



综述

基于能量获取的无线通信系统研究

冯 剑,王平阳,王 琳,张 兴

(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

摘 要: 由于部署便利及能提供无间断的绿色无污染的能量等特点,能量获取已经成为解决未来无线通信能耗问题的一项非常有潜力的技术。虽然能量获取技术仍存在能量来源不稳定、存储设备容量有限等限制条件,加之无线通信系统自身的信道与数据到达的随机特性,使得在无线通信系统中使用能量获取技术极富挑战性,但学术界与产业界在基于能量获取技术的无线通信研究中仍取得了显著进展。广泛调研了国内外在相关领域的研究现状及主要研究方向,考察了在基于能量获取技术的无线通信系统研究中的常用模型、系统框架与常用方法,对各研究方向进行了深入分析与梳理,最后对应用能量获取技术的无线通信系统的未来研究方向进行了总结和展望。

关键词: 能量获取;可再生能源;无线通信;能耗;能效

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015050

Research on Energy Harvesting Communication System

Feng Jian, Wang Pingyang, Wang Lin, Zhang Xing

(School of Information and Communication Engineering,

Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Energy harvesting (EH) is becoming a promising technology for future wireless communication network for its potential of saving nonrenewable energy and making the communication environmentally friendly. However, due to the unpredictable and intermittent nature of energy source, the capacity of storage devices, as well as the unpredictable nature of the communication channel and users' arriving data, the road to the communication system powered solely by harvested energy is plagued with potholes. Despite this, remarkable progress has been made in applying energy harvesting to wireless communications. An extensive survey on the current development status and main research fields was made, and the most common used model, system framework and optimization methods were analyzed carefully. Finally the future development for applying EH to communication systems was concluded.

Key words: energy harvesting, renewable energy, wireless communication, energy consumption, energy efficiency

1 引言

随着信息技术在社会生产和生活中的广泛应用,移动

通信网络的业务量呈现爆炸式增长。网络规模的不断扩大、基站等通信设备的多样化、通信设备选址的随机化,带来整个网络能耗的急剧上升与基站供能难度的加大,建设

收稿日期:2014-11-04;修回日期:2015-02-02

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2012CB316005),国家自然科学基金资助项目(No.61001117, No.U1035001),北京科技新星计划

Foundation Items: The National Basic Research Program of China(973 Program) (No.2012CB316005), The National Natural Science Foundation of China(No.61001117, No.U1035001), Beijing Nova Program

可持续发展、易于部署的通信网络已经成为一个重要的议题。能量获取(energy harvesting,EH)技术由于其部署灵活及能提供无间断的绿色无污染的能量等特点,已经成为解决未来通信系统中能耗问题的一项非常有潜力的技术,具体介绍如下。

(1)部署的便利性与灵活性

在传统的能量受限的无线网络(如无线感知网络)中,感知节点通常使用电池供电,缺乏稳定可靠的能量来源,运行时长受限。尽管可以通过替换电池或给电池重新充电的方法来延长网络的运行时间,但通常存在替换不便、成本过高或非常危险(如安装在腐蚀性环境中的传感器)等问题,有时甚至不可能进行替换(如植入人体的传感器)。在这些网络中,使用能量获取技术供能的设备优势明显:通过从周围环境中获取能量,提供几乎无限的能量,从而极大地延长网络的运行时间;同时使用能量获取设备,可以免去布线等约束,从而极大地提高部署节点的便利性。

(2)通信设备的多样性与能量获取技术的进步

以蜂窝网络为例,蜂窝通信网由传统单一的宏蜂窝(macro cell)网络逐渐演变为由宏蜂窝、微蜂窝(micro cell)、皮蜂窝(pico cell)、飞蜂窝(femto cell)及直放站等多种基站组成的多层异构网络。基站向微型化以及密集化方向发展,基站需要的发射功率急剧减少,使得在蜂窝网络中使用能量获取技术为小型基站供能成为可能。而在无线感知网络中,感知节点需要的能量更小。另一方面,能量获取技术,如太阳能收集技术,其性价比已经非常有竞争力,一部分原因是由于技术的进步,特别是超低功耗的电子设备,可以通过采集到的太阳能、电磁能、热能等极低的能量运行;另一部分原因是市场的压力,主要是对传统能源税收的提高以及对于绿色能源的补助和强制性政策。可以预见,能量获取技术未来的应用场景将涵盖各类自主性组网系统:从物联网和感知网络到自动化网络 and 智能电网的监控^[1]。

(3)减少无线通信网络的碳排放

据统计,2008年信息通信产业的碳排放量为全球排放量的2%~2.5%,在科技发达国家为5%~6%,与整个航空业的碳排放量相当。要提高整个通信网络的能效,除了对网络架构进行重新设计与优化之外,使用绿色能源也是非常有效的措施^[2]。中国移动在河北廊坊试点运行的完全用太

阳能供电的绿色基站,更是对在移动通信网络中使用绿色能源提供了有力支撑。

对能量获取技术的研究最初集中在以太阳光、风能等可再生能源为能量来源的设备,而能量获取技术的含义并不仅仅包括可再生能源。通信节点从周围环境中获取的能量并不一定指太阳能、风能等清洁能源,也可能指其他设备特定发送的能量,类似于无线充电技术。因此,本文中使用“能量获取”,从而更准确地描述设备从周围环境中获取能量的特点。

在无线通信系统中应用能量获取技术时,由于能量来源的变化,传统稳定的电网能量或有限的电池能量供能的网络问题及约束条件不再适用,需要基于能量获取技术的特点对无线通信的算法、网络的协议甚至传输节点的硬件进行重新设计。在能量获取技术供能的无线通信系统中,需要处理的问题首先是获取能量的随机性,由于能量来源不稳定,会在原本无线通信信道与数据到达的随机性基础上,叠加系统可使用能量的随机性,从而大大增加问题的复杂性;其次是能量获取的因果性,即获取的能量只能被后续时刻使用,系统能使用的能量不能超过当前获取到的及存储的总能量;最后是能量的有效性,由于能量存储设备的容量有限,不能无限地存储能量,导致可使用的能量有限,超出容量的部分只能丢弃。同时,与传统能量供电网络不同的是,传统供能网络由于能量不是约束条件,其优化的目标是提高网络服务质量,如提高系统的吞吐量或降低用户的阻塞率,而在基于能量获取技术的无线系统中,由于能量获取技术的限制,必须要在优化能量使用的基础上考虑网络中的服务质量优化问题。如果只是为了提高系统的吞吐量或降低系统的阻塞率,一旦出现能量枯竭使得传输中断,就会导致信息无法传输,从而严重影响服务质量。因此,对于是否在无线通信系统中应用能量获取技术,必须进行深入细致的研究。

本文在广泛调研国内外关于能量获取的无线通信研究工作的基础上,将研究方向大致归为3类:第一类为点到点通信,研究的是在一条点到点通信链路中,由能量获取设备供电的发送节点如何最大化吞吐量或如何缩短发送一定数量的数据所需要的传输时间等优化问题;第二类为使用能量获取技术的设备的组网,研究内容包括异构网络中的网络可用性、无线感知网络中的路由设计、认知无线电网络中次级用户传输节点传输模式设计等;第三类



是信息与能量流同时传输(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)系统,主要研究的是由能量来源稳定的发送节点向多个接收终端同时进行信息与能量流的传输问题。

2 点到点通信

基于能量获取的点到点通信,通常研究的是一个由能量获取设备供能的发送节点,通过一条信道将数据传送给目标节点的通信系统,目标节点的供能方式、数据的接收与解调通常不予考虑。对于这个场景下的研究已经有许多研究成果,例如参考文献[3]研究了一个在恒定信道中的离线最优功率分配策略,衰落信道的场景在参考文献[4]中进行了研究。由于实际系统中不可能提前预知能量与数据到达的准确分布,因此在线不可预测场景下的能量分配策略也有部分研究成果^[5]。为了深入介绍点到点通信中的研究现状,本节将依次介绍使用的能量获取设备模型、能量到达可预测的离线场景能量优化、能量到达不可预测下的在线场景能量优化。

2.1 能量获取设备模型

一个典型的能量获取设备供能的点到点通信场景如图1所示,能量获取设备有两个模块,一个是能量获取模块,用于获取周围环境中的能量供发送设备使用,在时刻 t 获取到的能量大小为 $H(t)$ 。能量模块部分还具有一个存储设备,存储的能量大小用 $E(t)$ 表示,最大容量用 $e_{\max}(t)$ 表示(将容量表示为时变模型是考虑到容量可能出现损耗,如随充放电次数的增加而减少)。另一个模块是数据模块,用于存放需要传输的数据。假设在时刻 t 到达的数据量大小为 $I(t)$,数据模块部分有一个缓冲区,存放的数据大小用 $D(t)$ 表示,最大容量用 $d_{\max}$ 表示。发送端发送的数据经过一个衰落信道后由接收端进行接收。

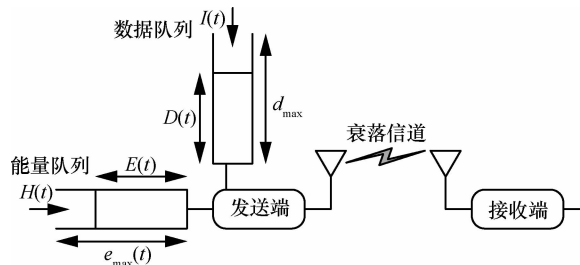


图1 能量获取设备模型

发送端的能耗模型除了发送能耗之外,在实际系统中,还可以考虑非理想的电路损耗,包括模数转换部分功耗、射频放大器功耗等,通常使用的能耗模型如下:

$$P_{\text{total}} = \begin{cases} \frac{P}{\eta} + \alpha, & P > 0 \\ \beta, & P = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, P 代表发送端的直接传输功耗, P_{total} 表示发送端消耗的总功耗。根据发送端的直接传输功耗是否为0,可以分为开启和静默两个状态,静默状态时发送端的功耗为 β ,开启状态时发送端的非理想静态功耗为 α ,射频端的转换效率为 η ,其中 $0 < \eta \leq 1$,通常静默状态下的功耗 β 要远小于开启状态下的静态功耗 α 。

2.2 离线场景能量优化

在离线场景(可预测环境)下,发送节点已知能量流与信息流的到达模型分别为 $H(t)$ 与 $I(t)$ 。对于传输能量 P ,假定使用某种传输策略能达到的信息速率为 $r(P)$,可以假设 $r(P)$ 是一个非负、单调递增的严格凹函数。大多数实际的编码策略,包括香农容量公式都满足该情况,如编码速率为1/2时的容量为:

$$r(P) = \frac{1}{2} \log(1+P) \quad (2)$$

对于用电池供电的设备,由于其总能量大小固定,根据琴生不等式,可以知道使总传输比特最大的能量分配策略是平均分配各时刻使用的功耗。然而,在能量获取的点到点通信场景中,获取到的能量是时变的,如果使用类似于电池供电设备的传输策略,将传输能耗固定,且在最终时刻将能量全部耗尽的方式是不可行的。该场景下的能量使用策略,必须根据能量流与信息流的到达模型 $H(t)$ 与 $I(t)$ 进行设计。

首先考虑无论能量流的到达模型如何,始终都有数据需要发送的场景。假设能量到达模型 $H(t)$ 随时间 t 的积分为 $\hat{H}(t)$,称为累计获取能量曲线;每一时刻使用的能量为 $P(t)$,而 $P(t)$ 随时间 t 的积分为 $\hat{P}(t)$,称为累计传输能量曲线。易知 $\hat{H}(t)$ 与 $\hat{P}(t)$ 均单调不减。由能量获取的因果性可知,累计传输能量曲线 $\hat{P}(t)$ 始终位于累计获取能量曲线 $\hat{H}(t)$ 的下方。

由于能量传输模块存储设备的限制,为了不浪费获取到的能量,最优使用策略的累计传输能量曲线,应始终高于曲线 $\hat{H}(t) - e_{\max}(t)$ ^[6]。并且,在研究的时间段 T 内,应有 $\hat{P}_{\text{opt}}(T) = \hat{H}(T)$,表示在研究时刻终点所有的能量都已耗尽。因此, $\hat{P}(t)$ 是起于原点、终于 $(T, \hat{H}(T))$ 的一条曲线,如图2所示。

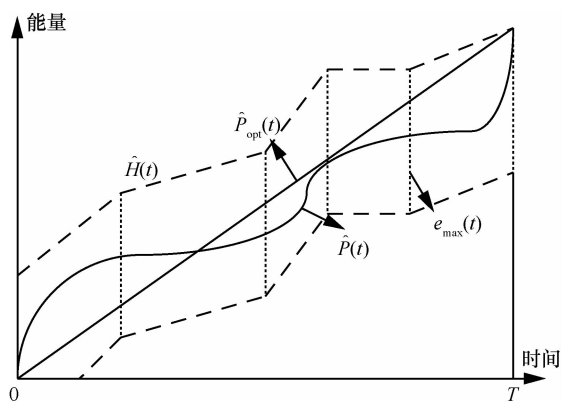


图 2 离线场景下始终有数据发送场景

根据参考文献[7]的结论可以知道,由于 $r(P)$ 为凹函数,最优的能量使用策略应该是从起点到终点最短的一条路径。对于离散的数据分组情形,最优的策略可用一个简单的递归算法得到^[8]。

其次,考虑普通数据到达场景,此时需要传输的数据随时间变化,与前文能量使用的分析类似, $\hat{I}(t)$ 和 $\hat{O}(t)$ 分别代表累计到达的数据总量与累计传输的数据总量。此时的优化目标可能是最小化传输时间^[8]或者最大化传输完成所有数据之后剩余的电量^[9]。同理可以推断出,最优传输策略的 $\hat{O}(t)$ 位于 $\hat{I}(t)$ 与 $\hat{I}(t) - d_{\max}$ 之间。同时,满足能量与数据限制的最优传输策略可以通过一个递归算法得到^[8]。

研究中,传输的信道除恒参信道外,还考虑变参信道,式(2)变为:

$$r(P) = \frac{1}{2} \ln(1 + \phi(t)P(t)) \quad (3)$$

其中, $\phi(t)$ 表示信道增益的幅值平方值。在传统变参信道系统中,根据注水定理,在时间 T 内,使传送比特数最多的准则是使信道的功率谱与噪声谱之和为常数。因此,信道质量越好,分配的能量越多。而在能量获取的变参信道中,由于能量获取的因果性,分配的能量不可能超过当前可使用的能量,因此传统的注水法不再可行,获取的能量只能注入后续的时间段中,也称为定向注水法,如图 3 所示。

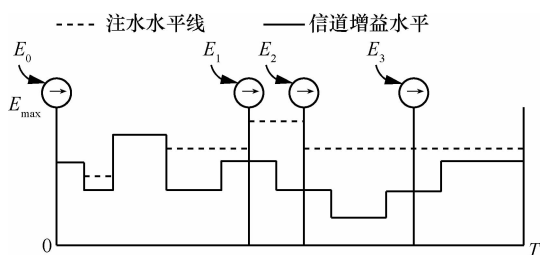


图 3 定向注水法

定向注水法在参考文献[4]中进行了细致的研究,满足能量限制条件和存储限制条件的最优定向注水策略可以通过一个递归算法得到^[9]。

除了考虑传输的能耗之外,如果电路处理的功耗等相对于传输能耗不可忽略,最优的能量分配策略就是让发送端间歇性地发送数据,其他时间保持静默状态。这个最优的分配策略可以通过参考文献[9]中给出的反向定向注胶法(backward directional glue-pouring algorithm)得到。

2.3 在线场景能量优化

在可预测环境下,能量获取设备的资源分配问题对于实际系统来说过于理想,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,通常使用的框架是马尔可夫决策(MDP)过程,通过将能量到达模型 $H(t)$ 与数据到达模型 $I(t)$ 分别建模为马尔可夫过程,在线问题可以转化为马尔可夫决策过程进行求解。

马尔可夫决策过程中,最优策略是最大化给定时间段内效用函数结果的策略。效用函数可能是数据的优先级、重要性^[10]或者传输的数据量^[11]、一个特定事件的检测结果。策略的选择实际上是能量与效用函数结果之间的折中。如果在某个时间段内能量使用过多,会使得后续效用函数更大时没有能量可用;反之,如果策略对于能量使用过于吝啬,效用函数的结果也不会最大。

获得效用函数结果最优的策略可以通过标准的动态规划工具如策略递归算法(PIA)^[9]得到,通常问题求解的复杂度与状态空间的大小相关,而且给出的结论并不是分析性的。因此,通常是根据有限的状态信息,寻找平衡能量损耗与获取的次优策略。

例如,考虑如下的时分系统,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。这个时候是否要进行传输,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,使整个时间段的重要性最高。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(与电池剩余量和收集量有关)时,就进行传输,否则抛弃。这个门限策略可以用 PIA 来得到。只有一个门限的策略(non-adaptive balanced policy, NABP)只与这一阶段收集到的能量的概率有关^[10]。

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^[1],这样就不会浪费获取的能源。

3 能量获取设备组网

能量获取技术最初集中在无线传感器网络,由于传感器在设计时,希望进行一次安装便永久使用。因此研究的重点主要在于硬件的设计,如何设计传感器的结构以获取太阳能、风能、电磁能,还有如压电能量(如人体弯折或行走),其他能源如何转化为设备可使用的能量等。在此基础上,如何高效地使用收集到的能量也逐渐成为研究重点,如能量如何存储、如何布置感知节点等。近年来,随着节能减排成为共识,能量获取技术在蜂窝网、物联网、智能电网等网络中的应用也越来越受到关注,并引发了一系列的研究。

对于能量获取设备的组网研究,可以按照其应用的网络进行大致区分,通常研究的网络是无线感知网络、认知无线网络(cognitive radio network, CRN)以及蜂窝通信网络。其中前两个方面研究成果较多,蜂窝网络中由于能量获取技术的限制,通常认为其收集到的能量还无法支撑整个蜂窝网络的运行,因而受到的关注不多。近年来,随着基站微型化的趋势,这个研究方向也在逐渐受到关注。

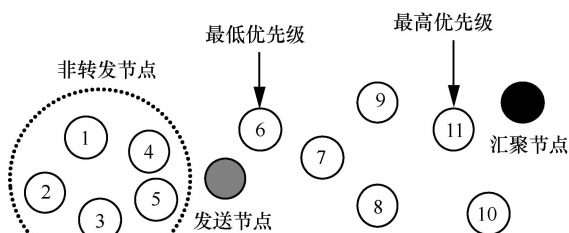
(1) 无线感知网络

在无线感知网络中,无线传感器与其他传感器之间的通信是其关键技术之一,受能量限制,通常需要经过多个

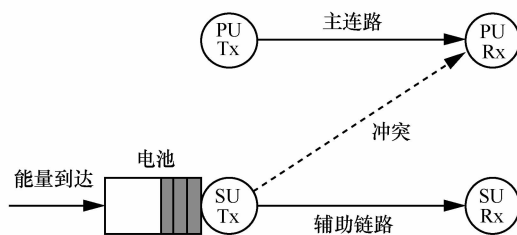
节点进行传输,传输节点的选择(也就是路由协议)是一个重要的研究点。另外,多个传感器组成的网络中,单个数据收集节点收集其他所有节点的移动路径的选择也是一个重要的研究方向,如参考文献[12]。由于传统的感知网络也是能量受限网络,能量的使用是其研究的重点所在,因此这个方向的研究工作成果很多,包括延长网络的工作时间、最优化传输一定数据的高能效路由选择方法等,传感器非理想的能耗模型也是一个考虑方向。基于能量获取的无线感知网络组网结构如图4(a)所示。

(2) 认知无线网络

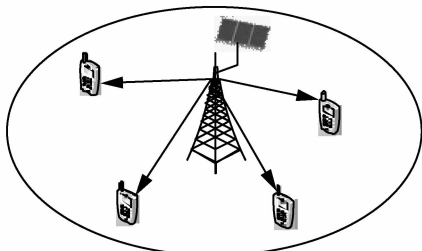
认知无线网络中,认知节点具备学习能力,通过与周围环境交互信息来感知和利用该空间中的可用频谱。通常假设次级用户(secondary user)使用能量获取技术。在这个过程中,次级用户选择感知与传输数据的策略、传输时使用能量的策略、学习策略等过程中能量的使用,都是非常值得研究的方向。如参考文献[16]中研究频谱感知的模数转换器,并推导出不同网络配置下的最优模数转换采样速率和感知时间;参考文献[17]中研究了一个由可再生能源供电的二级传输节点的认知无线网络中,在能量受限与冲突受限的约束条件下,最大化总吞吐量的最优频谱感知策略;参考文献[18]中推导出在一个可再生能源供电的无线网络中,从周围获取能量的二级节点可以达到的理论上的最大吞吐量上限。基于能量获取的认知无线网络结构如图4(b)所示。



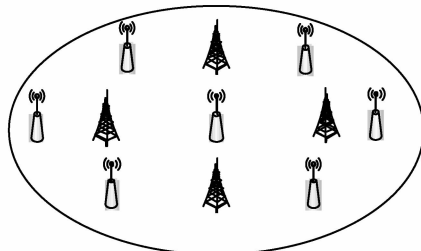
(a) 基于能量获取的无线传感器网络路由选择示意



(b) 基于能量获取的认知无线网络传输示意



(c) 基于能量获取的单蜂窝网示意



(d) 基于能量获取的多层异构蜂窝网示意

图4 能量获取设备组网示意^[1]

(3) 蜂窝通信网络

近来,能量获取技术在蜂窝网络中的应用也逐渐受到关注。但受获取能量的限制,通常考虑使用电网与可再生能源混合供电的场景。相对而言,这部分的研究工作不多。如在参考文献[13]中,考虑了在可再生能源与电网共存情况下,下行正交多输入多输出天线(MIMO)系统中时延最优的基站非连续传输控制机制及用户调度策略;在参考文献[14]中,考虑了在一个单小区下面,由电网与可再生能源混合供电情况下的最小化电网功率传输的问题;在参考文献[15]中,利用随机几何的数学工具,给出了在一个完全由可再生能源供电的 K 层空间泊松点过程(SPPP)分布的异构网络下,整个网络可用性大小的上界。在随机几何理论被引入用于建模异构蜂窝网络的情形下,这部分的研究成果也在逐渐增加。基于能量获取的蜂窝网的组网结构如图4(c)和图4(d)所示。

4 信息与能量流同时传输系统

无论是点到点通信还是能量获取设备组网,其共同点是能量获取的节点均为发送节点,即发送端从周围环境中获取能量,并将收集的能量用于信息的发送。近来,已有研究者将目光投向通信过程中信息的接收方获取能量的研究。其中发送端的能量由电网或其他稳定的能量来源供应,而接收端通信使用的能量则从发送端发送的电磁波中获取之后再用于信息的发送,类似于无线充电技术,一般称为无线能量传输,也称为 SWIPT。

4.1 SWIPT 技术介绍

SWIPT 技术研究的可行性是基于以下事实:传输信息的无线电波在电磁能量可以被获取的情况下,也是一种能量的来源,也可以被获取。如蜂窝系统中,对某个用户来说是有用信号的电磁波,对于其他用户来说则是噪声,而这

部分电磁波如果可以获取,则可以节约用户需要的能耗。在这个研究方向中,接收端可以接收信息,也可以接收能量,或者两者同时进行。受实际电路限制,接收端不能同时对同一个信息进行解调与能量收集。因此,SWIPT 中接收端对同时进行信息解调和能量接收的无线电电磁流的接收模式通常有两种,一种是时域切换(time switching, TS),另一种为能量分割(power splitting, PS)。时域切换的工作模式是,接收端接收的信号要么被能量获取单元收集,要么被信息接收单元接收用来解决信息;能量分割的工作模式是,接收的信号被一个能量分割器分割为两路,一路传输给能量获取单元,一路传送给信息处理单元。在这个研究点中,接收模式工作方式的设计(如 TS 中两部分的模式切换的策略、PS 中分割给两个单元的能量的策略)是研究的重点。

除此之外,对 SWIPT 的研究也不仅仅局限于能量流与信息流均被同一个接收端接收的情形。在同一个接入点(AP)下的用户终端,有些终端是从接收的信号中解调出有用信息,称为信息接收终端(information receiver, IR),有些终端只专注于从接收的信号中获取能量,称为能量获取终端(energy receiver, ER)。通常 IR 与 ER 对于功率的敏感程度不一致(通常 IR 为 -60 dBm, ER 为 -10 dBm)。在这个系统中,存在一个“远近效应”问题,即由于路径损耗,ER 终端会部署得与接入点更近一些,如图 5 所示。

另外,除了接收信息流与能量流的终端可以不统一之外,也有研究开始关注传输信息流与能量流的接入点不在一起的情况,即网络中单独有电站通过无线给终端传送能量(通常是使用微波能量传输),而信息的传输与原有的蜂窝网络一致。

4.2 场景与主要方法

对于 SWIPT 系统方向的研究,多与物理层多输入多

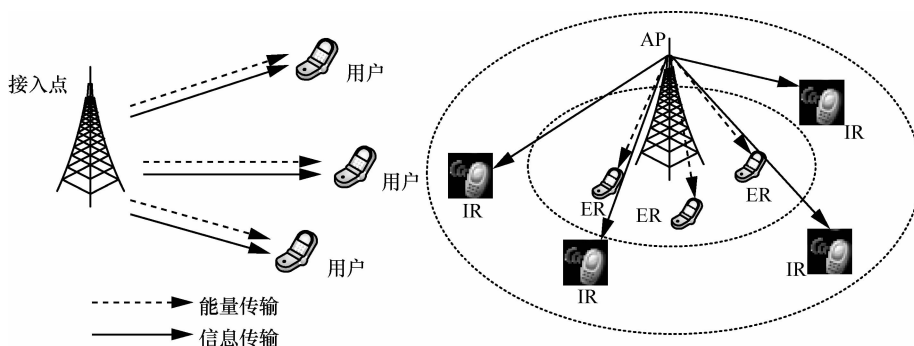


图 5 SWIPT 系统



输出(MIMO)天线技术相关,而研究的场景相对较为简单。参考文献[19]中,研究了一个三节点的 MIMO 广播系统,其中一个节点作为发射节点,向其他两个节点发送能量与信息,其他的两个节点,一个只获取能量、一个只解调信息,且发送节点与接收节点都装备了多天线,在能量节点与信息节点共站与不共站两种情形下研究最大信息速率与能量速率的折中关系。参考文献[20]中,考虑了一个多用户的多输入单输出(MISO)天线广播系统中,一个多天线的接入点通过波束成形向多个单天线的用户同时广播信息与能量,研究在信息解调用户最低接收功率约束条件下传输给能量接收者的能量最大值。而在参考文献[21]中,研究了一个点到点的 MISO 信道中,在信道信息未知的情况下,接收方的能量接收与信息接收两种状态之间的切换机制。参考文献[22]中,研究了接收节点将接收的能量分离,一部分用于获取能量,另一部分用于解调信息的能量分离策略。参考文献[23]中,研究了在一个宽带系统中,通过 OFDM(正交频分复用)技术和波束成形技术同时形成多个并行的子信道,这样可以进行信息与能量的同时传输,简化了系统的设计。

而对于区分了 ER 与 IR 的 SWIPT 系统中,由于发送节点信号衰落的影响,能量接收终端更靠近发送节点,因而有很大概率会窃听到信息接收终端的信息,因此在此类系统中,波束的安全性设计^[24]是一个非常值得关注的研究点。

对于信息发送节点与能量发送节点的分离,即网络中存在基站与电站分别给用户终端进行信息与能量的传输,参考文献[25]中已有部分研究:研究了在基站和电站分别以空间泊松点分布的系统中,对于用户也为空间泊松点分布的情况下,要满足阻塞率的约束条件,基站的分布密度、基站的发射功率以及电站的密度与发射功率这些参数之间应该满足的条件。

5 结束语

综观能量获取的研究现状,研究方向有发送节点获取能量的研究(点到点通信)、接收节点高效获取发送节点的能量(信息与能量同时传输系统)、多节点的能量获取设备组网的设计,能量获取技术已经应用到无线通信系统的各个层面。笔者认为,未来尚有许多研究方向需要进行进一步的分析。

点到点通信系统中,在能量到达模型不确定的不可预测环境中,能量使用的是学习算法;对于现有的不可预测环境中的能量使用,通常使用的方法是在线优化框架。然

而,在实际环境中,统计信息可能会随时间变化或者在开始部署节点时统计信息还没有办法得到。在这些情况下,一个可选的解决办法是使用学习理论来实时跟踪研究能量与数据到达的模型,并依此调整能量分配的策略。

关于能量获取设备组网,其能量的使用值得深入探讨。在现在的研究中,大多考虑的是单链路、三节点组成的中继信道、广播信道与多址接入信道的容量分析。对于多节点的系统,其复杂程度与节点的数目成正比,因此研究较少。而未来网络中,由于节点之间的差异,其获取能量的能力、能量存储的能力都不同,基于节点之间的合作,弥补能量不足节点的覆盖问题。如在异构蜂窝网络中,存在宏基站、微基站、直放站等,有些基站由电网供电,有些基站由电网与能量获取设备混合供电或者完全由能量获取设备供电。在获取能量不足时,缩小使用能量获取设备供电的覆盖范围或完全关闭,其业务量由其他基站进行服务等。

关于信息与能量传输的系统,除了 MIMO 系统中用于能量接收与信息解调的能量分割方式的设计、能量接收终端与信息接收终端的安全性问题这两个研究点之外,电站与基站的混合布站场景也是新兴的研究方向,如可以考虑在一片区域中,用户分布不均匀时基站与电站的布站选址问题等。除此之外,在蜂窝系统中基站的功耗模型较为完备,而电站的功耗模型在此类场景中也可以考虑。

在全球大力倡导节能减排的今天,绿色通信已经成为无线通信系统建设的共识。能量获取技术作为一项非常有潜力的节能技术,其应用与研究已经受到学术界与产业界的广泛关注,并予以了深入的研究。本文在广泛调研国内外研究的基础上,对能量获取的无线通信中资源优化的研究现状进行了总结,分析了研究中使用的模型与约束条件、主要研究的场景及问题、采用的主要解决方法,并对未来的研究方向进行了展望,为将来能量获取的各项技术提供了研究基础。

参考文献

- 1 于金火,田西柱. 物联网数据终端能量获取方式的比较与研究. 物联网技术, 2011(4): 75~78
Yu J H, Tian X Z. Comparative research on the way of energy harvesting of the internet of things' data terminal. Internet of Things Technologies, 2011(4): 75~78
- 2 苏文俊,蔡桂浩. 可再生能源在移动通信工程中的应用. 广东通信技术, 2011(6): 17~20
Su W J, Cai G H. Application of renewable energy in the mobile Engineering communication. Guangdong Communication Technology, 2011(6): 17~20

- 3 Ozel O, Yang J, Ulukus S. Optimal scheduling over fading broadcast channels with an energy harvesting transmitter. Proceedings of International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), San Juan, Puerto Rico, 2011: 193~196
- 4 Ozel O, Tutuncuoglu K, Yang J, *et al.* Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: optimal policies. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2011, 29(8): 1732~1743
- 5 Ozel O, Tutuncuoglu K, Yang J, *et al.* Adaptive transmission policies for energy harvesting nodes in fading channels. Proceedings of Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Shanghai, China, 2011: 1~6
- 6 Tutuncuoglu K, Yener A. Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2012, 11(3): 1180~1189
- 7 Deviller B, Gündüz D. A general framework for the optimization of energy harvesting communication systems. Journal of Communications and Networks, Special Issue on Energy Harvesting in Wireless Networks, 2012, 14(2): 130~139
- 8 Yang J, Ulukus S. Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system. IEEE Transactions on Communication, 2012, 60(1): 220~230
- 9 Orhan O, Gunduz D, Erkip E. Optimal packet scheduling for an energy harvesting transmitter with processing cost. Proceedings of IEEE Int'l Conference on Communication (ICC), Budapest, Hungary, 2013
- 10 Michelusi N, Stamatiou K, Zorzi M. Transmission policies for energy harvesting sensors with time-correlated energy supply. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(7): 2988~3001
- 11 Sharma V. Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1326~1336
- 12 Zhi Ang Eu, Hwee-Pink Tan. Adaptive opportunistic routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks. Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), Ottawa, Canada, 2012: 318~322
- 13 Cui Y, Lau V K N, Wu Y P. Delay-aware BS discontinuous transmission control and user scheduling for energy harvesting downlink coordinated MIMO systems. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(7): 3786~3795
- 14 Gong J, Zhou S, Niu Z, *et al.* Energy-aware resource allocation for energy harvesting wireless communication systems. Proceedings of IEEE VTC (Spring), Dresden, Germany, 2013
- 15 Dhillon H S, Li Y, Nugehalli P, *et al.* Fundamentals of heterogeneous cellular networks with energy harvesting. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2782~2797
- 16 Gan X Y, Xu M, Li H. Energy efficient sequential sensing in multi-user cognitive Ad Hoc networks: a consideration of an ADC device. Journal of Communications and Networks, 2012, 14(2): 188~194
- 17 Park S, Hong D. Optimal spectrum access for energy harvesting cognitive radio networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(12): 6166~6179
- 18 Park S, Hong D. Achievable throughput of energy harvesting cognitive radio networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 1010~1022
- 19 Zhang R, Ho C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989~2001
- 20 Xu J, Liu L, Zhang R. Multiuser MISO beamforming for simultaneous wireless information and power transfer. Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Vancouver, Canada, 2013: 4754~4758
- 21 Ju H, Zhang R. A novel mode switching scheme utilizing random beamforming for opportunistic energy harvesting. Proceedings of 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, China, 2013: 4250~4255
- 22 Zhou X, Zhang R, Ho C K. Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4754~4767
- 23 Huang K, Larsson E. Simultaneous information and power transfer for broadband wireless systems. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(23): 5972~5986
- 24 Zhu B, Ge J H, Huang Y X, *et al.* Rank-two beamformed secure multicasting for wireless information and power transfer. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(2): 199~203
- 25 Huang K B, Lau V K N. Enabling wireless power transfer in cellular networks: architecture, modeling and deployment. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 902~912

[作者简介]



冯剑,男,北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生,主要研究方向为绿色通信。



王平阳,女,北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生,主要研究方向为绿色通信。

王琳,女,北京邮电大学信息与通信工程学院博士生,主要研究方向为绿色通信。

张兴,男,北京邮电大学信息与通信工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为移动通信与网络、绿色通信、客户感知与流量分析等。