SCIENTIA SINICA Informationis

评 述

数能一体化无线通信网络

杨鲲¹, 于秦¹*, 冷甦鹏¹, 张平²

电子科技大学通信与信息工程学院,成都 611731
 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室,北京 100876
 * 通信作者. E-mail: yuqin@uestc.edu.cn

收稿日期: 2015-12-09; 接受日期: 2016-01-28

摘要 本文介绍一种新型的数能一体化无线通信网络 (data and energy integrated communication networks, DEINs), 它将传统的无线网络中相互独立的无线信息传输 (wireless information transfer, WIT) 和 无线能量传输 (wireless energy transfer, WET) 融合起来, 实现数据和能量的协作同传. 传统的无线携 能通信 (simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 侧重在物理层进行, 本文所提出的 数能一体化网络则强调系统性, 在网络各层设计并实现相应的协议和资源分配. 与其他再生能源如 风能太阳能等不同, 数能一体化网络 DEINs 中的能量源, 即基站的射频 (RF) 信号, 不受自然环境的 影响, 而且完全可控. 数能一体化网络在解决无线通信系统的能效问题、实现无线通信的节能减排方 面具有巨大的潜力. 本文从两个方面阐述所提出的数能一体化网络: 能量和网络. 在能量方面, 本文 介绍并分析了数能一体化网络的能量编码、能量模型、能量管理等. 在数据网络方面, 本文对数能一 体化网络的各层讨论了几种核心技术, 包括物理层、数据链路层协议及联合资源分配、网络层以及 数能一体化网络的典型网络应用场景. 在各层的介绍中, 本文着重于新方向的讨论, 而非现有研究工 作的简单重述. 最后, 本文对该领域未来的发展趋势和研究方向作了总结和展望.

关键词 数能一体化网络 携能通信 能量收集 能量管理 资源分配

1 引言

随着无线通信技术的迅猛发展, 能量消耗问题日益突出^[1]. 传统无线通信系统的设备耗能主要依赖于可充电的或可更换的电池加以解决, 花费较大且设备本身移动性受限. 本文提出一种新型的数能一体化无线通信网络 (data and energy integrated communication networks, DEINs), 将传统的无线网络中相互独立的无线信息传输 (wireless information transfer, WIT) 和无线能量传输 (wireless energy transfer, WET) 融合起来, 实现数据和能量的协作同传. 传统的无线携能通信 (simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 侧重在物理层进行, 本文所提出的数能一体化网络则强调系统性, 在网络各层设计并实现相应的协议和资源分配.

引用格式:杨鲲,于秦,冷甦鹏,等.数能一体化无线通信网络.中国科学:信息科学,2016,46:591-609,doi:10.1360/N112015-00304

数能一体化无线通信系统打破了传统的能量供应模式,系统设备通过能量收集 (energy harvesting, EH) 模块从自身所处环境获取可能的无限能源供应,有巨大的潜力实现无线通信能效问题的解决,使 得网络寿命取决于硬件设备而非能量存储,且减少了更换电池的昂贵代价和环境危害^[2].

数据和能量一体化无线通信网络,简称数能一体化无线通信网络,是一种新型的绿色网络,不仅可以通过能量自供给自我延长网络生命周期,还能减少能源浪费和通信碳足迹^[3]. EH 技术的能量来 源不仅包括周围环境的大多数自然能源,如太阳能、光能、风能、热能、化学能等,还可以将接收的周围无线信号转化成一种电能,如人工获取的射频 (radio frequency, RF) 信号^[4]. 电子技术的新发展也 使得能量和信息的协同传输受到人们的热切关注. 例如,无线 EH 技术已经用于给 3~5 米范围内的 小传感设备通过无线射频信号进行充电. 近期的研究表明通过电视塔的广播信号,能够从几英里外收 集到几百微瓦的能量.目前,数能一体化正日渐成为一个非常具有潜在价值的研究领域.

近年来,国内外学术界和工业界对数能一体化技术展开了广泛而深入的研究,大量成果发表在 IEEE 等顶级期刊和会议上.在现有的研究工作中,研究人员在信息论基础^[5~7]、能量管理^[8~12]、物 理层协议设计^[13~28]、媒介访问控制 (medium access control, MAC) 层协议设计及资源分配^[29~47]、无 线携能通信^[48~58] 等方面都有了较多的研究成果.

在信息论基础方面,现有研究主要针对发射端电池容量不同对发射的信息限制和信道的容量进行 了分析研究. 在能量管理方面, 针对不同的能量到达过程, 在分析不同情况下的限制条件的基础上, 现 有研究主要针对如何高效合理地利用能量展开. 在物理层协议设计方面, 主要研究方向有多输入多输 出 (multiple-input and multiple-output, MIMO)、协作环境下全双工中继等. 在 MAC 层协议设计方面, 现有研究主要是考虑在一体化网络中应用了 EH 技术后, 如何通过重新设计不同的 MAC 协议及动态 资源分配策略以提高网络的数据传输速率、优化整个网络性能.在 SWIPT 方面,现有研究主要针对 节点之间无线信息和能量的协同传输进行研究. Varsheney^[48] 首次提出能量与信息同时传输的概念, 通过建立能量模型对能量与信息同时传输进行性能折衷. Grover 和 Sahai^[49] 在 Varsheney 的基础上 进一步研究在加性白噪声 Gauss 信道上进行信道选择. 不同于点对点单天线系统, 文献 [50] 首次探讨 MIMO 数能一体化传输系统. 此外, 文献 [51~53] 深入研究了多用户正交频分复用多址接入 (orthogonal frequency division multiplexing access, OFDMA) 技术下的数能一体化传输系统. 文献 [54] 针对数能一 体化系统传输进行了架构设计与性能分析,提出在基带进行信号分离与射频端进行信号分离的接收机 结构.为了降低接收机的复杂性,文献 [55] 提出基于接收端信息解码 (information decoding, ID) 与用 于 EH 的时间选择 (time-switching) 方案, 联合信息与能量传输调度、功率控制以及信道干扰的协同 策略实现信息传输速率与能量容量 (rate-energy) 的折衷. 在干扰管理方面, 现有的干扰管理技术 (比 如干扰对齐和干扰消除)都是通过频谱调度避免或消除干扰并利用调度机制将有害的干扰转变成有用 的能量的方式^[56]. 在编码问题上, 文献 [57] 提出了 RRL 编码来控制传输能量的多少, 以此满足接收 端能量的因果性和有限性. 文献 [58] 分析了采用网络编码增加两条链路的中继网络生存时间的问题, 通过采集 RF 能量, 网络的生存时间可以增加 70%. 另外, 某些特定的网络场景, 如无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN)^[19,59~61]、认知无线电网络 (cognitive radio network, CRN)^[62~68] 和蜂 窝通信网络[53,55,69,70] 等也吸引了大量的关注.

另一方面,数能一体化网络中应用了 EH 技术,这也为无线网络设计带来了许多新的挑战.不同于 传统的功能方案,EH 过程具有间断性和随机性,这使得我们必须根据 EH 的动态情况来调整现有通 信技术以实现稳定可靠的网络操作.国内对于数能一体化网络的研究还处于初步阶段^[12,13,30,41],文 献 [12] 介绍了该领域的部分研究现状,但没有从信息论基础的角度来讨论 EH,而且没有考虑 EH 过 程中的协议等相关问题,文献 [30] 只是在 IEEE802.15.4 MAC 协议的基础上,考虑了 EH,提出了一种



图 1 带有 EH 的加性 Gauss 白噪声单用户信道 Figure 1 EH-enabled single-user channels with additive white Gaussian noise

基于时隙分析的 CSMA/CA 分析模型.

本文在广泛调研国内外关于携能无线通信技术相关研究工作的基础上提出了数能一体化网络的 概念,并从如下两个大的方面对其进行了阐述: (1) 能量模型及其管理; (2) 从网络的角度对其进行分 层介绍和综述. 在能量管理方面,本文首先从信息论层面上讨论了 EH,接着根据简单的能量收集模型 (energy harvesting model, EHM) 总结了对于不同能量到达过程 (energy arrival process, EAP) 的一些 能量管理方案. 在网络层面,本文讨论了我们认为的数能一体化网络 DEIN 的物理层关键技术、MAC 层协议和动态资源调度算法、网络层设计策略等. 另外,本文针对几种重要典型的数能一体化网络的 典型应用场景,如无线传感器网络、认知无线网络、蜂窝移动网络等作了分析和讨论. 最后,本文讨论 未来所面临的发展机遇和挑战.

2 能量收集与管理

2.1 能量的收集及其信息论基础

能量收集管理 (EHM) 是能量收集 (EH) 系统进行资源分配、数据能量协同传输的一个重要参考 因素. 基于能量中立 (energy-neutrality) (收割能量要大于消耗能量) 的条件, 文献 [71] 研究了带有理 想/非理想能量存储情况下的 EH 系统. 文献 [72,73] 研究了确定性的 EHM. 确定性的 EH 模型是指能 量到达时间和到达量都是确定的, 这种类型的 EHM 受初始状态的影响. 确定性的 EHM 是最常用的 模型, 不仅建模简单, 而且现在能对能量的到达作出很好地预测. 然而, EH 节点的能量到达时间和到 达量不能总是简单地认定为确定的, 它们需要更复杂的 EAP 模型 ^[73,74].

考虑一个带有 EH 的有加性 Gauss 白噪声单用户信道, 如图 1 所示. 假设不考虑具体 EH 过程, 输入信号为 X, 信道噪声为 N, 并服从均值为 0, 方差为 1 的正态分布, 输出信号为 Y = X + N. 假设 在时刻 t_i, 随机收集的能量为 E_i, 所携带电池容量为 E_{max}, 所有的收集能量用于码字的发送. 则任意 时刻输入的码字的可用能量取决于该时刻电池剩余存储量和该时刻的收集能量.

目前国内外在信息论层面上对于 EH 主要研究了针对不同电池容量 E_{max} 对应信道容量的极限 以及如何达到该极限策略. 具体研究主要从 3 个方面开展: $E_{\text{max}} \doteq \infty$, $E_{\text{max}} \doteq 0$, $E_{\text{max}} \doteq C$ (C 为非零 常数). 文献 [5~7] 分别在发射器电池容量不受限、发射器没有电池、发射器电池容量有限的情况下, 针对 AWGN 传输信道的信道容量展开研究, 提出了各自的信道容量表达式及其传输的信息限制条件. 表 1 列出了 3 种电池容量下它们各自的传输信息限制和信道容量, 更为详细的介绍请见文献 [5~7]. 下面对最常用的情形, 即电池容量有限, 进行简单介绍.

电池容量有限时,即 *E*_{max} = *C* (*C* 为非零常数),发送端可以进行 EH,直到电池达到饱满状态.此时信号的能量仍然需要使用振幅限制,并且信息的传输需要根据发送端当时的电池状态来作出相应的

	$E_{\rm max} = \infty$	$E_{\rm max} = 0$	$E_{\max} = C$
Constraint	The total of average energy is less than P	Amplitude constraint	Amplitude constraint
The capacity C of channel	$0.5\log(1+P)$	$\min_{f \in F} I_f(X;Y)$	$\max_{p(u),v(u,z)} I(U;T)$

表 1 3 种电池容量之间的对比

 Table 1
 Comparison between the three kinds of battery capacity



图 2 EH 系统示例 Figure 2 An energy harvesting system

策略. 若假设电池容量为一单元能量, 那么电池容量只有两种状态: 一种为 1, 一种为 0. Shannon 提供 了两种策略 (0,0) 和 (0,1), 两个元素分别表示电池容量为 0 和 1 的时候信息传输的能量. 另 p 表示策 略 (0,1) 的概率, 那么信道的传输能量就是一个和 p 有关的函数, 即信道容量与不同程度的策略选择 有着一定的关系. 另 U = 0,1 分别来对应两种策略, 信道输出 T 代表等待一个能量到达的信道等待值 与能量到达后发送一个信息之间的信道等待值之和, 即 T = Z + V, 那么信道容量可以表示为

$$C_{sm}(A) = \max_{p(u), v(u,z)} I(U;T).$$
(1)

V则是一个匹配策略 U 与 Z 的函数, 当该函数能够取得最优时, 信道容量就可以达到最大值^[7].

现有的研究中信道类型仅限于二进制无噪信道或加性 Gauss 白噪声信道,而在实际环境下,常会碰到底噪不平坦的非 Gauss 白噪声信道;另一方面,对于随机能量的分布没有结合实际的电磁信号开展研究,而提供随机能量的电磁信号到达分布又是极其复杂的.因此,如何处理好这两个问题,从而使EH 技术实用化,是数能一体化无线通信网络中一项困难且艰巨的任务.

2.2 能量管理

能量管理是继 EH 之后又一新考虑问题.如何保证能量使用的合理性和高效性是能量管理技术研究的关键部分.目前,针对不同能量达到过程和数据分组到达情况,都有大量的研究,并提出了许多传输策略.文献 [8] 提出了在多用户广播衰减信道信号在确定性 EAP 时,使用定向注水算法得到最优传输策略.文献 [9] 主要考虑了在确定性 EAP 下在发射机初始化的时候,数据包的不同到达过程,即已经到达和在传输过程中逐渐到达,在能量特性约束条件下的最优的能量分配策略.

能量管理的目标是针对在一定时间内的到达数据分组和收集能量,制定合理高效的能量分配策略, 即根据实时的数据和能量队列自适应的调整数据发送的速率和功率,并不关注能量源的形式.考虑一 个简单的加性 Gauss 白噪声单用户衰减信道 EH 系统模型,如图 2 所示.

其中,发送机有两个队列,即存储能量的能量队列和存储数据分组的数据队列.能量到达过程有随机性和间歇性,假设到达能量 *E*_i 为一个离散过程,并且在能量到达过程分析中引入关于场景的静



图 3 两种能量到达模型

Figure 3 Two models of energy arrival. (a) Static Markov process; (b) the normalized Markov process



图 4 传输数据先固定的确定性 EAP 模型 Figure 4 An EAP model in which the transmitted data is fixed

态随机过程 S_i. 一般情况下, 能量到达符合静态 Markov 模型或归一化 Markov 过程. 这两种模型如 图 3 所示.

同样,数据分组到达方式,也有两种情况通常被研究.第1种情况,在发射机初始化的时候数据分组已经全部到达发射机.第2种情况,数据分组在传输过程中逐渐到达,一般假设数据分组的大小和 到达时间和是已知的.

简单分析一种确定性 EAP, 即节点的能量的到达时间和到达量是可以预知的, 考虑发射机端数据 分组提前完全达到情况. 如图 4, 假设在 t = 0 时, 共有 B_0 bit 数据等待传输, 在时间 $t_1, t_2, ..., t_k$ 分别 收集到的能量是 $E_1, E_2, ..., E_k$. 假设发射机可以根据电池可用能量和现在剩余的待传输数据分组自适 应调整发送功率和发送速率 ^[9,10].

在上述情况下,能量管理的目标是通过控制传输速率和功率最小化传输时间或者在截止时间 T 之前尽可能发送最大数据分组.

假设传输速率 R 和发送功率 P 满足

$$R = \frac{1}{2}\log(1+hP).$$
 (2)

因此, 若以发射功率为 P, 传输数据时间为 l, 则消耗的能量为 lP. 由于在能量到达过程中, 能量 是受限的, 因此, 能量的使用必须考虑其因果性和存储受限性. 因果性是指系统中当前时刻收集的能 量只能供后续时刻使用, 当前时刻能使用的能量不能超过已收集到的及存储的总能量; 存储受限性是 指电池容量受有限大小的, 要保证能量的有效性, 不要让电池内能量溢出, 即不要浪费任何到达的能 量. 假设收集能量序列为 { $E_0, E_1, ..., E_{N-1}$ }, 发送数据时间段序列为 { $l_1, l_2, ..., l_{N-1}$ }, 功率控制函数 P(t) 在各时间段平均功率序列为 { $p_1, p_2, ..., p_N$ }, 则需满足能量因果抑制 ^[9]:

$$\sum_{i=1}^{K} l_i p_i \leqslant \sum_{i=1}^{K-1} E_i, \qquad k = 1, 2, ..., N,$$
(3)

以及存储有限抑制[11]:

$$\sum_{i=1}^{K} E_{i} - \sum_{i=1}^{K} l_{i} p_{i} \leqslant E_{\max}, \qquad k = 1, 2, ..., N.$$
(4)

以上两个条件限制构成了传输过程能使用能量的上下界,如图 5 所示.由于能量消耗曲线保持 分段线性可以达到最优,则最优策略为保持不同平均功率周期最大化^[9,11].图 6 为有限电容存储,即 *E*_{max} = *C* (*C* 为非零常数),最优策略方案,其中各直线分段及斜率表示了不同的平均功率和周期.





Figure 5 The upper and lower bounds of the usable energy in energy transfer process



图 6 有限电容存储最优策略 Figure 6 The optimal strategy for limited capacity to store

事实上,在实际系统中,能量的到达模型和数据的到达模型通常无法预测.此时进行能量分配只能根据当前的系统状态和能量与数据的历史到达规律,来决定解决不可预测能量到达的在线环境下获取到的能量优化问题,通常使用的框架是 Markov 决策 (Markov decision process, MDP) 过程.通过将能量到达模型与数据到达模型分别建模为 Markov 过程,在线问题可以转化为 Markov 决策过程进行求解^[12].

3 数能一体化网络的物理层

由于信道衰落和路径损耗,通过无线信道传输的能量是十分有限的.因此,就需要设计复杂的物理层方法来提高数能一体化网络的能量效率.在这方面,多天线技术是一项有效的技术,并已被用于提高网络的性能.然而,当前提出的研究方案仅局限于小规模的 MIMO,天线的数量很少 (10 个或更少).而近期已有研究表明,如果基站有上百的天线,网络容量将会大大提升.这也就刺激了所谓的大规模 MIMO 的发展.

文献 [13] 阐述了大规模 MIMO 的系统研究进展, 探讨了大规模 MIMO 系统的导频污染问题及解 决方案、适用于大规模 MIMO 系统的信道模型以及低复杂度的传输技术与实现方法 3 项关键技术. 提出与现有 MIMO 系统相比, 大规模 MIMO 系统能显著提高频谱效率、能量效率和系统的鲁棒性能. 文献 [14] 则是单独从能量效率方面将大规模 MIMO 与传统小蜂窝网络进行对比, 提出由于前者有着 比较小的短路功率, 使得大规模 MIMO 的能量效率得到显著提高. 因为目前已经有很多针对 MIMO 的研究, 未来的数能一体化通信也就被定位在高效也更复杂的大规模 MIMO, 因为它代表了未来的趋



图 7 MIMO 信道

Figure 7 MIMO channel. (a) MIMO radio channel (only a source); (b) MIMO interference channel (multisource)

势. 文献中有基于各种天线模式 (单天线或多天线) 的文献, 本文在下面两个小节中的讨论只是针对 MIMO, 而且从非协作和协作两个方面进行讨论, 而且协作模式的讨论针对更为前沿的全双工模式.

3.1 非协作环境下的物理层

大规模 MIMO 传输首先从较为简单的单源广播信道出发,如图 7(a) 所示,一个 MIMO 系统的中 心节点需要和若干分布式节点通信并为它们传输能量.通过优化理论和随机矩阵模型,可以得出半确 定信道状态质量信息将会受到一定的影响,而基于此的 MIMO 编码技术也会进而研究.除此以外,硬 件损耗、天线的增加和能量信号传输的均衡对信道质量都会产生不同的影响.文献 [15] 对天线数量的 增加对信道性能的影响作出了研究,提出随着天线的增多, CRB 和 SINR 门限值会相应降低,从而使 MIMO 雷达不确定函数趋于优化,进而提高信道质量.

如图 7(b) 所示,干扰信道是通信系统中的另一个重要的组成部分.因此,数能一体化网络还要考虑优化 MIMO 干扰信道中的能量和信息传输.数能一体化网络的使用为无线传输系统的干扰管理提供了全新的理念.非接收机所需的干扰信号可以被接收并用于能量采集.因此,利用数能一体化网络,信道干扰能量反而可以是低电量节点所需的.基于传统的传输技术,如干扰校正 (interference alignment, IA),将进一步考虑结合能量传输,并设计出新的 MIMO 系统预编码技术.

文献 [16] 提出了一种大规模 MIMO 系统中的干扰校正算法,基于对试点污染的考虑,该算法通过确定最大 SINR 上行链路预编码矩阵的方式来达到全局最优. 该算法的性能同时也随着 MIMO 天线数量的增多而提高. 文献 [17] 提出了一种基于信号校正的 MIMO 物理层预编码技术,从而可以最大 化接收端的 SNR,但没有对能量与信号协同传输的环境作出讨论.而文献 [18] 则对能量收割网络中基 于能量管理的物理层编码作出讨论,由于在能量收割网络中,能量不再有限,故其编码技术不再单单考虑 SNR 性能,而能量消耗也会作为一种新的性能衡量标准.

3.2 协作环境下基于全双工的物理层

随着无线自组织网络技术的普及,数能一体化网络在无线协作网络(即中继网络)中也会在未来



图 8 物理层全双工中继 Figure 8 The full-duplex relay in physical layer

有比较广泛的应用.在该网络中,中继节点需要收集能量并用于转发信息.数能一体化网络中使用中继技术会得到一定的性能增益.文献 [19,20] 研究一个能量收割网络下包含源节点、中继节点和目的节点的简单合作场景,提出为了最大化系统的性能,中继的数据包应该尽可能的多.然而它忽略了信息传输中的能量限制,并且没有考虑信息与能量协同传输的机制.文献 [21] 将中继节点的能量限制考虑进去,构建了一个中继场景,其中基站由电网功能而中继节点由能量收割供能,研究在能量限制条件下的系统吞吐最优化.文献 [22,23] 讨论了能量合作模式下的中继机制,在考虑能量限制的情况下加以能量中继机制,以能量和信息同时中继的方式提高系统的吞吐量.在对简单的中继场景研究基础上,再考虑更复杂的多用户中继场景,其中包括 3 种重要的通信信道,即多接入信道、广播信道及干扰信道.

全双工中继技术是基于半双工中继技术发展而来的.利用该技术,中继节点可以同时接收和传输 数据,如图 8 所示.但是截至目前为止,全双工中继仍被认为是不现实的,因为它具有很大的回送干扰 (loopback interference, LA).但是,结合了全双工模式的能量采集技术却可以明显地减少能量开销,因 为回送干扰可以被用于能量采集.但是在目前,回送干扰在发送端的能量采集还没有取得一定的研究 进展.

文献 [24] 对全双工中继的自干扰消除进行了一定的研究, 提出了最小均方错误滤波技术. 除此以 外, 全双工中继不光对自身产生一定的干扰, 还会对其他接收机产生一定的影响. 基于能量收割的全 双工中继技术在构造大型网络时, 必须考虑相应的干扰消除与干扰能量收割技术, 从而系统的吞吐量 得到有效的提高. 文献 [25] 提出了基于协作式中继的 MIMO 预编码技术, 对多方向中继信道的信息 交换机制作出了研究. 文献 [26] 则是考虑了运用 OFDM 机制的 EH 网络在基站的能量供应是多元复 杂的情况下, 其最优的能量效率. 文献 [27] 则是对多天线 MISO 的能量收割网络环境下, 只考虑下行 WET 的最优化, 其中, 包括了对基站发送端波束成形的最优化、各个用户上行传输信息的时隙分配最 优化等. 文献 [28] 则是数能一体化网络中, 对 MIMO 预编码技术进行讨论研究, 提出了一种能够优化 信息传输速率的预编码算法.

在无线网络 EH 时,周围环境中的 RF 信号也可作为能量碎片进行收集,为能量受限的无线网络 环境下延长网络使用周期并建立绿色通信供能.射频信号同时承载信息和能量,为信息与能量的同时 传输提供极大可能性.这种并行传输能提高频谱利用率和系统吞吐量,为无线系统的设计和无线资源 的分配带来革命性的变化.因此,数能一体化网络支持信息与能量协同传输,是无线通信技术与能源 技术交叉融合的一个新的研究方向.

在节点间的协同传输问题上,包括传统的数据层面协同传输以及能量层面协同传输.在多节点的 场景下,收割能源的不确定性造成了不同的节点储能情况的差异性.在许多情况下,一些节点储存的 能量较多,而发送数据的业务量较少;相对地,另一些节点储存的能量较少,发送数据的业务量较大. 在这种情形下,后者难以用较少的能量支持较大数据业务的传输,而前者又有大量的剩余能量没有得 到有效利用.因此,有大量剩余能量的节点如果能将能量传输给急需能量的节点,网络的性能将得到 较大提升.

节点间的协同传输要求节点能比较清楚和及时地知道网络中其他节点的储能状态,这就导致了节 点之间增加一些新的信令交互.频繁的信令交互不仅增加了网络开销,也占用了更多频谱资源,还给 传统的通信带来更多干扰.由于实际网络拓扑的复杂性和多变性,这将是一个巨大的挑战.此外,在实 际的电路系统中接收机无法同时进行信息解码与能量收割.在该条件的限制下,如何设计一种高效的 能量与数据协同传输策略将变得尤为重要.

另外,对于整个系统的干扰管理、网络编码、移动性影响等方面也值得我们作更深的研究.目前,现行现有的干扰管理技术,比如干扰对齐和干扰消除,都是通过频谱调度避免或消除干扰并利用调度 机制将有害的干扰转变成有用的能量的方式^[56].因此如何消除干扰以及如何增强能量传输,也是目前 研究的一个重要问题.此外,在未来能效管理上,调度机制也可能和功率管理机制相结合.而在编码问 题上,从网络生存时间的角度来看,更多不同网络模型和网络编码机制,比如物理层网络编码和模拟 网络编码都值得深入研究.

4 数能一体化网络 MAC 层协议及资源分配

在应用了 EH 技术后,数能一体化无线通信网络需考虑能量的特性来重新考虑 MAC 协议,并进行合理的动态资源分配,以此来提高网络的数据传输速率,优化整个网络性能.

4.1 MAC 层协议设计

文献 [29] 提出了一种适用于 EH 无线网络的优化帧结构, 考虑了最大吞吐量, 最小中断概率等参数, 为实际 MAC 协议的设计提供参考和指导.同时, 研究者们提出了多种适应不同网络以及提高不同网络性能的 MAC 协议:文献 [30] 在 IEEE 802.15.4 的 MAC 接入协议基础上, 考虑了 EH 情况, 提出了一种基于时隙分析的 CSMA/CA 分析模型来增大网络吞吐量. 文献 [31] 考虑在单跳无线网络中 EHM、耗能过程和分配资源冲突, 分别建立了冲突干扰模型, 耗能模型以及 EHM, 分析不同 MAC 层协议 (包括 TDMA, FA, DFA) 的性能并提出了两个衡量标准:传输效率和时间效率.文献 [32] 提出了适于单跳网络的 PP-MAC (概率轮询 MAC 协议), 其源节点采用轮询的方式广播随机节点的 ID, 网络中的节点首先在一个"充电"状态下收获足够的能量, 然后进入"接收"状态接收轮询数据包. 在此基础上, 基于节点分层的 MTTP 协议是对 PP-MAC 协议在多跳网络中的的扩展, MTTP 协议根据节点 到源节点的距离将其分为不同的层并用数字标记, 源节点向第一层的节点广播一个轮询数据包, 第一层的节点再向它的上一层节点广播一个相同的轮询数据包 [^{33]}.不同于 PP-MAC, 文献 [34] 提出了使节点最大化能量消耗的 OD-MAC 协议, 每个节点具有独立的 EH 操作, 节点能在任意状态下收集可能的能量.理想状态下使收获的能量与节点消耗的能量相同以最大化能量利用.而基于 QoS 感知的QAEE-MAC 协议使用数据优先级机制, 允许紧急的数据优先进行传输 ^[35].

4.2 MAC 层动态资源分配

公平有效的资源(带宽、功率、自由度等)分配是通信网络中的一个重要任务.它可以用来优化网 络性能,如总吞吐量和可靠性等.在数能一体化网络中,节点是需要收集能量才能进行通信的,也就是 说节点能量是有限的,因此传统的资源分配方案是不适用的.所以,分析新的优化目标(如最大化能量



图 9 数能一体化网络用户设备端的功率分割方案 Figure 9 The user equipment's power splitting scheme in DEIN

传输效率)和 QoS 限制条件 (如最大延迟和频谱效率) 对资源管理带来的影响以及设计新的 MAC 层 动态资源分配策略或者跨层 (如 MAC 子层和物理层子层结合) 的动态资源分配策略是目前这种网络的新研究热点.

例如, 文献 [36] 考虑了 MIMO 系统基于两种不同接收机的两种最优传输策略: 功率分割 (power splitting, PS) 和时隙分割 (time switching, TS). 图 9 为一种数能一体化网络用户设备端的 PS 方案.

其中,将接收功率的部分,即 τP_r 作为 WET 经转换器存储在电池中,其余的 $(1-\tau)P_r$ 作为 WIT 用于信息的解码. 文献 [37] 研究了时变衰减信道中在满足 EH 最小需求和传输功率限制约束下优化最 大的非中断概率和最大化信息传输速率. 这两个问题的解决结合了 Lagrange 对偶法和 0-1 规划方法. 参考文献 [37~40] 在接收能量有限和传输限制约束下,最大化信息传输数据率,提升了网络性能,同时 在多用户情况下,以牺牲公平性为折衷. 文献 [41] 分析了在无线传感网络中,以基于时分多址 (time division multiple access, TDMA) 的通信方式建立了适应于无线传感器网络的一体化网络新优化模型, 并考虑公平性和最小能量需求为约束,以最大化信息传输速率和能量获取量为优化目标,通过凸优化 问题的求解得到该优化模型的最优时间和功率分配策略. 文献 [42] 针对多输入单输出 (multiple-input single-output, MISO) 信道中的一体化网络,通过设计波束成形和功率分割策略,最大化总功率消耗的 实现效用率.

实际上,更多的约束条件应该在资源分配时考虑在内,如半确定信道状态信息、有限回馈信息、严格的延迟限制、异构的 QoS 需求以及干扰限制等,从而设计最优的或接近最优的资源分配策略,这些都值得我们深入研究.另外还可以更进一步探究高维度资源分配算法,例如,考虑引入电池充电状态(全部信息或部分信息)、用户自私性、网络和用户端功能的最优分割点等,针对多变的能效和数据速率需求,构造不同的效用函数,分别实现频谱效率和能量效率的最大化,或者同时实现多个效率的优化等.

同时,随着数能一体化网络的发展以及无线能量传送方面的研究进展,使得能量共享具有很大的 可实现性,在数能一体化网络中引入能量协同的概念也吸引了大量的关注.在这种情况下,能量的传 送和数据的传输既有一定的关联性,即能量保证数据的传输,同时能量数据同时传输的情况下两者也 有相互制约性,如何利用这种相关性和相制约性提高网络的数据传输率和能量效率显得尤为重要,此 种资源协作问题具有极大的研究价值.例如,考虑引入中继 (relay)节点的协作资源分配问题.图 10 展 示了离线数能一体化网络中包含单中继节点以及一对源 – 目节点的简单协作场景.考虑到每个节点 都可以使用 EH 进行能量的收集,且收割的能量在节点间的传输过程中会有一定的损耗,因此使用协 作的能量进行数据传输和使用收割的能量进行数据传输之间需要一定的权衡,我们需要通过数据和能 量的协同,进而解决无线资源与传输功率联合优化的问题.



图 10 具有 EH 和能量协同的中继场景下单源 – 目的节点对协作场景 Figure 10 The collaboration scenarios of source-destination with EH and collaboration

对于这些问题, 文献 [43] 研究了基于 PS 和 TS 协议下的放大转发 (amplify-and-forward, AF) 中继系统的吞吐量性能.同时, 文献 [44] 分析了基于多源 – 目节点的对解码转发 (decode-and-forward, DF) 中继系统的功率分配策略, 文献 [45] 则研究了多载波 DF 中继携能通信系统中的时间和功率分配策略, 而文献 [46] 通过引入博弈论, 设计了多载波中继携能通信干扰信道中的分布式 PS 方案, 且设计出适合 AF 中继, DF 中继和混合中继的分配方案控制帧.另外, 文献 [47] 则研究了基于 MISO 信道的能源协作中继系统, 通过分析最优功率分配和波束形成设计优化系统的总的吞吐量.

这些研究都针对不同场景对引入中继的协作资源的功率或时间分配作了一定的研究.但同时,传统的中继节点处于源目节点之间更便于数据的传输,而能量协同作用的中继节点可能会颠覆原有的设定,因此研究中继节点的位置对能量协同的影响具有很大的研究价值.另外,对于多中继节点场景,目前的研究资料也比较少,能量的共享方式、结构 (如集中式结构和分布式结构) 优化问题也等待我们继续深入研究.

5 数能一体化网络的网络层

能够收集能量的网络的网络层设计主要有无线的和有线的两个方面.前者是通过收集到的能量供能的包路由或者信息转发;后者就是所谓的能源网络.在能源网络中,网络的基本原理可以应用于能量路由.对于无线的数能一体化网络而言,除了传统的包路由之外,节点还可以通过能量协作将自己收集到的一部分能量传输给相邻节点.

5.1 基于能量协作的数据和能量路由

文献 [75] 考虑了一个既有数据节点/链路,又有能量节点/链路的有线网络.与我们提出的数能一体化网络不同,这个网络的能量源是太阳光而不是射频信号,并且是有线的而不是无线的.该文献通过优化数据和能量的路由来实现网络的数据传输延迟最小化.对于固定的数据和能量拓扑结构,该文献能够确定最优的数据率、发射功率和能量路由.该文献的一个有趣现象是能量从数据负载低的节点被路由到数据负载高的节点.

5.2 基于电池状态的数据传输策略

假设设备能随时获得电池状态信息,分析其传输策略.考虑一个如下的时分系统,在每个时隙中,

一个给定重要性的数据分组到达,数据分组必须立即被传送或者被丢弃. 传输优化目标是使整个时间 段的重要性最高. 数据分组是否要进行传输,基于以下几个条件,包括此数据分组的重要性、电池剩 余量和收集到的电池电量. 最优的策略实际上是一个门限决策的问题. 当数据分组的重要性高于某个 门限值 *T* 与电池剩余量和收集量有关时,就进行传输,否则抛弃^[76]. 这个门限策略可以用策略迭代算 法 (policy iteration algorithm, PIA) 来得到. 只有一个门限的策略只与这一阶段收集到的能量的概率 有关^[77].

再如,在突发数据的传输中,数据是突发到达的而且可以存储,要优化的是整个数据的平均时延,对于这类问题的传输策略一般是基于缓存中的数据量来调整传输的功耗,这样就不会浪费获取的 能源^[76].

5.3 无线充电桩与数据转发器的联合部署

现在,移动设备在处理、通信和交互方面的能力日益增强.此外,短程通信技术,如 Device-to-Device (D2D),能够使移动设备作为其他设备的中继进行数据转发.然而,这也带来了另一个问题:电 池消耗非常快.为了解决这个问题,科研工作者对基于能量收集的射频供能 (radio frequency based EH, RF-EH) 进行了大量研究. RF-EH 技术能够将射频信号转化成能量,但是阻碍 RF-EH 实用化的一个大 缺点是射频信号的能量传输损耗太大.在网络层,有希望缓和这个问题的方式是部署多重能量源.事 实上,类似的想法,如 throwbox 的概念,已经用在了数据转发中.

无线大数据通常涉及大规模的数据分发.对于大的无线网络,电池和传输范围有限的终端和多跳中继是一个有效的机制. 部署 Throwbox 是一个有效的数据转发方式,其可以作为彼此之间不能直接连接的两个终端的桥梁^[78]. 接下来需要探究 Throwbox 在数能一体化网络中的部署问题.也就是说, Throwbox 既需要分发数据也需要分发能量给终端,其中数据转发和能量收集之间的折衷将是一个有趣的研究课题.

6 数能一体化网络应用

数能一体化无线通信技术可以应用于多种无线网络,比如无线传感网 WSN,认知无线电网络 CRN 和蜂窝通信网络.

6.1 无线传感网络 WSN

与一般无线网络不同的是, WSN 中节点的能量不仅用于信息数据的传输, 还包括数据的采集.数据采集过程一般包括探测、采样和编码等, 所消耗的能量并不弱于数据传输所需能量.因此, 针对于特定的数能一体化 WSN 的能量管理, 传输策略和 MAC 层协议设计等也是目前研究热点. 文献 [59] 提出了一种 WSN 单节点 EHM, 如图 11 所示.其中,数据收集和数据传输能量由能量管理单元 (energy management unit, EMU) 动态分时隙地动态分配.文献 [60] 则考虑了多跳网络, 另外文献 [61] 提出了一种基于延时限制的多跳 WSN 的离线功率分配方案. 文献 [17] 针对多个数据采集节点携带 EH 功能的单跳 WSN 中各种采用载波侦听 (carrier sense multiple access, CSMA) 和轮询技术的 MAC 层协议 作比较分析,并设计了新的概率轮询协议.

602



Figure 11 EHM of a sensor node



图 12 基于 EH 的 CRN 架构 Figure 12 EH-based CRN architecture

6.2 认知无线电网络

在认知无线电网络 CRN 中, 次用户可以采用频谱感知的方式, 在检测到主用户不占用频谱时, 机 会性地接入主用户频谱进行通信^[62,63].同时, 将 EH 技术引入到 CRN 中来, 既能提高频谱使用效 率又能提高能量使用效率, 对无线通信网络提出了一种新的技术解决方案. 这方面主要研究点在于优 化感知能量和数据传输能量的调度分配, 使得既能保证网络的正常运行同时获得能量利用率的最大 化^[64,65].文献 [66] 中研究了一个由可再生能源供电的二级传输节点的认知无线电网络中, 在能量受 限与冲突受限的约束条件下, 最大化总吞吐量的最优频谱感知策略. Zheng 等^[67] 考虑了 CRN 中的 二维协作, 即信息与能量的联合协作, 并提出了 3 个不同的方案实现联合协作. Xu 等^[68] 研究了基于 MIMO 的 CRN 中的携能接收机设计问题, 并且在保证次用户信息解码接收机的最小均方差和主用户 干扰约束的前提下, 最大化 EH 的总收集能量.图 12 描述了基于能量获取的单主用户和单次用户组 成的 CRN 架构^[64].

6.3 蜂窝通信网络

目前, 在蜂窝网中应用能量获取技术, 并合理进行能量资源分配的研究逐渐受到关注. 下一代 5G 无线网络也将能量效率考虑在内, 研究新的体系结构和技术同时保证频谱效率和能源效率^[69]. 目前, 蜂窝网络中对 EH 资源分配研究还是相当有限, 这主要是由于传统宏基站 (macro base station, MBS) 需要相当高的传输功率, 这使得就 EH 而言研究资源分配策略进而调整能量的敏感程度相当低. 文 献 [53] 研究具有电网和 EH 设备供电的单蜂窝小区场景的中断概率和电网供电的权衡; 文献 [70] 研 究只有 EH 供电的 K-tier 蜂窝网络的基站 (base station, BS) 可用性, 进而证明了每层 BS 的可用率存 在一个基本的上限值. 然而由于 EH 中能量到达的随机性和间断性, 仅仅依靠 EH 的能量不可能为通 信系统完全供电, 因此蜂窝网络中电网和 EH 的混合供电变得尤为重要, 文献 [55] 中考虑带电网供电 的 MBS 和具有电网供电和收集能量供电的小蜂窝基站 (small base station, SBS) 场景下, 研究资源分 配问题进而在满足用户的 QoS 需求的前提下, 最小化电网所提供的电能源. 主要使用动态规划算法分 析中断概率和解决该问题. 另外, 在异构蜂窝网络应用 EH 技术的研究也受到一定关注^[70]. 表 2 总结 了在上述 3 种网络中 EH 技术方面的主要研究点.

7 总结与展望

随着无线通信技术和智能终端的迅猛发展,人们对无线网络的可靠性、稳定性、可持续性以及移

The type of wireless network	WSN	CRN	Cellular network
The main	Energy	Optimizing the schedule	Reasonable energy resource allocation; the new
research	management;	of power allocation to	architecture and technology which can
points in	$\operatorname{transmission}$	maximize energy	guarantee the spectrum efficiency and energy
the aspect	policy; the	utilization on the	efficiency at the same time; the technology of
of EH	design of	premise of ensure the	power grid and EH hybrid power supply; the
	MAC layer	normal operation of the	EH technology under heterogeneous cellular
_	protocol	network	network

表 2 DEIN 的 3 种网络应用场景

 Table 2
 Three network application scenarios of DEIN

动性的需求日益增长.无线网络急需新的技术来解决能耗问题,提升网络部署的灵活性并减少碳足迹的排放.数能一体化无线通信网络能更大力度地解决能耗问题,提升能量受限网络的生命周期.本文广 泛调研了无线携能通信技术的国内外发展方向和现状,讨论了一种新型的数能一体化无线通信网络. 不仅从信息论层面上讨论了基于设备电池容量的 EH 信道容量上限和达到上限的策略,并提出了目前 还需解决的问题;而且分析了目前对于不同 EAP 对应的不同的 EHM 的一些能量管理方案;接下来 介绍了当前数能一体化的物理层协议和 MAC 层协议及资源分配;最后,针对 WSN、CRN 和蜂窝网 3 种数能一体化网络的应用场景,介绍了目前的研究进展.

数能一体化无线通信网络还面临诸多挑战,未来的研究可从如下几方面展开:

(1) 数能一体化网络的信息论基础: 能量编码及其与信息编码的关系、能量和信息的联合编码及 其评价指标的定义.

(2) 数能一体化网络中的干扰管理. 如何能将干扰作为一种有用资源并运用在无线通信提高能耗和频谱利用率是一个重要研究方向.

(3) 数能一体化网络的系统架构. 与传统中继网络不同, 数能一体化网络中的中继节点不再有固定的能量供应, 而是从周围环境中的射频信号收集能量. 因此, 节点间的协同传输要求节点能比较清楚和及时地知道网络中其他节点的储能状态, 这就导致了节点之间增加一些新的信令交互. 频繁的信令交互不仅增加了网络开销, 也占用了更多频谱资源, 还给传统的通信带来更多干扰. 由于实际网络拓扑的复杂性和多变性, 这将是一个重要研究方向. 传统的协作中继系统中的信息流与能量流共享有限的频谱资源. 然而, 信息流与能量流受信道的影响程度不同, 采用传统的传输策略难以实现两者传输同时达到最优化. 因此, 需要在数能一体化网络中对协作中继系统重新设计传输策略.

(4) 协议及动态资源分配: WIT 与 WET 都要占用有限的无线频谱资源,设计高效合理资源分配 策略并能满足能量、网络和用户的多种约束.

(5)数能一体化网络的硬件实现. 在实际的电路系统中接收机无法同时进行信息解码和能量采 集,因此 ID 与 EH 需要在不同的接收机上实现. 如何在该条件的限制下,设计高效的协同传输策略. WIT 与 WET 的接收机对信息与能量信号有不同的灵敏度,如何针对信道状态以及干扰进行综合考虑,设计协同传输策略.

另外,数能一体化网络的发展为我们的网络安全,移动性问题也带来了新的目标.而且,目前携能 通信技术的研究大多基于单用户,如何拓展到实际的多用户系统仍是待解决的问题.

604

致谢 电子科技大学的张兰心和蒋礼锐两位研究生对本文作了校对和编辑,感谢他们所做的工作.

参考文献 -

- Chen Y F. Improved energy detector for random signals in gaussian noise. IEEE Trans Wirel Commun, 2010, 9: 201–220
- 2 Ulukus S, Yener A, Erkip E, et al. Energy harvesting wireless communications: a review of recent advances. IEEE J Sel Areas Commun, 2015, 33: 360–381
- 3 Han C, Harrold T, Armour S, et al. Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks. IEEE Commun Mag, 2011, 49: 46–54
- 4 Cai L X, Poor H V, Liu Y, et al. Dimensioning network deployment and resource management in green mesh network. IEEE Wirel Commun, 2011, 18: 58–65
- 5 Ozel O, Ulukus S. Achieving AWGN capacity under stochastic energy harvesting. IEEE Trans Inf Theory, 2012, 58: 6471–6483
- 6 Ozel O, Ulukus S. AWGN channel under time-varying amplitude constraints with causal information at the transmitter. In: Conference Record of the 45th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, California, 2011. 373–377
- 7 Tutuncuoglu K, Ozel O, Yener A, et al. Binary energy harvesting channel with finite energy storage. In: 2013 IEEE International Symposium on Information Theory, Istanbul, 2013. 1591–1595
- 8 Ozel O, Yang J, Ulukus S. Optimal scheduling over fading broadcast channels with an energy harvesting transmitter. In: the 4th IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing, Puerto, 2011. 193–196
- 9 Yang J, Ulukus S. Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system. IEEE Trans Commun, 2012, 60: 220–230
- Peng S, Ping C. Low throughput optimal energy neutral management for energy harvesting wireless sensor networks.
 In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Paris, 2012. 2347–2351
- 11 Tutuncuoglu K, Yener A. Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes. IEEE Trans Wirel Commun, 2012, 11: 1180–1189
- 12 Feng J, Wang P Y, Wang L. Research on energy harvesting communication system. Telecom Science, 2015, 31: 1-8 [冯剑, 王平阳, 王琳. 基于能量获取的无线通信系统研究. 电信科学, 2015, 31: 1-8]
- Qi C H, Huang Y C, Jin S. Overview of massive MIMO system. Data Acquisition Process, 2015, 30: 544-551 [戚晨 皓, 黄永明, 金石. 大规模 MIMO 系统研究进展. 数据采集与处理, 2015, 30: 544-551]
- 14 Liu W J, Han S Q, Yang C Y. Energy efficiency comparison of massive MIMO and small cell network. In: IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, Atlanta, 2014. 617–621
- 15 Qian H, Rick S, Blum A M, et al. Noncoherent MIMO radar for location and velocity estimation: more antennas means better performance. IEEE Trans Signal Process, 2010, 58: 3661–3680
- 16 Jiang J, Lv W, Sun B, et al. Interference alignment scheme for massive MIMO system. J China Univ Posts Telecommun, 2014, 21: 19–24
- 17 Tim R, Aditya U T A, Armin W. On the trade-off between transmit and leakage power for rate optimal MIMO precoding. In: the 15th IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Toronto, 2014. 184–188
- 18 Zhou R T, Li Z P, Wu C, et al. Signal alignment: enabling physical layer network coding for MIMO networking. IEEE Trans Wirel Commun, 2013, 12: 3012–3023
- 19 Castiglione P, Simeone O, Erkip E, et al. Energy-harvesting for source-channel coding in cyber-physical systems. In: the 4th IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing, Puerto Rico, 2011. 189–192
- 20 Wang S H, Wang B Y. Robust secure transmit design in MIMO channels with simultaneous wireless information and power transfer. IEEE Signal Process Lett, 2015, 22: 2147–2151
- 21 Gunduz D, Devillers B. Two-hop communication with energy harvesting. In: the 4th IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing, Puerto Rico, 2011. 201–204
- 22 Huang C, Zhang R, Cui S. Throughput maximization for the Gaussian relay channel with energy harvesting constraints.

IEEE J Sel Areas Commun, 2013, 31: 1469-1479

- 23 Zhao M, Zhao J, Zhou W Y, et al. Energy efficiency optimization in relay-assisted networks with energy harvesting relay constraints. China Commun, 2015, 12: 84–94
- 24 Gurakan B, Ozel O, Yang J, et al. Energy cooperation in energy harvesting wireless communications. In: IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings, Cambridge, 2012. 965–969
- 25 Gurakan B, Ozel O, Yang J, et al. Energy cooperation in energy harvesting communications. IEEE Trans Wirel Commun, 2013, 61: 4884–4898
- 26 Riihonen T, Werner S, Wichman R. Mitigation of loopback self-interference in full-duplex MIMO relays. IEEE Trans Signal Process, 2011, 59: 5983–5993
- 27 Wang Y, Wu H, Li H, et al. MIMO precoding for cooperative relay transmission. J Commun Tech Electron, 2015, 60: 890–894
- 28 Bing B, Wei W, Qian Z P, et al. Optimal precoding for simultaneous information and power transfer in MIMO relay networks. In: Proceedings of the 9th International Conference on Communications and Networking in China, Guangdong, 2015. 462–467
- 29 Li H, Xu J, Zhang R, et al. A general utility optimization framework for energy-harvesting-based wireless communications. IEEE Commun Mag, 2015, 53: 79–85
- 30 Zhu F, Qian C. Performance analysis MAC schemes for wireless sensor networks based on energy harvesting. Sci Tech Consulting Herald, 2014, 1: 66 [朱锋, 钱超. 基于能量收集的无线传感网 MAC 接入机制性能分析. 科技创新导报, 2014, 1: 66]
- 31 Iannello F, Simeone O, Spagnolini U. Medium access control protocols for wireless sensor networks with energy harvesting. IEEE Trans Commun, 2012, 60: 1381–1389
- 32 Eu Z A, Tan H P, Seah W K G. Design and performance analysis of MAC schemes for wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting. Ad Hoc Netw, 2011, 9: 300–323
- 33 Fujii C, Seah W K G. Multi-tier probabilistic polling in wireless sensor networks powered by energy harvesting. In: the 7th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, Adelaide, 2011. 383–388
- 34 Fafoutis X, Dragoni N. ODMAC: an on-demand MAC protocol for energy harvesting-wireless sensor networks. In: Proceedings of the 8th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks, Miami, 2011. 49–56
- 35 Kim S C, Jeon J H, Park H J. QoS-aware energy-efficient (QAEE) MAC protocol for energy harvesting wireless sensor networks. In: Convergence Hybrid Information Technology, Daejeon, 2012. 41–48
- 36 Zhang R, Ho C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. IEEE Trans Wirel Commun, 2013, 12: 1989–2001
- 37 Ng D K W, Lo E S, Schober R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with hybrid energy harvesting base station. IEEE Trans Wirel Commun, 2013, 12: 3412–3427
- 38 Liu L, Zhang R, Chua K C. Multi-antenna wireless powered communication with energy beamforming. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 62: 407–412
- 39 Ju H, Zhang R. Optimal resource allocation in full-duplex wireless-powered communication network. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 62: 3528–3540
- 40 Huang K, Lau V K N. Enabling wireless power transfer in cellular networks: architecture, modeling and deployment. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 13: 902–912
- 41 Wang S Q, Xin J C, Li J L, et al. Research on simultaneous wireless information and power transfer for wireless sensor networks. Transducer Microsyst Tech, 2015, 8: 46–53 [王世强, 邢建春, 李决龙, 等. 面向无线传感器网络的无线携 能通信研究. 传感器与微系统, 2015, 8: 46–53]
- 42 Vu Q D, Tran L N, Farrell R, et al. An efficiency maximization design for SWIPT. IEEE Signal Process Lett, 2015, 22: 2189–2193
- 43 Nasir A A, Zhou X S, Durrani S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing. IEEE Trans Wirel Commun, 2013, 12: 3622–3636
- 44 Ding Z G, Perlaza S M, Esnaola I, et al. Power allocation strategies in energy harvesting wireless cooperative networks. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 13: 846–860

- 45 Huang G F, Zhang Q, Qin J Y. Joint time switching and power allocation for multicarrier decode-and-forward relay networks with SWIPT. IEEE Signal Process Lett, 2015, 22: 2284–2288
- 46 Chen H, Li Y H, Jiang Y X, et al. Distributed power splitting for SWIPT in relay interference channels using game theory. IEEE Trans Wirel Commun, 2015, 14: 410–420
- 47 Zeng Y, Zhang R. Full-duplex wireless-powered relay with self-energy recycling. IEEE Wirel Commun Lett, 2015, 4: 201–204
- 48 Varshney L R. Transporting information and energy simultaneously. In: 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, 2008. 1612–1616
- 49 Grover P, Sahai A. Shannon meets Tesla: wireless information and power transfer. In: 2010 IEEE International Symposium on Information Theory, Austin, 2010. 2363–2367
- 50 Huang K, Larsson E G. Simultaneous information and power transfer for broadband wireless system. IEEE Trans Signal Process, 2013, 61: 5972–5986
- 51 Zhou X, Zhang R, Ho C K. Wireless information and power transfer in multiuser OFDM systems. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 13: 2282–2294
- 52 Ng D W K, Lo E S, Schober R. Wireless information and power transfer: energy efficiency optimization in OFDMA systems. IEEE Trans Wirel Commun, 2013, 12: 6352–6370
- Gong J, Zhou S, Niu Z, et al. Energy-aware resource allocation for energy harvesting wireless communication systems.
 In: the 77th IEEE Vehicular Technology Conference, Dresden, 2013. 1–5
- 54 Ng D W K, Lo E S, Schober R. Robust beamforming for secure communication in systems with wireless information and power transfer. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 13: 4599–4615
- 55 Feng J, Meng X, Yin X, et al. Energy-aware resource allocation with energy harvesting in heterogeneous wireless network. In: the 11th International Symposium on Wireless Communications Systems, Barcelona, 2014. 766–770
- 56 Karalis A, Joannopoulos J D, Soljacic M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. Ann Phys, 2008, 216: 34–48
- 57 Barbero A I, Rosnes E, Yang G, et al. Constrained codes for passive RFID communication. In: Information Theory and Applications Workshop, Attica, 2011. 1–9
- 58 Chen X, Wang X, Chen X. Energy-effcient optimization for wireless information and power transfer in large-scale MIMO systems employing energy beamforming. IEEE Wirel Commun Lett, 2013, 2: 667–670
- 59 Castiglione P, Simeone O, Erkip E. Energy management policies for energy-neutral source-channel coding. IEEE Trans Wirel Commun, 2012, 60: 2668–2678
- 60 Tapparello C, Simeone O, Rossi M. Dynamic compression-transmission for energy-harvesting multihop networks with correlated sources. IEEE/ACM Trans Netw, 2014, 22: 1729–1741
- 61 Orhan O, Gunduz D, Erkip E. Delay-constrained distortion minimization for energy harvesting transmission over a fading channel. In: IEEE International Symposium on Information Theory, Istanbul, 2013. 1794–1798
- 62 Shafie A E, Sultan A. Optimal random access for a cognitive radio terminal with energy harvesting capability. IEEE Commun Lett, 2013, 17: 1128–1131
- 63 Lee S, Huang K, Zhang R. Cognitive energy harvesting and transmission from a network perspective. In: IEEE International Conference on Communication Systems, Singapore, 2012. 225–229
- 64 Park S, Kim H, Hong D. Cognitive radio networks with energy harvesting. IEEE Trans Wirel Commun, 2013, 12: 1386–1397
- 65 Yoo H, Shim M, Kim D. Dynamic duty-cycle scheduling schemes for energy-harvesting wireless sensor networks. IEEE Commun Lett, 2012, 16: 202–204
- 66 Park S, Hong D. Optimal spectrum access for energy harvesting cognitive radio networks. IEEE Trans Wirel Commun, 2013, 12: 6166–6179
- 67 Zheng G, Ho Z, Jorswieck E A, et al. Information and energy cooperation in cognitive radio networks. IEEE Trans Signal Process, 2014, 62: 2290–2303
- 68 Xu C, Zhang Q, Li Q, et al. Robust transceiver design for wireless information and power transmission in underlay MIMO cognitive radio networks. IEEE Wirel Commun Lett, 2014, 18: 667–670
- 69 Liu Y, Zhang Y, Yu R, et al. Integrated energy and spectrum harvesting for 5G wireless communications. IEEE Netw, 2015, 29: 75–81

- 70 Dhillon H S, Li Y, Nuggehalli P, et al. Fundamentals of heterogeneous cellular networks with energy harvesting. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 13: 2782–2797
- 71 Kansal A, Hsu J, Zahedi S, et al. Power management in energy harvesting sensor networks. ACM Trans Embed Comput Syst, 2007, 6: 32–63
- 72 Jakobsen M K, Madsen J, Hansen M R. DEHAR: a distributed energy harvesting aware routing algorithm for ad-hoc multi-hop wireless sensor networks. In: IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, Montreal, 2010. 1–9
- 73 Fan K W, Zheng Z, Sinha P. Steady and fair rate allocation for rechargeable sensors in perpetual sensor networks. In: Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, North Carolina, 2008. 239–252
- Yang G, Lin G Y, Wei H Y. Markov chain performance model for IEEE 802.11 devices with energy harvesting source.
 In: IEEE Global Communications Conference, California, 2012. 5212–5217
- 75 Gurakan B, Ozel O, Ulukus S. Optimal energy and data routing in networks with energy cooperation. IEEE Trans Wirel Commun, 2015, 15, 857–870
- 76 Michelusi N, Stamatiou K, Zorzi M. On optimal transmission policies for energy harvesting devices. In: Information Theory and Applications Workshop, San Diego, 2012. 249–254
- 77 Bertsekas D P. Dynamic Programming and Optimal Control. 3rd ed. Lexington: Athena Scientific, 2005. 218–270
- 78 Fan B, Leng S P, Yang K, et al. Optimal storage allocation on throwboxes in mobile social networks. Comput Netw, 2015, 91: 90–100

Data and energy integrated communication networks

Kun YANG¹, Qin YU^{1*}, Supeng LENG¹ & Ping ZHANG²

1 School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2 State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

*E-mail: yuqin@uestc.edu.cn

Abstract This paper introduces a new network type for future wireless broadband communications called data and energy integrated communication networks (DEINs). It brings together two separate processes in traditional wireless systems, namely, wireless information transfer (WIT) and wireless energy transfer (WET), and emphasizes on their integration. The paper starts with an introduction of energy from an information-theoretic perspective and is followed by a description of an energy information model and energy management. Then, the paper moves on to DEIN's networking perspective by presenting some key technologies from different network layers including physical layer (both non-cooperative and cooperative), media access control and dynamic resource allocation, and several typical application scenarios. Finally, the paper concludes by identifying some key future research directions.

Keywords data and energy integrated communication networks (DEINs), communication powered by wireless energy transfer, energy harvesting, energy management, dynamic resource allocation



ogy, and network virtualization.

Kun YANG received his Ph.D. degree from the Department of Electronic & Electrical Engineering at the University College London (UCL), UK. He is currently a full professor at the School of Computer Science & Electronic Engineering, University of Essex, UK, and an affiliate professor at the University of Electronic Science and Technology of China (UESTC). His main research interests include wireless networks/communications, fixed mobile convergence, future Internet technol-

Qin YU received her B.S. degree in Communications Engineering from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 1996 and her M.S. and Ph.D. degrees in Communication and Information Engineering from University of Electronic Science and Technology of China (UESTC) in 2002 and 2006, respectively. She joined the School of Communications and Information Engineering of UESTC in 2007. From 2007 to 2009, she conducted a

postdoctoral research with Professor Zhiguang Qin in information security at UESTC. Her current research interests include wireless networks and information security.



Supeng LENG is a professor at the School of Communications and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China (UESTC). He received his Ph.D. degree from Nanyang Technological University (NTU), Singapore in 2005. He has been working as a research fellow in the Network Technology Research Center, NTU. His research focuses on resource, spectrum, energy, routing, and networking in wireless and ad hoc/sensor

networks, broadband wireless access networks, smart grid, and the next generation mobile networks.



Ping ZHANG is a Ph.D. professor of BUPT (Beijing University of Posts and Telecommunications) and director of State Key Laboratory of Network and Switching Technology. He focuses on wireless communication, new technologies for cognitive radio, cognitive wireless networks, TD-LTE, MIMO, OFDM, etc.