率。Wu等<sup>[47]</sup>为密集小小区网络提出了一个基于联合的休眠模式和功率分配方案,显著提升系统性能并有效减少中断用户的数量。

合理的资源规划也是提升能效的重要方法。Zheng等<sup>[48]</sup>研究了干扰管理和能量消耗问题,制定了基于干扰协同配置的最大最小能效优化问题。Kim等<sup>[49]</sup>利用分式规划方法来研究正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)异构网络中的频谱分配算法,使得每比特传输消耗的能量最小。Huang等<sup>[50]</sup>考虑了基于确定性和随机性误差的不完美CSI,提出了一种人工噪声(Artificial Noise, AN)辅助的安全传输设计,通过共同优化波束成形和AN矢量,在满足每个用户保密概率的约束下,最大程度地降低总发射功率。Ma等<sup>[51]</sup>在2层异构网络场景下提出了一种具有比例保密率的波束成形设计,在考虑公平性的情况下最大化总保密率。

## 2.2 天线部署和规划

由于高频段的穿透力和衍射性能较差,可以使用小尺寸天线阵列来实现高天线方向性。Marzetta<sup>[52]</sup>首先论述了基站具有大规模天线的具体细节,mMIMO系统通过利用大规模天线带来的分集和空间复用增益,可以在不占用额外频谱资源和增加发射功率的情况下同时服务多个用户,显著提高频谱的利用率和网络容量。使用大规模天线不仅提供天线功率增益,在一定程度上解决了 5G 超大辐射功率的问题,提供了新的能量传输效率,而且通过使用波束成形技术能够将发射功率集中在较小的空间区域,从而降低对其他用户的干扰并且提升通信的安全性,对于改善密集异构网络的干扰问题也有所助益。Dai 等<sup>[53]</sup>指出 mMIMO 系统可以显著地提高 SWIPT 传输性能。Liu 等<sup>[54]</sup>和 Barati 等<sup>[55]</sup>研究了基于定向 BM 技术的毫米波定向传输机制,通过该技术可以实现较高的天线方向性,将发射功率集中于目的节点,提升 mm-Wave-SWIPT 通信的效率。Liu 等<sup>[56]</sup>在波束训练的基础上提出了穷举搜索和分层搜索的波束对准方法,实现定向传输。Bao 等<sup>[57]</sup>的研究中,基站采用混合数字和模拟 2 种波束成形架构来降低硬件成本,通过联合设计混合波束成形和 PS 比来最大程度地降低系统总发射功率。Zhao 等<sup>[58]</sup>指出,对于启用 mMIMO 的 SWIPT 系统,PS 方案比 TS 方案具有更高的能量效率。Kusaladharma 等<sup>[59]</sup>和 Akin 等<sup>[60]</sup>分别研究了无小区和室内场景下的 SWIPT 性能。然而,天线数量的增多在带来增益的同时也带来了高复杂度的预编码、信道估计以及信号处理工作。Thakur 等<sup>[61]</sup>考虑了信道互异性误差对系统性能的影响,并采用导频重用技术,最大程度地减少导频污染和同频道干扰。Ha 等<sup>[62]</sup>为速率和能量多目标优化问题着重设计了预编码矩阵,提出了一种基于交替优化的高效迭代算法来获得最佳预编码器。Nasir 等<sup>[63]</sup>研究了发射机侧的时间因子优化问题,在满足最小收集能量及发射功率约束条件下最大化吞吐量。Li 等<sup>[64]</sup>在具有有限射频频链的毫米波 mMIMO-SWIPT 系统中研究了全数字以及模数混合波束成形方案,并通过实验验证了在不完美 CSI 场景下,性能要求相同时,混合波束成形方案所需要的传输功率更小。Dong 等<sup>[65]</sup>在视距传输的莱斯衰落信道中,推导出了 mMIMO 系统中用户能量收集和可达速率的表达式,以及在天线数趋于较大值时的渐近表达式,仿真证明了该表达式的准确性。Fan 等<sup>[66]</sup>考虑了 3D 天线,并通过

自适应的调整天线倾斜来提高系统的安全速率和能量传输。赵飞等<sup>[67]</sup>对毫米波 MIMO-NOMA 系统的安全最大化能效问题进行研究,提出一种迭代优化算法求解最初问题的解。

## 2.3 全双工通信

从能量收集的角度来看,全双工提供了一种全新的能效思路<sup>[68]</sup>。由全双工通信同时同频传输而产生的有害自干扰(Self-interference, SI)将变得有益,全双工节点处所产生的部分自能量可以由节点自身收集,用于上行信息传输以及提高自身的续航能力,基于此提出了自能量回收机制。Zeng 等<sup>[69]</sup>和 Maso 等<sup>[70]</sup>考虑了全双工节点通过 SI 信道获取能量,SI 在全双工无线通信中被转换为额外的能源。Kwon 等<sup>[71]</sup>讨论了 FD 自能量回收中继的波束成形问题,通过优化中继的波束成形矢量和功率分流比最大化收集的能量。周叶宁等<sup>[72]</sup>将自能量回收机制应用于双向传输全双工中继系统,提出了最小化系统总发射功率的优化问题,并通过仿真实验证明所提系统优于传统双向传输中继系统。谢显中等<sup>[73]</sup>针对全双工 SWIPT 双向中继研究存在问题,提出了 FD-SWIPT 双向中继系统中基于天线选择与波束成形联合优化的高能效和吞吐量最大化方案,说明天线选择方案对提升系统的吞吐量与能量效率起到了重要作用。陈可可等<sup>[74]</sup>研究 MIMO 全双工通信系统中同时存在无线信息与能量时的安全传输问题,提出基于替代函数和泰勒公式展开的 2 种优化方法来解决全双工模式中的保密速率最大化问题。陈佩佩等<sup>[75,76]</sup>针对全双工能量受限中继网络的无线物理层安全问题,提出一种基于 SWIPT 的安全波束成形方法,通过联合优化波束成形矩阵、人工噪声协方差矩阵和功率分配因子等参数实现系统安全速率最大化。鲍慧等<sup>[77]</sup>构建了中继协作的全双工认知多输入多输出系统,通过能量收集技术收集自干扰的能量,以获得最大的系统能量效率。

## 2.4 下一步工作

综上所述,未来无线网络朝着密集化和异构化的方向发展,基础设施的数量和种类也相应大大增加,不同技术之间的交叉程度更高,这种趋势对系统能效提出了极大的挑战。尽管目前已经从网络部署和规划方面进行了优化,但大多数研究仅针对密集异构程度较小的系统,对超密集异构网络的性能仍有待进一步的研究。mMIMO 的使用在能量效率方面获得了实质性的提高,但由于路径损耗,对于长距离功率传

输而言,其能量效率可能不如预期高,克服这一瓶颈需要更多的研究工作。此外,由于波束成形对 CSI 的要求较高,基于更准确信道模型或者更加合理信道估计方法的波束成形仍然值得深入研究。尽管全双工产生的自干扰可以作为一种额外的能源,但是它改善系统整体性能的能力仍未知,需要进一步研究以平衡系统在能效和信息传输方面的整体性能。

### 3 无缝覆盖

#### 3.1 协作中继技术

实现无缝覆盖的有效手段之一是通过协作中继扩大通信范围。在无线携能通信中,由于城市、气候或地理原因,通信节点之间可能相距很远,超出彼此的传输范围,导致视线通信不可行或者需要较高的传输功率,协作中继技术可充分利用网络中的中继节点或空闲节点,能够有效解决通信过程中的衰落问题,扩大通信范围并提高传输的可靠性。

##### 3.1.1 优化设计资源分配方案

在能量受限的协作中继网络中,时间、功率及频率等都是非常有限的资源,为了合理地利用资源,需要对资源分配方案进行优化设计。万晓榆等<sup>[78]</sup>针对能量采集异构蜂窝网络,提出了一种在线功率分配算法,可为密集异构网络提供更高的能量效率。Zlatanov 等<sup>[79]</sup>基于平均收获能量提出一种渐近最优功率分配方案。Mangayarkarasi 等<sup>[80]</sup>提出一种增量冗余混合自动重复请求功率分配方案,并证明提出的方案有助于提高通信可靠性、效率以及网络的吞吐量。Liu<sup>[81]</sup>研究基于多天线的 SWIPT 网络中的资源分配。Ding 等<sup>[82]</sup>研究基于 TS 协议的 SWIPT 中继系统,提出一种根据信道状态动态调整 TS 比的策略,以最大化单个传输时间块内的吞吐效率。

##### 3.1.2 提高时隙资源利用率

为提高时隙资源利用率,Zhong 等<sup>[83]</sup>针对 SWIPT 双向中继系统,推导出 Nakagami-m 信道下的系统中断概率,对比分析了 DF 协议和 AF 协议下 PS 因子对系统的中断概率的影响。Sarajlic 等<sup>[84]</sup>将模型扩展到多对双向中继系统中,针对大规模多对双向系统进行研究,通过遍历总和速率的下限表达式对系统性能进行分析。宁倩丽等<sup>[85]</sup>提出一种基于解码转发策略的机会协作中继系统动态时间分配策略,通过减小系统中断概率来提高无线网络的传输性能和运行可靠性。孙莉等<sup>[86]</sup>构建一种双向能量协作的菱形通信网络模型,提出一种能够实现系统端到端的吞

吐量最大化的功率分配和能量转移策略。周叶宁等<sup>[87]</sup>在基于无线射频网络中构建一个基于 SWIPT 和自能量回收技术的非分时全双工中继系统,利用网络中多个可供电无线设备作为能量接入点,实现信息传输、能量捕获和协作传输在 1 个时间块中同步进行。

##### 3.1.3 提高网络覆盖率

设备到设备(Device-to-device,D2D)通信技术使得用户之间可以不使用或部分使用网络基础设施直接进行通信,通过构建 D2D 中继设备实现数据的多跳正常传输,能够显著提高网络的覆盖率。Salim 等<sup>[88]</sup>在保证所有用户服务质量要求的情况下,研究能量收集链路和信息传输链路之间的总速率最大化问题。Jiang 等<sup>[89]</sup>则通过设计安全的波束成形方案,最大程度地提高中继协作 D2D 网络的数据速率。Zhong 等<sup>[90]</sup>研究无人机辅助的协作 D2D 网络,通过联合优化中继部署、信道分配以及中继分配,最大化中继网络的容量。

##### 3.1.4 选择最佳中继算法

协作中继网络中提升系统性能的另一个重要手段是采用正确的中继选择(Relay Selection,RS)算法,从多个中继中选择最佳的中继节点。丁长文等<sup>[91]</sup>针对能量收集双向中继网络的最小化功率消耗问题,提出一种适用于完美和非完美的信道,用于估计 2 种不同情况的高效联合中继选择和功率分配算法。Wang 等<sup>[92]</sup>提出将 RS 用于基于 PS 的全双工通信,对于每一个中继,作者通过线性搜索得到了基于中断概率的最优 PS 因子,并且针对不限制协作中继数的单中继选择和一般中继选择分别提出了相应的 RS 方法。Fidan 等<sup>[93]</sup>针对存在直传链路的全双工中继系统,引入适用于该系统的最大比传输策略。Xia 等<sup>[94]</sup>通过计算基于统计 CSI 和完美 CSI 下的系统中断概率,分析了 SWIPT 中继系统的中继选择性能。

此外,任何恶意节点都可以宣称自己为最佳中继,因此,在选择最佳中继时必须考虑安全问题,一些学者就 CoR-SWIPT 网络中的物理层安全问题展开了相关研究。Liu 等<sup>[95]</sup>基于两跳 SWIPT 中继系统研究了线型和非线性的这 2 种能量收集模型,通过优化功率分配以及中继位置来最小化安全中断概率。Li 等<sup>[96]</sup>基于干扰对齐网络提出了一种安全通信方案,通过中继协作传输人工噪声提高系统的保密性能。

### 3.2 超密集异构蜂窝网络技术

实现无缝覆盖的另一个有效手段是部署超密集异构蜂窝网络,但由于密集部署的不同类型基站覆盖范围及服务能力各不相同,合理的用户关联策略显得至关重要。Zhang 等<sup>[97]</sup>考虑了最大平均接收功率关联策略下的基站部署与能量效率的关系。Saha 等<sup>[98]</sup>基于最大信号干扰比关联策略开发了用户-基站统一框架。Saha 等<sup>[99]</sup>考虑了最大功率关联,提供了该策略下的典型用户覆盖概率的精确表达式。Afs-hang 等<sup>[100]</sup>则研究了基于最近基站关联策略下,基站的关联概率和覆盖概率。金明录等<sup>[101]</sup>建立了基于最大平均偏置接收功率关联策略下的 K 层异构网络模型框架,并利用随机几何理论和概率论推导了关联概率、覆盖概率以及整个网络的能效。

尽管网络部署的密集化和异构化显著提高了频谱的利用率和网络的覆盖范围,但也导致了网络中的干扰比传统单蜂窝网络严重很多,因此一些研究人员对 UDN 中的干扰管理进行了研究。Ahuja 等<sup>[102]</sup>研究了不同小区规模、不同用户数量、不同吞吐量要求的网络中分布式干扰管理策略。Liu 等<sup>[103]</sup>提出了一项干扰消除方案,并证明了通过该方案可以有效降低网络中的干扰,且该方案允许干扰者与被干扰者利用同一组资源,从而在一定程度上提高了网络容量。Xiao 等<sup>[104]</sup>提出一种分布式多域干扰管理方案,通过综合考虑干扰对齐、功率控制以及 2 种多址接入技术,有效降低密集蜂窝网中的干扰。

### 3.3 小结

未来 5G 甚至 6G 时代将是一个实现全球无缝覆盖的空天地一体化通信系统。对以上相关研究的分析可知,毫米波通信技术与超密集异构网络的内核之间具有高度一致性,二者的结合不仅较高程度地实现了无缝覆盖,更对提升无线携能通信网络地性能具有极大的促进作用,未来可以针对该领域进行深入研究。未来无线通信网络的主要问题包括网络结构的复杂化以及节点、电源等的移动性。移动性使获取准确 CSI 的难度增大,且能量收集和传输的时变特性,使得资源分配和中继选择方案必须对移动节点具有实时性和自适应性。此外,目前针对超密集异构网络安全性的研究仍然较少且具有较大的难度,针对为 SWIPT 协作中继网络和超密集异构网络开发更动态和自适应的高效安全传输机制是实现 5G 通信的关键。

## 4 展望

无线设备数量的激增,使设备性能、生命周期和系统规划成为一项新的挑战。SWIPT 技术的发展,使得节点可利用 TS 或 PS 机制实现同步或异步的能量捕获与信息解码,提高了资源的复用率以及节点和设备之间的协作等级,为网络提供了更智能的自治能力、更广泛的覆盖范围、更高度集成的系统能力等美好前景。本文重点关注 SWIPT 与新兴 5G 关键技术的融合,从网络性能优化的角度,对 SWIPT 与 5G 新兴通信技术集成的相关研究进行总结回顾。针对 SWIPT 未来发展,笔者认为可以开展以下方面的研究:

①无线携能通信系统中的最优化中继技术研究。SWIPT 与 CoR 这 2 种突出技术的联合使用,为无线网络中提高服务质量提供了能量和频谱效率,极大地促进了无线网络的革命。最优中继选择可以从多个中继中选择最佳的中继节点,以提高网络的整体服务质量,并使能量消耗最小化,以符合 5G 网络对高服务质量和绿色可持续通信要求。

②SWIPT 系统的安全性问题。如传统网络一样,SWIPT 系统需要考虑信息的安全性,同时也应考虑能量收集与传输的安全性问题,网络中可能含有恶意的信息窃听节点,也可能含有恶意的能量接收节点。因此,结合波束成形、人工噪声及加密等技术,实现能量与信息的安全传输仍然是亟待解决的问题;同时通信过程中也包含有能量状态信息,应确保该部分信息的安全以使得节点或设备间能够正确共享能量,实现节点间能量的协作与传输。

③基于 SWIPT 的移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)网络中计算卸载与功率控制。随着移动网络技术的不断研究与发展,基于无线携能通信的移动边缘计算网络逐渐成为研究热点,其中移动卸载就是用来解决网络中的计算资源分配问题。从研究和解决问题的本质上说,计算卸载与功率控制对于无线网络和移动边缘计算网络来说都是相同的规划问题。目前,移动边缘计算相当热门,相应的云计算也是热点问题。将移动边缘计算和云计算应用于无线携能通信和能量收集,可以发挥技术和理论交叉的优势。

④反转型的无线信息与能量传输。在近几年的研究中,关注点主要集中在对下行链路的能量与信息传输研究。如果反转过来,研究多设备向同一设备

(可能是中心节点、汇聚节点等)传输信息和能量的上行链路时,也许就有研究的新意。目前,有关这个模型的研究已经出现在 D2D 网络中。在 5G 激增的移动终端和海量数据接入的无线网络中,研究和实现 D2D 通信技术是十分必要的。可以把 D2D 技术等价地借鉴过来,将 D2D 通信技术与基于 SWIPT 的能量收集无线网络技术结合起来,构建一个满足未来 5G 发展的新型网络结构,重点解决 5G 通信网络能源管理中的系统能耗优化问题,实现绿色、高速、可靠的移动通信。

网络的应用朝着多样化和智能化的方向发展,SWIPT 在未来逐渐融入和取代部分传统网络,各种新兴通信技术之间不是完全孤立的,出现了多种网络类型的混合、多种能源与信息交互方式的混合。因此从科学研究的角度而言,需要更加系统化智能化的解决方案以适应各种场景及应用的需求,提升无线通信网络的性能,该领域也将得到更多学者的关注与研究。

#### 参考文献

- [1] 王哲,李陶深,叶进,等. 能量收集网络技术研究与发展综述[J]. 广西科学, 2019, 26(3): 253-266.
- [2] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 757-789. DOI: 10. 1109/COMST. 2014. 2368999.
- [3] BI S Z, HO C K, ZHANG R. Wireless powered communication: Opportunities and challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(4): 117-125. DOI: 10. 1109/MCOM. 2015. 7081084.
- [4] 王哲,李陶深,叶进,等. 基于不确定理论的能量收集可靠性建模及规划[J]. 通信学报, 2018, 39(5): 166-176.
- [5] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously [C]//2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, ON, Canada, IEEE, 2008. DOI: 10. 1109/ISIT. 2008. 4595260.
- [6] TABESH M, DOLATSHA N, ARBABIAN A, et al. A power-harvesting pad-less millimeter-sized radio [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2015, 50(4): 962-977. DOI: 10. 1109/JSSC. 2014. 2384034.
- [7] LADAN S, GUNTUPALLI A B, WU K. A high-efficiency 24 GHz rectenna development towards millimeter-wave energy harvesting and wireless power transmission [J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems I: Regular Papers*, 2014, 61(12): 3358-3366.
- [8] KHAN T A, ALKHATEEB A, HEATH R W. Millimeter wave energy harvesting [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(9): 6048 - 6062. DOI: 10. 1109/TWC. 2016. 2577582.
- [9] WANG L F, WONG K K, HEATH R W, et al. Wireless powered dense cellular networks: How many small cells do we need [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(9): 2010 - 2024. DOI: 10. 1109/JSAC. 2017. 2720858.
- [10] TU L T, RENZO M D. Analysis of millimeter wave cellular networks with simultaneous wireless information and power transfer [C]//2017 International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom), Da Nang, Vietnam, 2017: 39-43. DOI: 10. 1109/SIGTELCOM. 2017. 7849792.
- [11] TRAN T X, WANG W, LUO S, et al. Nonlinear energy harvesting for millimeter wave networks with large-scale antennas [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(10): 9488-9498. DOI: 10. 1109/TVT. 2018. 2856500.
- [12] ZHAI D S, ZHANG R N, DU J B, et al. Simultaneous wireless information and power transfer at 5G new frequencies: Channel measurement and network design [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 171 - 186. DOI: 10. 1109/JSAC. 2018. 2872366.
- [13] LIU C S, LI M, HANLY S V, et al. Millimeter-wave small cells: Base station discovery, beam alignment, and system design challenges [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(4): 40-46. DOI: 10. 1109/MWC. 2018. 1700392.
- [14] WANG X Y, GURSOY M C. Coverage analysis for energy-harvesting UAV-assisted mmWave cellular networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(12): 2832 - 2850. DOI: 10. 1109/JSAC. 2019. 2947929.
- [15] SUN X L, YANG W W, CAI Y M, et al. Physical layer security in millimeter wave SWIPT UAV-based relay networks [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 35851 - 35862. DOI: 10. 1109/ACCESS. 2019. 2904856.
- [16] SUN X L, YANG W W, CAI Y M, et al. Secure transmissions in wireless information and power transfer millimeter wave Ultra - dense networks [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2019, 14(7): 1817-1829. DOI: 10. 1109/TIFS. 2018. 2885286.



- [17] 肖楠,李陶深,王哲. 带有下行 SWIPT 的强干扰 WPCN 中最大化用户最小速率问题的研究[J]. 广西科学, 2019, 26(3): 267-275.
- [18] 曹雍,杨震,冯友宏. 新的 NOMA 功率分配策略[J]. 通信学报, 2017, 38(10): 157-165.
- [19] LIU Y W, DING Z G, EIKASHLAN M, et al. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems with SWIPT [C]//2015 23rd European Signal Processing Conference, Nice, France, 2015: 1999-2003. DOI: 10.1109/EUSIPCO. 2015. 7362734.
- [20] KADER M F, UDDIN M B, ISLAM A, et al. Cooperative non-orthogonal multiple access with SWIPT over Nakagami-m fading channels [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2019, 30(5): e3571. Doi.org/10.1002/ett. 3571.
- [21] LI X W, MENG L, CHAO D, et al. Joint effects of residual hardware impairments and channel estimation errors on SWIPT assisted cooperative NOMA networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 135499-135513. DOI: 10.1109/ACCESS. 2019. 2942337.
- [22] ZHAO Y Z, HU J, DING Z G, et al. Joint interleaver and modulation design for Multi-user SWIPT-NOMA [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(10): 7288 - 7301. DOI: 10.1109/TCOMM. 2019. 2931545.
- [23] WANG W, TANG J, ZHAO N, et al. Secure transmission for UAV-Aided NOMA networks with SWIPT via precoding optimization [C]//2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Xi'an, China, 2019: 1-6. DOI: 10.1109/WCSP. 2019. 8928145.
- [24] LI S Y, BARIAH L, MUHAIDAT S, et al. Error analysis of NOMA-based user cooperation with SWIPT [C]// 2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Santorini, Greece, 2019. DOI: 10.1109/DCOSS. 2019. 00098.
- [25] MA Y Y, LV T J, LI X F, et al. User pairing schemes in cooperative downlink NOMA system with SWIPT [J]. Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp), Shenzhen, China, 2019: 82-87. DOI: 10.1109/ComComAp46287. 2019. 9018780.
- [26] WU W, YIN X J, DENG P, et al. Transceiver design for downlink SWIPT NOMA systems with cooperative full-duplex relaying [J]. IEEE Access, 2019, 7: 33464-33472. DOI: 10.1109/ACCESS. 2019. 2904734.
- [27] 李陶深, 宁倩丽, 王哲. SWIPT-NOMA 机会协作系统的优化方案[J]. 通信学报, 2020, 41(8): 141-154.
- [28] 徐勇军, 李国权, 陈前斌, 等. 基于非正交多址接入异构携能网络稳健能效资源分配算法[J]. 通信学报, 2020, 41(2): 84-96.
- [29] NAWAZ H, NIAZI A U, BASIT M A, et al. Dual-polarized, monostatic antenna array with improved Tx-Rx isolation for 2.4 GHz in-band full duplex applications [J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2020, 12(5): 398-408. DOI: https://doi.org/10.1017/S1759078719001569.
- [30] LE A T, TRAN L C, HUANG X J, et al. Beam-based analog self-interference cancellation in full-duplex MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(4): 2460-2471. DOI: 10.1109/TWC. 2020. 2965441.
- [31] AYESHA A, CHAUDHRY S M. Self-interference cancellation for full-duplex radio transceivers using extended kalman filter [J]. National Academy Science Letters, 2020(4): 631-634. DOI: 10.1007/s40009-020-00958-4.
- [32] FOUDA M E, SHABOYAN S, ELEZABI A, et al. Application of ICA on self-interference cancellation of in-band full duplex systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(7): 924-927. DOI: 10.1109/LWC. 2020. 2973637.
- [33] LEE S, ZHANG R, HUANG K B. Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4788-4799. DOI: 10.1109/TWC. 2013. 072613. 130323.
- [34] HU Z Z, WEI N, ZHANG Z P. Optimal resource allocation for harvested energy maximization in wideband cognitive radio network with SWIPT [J]. IEEE Access, 2017, 5: 23383-23394. DOI: 10.1109/ACCESS. 2017. 2737034.
- [35] SINGH A, BHATNAGAR M R, MALLIK R K. Secrecy outage performance of SWIPT cognitive radio network with imperfect CSI [J]. IEEE Access, 2020, 8: 3911-3919. DOI: 10.1109/ACCESS. 2019. 2962382.
- [36] SONG Z Q, WANG X, LIU Y T, et al. Joint spectrum resource allocation in NOMA-based cognitive radio network with SWIPT [J]. IEEE Access, 2019, 7: 89594-89603. DOI: 10.1109/ACCESS. 2019. 2926429.
- [37] LI Q, ZHANG X Y, PANDHARIPANDE A, et al. An energy-aware retransmission approach in SWIPT-based cognitive relay systems [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(3): 580-594. DOI: 10.1109/TCCN. 2019. 2911680.

- [38] TANG K, LIAO S W. Buffer-aided cooperative spectrum sharing with full-duplex wireless-powered relay [J]. *Computer Networks*, 2019, 166: 106974. DOI: 10.1016/j.comnet.2019.106974.
- [39] 王哲, 李陶深, 叶进, 等. 基于非线性能量收集的多用户 MIMO 认知无线供电通讯网络[J]. *控制与决策*, 2020, 35(3): 547-558.
- [40] BUZZI S, CHIH-LIN I, KLEIN T E, et al. A survey of energy-efficient techniques for 5G networks and challenges ahead [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(4): 697-709. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2550338.
- [41] CAO D X, ZHOU S, NIU Z S. Optimal combination of base station densities for energy-efficient two-tier heterogeneous cellular networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(9): 4350-4362. DOI: 10.1109/TWC.2013.080113.121280.
- [42] 赵拓, 杨洁, 曹雪虹. 基于能效的异构蜂窝网络微基站部署研究[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(1): 179-182.
- [43] XU J, DUAN L J, ZHANG R. Energy group-buying with loading sharing for green cellular networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 34(4): 786-799. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2544603.
- [44] LIU C H, HSU C S. Fundamentals of simultaneous wireless information and power transmission in heterogeneous networks: A cell-load perspective [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 100-115. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2872314.
- [45] KIM J, JEON W S, JEONG D G. Effect of base station-sleeping ratio on energy efficiency in densely deployed femtocell networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(4): 641-644. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2401583.
- [46] CHEN F, YANG B, HAN Q N. Dynamic sleep control in green relay-assisted networks for energy saving and QoS improving [C]//2015 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE Press, 2015: 1-6. DOI: 10.1109/ICCCChina.2015.7448734.
- [47] WU S E, ZENG Z M, XIA H L. Coalition-based sleep mode and power allocation for energy efficiency in dense small cell networks [J]. *IET Communications*, 2017, 11(11): 1662-1670. DOI: 10.1049/iet-com.2016.1257.
- [48] ZHENG J, GAO L, ZHANG H J, et al. Joint energy management and interference coordination with maximum fairness in ultra-dense HetNets [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 32588-32600. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2841989.
- [49] KIM S, LEE B G, PARK D. Energy-per-bit minimized radio resource allocation in heterogeneous Networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(4): 1862-1873. DOI: 10.1109/TWC.2014.022114.130443.
- [50] HUANG K Z, ZHANG B. Robust secure transmission for wireless information and power transfer in heterogeneous networks [J]. *IET Communications*, 2019, 13(4): 411-422. DOI: 10.1049/iet-com.2018.5529.
- [51] MA H, CHENG J L, WANG X F. Proportional fair secrecy beamforming for MISO heterogeneous cellular networks with wireless information and power transfer [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(8): 5659-5673. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2910260.
- [52] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3590-3600. DOI: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [53] DAI L L, WANG B C, PENG M G, et al. Hybrid precoding-based millimeter-wave massive MIMO-NOMA with simultaneous wireless information and power transfer [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 131-141. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2872364.
- [54] LIU C S, LI M, COLLINGS L B, et al. Design and analysis of transmit beamforming for millimeter wave base station discovery [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(2): 797-811. DOI: 10.1109/TWC.2016.2630681.
- [55] BARATI C N, HOSSEINI S A, MEZZAVILLA M, et al. Initial access in millimeter wave cellular systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(12): 7926-7940. DOI: 10.1109/TWC.2016.2609384.
- [56] LIU C S, LI M, HANLY S V, et al. Millimeter wave beam alignment: Large deviations analysis and design insights [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(7): 1619-1631. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2699360.
- [57] BAO T T, WEN X M, LU Z M, et al. Joint hybrid beamforming and power splitting design in millimeter-wave simultaneous wireless information and power

- transfer system [J]. *Journal of China Universities of Posts & Telecommunications*, 2019, 26 (2): 59 - 66. DOI:10.19682/j.cnki.1005-8885.2019.1007.
- [58] ZHAO Y F, XU X T, WU S Y, et al. Research on transmission schemes of massive MIMO enabled SWIPT systems [C]//2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), Toronto, Canada, 2019: 155-160. DOI: 10.1109/ICCSE.2019.8845481.
- [59] KUSALADHARMA D, ZHU W P, AJIB W, et al. Performance of SWIPT in cell-free massive MIMO: A stochastic geometry based perspective [C]//2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2020: 1-6. DOI:10.1109/CCNC46108.2020.9045726.
- [60] AKIN A I, STUPIA I, VANDENDORPE L. On the effect of blockage objects in dense MIMO SWIPT networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67 (2): 1059 - 1069. DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2876308.
- [61] THAKUR A, MISHRA R C. Performance analysis of energy-efficient multi-cell massive MIMO system [C]//2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kanpur, India, 2019: 1-7. DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944389.
- [62] HA T N, KHA H H. Harvested energy and spectral efficiency trade-offs in multicell MIMO wireless networks [J]. *Radio Engineering*, 2019, 28(1): 331-339. DOI:10.13164/RE.2019.0331.
- [63] NASIR A A, TUAN H D, DUONG T Q, et al. Transmitter-side wireless information- and power-transfer in massive MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69 (2): 2322-2326. DOI: 10.1109/TVT.2019.2959932.
- [64] LI A, MASOUCOS C. Energy-efficient SWIPT: From fully digital to hybrid analog-digital beamforming [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 3390-3405. DOI:10.1109/TVT.2017.2782775.
- [65] DONG G N, ZHANG H X, YUAN D F. Downlink achievable rate of massive MIMO enabled SWIPT systems over rician channels [J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22 (3): 578 - 581. DOI: 10.1109/LCOMM.2017.2782798.
- [66] FAN L X, WANG Q, HUANG Y M, et al. Secure wireless information and power transfer based on tilt adaptation in 3-D massive MIMO systems [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 5531 - 5540. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2888541.
- [67] 赵飞, 郝万明, 孙钢灿, 等. 基于 SWIPT 的毫米波大规模 MIMO-NOMA 系统下安全能效资源优化[J]. *通信学报*, 2020, 41(8): 79-86.
- [68] 楚万顺, 张起贵. 基于全双工中继网络的功率分配优化策略[J]. *计算机工程*, 2018, 44(1): 149-153.
- [69] ZENG Y, ZHANG R. Full-duplex wireless-powered relay with self-energy recycling [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4 (2): 201 - 204. DOI: 10.1109/LWC.2015.2396516.
- [70] MASO M, LIU C F, LEE C H, et al. Energy-recycling full-duplex radios for next-generation networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(12): 2948-2962. DOI: 10.1109/JSAC.2015.2482058.
- [71] KWON K, HWANG D, SONG H K, et al. Full-duplex with self-energy recycling in the RF powered multi-antenna relay channels [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26 (10): 1516 - 1520. DOI: 10.1109/LSP.2019.2938304.
- [72] 周叶宁, 李陶深, 曾敏, 等. 最小化具有无线携能通信的全双工中继系统发射功率和[J]. *计算机应用*, 2019, 40(2): 363-368.
- [73] 谢显中, 扶渝茜, 陈九九. FD-SWIPT 双向中继系统中基于天线选择与波束成形联合优化的高能效和吞吐量最大化方案 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(9): 1217-1230.
- [74] 陈可可, 赵赛, 唐冬. SWIPT MIMO 全双工系统中的物理层安全通信优化方法 [J]. *计算机工程*, 2019, 45(12): 109-113.
- [75] 陈佩佩, 李陶深, 葛志辉, 等. 全双工能量受限中继网络的安全波束成形设计 [J]. *北京邮电大学学报*, 2020, 43(2): 59-65, 79.
- [76] 陈佩佩, 李陶深, 方兴, 等. 能量收集全双工中继系统中的安全波束成形研究 [J]. *计算机科学*, 2020, 47(6): 316-321.
- [77] 鲍慧, 李梦辉, 赵伟. 全双工中继协作下认知 MIMO 系统的自干扰收集 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2019, 47(6): 17-22.
- [78] 万晓榆, 冯小龙, 王正强, 等. 基于能量采集异构蜂窝网络的功率分配算法研究 [J]. *电子学报*, 2017, 45(9): 2308-2312.
- [79] ZLATANOV N, SCHÖBER R, HADZI-VELKOV Z. Asymptotically optimal power allocation for energy harvesting communication networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66 (8): 7286-

7301. DOI:10.1109/TVT.2017.2662641.
- [80] MANGAYARKARASI P, RAJA J. An efficient IR-HARQ power allocation for relay-aided cellular networks [J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2018, 27 (12): 1850195. DOI: 10.1142/S0218126618501955.
- [81] LIU Y. Joint resource allocation in SWIPT-based multi-antenna decode-and-forward relay networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(10): 9192-9200. DOI:10.1109/TVT.2017.2717018.
- [82] DING H Y, WANG X D, COSTA D B D, et al. Adaptive time-switching based energy harvesting relaying protocols [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65 (7): 2821 - 2837. DOI: 10.1109/TCOMM.2017.2693358.
- [83] ZHONG S H, HUANG H J, LI R F. Outage probability of power splitting SWIPT two-way relay networks in Nakagami-m fading [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications & Networking*, 2018, 2018(11): 1-8. DOI:10.1186/s13638-017-1006-0.
- [84] SARAJLIC M, LIU L, RUSEK F, et al. Impact of relay cooperation on the performance of large-scale multipair two-way relay networks [C]//2018 IEEE Global Communications Conference, Abu Dhabi, United Arab Emirates, IEEE, 2018: 1-6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647760.
- [85] 宁倩丽, 李陶深, 王哲. 基于 SWIPT 的协作中继系统动态时间分配策略 [J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2019, 44(3): 696-702.
- [86] 孙莉, 李陶深, 王哲. 能量收集和能量协作菱形信道的功率分配策略 [J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(3): 569-574.
- [87] 周叶宁, 李陶深, 王哲, 等. 具有 SWIPT 和自能量回收的非分时全双工中继系统 [J]. *计算机研究与发展*, 2020, 57(9): 1888-1897.
- [88] SALIM M M, WANG D S, LIU Y Z, et al. Optimal resource and power allocation with relay selection for RF/RE Energy harvesting relay-aided D2D communication [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 89670-89686. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2924026.
- [89] JIANG L, QIN C, ZHANG X X, et al. Secure beamforming design for SWIPT in cooperative D2D communications [J]. *China Communications*, 2017, 14(1): 20-33. DOI:10.1109/CC.2017.7839755.
- [90] ZHONG X J, GUO Y, LI N, et al. Joint optimization of relay deployment, channel allocation, and relay assignment for UAVs-aided D2D networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28 (2): 804 - 817. DOI:10.1109/TNET.2020.2970744.
- [91] 丁长文, 杨霖, 李高祥. 能量收集双向中继网络的高能效联合中继选择和功率分配算法 [J]. *电子学报*, 2017, 45(5): 1124-1129.
- [92] WANG D X, ZHANG R Q, CHENG X, et al. Relay selection in full-duplex energy-harvesting two-way relay networks [J]. *IEEE Transactions on Green Communications & Networking*, 2017, 1 (2): 182-191. DOI: 10.1109/TGCN.2017.2686325.
- [93] FIDAN E, KUCUR O. Performance of cooperative full-duplex AF relay networks with generalised relay selection [J]. *IET Communications*, 2020, 14(5): 800-810.
- [94] XIA H X, LI Y Z, LU Y L, et al. Relay Selection optimization for SWIPT-enabled cooperative networks [J]. *Information*, 2019, 11 (1): 7. DOI: 10.3390/info11010007.
- [95] LIU X L, LI Z, WANG C. Secure decode-and-forward relay SWIPT systems with power splitting scheme [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67 (8): 7341 - 7354. DOI: 10.1109/TVT.2018.2833446.
- [96] LI M, TAO X F, LI N, et al. Multi-objective optimization for full-duplex SWIPT systems [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 30838-30853. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973323.
- [97] ZHANG T K, ZHAO J J, AN L, et al. Energy efficiency of base station deployment in ultra-dense HetNets: A stochastic geometry analysis [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5 (2): 184 - 187. DOI: 10.1109/LWC.2016.2516010.
- [98] SAHA C, AFSHANG M, DHILLON H S. 3GPP-inspired HetNet model using poisson cluster process: Sum-product functionals and downlink coverage [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(5): 2219-2234. DOI:10.1109/TCOMM.2017.2782741.
- [99] SAHA C, DHILLON H S, MIYOSHI N, et al. Unified analysis of hetnets using poisson cluster processes under max-power association [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18 (8): 3797 - 3812. DOI:10.1109/TWC.2019.2917904.
- [100] AFSHANG M, DHILLON H S. Poisson cluster process based analysis of HetNets with correlated user and base station locations [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17 (4): 2417 - 2431. DOI:10.1109/TWC.2018.2794983.
- [101] 金明录, 郭楠. 基于 Thomas 簇过程的异构蜂窝网能

- 量效率分析[J]. 通信学报, 2019, 40(10): 149-156.
- [102] AHUJA K, XIAO Y Z, SCHAAR M V D. Distributed interference management policies for heterogeneous small cell networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(6): 1112-1126. DOI: 10.1109/JSAC.2015.2417014.
- [103] LIU C J, XIAO L. Interference precancellation for resource management in heterogeneous cellular networks [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Commu- nications & Networking*, 2019, 5(1): 138-152. DOI: 10.1109/TCCN.2018.2878199.
- [104] XIAO J, YANG C G, ANAPALAGAN A, et al. Joint interference management in ultra-dense small-cell networks: A multi-domain coordination perspective [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(11): 5470-5481. DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2851215.

## Research and Development of Simultaneous Wireless Information and Power Transfer Technology Based on 5G

LI Taoshen<sup>1,2</sup>, ZHU Qing<sup>1</sup>, WANG Zhe<sup>3</sup>, SHI Anni<sup>1</sup>, HE Lu<sup>1</sup>, LU Mingyu<sup>1</sup>

(1. School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. School of Information Engineering, Nanning University, Nanning, Guangxi, 530200, China; 3. School of Artificial Intelligent, Guangxi University for Nationalities, Nanning, Guangxi, 530005, China)

**Abstract:** Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) can improve the utilization of spectrum and realize the energy saving and emission reduction of traditional network, which provides the network with more intelligent autonomous ability, wider coverage and more highly integrated system capability. In view of this new research field, this article summarizes and reviews the existing researches on the integration of SWIPT and 5G emerging communication technologies from the perspective of optimal allocation of resources and secure transmission. It also analyzes and discusses several possible research directions to further improve the performance of the SWIPT system, aiming to provide a reference for the research and development of simultaneous wireless information and power transfer networks.

**Key words:** simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT), resource allocation, 5G, spectrum efficiency, energy efficiency, seamless coverage, security

责任编辑: 陆雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>