

# 无线数据与能量协同传输技术: 编码与调制设计

## Simultaneous Wireless Information and Power Transfer: Coding and Modulation Design

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0043-004

**摘要:** 利用射频(RF)信号的远场传输特性,无线数据与能量协同传输技术(简称为无线数能同传)(SWIPT)可以将数据与能量通过同一无线射频信号传输到通信设备,从而同时满足设备的通信与用能需求。该技术的实现需要从硬件方面对无线射频电路、收发天线以及电磁波束重新设计以提升无线能量传输(WPT)的效率,另一方面也需要在信息和通信理论方面取得突破,实现编码和调制级别的SWIPT控制。

**关键词:** RF WPT; SWIPT; 编码与调制

**Abstract:** Thanks to the far-field transmission characteristics, radio frequency (RF) signals can be relied upon for realising simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT). Thus, both the communication and charging requests of devices are satisfied. In order to make SWIPT a reality, wireless RF circuits have to be redesigned for improving the efficiency of wireless power transfer (WPT). The breakthrough in the classic information and communication theory has to be achieved in order to control SWIPT in both coding and modulation levels.

**Key words:** RF WPT; SWIPT; coding and modulation

胡杰/HU Jie<sup>1</sup>  
金石/JIN Shi<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学, 四川 成都 611731;  
2. 东南大学, 江苏 南京 210096)  
(1. University of Electronic Science and  
Technology of China, Chengdu 611731,  
China;  
2. Southeast University, Nanjing 210096,  
China)

### 1 未来通信设备能量危机 及解决方案

**在**即将到来的物联网时代,无线通信网络需要满足未来大规模机器类通信需求。广泛部署的低功耗机器类通信设备(例如:传感器、智能电网、共享单车等)的数据接收、数据采集、数据上传等操作依赖于自身配备的电池;但有限的电池容量极大制约了该类通信设备的使用寿命,更换电池提升了网络运营商的运营成本,依赖于化学储能的电池也会对环境造成有害影响。因此,无线自供电

通信网络的出现可以从根本上解除低功耗通信设备对传统电池的依赖。

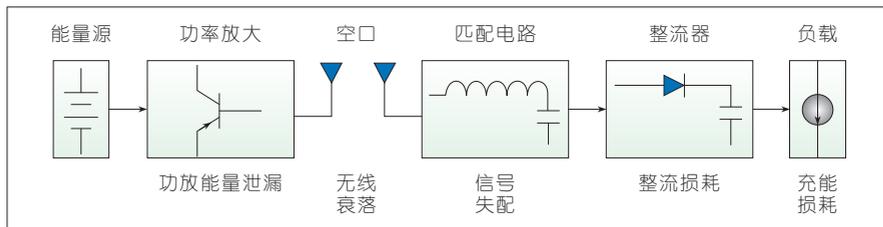
在无线自供电通信网络中,能量的来源多样化。低功耗通信设备可以从太阳能、风能等可再生能源采集能量来支持自身操作<sup>[1]</sup>。然而可再生能源的采集极大地依赖周围环境,例如:在阴雨天气、夜间或者植被覆盖丰富的地区,光照严重不足,通信设备并不能获取足够的太阳能以支持自身操作。此外,通信设备也可以采集广泛存在于周围环境中的射频信号能量。各种类型的射频信号发射机广泛部署于周边环境,例如:广播电视发射塔、音频广播服务发射塔、蜂窝通信基站, Wi-Fi 接入热点等。这些发射机发射的信号广泛分

布于 300 MHz ~ 300 GHz 的射频频段。通信设备装配相应的射频能量采集装置,就可实现对周边射频信号能量的获取。但环境中的射频(RF)能量密度只有 0.0002~1 Mw/cm<sup>2</sup>,只能支撑一些较长工作周期的通信设备。为了克服能量在时间空间分布的不均匀性,可以采取主动控制的无线能量传输(WPT)技术,实现对低功耗通信设备的无线充电,如:电感耦合技术<sup>[2]</sup>、磁感耦合技术<sup>[3]</sup>,以及射频传能技术<sup>[4]</sup>等。值得注意的是:电感耦合和磁感耦合技术只适应于收发机之间距离小于 2 m 的近场能量传输。在无线自供电通信网络中,射频传能技术更加适合于为处于远场位置(大于 2 m)的低功耗通信设备进行能量补充。

### 2 无线射频能量传输

一条完整的无线射频能量传输链路如图 1 所示。在发射端能量源提供的直流能量通过功率放大器以射频信号的形式从天线发出,经过无线信道的传输到达接收天线后,射频

收稿日期: 2018-07-20  
网络出版日期: 2018-10-18



▲图1 无线射频能量传输链路

信号携带的交流能量由匹配电路和整流器转化为直流能量。直流能量经过充能管理电路完成对储能单元的充电操作或者直接用于驱动用电设备。为了对抗无线能量传输过程中的损耗,需要在不同的模块采用以下应对措施。

(1)无线射频能量传输通常需要较高的射频信号发射功率。若发射功率超过功率放大器的线性工作区间,就会产生功放能量的泄露问题。因此需要开发全固态功率放大器,有效增加功放的线性工作区间,减小功放能量泄露对无线能量传输效率的影响。

(2)无线空口传输损耗会带来射频能量的显著衰减。为克服无线信道的路径损耗,收发机两侧均需要设计高增益定向天线,将射频能量集中在某一个方向发射以提升能量传输效率。接收机一侧也可以采用人造电磁结构以及超表面技术来提升对空间射频能量的采集能力<sup>[5]</sup>。工作于射频频段的艾力波束(Airy Beam)具备非散射特性和自加速特性<sup>[6]</sup>。这些特性使得艾力波束可以在传输过程中实现自愈和自聚焦,以减少射频能量在传输过程中的损失,提升无线射频能量的传输效率。

(3)由于收发机可能发生的移动,造成接收射频信号的频率与接收机最佳匹配频率之间发生偏移。由此产生的信号失配会造成射频能量的极大损失。因此需要采用宽带匹配电路,对抗频率偏移产生的信号失配影响,提升无线能量的传输效率。

(4)在完美匹配的情况下,整流器具备如下特性:输入的射频信号功

率需要高于某一门限值,其射频能量才可被转换为直流能量。整流器输出的直流电流是关于输入射频信号功率各项系数为正数的多项式函数。因此提升接收射频信号的功率一方面可以有效激活整流器,另一方面也可以提升整流效率<sup>[7]</sup>。

(5)能量管理电路可以起到升压和稳压的作用,以保证用电设备的稳定工作。能量管理电路也可以有效减缓能量存储单元的放电现象,保证能量的存储效率<sup>[8]</sup>。

为有效提升整条无线射频能量传输链路的传输效率,需要对上述各个模块的传能效率进行联合设计和优化。

工业界当前已在无线射频能量传输技术的商用化上取得了进展。Energous WattUp公司在5.8 GHz射频频段利用阵列天线技术实现4.5 m范围内的无线射频充电,能量发射机的发射功率至少为16 W;OSSIA Costa公司开发的射频能量发射机利用阵列天线技术在2.8 GHz频段发射定向能量波束,其充电范围可达9 m。Powercast公司提供了一种低功耗射频能量发射设备,在915 MHz频段以3 W的射频发射功率可在3 m的范围内对鼠标、键盘等用电设备进行充电,并在18~24 m的范围内对小型传感器设备进行充电。也就是说,无线射频传能正在走向实践。

### 3 全新的数能编码与调制机制

由于同时竞争有限的码字和空口资源,工作在同一射频频段的无线数据传输和WPT会对彼此的性能产

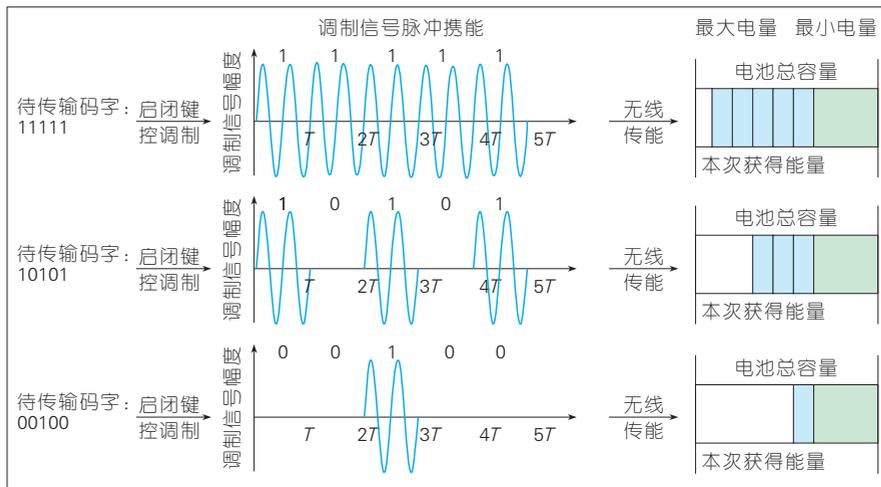
生损害。为实现无线数能的协作传输,需要突破传统的信息与通信理论建立起一套全新的数能编码与调制的相关机制。

#### 3.1 无线数能传输联合编码

编码器将信源产生的消息转化为由二进制比特串构成的码字,使其可在数字通信系统中进行传输。由二进制符号组成的码字结构可以影响码字的通信性能和传能性能。不同的二进制比特或二进制比特串会被数字调制器映射为不同的符号进行传输。如果采用相移键控等恒包络调制方案,不同比特串形成的符号会产生携带能量相同的符号。在这种情况下,码字结构不会影响其传能性能。如果采用脉冲振幅调制或正交振幅调制等变包络调制方案,那么不同比特串形成携带不同能量的符号。因此控制编码器产生的码字结构,或者控制编码器发出某一具体码字的概率,即可实现对无线能量传输的控制。如果采用最简单的二进制启闭键控(OOK)调制方式,码字中的二进制比特1携带能量而比特0不携带能量。因此调整码字中比特1和比特0的数量即可以改变该码字的携能性能,如图2所示。

在传统信息论研究中,通过优化信源一侧码字的发射概率可以实现信源和信宿之间的平均互信息量的最大化,从而得到某一具体信道的信息传输极限性能;但为了满足码字传输能量的约束,编码器必需调整信源发出码字的概率。如果码字概率的最优性被破坏,必然使得信息的传输性能下降。当信源编码器只产生全1码字时,如采用启闭键控调制,码字会携带最多的能量,但相对应的信息传输能力为0。因此,从信息论角度出发,可以看到码字的信息传输能力和能量传输能力之间存在制约关系。

通常情况下,传统的信息编码器产生等概率的二进制比特,从而最大化码字的信息传输能力。但是单一



▲图2 基于二进制启闭键控调制的数能联合编码

的码字结构极大地制约了码字的能量传输能力,并不能满足接收机多样化的能量需求。如下的编码器可以实现对码字结构的灵活调整<sup>[10]</sup>:

(1)补偿性能量编码。不携带任何信息的伪比特可以直接链接在信息比特之后使得生成的码字具备能满足某一具体能量需求的结构。这种编码器的编解码方案具备最低的复杂度;但不携带任何信息的伪比特只起到能量补充的作用,会显著降低信息传输的有效性。

(2)逆信源编码。典型的信源编码器将不等概率发送的原始信源消息编成0/1比特等概率出现的二进制比特序列。相反,逆信源编码可将等概率发出的原始信源消息编成0/1比特非等概率出现的二进制比特序列,从而满足序列的无线能量传输需求。但是编码器和解码器之间的异步情形极大地影响接收端解码的有效性。

(3)约束编码。一些约束编码技术具备改变码字结构的自由度,可以实现对无线能量传输的灵活控制。由于该种编码技术并不引入不携带信息的伪比特,因此其信息传输的有效性并不会受到影响。另外,高效的符号级别网格算法可以用于约束编码的相关解码过程,使得其可以在数能编码领域进行广泛应用。典型的

约束编码技术包括游程编码以及一元编码。

在无线数能编码方案的设计中,还可进一步以接收机电池的能量存储状态作为设计依据<sup>[11]</sup>。在无线充电的过程中,一方面为了防止能量的浪费,需要尽可能减小电池中能量的溢出概率;另一方面为了保证接收机的正常工作,需要保证电池中保留的能量要高于最低需求,并尽可能减小电池中能量不足的概率。

### 3.2 无线数能联合调制

收发机两侧装配多天线可以从空间域增加无线数能传输的可用通道,提升无线数能传输的容量。通常情况下,多天线数能发射机的波束要和接收机的信号分割策略进行联合设计,以满足无线数据和能量传输的要求。若发射机发出符合高斯分布的连续信号,那么无线信道的信息传输速率可以被最大化。此时,香农信道容量公式可以用来描述无线数据传输性能。但是基于香农公式得到的收发机波束和信号分割策略与实际数能性能有较大差距。这是因为在一个实际的数能收发系统中,由于调制器的存在,发射符号只能从有限符号中进行选取。在给定符号选取概率的前提下,离散输入信号连续输出信号的平均互信息量可以描述有

限发射符号情形下的数据传输速率。在考虑调制的实际数能收发机设计中,应当以离散输入信号连续输出信号之间的平均互信息量作为衡量无线数据传输性能的标准。当在采用M阶正交幅度调制的情况下,随着发射功率的增长,该速率收敛于 $\log_2 M$  bit/Hz。因此当无线数据传输性能收敛后,更多的功率应当分配给无线能量传输。

当考虑能量接收机的非线性特征时,不同的调制方案具备不同的无线能量传输性能<sup>[11]</sup>。假设能量接收机的激活功率门限为 $P_{th}$ 。只有当接收射频信号功率大于该门限值时,射频信号携带的能量才可以被有效整流为直流能量。图3描述了16阶相移键控、16阶正交幅度调制以及16阶脉冲幅度调制的无线能量传输性能,这3种调制方案均具有相同的平均接收功率。如图3所示,当整流激活门限高于这3种调制方案的平均发射功率时,16阶相移键控的所有符号都会被能量接收机的整流器过滤。经过16阶相移键控调制的符号不能起到能量传输的作用。在16阶正交幅度调制的方案中,尽管有12个符号会被整流器过滤,但仍有4个符号携带的能量可以被接收机获取。16阶脉冲幅度调制具备最佳的能量传输性能,因为同样的整流激活门限下,该种调制方式仍然有8个符号可以实现能量传递。如果接收射频信号的平均功率大于整流激活门限,那么16阶相移键控调制具备最佳的传输性能,因为所有16个调制符号携带的能量都可以被能量接收机获取。对于正交幅度调制和脉冲幅度调制等变包络调制方案,高阶调制在整流激活门限较高时表现较好,而低阶调制在整流激活门限较低时表现更好。同阶调制方案具备相同的频谱利用率(吞吐量),但表现出不同的数据传输可靠性,例如:虽然16阶脉冲幅度调制具备最佳的能量传输性能,但其误比特率性能在同阶调

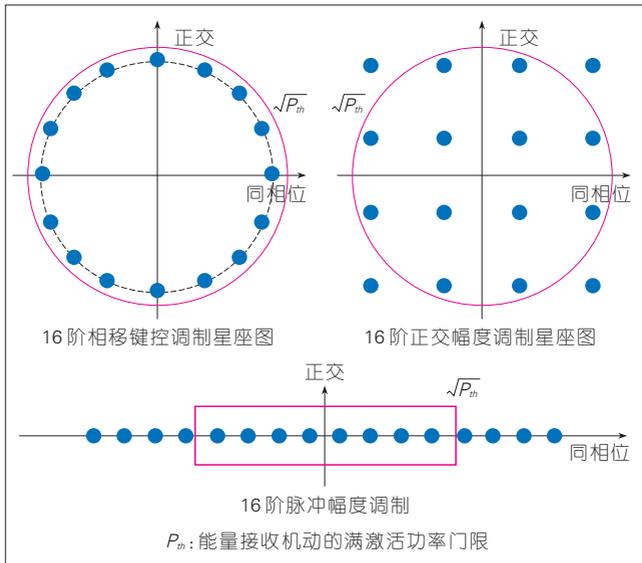


图3 不同调制方式的传能性能

制方案中最差。因此,需要综合考虑数能用户对吞吐量、可靠性以及传能性能的要求,在不同信道条件下选择最佳的调制方案进行无线数能传输。

通常对于无线数据传输有害的多径衰落反而对于无线能量传输是有益的。信道的反射和散射路径增加后,经过多路径传输的射频信号有更大的机会在接收端进行增益性叠加,从而使得接收射频信号的功率能够有效激活能量接收机的整流功能,促进能量接收。

正是因为不同调制方式呈现出不同的无线能量传输性能,数能发射机需要重新设计一种合理的自适应调制方案,以在不同的无线信道条件下取得数据传输有效性、可靠性以及无线能量传输性能三者之间的权衡。也可设计针对多用户的调制方案,以更好地满足多用户的数能传输需求<sup>[12]</sup>。

## 4 结束语

无线数能同传技术的实现既需要底层射频电路、天线以及电磁波束技术的革新,又需要信息编码与通信调制理论的重构。该技术可以从根本上解决未来5G和后5G时代大规模低功耗设备的通信与供能问题,并首先在无线接入网络中实现数据网

络和供能网络的融合。未来随着电力线通信和以太网供电技术的进一步发展,必将实现数据网络和供能网络的大融合,实现万网归一的愿景。

### 参考文献

- [1] ULUKUS S, YENER A, ERKIP E, et al. Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 360–381. DOI:10.1109/jsac.2015.2391531
- [2] CHOI B H, THAI V X, LEE E S, et al. Dipole-Coil-Based Wide-Range Inductive Power Transfer Systems for Wireless Sensors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3158–3167. DOI:10.1109/tie.2016.2517061
- [3] JIWARIYAVEJ V, IMURA T, HORI Y. Coupling Coefficients Estimation of Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonance Coupling Using Information from Either Side of the System [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 191–200. DOI: 10.1109/jestpe.2014.2332056
- [4] BROWN W C. The History of Power Transmission by Radio Waves [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(9): 1230–1242. DOI: 10.1109/tmtt.1984.1132833
- [5] ALAVIKIA B, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Complementary Split Ring Resonator Arrays for Electromagnetic Energy Harvesting [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(3): 033902. DOI:10.1063/1.4927238
- [6] CHREMMOS I D, FIKIORIS G, EFREMIDIS N K. Accelerating and Abruptly-Autofocusing Beam Waves in the Fresnel Zone of Antenna Arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(10): 5048–5056. DOI:10.1109/tap.2013.2274261

- [7] CLERCKX B. Wireless Information and Power Transfer: Nonlinearity, Waveform Design, and Rate-Energy Tradeoff [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(4): 847–862. DOI:10.1109/tsp.2017.2775593
- [8] HWANG Y S, WANG S C, YANG F C, et al. New Compact CMOS Li-Ion Battery Charger Using Charge-Pump Technique for Portable Applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2007, 54(4): 705–712. DOI:10.1109/tcsi.2007.890605
- [9] BABAR Z, MOHD I M A, NGUYEN H V, et al. Unary-Coded Dimming Control Improves ON-OFF Keying Visible Light Communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(1): 255–264. DOI: 10.1109/tcomm.2017.2759271
- [10] HU Jie, ZHAO Y Z, YANG K. Modulation and Coding Design for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer [J]. IEEE Communication Magazine, 2018
- [11] ZHAO Y Z, HU J, DING Z G, et al. Constellation Rotation Aided Modulation Design for the Multi-User SWIPT-NOMA [C]// Proceedings of IEEE ICC 2018. USA: IEEE, 2018

### 作者简介



胡杰,电子科技大学信息与通信工程学院副教授、硕士生导师;主要研究方向为无线通信与组网中的物理层设计和资源分配、无线数能一体化传输关键技术等;现主持国家自然科学基金青年项目1项,主持重点项目2项;已发表论文30余篇,授权及申请国家发明专利7项,出版英文著作1部。



金石,东南大学教授、博士生导师,并担任多本国际知名期刊的编委、IEEE信号处理学会通信技术委员会(SPCOM)委员等;主要研究方向为5G/B5G移动通信理论与关键技术、物联网理论与关键技术、机器学习与大数据处理在移动通信中应用等;研究成果获2014年度江苏省科学技术一等奖、2014年度教育部高等学校科学研究优秀成果奖二等奖、2011年度国际电气与电子工程师协会通信学会莱斯奖、2010年度国际电气与电子工程师协会信号处理学会青年最佳论文奖、2016年IEEE GLOBECOM最佳论文奖、2009年度全国优秀博士学位论文提名奖,以及爱思唯尔中国高被引学者(2014–2017年)等,还获得国家自然科学基金杰出青年基金;已在无线通信领域发表论文200余篇,其中国际核心期刊110余篇,IEEE国际学术会议论文130余篇。