

数能一体化网络在无线通信系统中的应用

张 萍

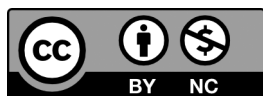
安徽大学电子信息工程学院，合肥

摘 要 | 本文介绍一种新型的数能一体化无线通信网络，它将传统的无线网络中相互独立的无线信息传输和无线能量传输融合起来，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

Copyright © 2021 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



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。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, 将传统的无线网络中相互独立的无线信息传输和无线能量传输融合起来, 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。

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。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。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, 如人工获取的射频信号。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、能量管理、物理层协议设计、媒介访问控制层协议设计及资源分配、无线携能通信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、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 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 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, 文献首次探讨 MIMO 数能一体化传输系统。此外, 文献深入研究了多用户正交频分复用多址接入技术下的数能一体化传输系统。文献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, 文献提出基于接收端信息解码与用于 EH 的时间选择方案, 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。在编码问题上, 文献提出了 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、认知无线网络和蜂窝通信网络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。

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总结了对于不同能量到达过程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

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,研究了带有理想/非理想能量存储情况下的EH系统。文献研究了确定性的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。

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。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。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。

4 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。基于能量协作的数据和能量路由文献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。

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 and 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。

参考文献

- [1] Tutuncuoglu K, Yener A. Optimum Transmission Policies for Battery Limited Energy Harvesting Nodes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 11(3): 1180–1189.
- [2] 冯剑, 王平阳, 王琳. 基于能量获取的无线通信系统研究 [J]. 电信科学, 2015(31): 1–8.
- [3] 戚晨皓, 黄永明, 金石. 大规模 MIMO 系统研究进展 [J]. 数据采集与处理, 2015(30): 544–551.

Application of Digital and Energy Integration Network in Wireless Communication System

Zhang Ping

School of Electronic and Information Engineering, Anhui University, Hefei

Abstract: This paper introduces a new type of digital and energy integrated

wireless communication network, which integrates the independent wireless information transmission and wireless energy transmission in the traditional wireless network, and realizes the cooperation and simultaneous transmission of data and energy. The traditional wireless energy communication focuses on the physical layer, but the digital energy integrated network proposed in this paper emphasizes systematicness, and the corresponding protocols and resource allocation are designed and implemented at each layer of the network. Unlike other renewable energy sources such as wind and solar power, the power source in DEINS, namely the radio frequency (RF) signal from the base station, is not affected by the natural environment and is completely controllable. Digital and energy integration network has great potential in solving the energy efficiency problem of wireless communication system and realizing the energy saving and emission reduction of wireless communication. In this paper, the proposed digital energy integration network is described from two aspects: energy and network. In terms of energy, this paper introduces and analyzes the energy coding, energy model and energy management of digital energy integrated network. In terms of data network, several core technologies, including physical layer, data link layer protocol and joint resource allocation, network layer and typical network application scenarios of digital energy integrated network, are discussed in each layer of log-energy integrated network. In the introduction of each layer, this paper focuses on the discussion of new directions rather than a simple restatement of existing research work. Finally, this paper summarizes and forecasts the development trend and research direction of this field in the future.

Key words: Digital and energy integration network; Energy communication; Energy harvesting; Energy management; Resource allocation.