

Advances in Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

Zuxiang Zheng, Lenan Wu

School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing
Email: zzx4ever@126.com, wuln@seu.edu.cn

Received: Nov. 18th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 25th, 2013

Copyright © 2013 Zuxiang Zheng, Lenan Wu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The needs and prospects of Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) are analyzed at first. Development history and principal applications of Wireless Power Transfer (WPT) and Wireless Information Transmission (WIT) are summarized. On this basis, framework of SWIPT system is conceived. Moreover, the modulation schemes, the dynamic power splitting (DPS) methods and the main techniques used in WPT are discussed in details. Finally, the simulation performance of Ultra-Narrow Band (UNB) used as a novel high efficiency modulation scheme in SWIPT is illustrated and analyzed.

Keywords: Wireless Power Transfer; Simultaneous Wireless Information and Power Transfer; Ultra-Narrow Band

无线携能通信研究进展

郑祖翔, 吴乐南

东南大学信息科学与工程学院, 南京
Email: zzx4ever@126.com, wuln@seu.edu.cn

收稿日期: 2013年11月18日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月25日

摘要: 本文首先概要分析了无线携能通信技术的需求与前景, 综述了国内外在无线能量传输(Wireless Power Transfer, WPT)和无线信息传输(Wireless Information Transmission, WIT)领域的研究现状。进而构思了无线携能通信系统的体系架构, 并分析了该系统的信息调制方案、WPT方式以及动态功率分配(Dynamic Power Splitting, DPS)方案。最后, 对采用超窄带调制技术作为无线携能通信系统的信息调制方案的合理性与性能进行了仿真与分析。

关键词: 无线能量传输; 无线携能通信; 超窄带调制

1. 引言

随着社会的飞速发展, 跨学科、多平台的整合与集成逐渐成为技术创新的重要趋势与产业进步的源源动力, 但水源、能源和无线电频谱等, 日益成为稀缺资源。因此, 迫切需要整合通信技术与能源技术现有的研究成果, 推陈出新, 既满足人们对高效可靠信息交互的需求, 又有效应对能源和频谱短缺的压力。

无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)便是在这样的社会需求背景下应运而生, 它是通信技术与输电技术交叉融合的一个前沿方向, 旨在实现信息与能量的并行传输, 即在现有无线供电技术的基础上, 通过某种技术手段, 在完成能量的传输与收集的同时, 实现高效可靠通信, 从而充分利用宝贵的发射功率, 具有重要的实际意义

和技术挑战性。

2. 前景与需求

物质、能量、信息是构成世界万物的三大要素。能量的聚集产生物质，物质的运动产生能量，信息则是以物质、能量为载体而无处不在。物质、能量与信息之间是既相互联系又相互区别。从这一哲学观点出发，无线电波既是能量的载体，也是信息的载体，其本质属性不可分割。

无线携能通信是将无线能量传输(Wireless Power Transfer, WPT)与无线信息传输(Wireless Information Transmission, WIT)相结合的产物，并有望“一加一大于二”。将 WPT 与 WIT 技术相结合是物质本质属性的体现，必将进一步拓展其各自的应用领域，为人们的生活带来深远的变革。

基于信息与能量并行传输这一显著特点，SWIPT 技术有望广泛用于高速射频标签(RFID)、物联网以及各类移动终端之间的信息交换与能量传输，有望在实现高速信息交换的同时，通过提取接收信号中的能量有效地向各种终端设备馈电，从而取代传统有线或电池供电所带来的不便，减小了终端设备的体积与成本，并极大地延长其待机时间，特别适合于需要大规模布撒的终端节点的应用。

基于能量与信息非接触式传输的特点，SWIPT 技术有望实现对恶劣工作环境中设备的供能与控制，对处于太空、海洋、森林、沙漠、峡谷、矿井、地震灾区等复杂环境难以人为架设供电线路以及反复更换电池的情况，不仅能远程为设备提供非接触式的电力供应，避免因线路老化而带来的不安全因素，还有望实现设备的远程遥控与信息交互，极大地提高设备对于极端工作环境的适应能力。

基于稳定与可靠的特点，SWIPT 在生物医学领域也有广阔的应用前景。随着科技的不断发展和人类医疗水平的日益提高，人造器官和医疗辅助电子设备成为研究热点，如心脏起搏器、人造耳蜗等，这些设备所需功率最大可达几十瓦，最小仅需几十毫瓦。对于这类植入式辅助电子设备，传统的供电方式要么用导线穿透皮肤连接植入设备与外置电源，要么将电池植入人体为设备供电，均会给患者带来极大的痛苦与不便，而且难以解决可靠性与持续性的问题，威胁着患者的生命安全。借助 SWIPT 技术，不但有望实现体

外非接触式供电，同时有望实现体内设备与体外终端的数据交互，完成对体内电子设备的控制以及医疗数据的采集与监视，使患者摆脱传统导线与电池的束缚，提高生活质量，保障生命安全。

此外，SWIPT 在日常生活中也有广阔应用空间，如手机、家用电器等设备的无线充电与遥控等，有望使各种家用电器和便携设备实现真正意义上的“便捷与智能”，摆脱传统电线束缚，实现家庭或小区的远程控制与监视，使得“智能”家居成为可能。

3. 国内外相关技术发展现状

3.1. 国外无线能量与信息传输技术水平

自 1831 年 Faraday 发现电磁感应现象以来，导线就是电能传输的主要载体，但这种传统方式已不能满足当代对用电设备便捷性与安全性的要求。而且随着人们环保意识的提高，电池对环境尤其是对水资源和土壤带来的严重破坏，无不催促着人们对于新型馈电方式的探索与思考。

Nikola Tesla 最早萌生了无线输能的设想，他试图利用地球本身和大气电离层为导体来实现无线输电，但受当时技术条件所限，实验并没能取得预期的成功^[1]。1950 年代后期，Goubau 和 Schweing 等人从理论上推算了自由空间波束导波可达到近 100% 的传输效率，并在反射波束导波系统上得到了验证^[2]。随后，以 William C. Brown^[3]等人为首的雷声(Raytheon)公司开始对该项技术进行研究，并于 1964 年完成了用 2.45 GHz 的微波驱动直升机的实验。1968 年，Peter Glaser 设想建设卫星太阳能电站以应对能源危机^[4]。1980 年代后期，加拿大通信研究中心设想建立永久高空中继平台为广播、电视、通信等应用服务，并提出采用无线输能方式为这一平台供电^[1]。至 1990 年代，无线输能技术在中小功率、近距离应用上受到了广泛关注。

2001 年 5 月，国际无线电力传输技术会议在法属留尼旺岛(Reunion Island, France)召开期间，法国国家科学研究中心的 G. Pignolet 利用微波无线传输电能点亮 40 m 外一个 200 W 灯泡；2003 年在该岛建立了 10 kW 试验性微波输电装置，并以 2.45 GHz 频率向位于近千米深峡谷底部的 Grand-Bassin 村进行点对点无线供电^[5]。

2006 年 11 月，美国麻省理工学院(MIT)的 Marin

Soljacic 及其团队使用“电磁共振原理”成功地实现了相距 2.13 m 的两个线圈之间进行无线能量传输,并点亮一只 60 W 灯泡,比普通非共振磁感应的效率要高上 100 万倍之多^[6]。美国洛克希德·马丁公司在 2012 年 7 月报道称,该公司研发出一种以激光作为载体的无线充电系统,可为无人侦察机无线供电,使其能够连续飞行 48 小时,增加续航时间 2400%。

可见,在 WIT 日益普及之时,对 WPT 的研究也有很大的突破。人们已不满足于单纯借助无线电波传输信息,而是希望在传输信息的同时,也能充分利用宝贵的发射功率传输能量。在这种需求的推动下,研究基于信息和能量同时传输的 SWIPT 系统的体系架构、信息调制方式、能量中继方式、小功率高效整流天线等关键技术,尤为重要。

Varshney 首次提出并分析了信息与能量同时传输这一问题^[7],定义了“容量能量函数”(capacity energy function),并针对二进制离散信道及幅度受限的加性高斯白噪声(AWGN)信道给出了信道容量与能量传输效率之间的权衡。

Pulkit Grover 和 Anant Sahai 给出了基于耦合电感的近距离无线能量传输电路模型,并分析了含噪耦合电感电路中的无线信息与能量传输的问题^[8]。他们将这一电路模型抽象成平均功率受限的频率选择性 AWGN 信道,针对这一信道模型,采用注水功率分配算法实现了最优功率分配,并给出了信息传输速率与能量转换效率之间的最优权衡。

Liang Liu、Rui Zhang 和 Kee-Chaing Chua 考虑了一个受时变共信道干扰影响下的窄带平坦衰落信道中的点对点无线链路问题^[9],针对接收端没有固定电源供电,而需要从接收信号中获取能量这一应用场景,给出了接收机的最优工作模式切换准则以实现信息传输与能量传递之间的最优权衡。此外,研究了传输能量控制、信息和能量传输调度以及接收机模式切换的联合优化问题。

Omur Ozel 与 Jing Yang 等人研究了一个具有能量收集功能的发射机在衰落信道中的点对点数据传输的优化问题^[10]:以最大化信息传输速率和最小化传输时间为优化目标,优化了以能量存储容量和因果性为约束条件的时间序列能量传输问题。

Xun Zhou, Rui Zhang 和 Chin Keong Ho^[11]为了解

决实际硬件无法同时进行信息解调与能量收集这一限制,提出了动态功率分配(Dynamic Power Splitting, DPS)的通用接收方式,即将接收信号按一定比例分配,一部分用于能量收集,一部分用于信息解调。进一步给出两种接收机结构,即分离式和综合式接收机。此外,他们分别研究了电路能耗对两种接收机信息传输速率和能效的影响,并对比了这两种接收机采用 M-QAM 调制时的性能。

不同于文献[7-11]所考虑的对点单天线传输系统,文献[12-14]主要考虑了在 MIMO 系统中的信息与能量同时传输问题。

Rui Zhang 和 Chin Keong Ho^[12]考虑了在一个 3 节点 MIMO 无线广播系统中的 SWIPT 问题,场景是由固定接入点(Access Point, AP)和分布式用户终端(User Terminal, UT)组成的 MIMO 无线广播系统,并分别针对单用户和多用户情况,设计了信息传输速率与能量传输效率之间不同权衡的最优传输策略,给出了速率能量域界(rate-energy region)。

Batu K. Chalise 等人^[13]研究了含有多天线能量接收机的两跳前向放大中继系统的性能。在该系统中,信源和中继节点均采用正交空时分组编码(Orthogonal Space-Time Block Code, OSTBC),设计了信源中继最优联合预编码以获得不同条件下速率与能量传输之间的权衡。

Ali Mohammad Fouladgar 和 Osvaldo Simeone 考虑了多用户系统中的 SWIPT^[14],并指出在接收能量受限的多接入信道中,为了最大化系统总传输速率,须采取时分复用的方式。

此外,[15]研究了 SWIPT 的多用户 OFDMA 系统中的资源分配算法,采用了非线性分式规划和拉格朗日对偶分解处理该非凸的联合优化问题,设计出了新型的迭代算法来获取系统的最大能效,从而揭示出多用户情况对能量效率以及系统容量所带来的潜在好处。[16]中研究了混合网络,在蜂窝网的上行链路中,通过随机布设能量信标用于为移动设备进行无线充电,并给出在数据链路中断约束下,网络参数之间的权衡。

3.2. 国内无线能量与信息传输技术研究现状

我国在无线输电领域的研究还处于起步阶段。从本世纪初开始,国内的科研工作者陆续展开相关的研

研究工作。1994年电子科技大学林为干院士首次在国内介绍了微波输能技术^[1]。

中国科学院电工所首次在国内研究了WPT系统,对可分离变压器的耦合系数、各种补偿拓扑结构、系统运行频率以及负载对系统性能的影响等关键技术问题都进行了深入的理论和实验,并分析了该技术在磁悬浮列车无线供电中应用的可行性。

上海大学从1998年开始对WPT系统进行研究,利用微波输能技术为不锈钢管道无缆探测微机器人建立了一套微波供能系统,在国内首次实现了对管道机器人的微波输能^[17]。

重庆大学孙跃教授及其课题组从2002年开始研究非接触式感应耦合电能传输技术^[18]。2007年2月,该课题组研制出了非接触式感应耦合电能传输装置,能够实现600~1000 W的电能输出,传输效率能达到70%,并能实现向多个用电设备同时供电。

2009年,四川大学在某飞行训练场演示了微波无线输能实验:使用平面天线和接收整流天线阵列,实现了达200 m的无线输能,这是国内首次采用大规模阵列天线的长距离微波输能实验^[5]。

武汉大学微电子与信息技术研究院石新智及其科研团队采用3个环形线圈作为天线,并采用传统的ASK调制方式,实现了基于磁共振的无线能量和数据协调传输的验证试验。

2013年3月中科院上海微系统所宽带无线技术研究室基于磁场共振原理实现了无线能量传输演示,发射端功率10 W,接收端功率5 W,最大传输效率50%,传输距离0.6 m。

综上所述,几年来国内在SWIPT领域的相关研究虽有突破,但大多还停留在实验室阶段,对于以实现高速通信为目标的SWIPT研究更鲜有报道。因此,无线携能通信这一片广阔的研究领域还有待于广大科研工作者进一步探索与开拓。

3.3. 三种无线能量传输方式

现行的WPT技术主要有3种实现方式:电磁感应方式;电磁耦合共振方式;基于微波或光波的远场辐射方式^[19]。

3.3.1. 电磁感应方式

电磁感应式无线能量传输系统主要应用于短程

传输,系统如图1所示,主要由3部分组成,即能量发送端、无接触变压器和能量接收端。发射线圈和接收线圈之间利用磁耦合来传递能量。若在发送线圈中通以交变电流,该电流将在周围空间中产生一个交变磁场,接收线圈要处于这一磁场中,才能产生感应电动势向负载供电。该方式简单易行,但传输距离非常有限。当距离较大时,能量损耗严重,而且易受收发端的位移和频率变化影响。

3.3.2. 电磁耦合共振方式

2006年11月,MIT基于电磁场近场理论,建立了基于强耦合的共振能量传输系统,该系统利用非辐射磁场可在几倍于振荡器尺寸的中距离实现电能高效传输^[20,21]。典型系统如图2所示,发射端与接收端各连接有一个线圈,发射线圈与振荡源相连,但它并不向外发射电磁波,而是利用振荡器产生的高频振荡电流,在发射线圈周围空间形成非辐射磁场,将电能转化为磁能。当接收转置的固有频率与振荡频率相同时,接收线圈中产生的谐振电流最强,从而将磁能转化为电能,以实现能量传输。该方式的理论基础在于两个振荡电路之间重叠存在的瞬逝波耦合,不同于远场的辐射损耗,该方式属于近场无损非辐射共振耦合,虽然接收端与发射端之间的耦合随两者距离的增大而衰减,但从理论上说,未被负载吸收的部分能量会返回发射端,从而不会过多影响传输效率^[22]。该方式磁场与生物体之间相互作用很弱,对生物体较为安全,对其它频率的电子设备干扰很小,且受障碍物的影响较小,并能够对多个共振频率用电设备供能。

在MIT的方案中,采用电磁耦合共振方式为一个60 W灯泡供电,铜线圈直径为60 cm,收发线圈间存在障碍物,如墙体、木材、金属等。传输距离为2 m时,传输效率只有40%,传输距离为1 m时,传输效率可达90%。

3.3.3. 远场辐射方式

理论上,无线电波频率越高、波长越短,其定向性越好。所以,可利用微波或激光来实现能量的远距传输。远场一般指远大于装置尺寸的几千米以上的传输距离。现行远场WPT系统的设计,主要是用微波作为能量的传输载体。发射端借助于诸如磁控管、行波管和速调管等微波功率源,将直流电转化为微波能量,通过发射天线聚焦后高效地向外发射,经自由空

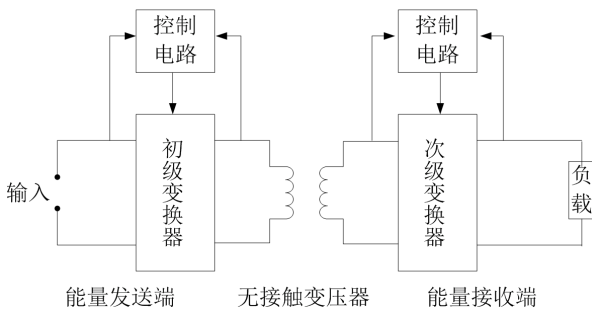


Figure 1. System diagram of induction wireless power transfer system

图 1. 电磁感应式无线能量传输系统框图

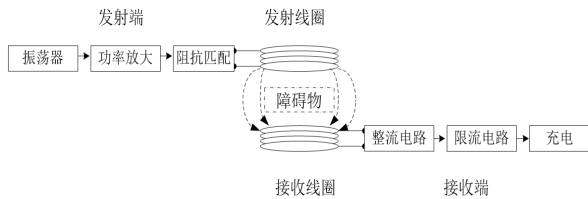


Figure 2. Configuration of magnetic resonant coupling wireless power transfer system

图 2. 电磁耦合共振方式无线能量传输系统示意图

间传播到达接收端，再经由整流天线(rectenna)将微波能量转换成直流功率用于供电，从而实现能量的无线传播。该输能方式的典型系统如图 3 所示。

微波在大气层中具有很强的穿透效率，基本上无耗，但受气候条件影响，湿度、雨水量越大，传输效率越低，并且这种差别在频率高于 3 GHz 时较为明显。在 S 和 C 波段的传输效率一般超过 90%，且微波波束强度和方向易于控制，使功率密度不难满足国际安全标准的要求。因此，一般采用较低频段作为 WPT 系统的工作频率，实用中一般利用 ISM (Industrial, Scientific and Medical)公用频段，如 S (2.45 GHz)、C (5.8 GHz)、X (8.51 GHz)等。工作频率越高，微波器件体积越小，但就目前的工艺水平，低频段的微波器件较为成熟^[17]。

整流天线是远场 WPT 系统接收机的核心部件，由接收天线和整流电路组成，作用是将接收到的微波能量转换为直流功率，其典型结构如图 4 所示。

由于微带整流天线具有重量轻、体积小，接收面积大，增益高等优点，目前主流的整流天线设计方案大多基于微带电路实现^[23-26]。整流电路大多采用肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)，其是一种低功耗、大电流、超高速半导体器件。SBD 不是利用 PN 结原理，而是利用金属与半导体接触形成的金属-半导体结原理制作的。其反向恢复时间极短，正

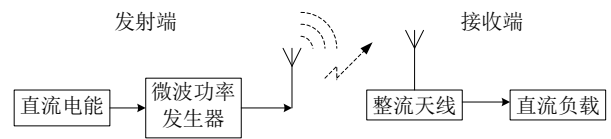


Figure 3. Configuration of far-field radiation wireless power transfer system

图 3. 远场辐射方式无线能量传输系统示意图

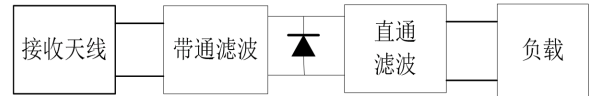


Figure 4. Typical architecture for rectenna system

图 4. 整流天线典型结构图

向导通电压降仅 0.4 V 左右，而整流电流却可达到几千毫安。SBD 的结构及特点使其适合于在低压、大电流输出场合用作高频整流，可在 X 波段、C 波段、S 波段和 Ku 波段用于检波和混频。

图 4 给出的整流电路结构主要由带通滤波器、整流二极管及直通滤波器构成。其中，带通滤波器起着双向滤波的作用：1) 对天线接收信号进行滤波，仅允许基频信号通过，而阻止接收到的其它频率分量进入整流电路；2) 能够反射整流二极管所产生的高次谐波分量；3) 兼有实现接收天线与整流电路之间阻抗匹配的功能。直通滤波器能够输出平稳的直流能量，并将基频及其高次谐波分量反射回整流二极管，不仅提高了输出直流的平稳度，而且有利于对微波能量的充分利用^[17]。通过以上设计，使得整流电路所产生的高次谐波被限制在带通滤波器和直通滤波器之间来回反射，大大提高了微波能量转换为直流能量的效率。

4. 无线携能通信系统设计方案

无线电波是能量与信息的载体，这是其本质属性。因此，WPT 与 WIT 的原理是一致的，都是依靠无线电波为载体在收发两端间进行能量与信息的传输，但二者侧重不同：WPT 关注的是无线电波中所携带的能量，因而传输效率是 WPT 系统的核心指标；而 WIT 则着眼于附于能量之上的信息，因此更高的信息传输速率、传输可靠性以及系统容量是 WIT 系统的永恒追求。WPT 与 WIT 相结合的可行性不言而喻，但仍然存在两个关键问题有待解决：

1) 实际的硬件电路无法在解调信息的同时也收集作为载体的无线电波所携带的能量，在 WIT 系统中，无线电波所携带的能量最终都以热能的形式耗

散。

2) WIT 与 WPT 系统的接收机具有不同的功率灵敏度(WPT 系统为-10 dBm, 而 WIT 系统为-60 dBm^[11]), 若将二者结合, 就要对各自现有系统重新设计, 以兼顾各自的应用需求。

从上述问题出发, ^[11]提出了动态功率分配方式(DPS)作为 SWIPT 的解决方案。DPS 方案通过将接收信号的能量按一定比例进行分配, 一部分用于能量收集, 另一部分用于信息解调, 从而实现信息与能量的同时接收。DPS 具体有 3 种方案, 分别为 TS (Time Switching)、SPS (Static Power Splitting)和 OPS (On-off Power Splitting)。

按其定义, 能量分配率表征用于能量收集的能量 ($0 \leq \rho(t) \leq 1$) 和用于信息解码的能量 ($1 - \rho(t)$) 占接收总能量的比例。将 N 个接收符号视为一个数据块, 设其持续时间为 $T = NT_s$, 其中 T_s 为符号周期。为了方便, 定义了能量分配率矢量 $\rho = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T$ 来表示分别对应于一个数据块中 N 个接收符号的能量分配率。下面具体考察以上 3 种方案。

1) TS 方式: 接收一个 N 符号的数据块时, 将前 $\lfloor \alpha N \rfloor$ ($0 \leq \alpha \leq 1$) 个符号时间用于能量收集, 而剩余 $\lceil (1 - \alpha)N \rceil$ 个符号时间用于传递信息。因此, 对于 TS 方式而言, 其能量分配率矢量可以表示为:

$$\rho_k = \begin{cases} 1, & k = 1, \dots, \lfloor \alpha N \rfloor \\ 0, & k = \lceil \alpha N \rceil, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

一般而言, 整流电路对纯正弦信号的整流效率要高于调制信号, 因此对于 TS 方式, 发送端在发送一个 N 符号数据块时, 前 $\lfloor \alpha N \rfloor$ ($0 \leq \alpha \leq 1$) 个符号时间发送的是纯正弦信号, 而剩余的 $\lceil (1 - \alpha)N \rceil$ 个符号时间发送的是某种调制波形。这能提高能量转换效率, 但需要结合实用需求对参数 α 的选取加以斟酌。

2) SPS 方式: 将以一个固定的能量分配率 ρ 对整个数据块中的全部 N 个符号同时进行信息的解调与能量的收集, 即 $\alpha = 0$ 。从某种意义上来说, SPS 方式才称得上真正意义上的信息与能量并行传输。对于 SPS 方式, 有

$$\rho_k = \rho, k = 1, \dots, N. \quad (2)$$

3) OPS 方式: 将一个数据块中前 $\lfloor \alpha N \rfloor$ 个符号时间用于能量收集, 而对于剩余的 $\lceil (1 - \alpha)N \rceil$ 个符号时

间则与 SPS 方式一样, 以固定的能量分配率 ρ 将接收功率进行分配, 分别用于能量收集与信息解码。因此, 对于 OPS 方式, 有

$$\rho_k = \begin{cases} 1, & k = 1, \dots, \lfloor \alpha N \rfloor \\ \rho, & k = \lceil \alpha N \rceil, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

可以看出, 实际上 TS 和 SPS 是 OPS 方式的特例。当 $\rho = 0$ 时为 TS 方式, 当 $\alpha = 0$ 时为 SPS 方式。[11]中指出, 在考虑接收机电路能耗的情况下, OPS 是最优的工作方式。而在不考虑接收机的功率损耗时, SPS 方式性能更优。

进一步给出两种实现 DPS 方式的接收机结构, 即分离式和综合式接收机。对于分离式接收机, 如图 5(a)所示, 天线接收信号在射频端即图 5(a)中 A 点就被分割成两部分, 分别输入能量收集与信息解调模块。而对于综合式接收机, 如图 5(b)所示, [11]中指出这种 RF 到 DC 的转换与传统接收机中 RF 到基带信号的变频相类似, 因此可把 DC 信号视为基带信号。在综合式接收机结构中, 是在图 5(b)中 B 点将基带信号能量按比例分割成两部分。图 5(b)中 $n(t)$ 表示天线噪声, $n_{rec}(t)$ 表示整流噪声, $y(t)$ 表示接收信号。

尽管无线携能通信是 WPT 与 WIT 相结合的产物, 但二者的结合应有主辅之分。笔者认为 SWIPT 是在 WPT 的技术基础上, 通过某种技术手段, 辅以 WIT 的功能, 从而实现这两种技术的结合。因此, 在 SWIPT 研究中, 需要考虑的两个基本问题是:

- 1) 如何设计一个能与 WIT 相适应的最优 WPT 系统;
- 2) 如何在尽可能小地影响 WPT 系统性能的前提下, 通过某种性价比合理的技术手段, 使 WPT 系统兼有 WIT 功能;

基于上述两点, 图 6 给出了 SWIPT 系统框图。

如图 6 所示, SWIPT 系统主要由发送端的调制模块、WPT 系统以及接收端的 DPS 模块构成。发射端与接收端之间依靠 WPT 系统作为纽带相连接, WPT 系统是 SWIPT 系统的核心模块, 因此需要结合实际的应用场景与技术指标要求, 妥善选取合适的 WPT 实现方式。

现有的 WPT 系统均采用正弦信号作为能量载体进行无线输能, 由于正弦信号在频域能量高度集中, WPT 系统可以获得较高的能量转换效率。但正弦信号

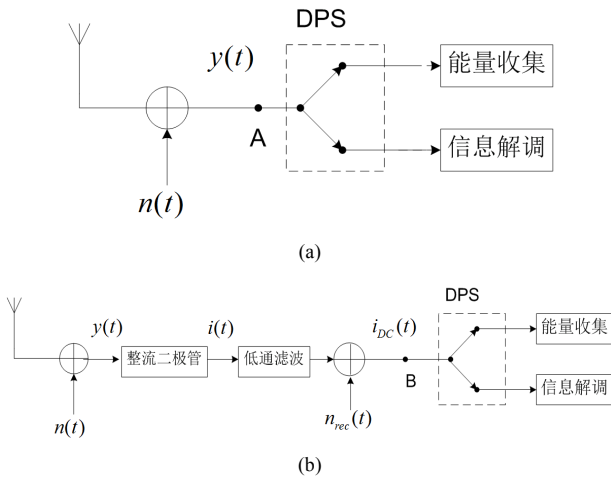


Figure 5. Architecture for two types of practical receiver^[11]: (a) Architecture for the separated information and energy receiver; (b) Architecture for the integrated information and energy receiver
图 5. 两种接收机结构示意图^[11]: (a) 分离式接收机; (b) 综合式接收机

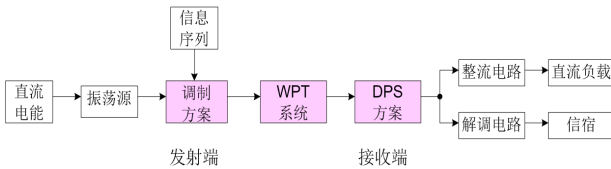


Figure 6. System model of SWIPT
图 6. 无线携能通信系统框图

理论上带宽为零, 无法携带信息, 需对其进行调制。现有 WIT 系统中调制方案繁多, 无论是经典的幅度、相位及频率调制还是各种新型的复杂调制方案, 均是以香农信息论为指导以一定的带宽换取信道容量。在 SWIPT 应用中, 收发两端是以 WPT 系统相连接的, 而 WPT 系统是一个平均功率受限的频率选择性 AWGN 信道^[8], 因此常规调制方案由于占用带宽较大, 通过 WPT 系统时必然会受到衰减, 从而对调制信号所携带的信息与能量造成损失, 难以实现较高的能量转换效率与信息传输速率。可见, 直接套用 WIT 经典调制方案进行 SWIPT 系统调制模块的设计未必明智。因此, 针对 SWIPT 的特殊性, 研究新型高效调制方案, 对提升系统整体性能有重要意义。

下一节将简介我们的进展, 作为对国内 SWIPT 技术研究现状的一点补充。

5. 超窄带调制在无线携能通信中的应用

正弦波是功率型信号, 其 Fourier 变换是个冲击函数, 在频域能量高度集中, 是最好的携能信号形式,

但纯粹正弦信号无法传递任何有用信息。如果保持正弦波频率不变, 但其它波形参数(幅度、相位、形状、对称性或周期数等)被轻微调制, 则尽管其功率谱主瓣和边带都会被展宽, 但能量仍高度集中在载频上, 这就是超窄带(Ultra Narrow Band, UNB)调制的基本思路^[27,28]。尽管饱受争议, 但也正由于 UNB 调制信号中保留了强载波, 采用其作为无线携能通信的信息调制方式, 得天独厚。为了体现这一判断, 本文以最简单的扩展的二元相移键控(Extended Binary Phase Shift Keying, EBPSK)调制为例, 简介超窄带调制用于无线携能通信的明显优势。

为了实现简单, 常取 $\theta = \pi$, 则 EBPSK 调制信号的统一表达式定义为^[29]:

$$g_0(t) = A \sin 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t < T$$

$$g_1(t) = \begin{cases} -B \sin 2\pi f_c t, & 0 \leq t < \tau \\ A \sin 2\pi f_c t, & \tau \leq t < T \end{cases} \quad (4)$$

其中, $g_0(t)$ 和 $g_1(t)$ 分别表示码元“0”和“1”的调制波形; A和B为调制信号的幅度; f_c 为载波频率; 码元周期 $T = N/f_c$ 持续了 $N \geq 1$ 个载波周期; “1”码元的调制时间 $\tau = K/f_c$ 持续了 $K < N$ 个载波周期, 其中 K/N 称之为调制占空比。式(4)中令 $B = 0$, 得到缺周期调制(Missing Cycle Modulation, MCM), 这是 EBPSK 调制信号中载波分量最强的一个特例。

不难看出, 当调制占空比较小时, EBPSK 信号的能量高度集中在载频上, 调制波形与正弦波极为“相似”, 通过 WPT 系统传输, 可获得较高的能量转换效率。同时借助于 DPS 模块, 将接收到的信号能量进行合理分配, 一部分用于能量收集, 另一部分用于信息解调, 便可实现信息与能量的同时传输。此外, 通过控制 EBPSK 信号的调制占空比, 可以权衡能量转换效率与信息传输速率。取载频 $f_c = 2.45 \text{ GHz}$, 并在微带整流天线中引入功率分配支路实现 SPS 方式工作, 对 MCM 信号的整流效率进行仿真。表 1 给出了不同调制占空比(固定 $K = 2$ 不变, 改变 N)下最大能量转换效率与相应的信息传输速率。图 7 给出了不同调制占空比下, 整流电路对 MCM 的能量转换效率随输入功率变化曲线。能量转换效率随输入功率的变化是由整流二极管输入阻抗的非线性所致^[26], 图 7 说明, 输入功率约在 0.15 W 至 0.25 W 范围内时, 微带整流电路能够实现较好的匹配, 从而获得较高的能量转换效率。

Table 1. Information transmission rate and power conversion efficiency of MCM under different values of N , with $K = 2$
表 1. $K = 2$ 、 N 不同时 MCM 信号信息传输速率与能量转换效率

N	信息传输速率/Mbps	能量转换效率/百分比
10	245.0	49.0%
20	122.5	64.5%
30	81.6	71.5%
40	61.2	78.1%
50	49.0	78.9%
60	40.8	79.4%
70	35.0	80.0%
80	30.6	80.2%
90	27.2	87.4%

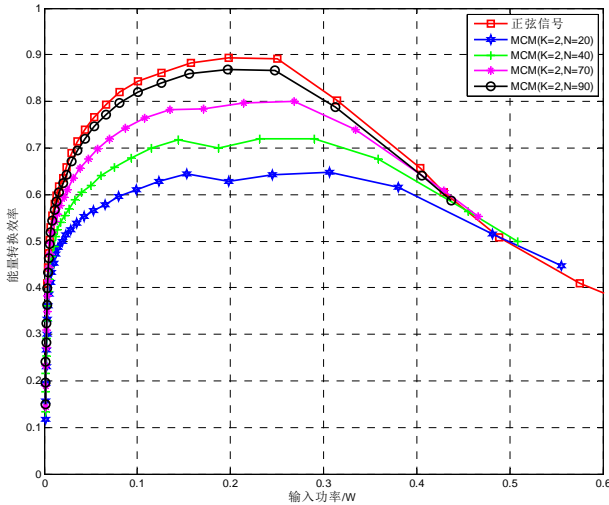


Figure 7. Simulated efficiency of the rectifying circuit versus input power
图 7. 能量转换效率随输入功率变化仿真曲线

进一步可将二进制的 E BSPK 调制推广到多进制的多元位置相移键控(M-ray Position Phase Shift Keying, MPPSK)调制^[30]来考察, 因为当调制参数满足 $N = K(M - 1)$ 时, MPPSK 功率谱中将没有离散谱, 能量更为集中。表 2 给出了 MPPSK 的一个特例, 即 $B = 0$ 的多元位置缺周期调制(M-ray Position Missing Cycle Modulation, MPMCM)在不同调制参数下最大能量转换效率与相应的信息传输速率。可见, 采用多进制调制无论对 WPT 还是对 WIT, 都更有利。

6. 结论

在较详细地综述国内外无线携能通信现有进展

Table 2. Information transmission rate and power conversion efficiency of MPMCM under different modulation parameters
表 2. MPMCM 调制在不同调制参数下的信息传输速率与能量转换效率

调制参数	信息传输速率/Mbps	能量转换效率/百分比
$K = 2, N = 20, M = 11$	423.7	54.9%
$K = 2, N = 30, M = 16$	326.6	74.9%
$K = 2, N = 40, M = 21$	269.0	81.7%
$K = 2, N = 50, M = 26$	230.3	86.8%

的基础上, 简介了我们分别将超窄带调制中的 MCM 和 MPMCM 用于 SWIPT 系统的研究进展, 初步的仿真结果表明: 采用超窄带调制技术作为 SWIPT 系统的信息调制方案, 不仅性能优异, 而且码率与能效之间转换灵活, 更有望直接沿用现有 WPT 系统的研究成果, 快速设计性能优异的无线携能通信系统。再注意到超窄带调制内在的高频谱利用率^[31], 因此, UNB 技术在携能通信领域也具有广阔的应用前景, 值得进一步深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 林为干, 赵愉深, 文舸一, 等 (1994) 微波输电, 现代化建设的生力军. *科技导报*, **3**, 31-34.
- [2] Goubau, G. and Schwering, F. (1961) On the guided propagation of electromagnetic wave beams. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, **9**, 248-256.
- [3] Brown, W.C. (1965) Experimental airborne microwave supported platform. RADC-TR-65-188, Techniques Branch Rome Air Development Center Research and Technology Division AirForce Systems Command, Griffiss Air Force Base, New York.
- [4] Glaser, P.E. (1992) An overview of the solar power satellite option. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **40**, 1230-1238.
- [5] 刘长军, 李凯, 黄卡玛 (2011) 微波输能技术研究进展. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, **36**, 19-22.
- [6] 赵相涛 (2011) 无线输电技术研究现状及应用前景. *科技信息*, **10**, 122-123.
- [7] Varshney, L.R. (2008) Transporting information and energy simultaneously. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Toronto, 6-11 July 2008, 1612-1616.
- [8] Grover, P. and Sahai, A. (2010) Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer. *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*, Austin, 13-18 June 2010, 2363-2367.
- [9] Liu, L., Zhang, R. and Chua, K.C. (2012) Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting. *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*, Cambridge, 1-6 July 2012, 950-954.
- [10] Ozel, O., Tutuncuoglu, K., Yang, J., et al. (2011) Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: Optimal policies. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **29**, 1732-1743.
- [11] Zhou, X., Zhang, R. and Ho, C.K. (2012) Wireless information

- and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, 3-7 December 2012, 3982-3987.
- [12] Zhang, R. and Ho, C.K. (2011) MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, Houston, 5-9 December 2011, 1-5.
- [13] Chalise, B.K., Zhang, Y.D. and Amin, M.G. (2012) Energy harvesting in an OSTBC based amplify-and-forward MIMO relay system. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Kyoto, 25-30 March 2012, 3201-3204.
- [14] Fouladgar, A.M. and Simeone, O. (2012) On the transfer of information and energy in multi-user systems. *IEEE Communications Letters*, **16**, 1733-1736.
- [15] Ng, D.W.K., Lo, E.S. and Schober, R. (2013) Wireless information and power transfer: Energy efficiency optimization in OFDMA systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, arXiv preprint arXiv:1303.4006.
- [16] Huang, K. and Lau, V.K.N. (2012) Enabling wireless power transfer in cellular networks: Architecture, modeling and deployment. arXiv preprint arXiv:1207.5640.
- [17] 杨雪霞 (2009) 微波输能技术概述与整流天线研究新进展. *电波科学学报*, **24**, 770-778.
- [18] 孙跃, 夏晨阳, 戴欣, 苏玉刚 (2010) 感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化. *中国电机工程学报*, **30**, 44-50.
- [19] 杨庆新, 陈海燕, 徐佳芝, 等 (2010) 无接触电能传输技术的研究进展. *电工技术学报*, **25**, 6-13.
- [20] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., et al. (2007) Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, **317**, 83-86.
- [21] Karalis, A., Joannopoulos, J.D. and Soljacic, M. (2008) Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of Physics*, **323**, 34-48.
- [22] Stewart, W. (2007) The power to set you free. *Science*, **317**, 55-56.
- [23] Yadav, R.K., Das, S. and Yadava, R.L. (2011) Rectenna design, development and applications. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, **3**, 7823-7841.
- [24] 池玉友, 许建军, 秦占豪 (2007) 整流天线技术及应用. *电子信息对抗*, **22**, 28-31.
- [25] 邓红雷, 孔力 (2006) 高效率微波输电微带贴片接收整流天线的研究与设计. *太阳能学报*, **27**, 136-140.
- [26] 邓红雷, 孔力 (2007) 一种新颖的 5.8 GHz 微带贴片整流天线. *华南理工大学学报(自然科学版)*, **35**, 46-49.
- [27] 吴乐南 (2007) 超窄带高速通信进展. *自然科学进展*, **17**, 1467-1473.
- [28] Wu, L.N., Feng, M. and Qi, C.H. (2011) Recent patents on ultra narrow band modulations. *Recent Patents on Signal Processing*, **1**, 36-47.
- [29] 吴乐南, 应鹏魁 (2011) 扩展的二元相移键控调制参数性能比较. *电波科学学报*, **26**, 961-965.
- [30] Qi, C.H. and Wu, L.N. (2009) PLL demodulation technique for M-ray position phase shift keying. *Journal of Electronics (China)*, **26**, 289-295.
- [31] 吴乐南 (2013) 论独占加共享的频谱划分模式. *电波科学学报*, **28**, 605-610.