

文章编号: 2095-4980(2017)04-0617-05

MPT 中基于 LabWindows/CVI 的微波波束自适应调节

李 超, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘 要: 为实现微波无线能量传输(MWPT)系统中最高传输效率, 需要调节微波发射波束对准接收端。通过对微波发射端天线单元的相位进行闭环调节和控制, 实现接收端微波功率最大值的跟踪与锁定。本文构建 2 个发射天线单元的 X 波段微波无线能量传输系统, 基于 LabWindows/CVI 软件平台进行发射端功率放大器相位自适应控制, 实现系统最高效率传输。发射天线和接收天线的中心距离为 152 cm, 功率放大器的最小移相步进 5.625° 。实测结果表明, 微波无线能量传输系统输出功率降为最大值一半的范围(3 dB 动态范围)扩大了 49%, 验证了本方法能准确地进行闭环自适应相位控制并锁定最高系统传输功率。

关键词: LabWindows/CVI 软件; 微波无线能量传输; 闭环控制; 移相; 功率放大器; X 波段

中图分类号: TN821⁺.91

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0617

Adaptive adjustment on microwave beam based on LabWindows/CVI in a microwave power transmission system

LI Chao, LIU Changjun

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: In order to realize the highest transmission efficiency in a Microwave Power Transmission (MWPT) system, microwave transmitting beam should be directed to the receiving end. Through a closed-loop regulation and control of phases of the microwave transmitting antenna unit, tracking and locking of the maximum receiving power is realized. In this paper, a microwave power transmission system with two units of X-band transmitting antennas is built and adaptively adjusting the phases at the transmitting end to achieve the highest efficiency is realized based on LabWindows/CVI platform. The center distance between the transmitting antenna and receiving antenna is 152 cm and the minimum phase shift step of power amplifier is 5.625° . Measured results show that the 3 dB dynamic range of the output power of the microwave wireless energy transmission system has been increased by 49%, and it controls the phase accurately and locks the highest system efficiency with an adaptive closed-loop.

Keywords: LabWindows/CVI; Microwave Wireless Power Transmission(MWPT); closed-loop control; phase shift; power amplifiers; X-band

微波无线能量传输是实现空间太阳能电站的核心关键技术, 国内外已对基于微波的无线能量传输技术开展了诸多研究^[1]。微波无线能量传输具有在大气中损耗小的优点^[2], 在太空发电、模块航天器间能量传输, 军事定向能源武器, 星际探测等领域的应用均具有特殊的意义^[3-5]。微波无线能量传输通过将直流电能转化为微波, 在自由空间中传输, 到达接收部分后转换为直流电能。微波发射端天线阵列辐射的相位差异决定波束合成和波束指向, 影响系统效率。因而, 需要对微波发射端天线单元的相位进行调节, 以得到最高系统效率。LabWindows/CVI 主要用于仪器控制、数据采集、数据分析、数据显示等领域^[6]。本文利用 LabWindows/CVI 软件构建了发射端包含 2 个发射天线单元的 X 波段无线能量传输系统的控制系统, 实现了对发射端的功率放大器的开关机、状态查询、移相和输出功率检测等功能, 同时依据微波波束自适应调节算法自动锁定并跟踪最大接收功率时功放相位。

收稿日期: 2015-12-29; 修回日期: 2016-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271074)

1 微波波束控制原理及系统框架

1.1 微波波束控制原理

微波天线阵列的波束合成和方向受天线单元相位的控制。根据波瓣图乘法原理：非各向同性源阵的场波瓣图是其源波瓣图与阵列中具有相同的位置、幅度和相位的各向同性点源阵波瓣图之乘积。

N 个相同单元组成一维天线阵列，天线单元距离为 d_r ，相邻点源相位差为 δ ，则在 φ 方向的远场区的分布为：

$$E = f(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \cdot (1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j(n-1)\psi}) = f(\theta, \varphi) \cdot (1 + e^{jd_r \cos \varphi + \delta} + e^{j2d_r \cos \varphi + \delta} + \dots + e^{j(n-1)d_r \cos \varphi + \delta}) \quad (1)$$

式中： $f(\theta, \varphi)$ 为个别源的场波瓣图； ψ 是相邻点源场之间的总相位差且可分解为 $\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \varphi + \delta = d_r \cos \varphi + \delta$ ；改变相邻点源之间的相位差就能对合成波束进行控制。

1.2 系统框架图

以两天线单元的微波无线能量传输系统为基础，构建具有自适应波束控制的微波无线能量传输演示系统，如图 1 所示。

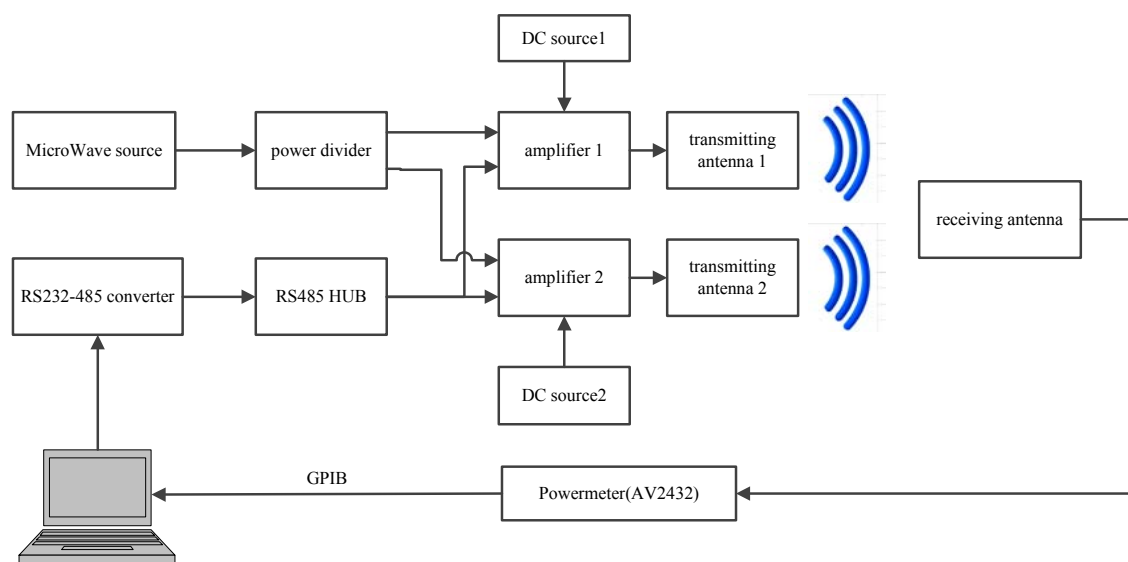


Fig.1 Structure of system
图 1 系统结构图

系统包括微波信号源、直流源、功率放大器、微波发射天线阵列、微波接收接收天线等。上位机通过 USB-232 串口线与 RS232-485 转换器相连，完成 232 信号与 485 信号电平和接口标准的转换，再通过 RS485 集线器实现对 2 个功放的开关、查询和移相等操作。2 个直流源分别给 2 个功放提供直流功率，放大后的微波经过 2 个发射天线辐射出去。接收端通过接收天线接收能量，功率计进行测量后通过 GPIB^[7-8] 将所检测到的功率值反馈给上位机。上位机将根据算法对功放的相位进行扫描与锁定，得到发射天线处于不同位置时所能接收到的最大输出功率，形成一个自适应的闭环控制系统。

2 系统模块介绍

2.1 发射天线和接收天线

单个发射、接收天线单元均为 2×2 天线阵列结构，整体天线口径大小为 $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ ，采用封闭腔体结构，SMA 接头馈电。每个天线均采用 4 个带金属墙的法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 谐振腔天线组成阵列，4 个天线之间利用 0.5 mm 的铝板作为金属墙，最外侧使用 2 mm 的铝板，底部使用 5 mm 的铝板作为支撑。发射、接收天线的腔体与反射背板的结构图如图 2 所示。

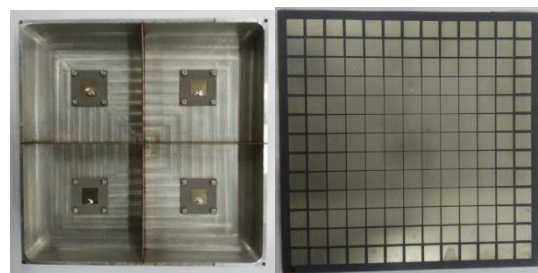


Fig.2 Picture of antenna chamber and reflect plate
图 2 天线腔体与背板结构图

单个 F-P 天线的空气腔体横截面为 $60.25\text{ mm} \times 60.25\text{ mm}$ 。单个天线单元的仿真增益为 16.6 dBi ，天线阵增益为 21.2 dBi ，相对带宽大于 2% 。实际测量中，2 个发射天线与接收天线的 E 面方向均沿水平方向，两发射天线腔体紧密相邻，组成边射阵天线阵列。

2.2 功率放大器

本系统中功率放大器的主要作用是对从功分器分出的微波进行放大和移相，将处理后的信号馈入发射天线。可通过不同的指令对其进行各种操作，如开机，开风扇，查询功率、温度、移相状态等，其指令帧格式如表 1 所示。相位自适应调节流程如图 3 所示。表 1 中数据为 16 进制表示，X 取值范围为 0~9 或 A~F。如 1 号功放

的开机指令为：

```
FlushInQ(COM); //清除串口缓存
amp[20]={0x7B,0x30,0x30,0x31,0x30,0x31,0x31,0x31,0x33,0x30,0x7D};
ComWrt(COM,amp,strlen(amp)); //向串口发送开机指令
```

表 1 数据帧组成

Table1 Composition of data frame											
frame header	address			frame type		data(variable length)			check code		frame tail
7B	3X	3X	3X	3X	3X	3X	3X	...	3X	3X	7D

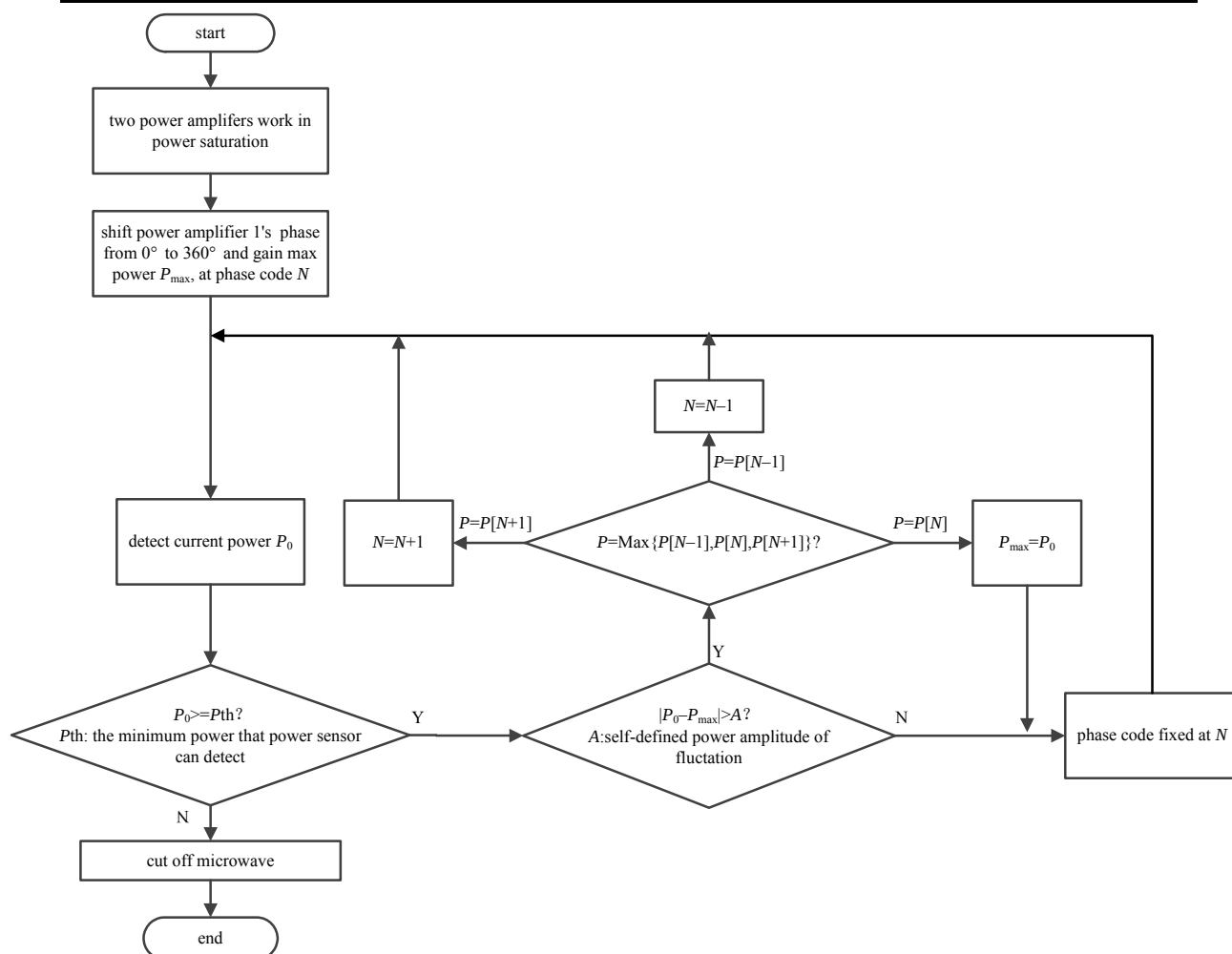


Fig.3 Flow chart of adaptive adjust of phase

图 3 相位自适应调节流程图

2.3 微波功率计

微波功率计在本系统中的作用是检测接收天线接收到的功率，同时将所检测到的功率值通过 GPIB 返回给上位机(PC)。系统中需要基于 LabWindows/CVI 软件平台对微波功率计进行远程控制，在 LabWindows/CVI 中连接微波功率计的程序如下：

```

DAQ_DEVICE=ibdev(0,13,NO_SAD,T3s,1,0); //对功率计进行设置
if(ibsta& ERR||DAQ_DEVICE<0)
{ MessagePopup("提示","不能连接"); //连接失败对话框
return 0; }
else { MessagePopup("提示","成功连接功率计"); //连接成功对话框
return 1; }
上位机通过 GPIB 获得功率计的功率读数的部分程序如下:
strcpy(CommandBuffer,"BP"); //选择测量通道
GPIBWrite(DAQ_DEVICE,CommandBuffer); //发送读功率指令
GPIBRead(DAQ_DEVICE,VoltageReadBuffer); //返回功率值
voltage_value=atof(VoltageReadBuffer); //值转化成 float 型

```

3 实测结果

系统平台采用 Agilent E8267C PSG-D 型号的信号源、X 波段功率放大器、中电 41 所的 AV2433 功率计,接收天线和发射天线采用图 2 所示的腔体天线。运行时,控制系统界面如图 4 所示。在移动过程中,功放 1 和 2 的相位均采用开机时初始相位,不对功放 1 进行任何相位扫描,测得的接收功率记为固定相位功率;功放 2 相位不变,对功放 1 进行实时相位动态扫描,检测到的微波功率记为动态相位功率。动态相位与固定相位接收功率对比如图 5 所示。

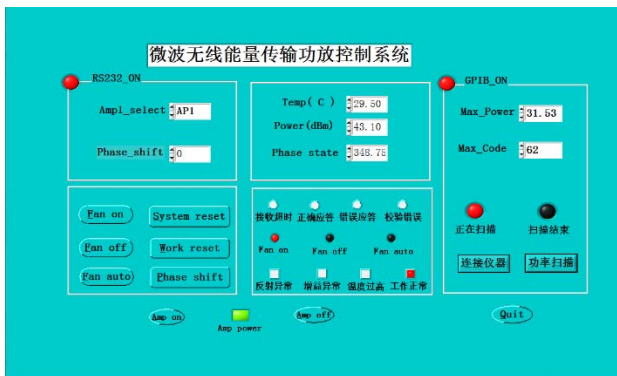


Fig.4 Interface of control system
图 4 控制系统界面

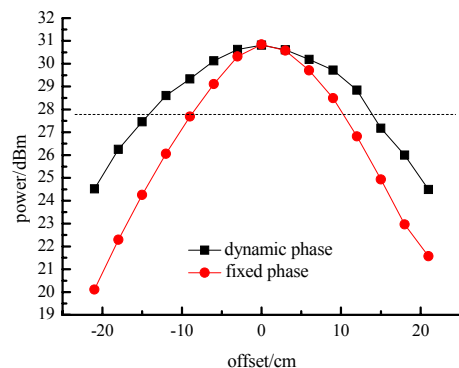


Fig.5 Measurement of power of dynamic phase and fixed phase
图 5 动态相位与固定相位时接收功率测量结果

图 5 中 $\text{offset}=0$ 为发射、接收端正对齐时的中心位置; offset 为正和负值分别代表发射天线偏移中心位置靠右与靠左时的距离。3 dB 动态范围定义为接收功率降为中心位置获得的最大接收功率一半时偏离中心位置左右两端的距离。对比实测结果可知: 固定相位时, 3 dB 动态范围为 $-8.6 \sim 10.4$ cm, 总长度为 19 cm; 动态相位时, 3 dB 动态范围为 $-14.2 \sim 14.2$ cm, 总长度为 28.4 cm, 3 dB 动态范围扩大了 49%。实际测量中, 该控制系统工作稳定可靠, 能实时监控发射端功放的温度、功率、工作状态和接收端的功率。当接收端位置移动时, 控制系统能及时调整发射端功放的相位, 单步移相的响应时间为 15 ms, 系统响应时间为 ms 量级, 能快速准确获得发射天线移动时接收天线所能接收到的最大功率, 从而验证了本文提出的算法有效地实现了无线能量传输系统中的波束自适应调节。

4 结论

本文将虚拟仪器与无线能量传输中的微波功率合成的波束自适应调节结合起来, 研究了一个闭环控制系统。该系统能实现功放控制、工作状态查询、功率反馈比较、相位自适应调节等功能, 系统简单可靠, 能自动锁定发射端处于不同位置时, 接收端所能接收到的最大功率。实测表明该系统工作稳定可靠, 充分发挥了虚拟仪器的灵活性和可扩展性。今后可应用在多发射天线阵列和多接收天线阵列的应用中, 未来可将本微波波束自适应调节技术应用到无线能量传输技术、空间太阳能站 (SPS) 系统中, 也可以用于对移动目标的微波无线能量传输领域。

参考文献:

- [1] BAY H, FERRARI V, GOOL L V. Wide-base line stereo matching with line segments[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego:[s.n.], 2005:329–336.
- [2] THACKER N A, RIOCREUX P A, YATES R B. Assessing the completeness properties of pairwise geometric histograms[J]. Image and Vision Computing, 1995, 13(5):423–429.
- [3] 傅丹, 王超, 徐一丹, 等. 一种直线段匹配的新方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1):115–120. (FU Dan, WANG Chao, XU Yidan, et al. A new algorithm of matching of line segments[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(1):115–120.)
- [4] WOO D M, PARK D C. Stereo line matching based on the combination of geometric and intensity data[C]// IEEE 24th International Symposium on Computer and Information Sciences. Guzelyurt, Cyprus:IEEE, 2009:581–585.
- [5] WANG Z H, LIU H M, WU F C. HLD:a robust descriptor for line matching[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(5):941–953.
- [6] 王鲲鹏, 尚洋, 于起峰. 影像匹配定位中的直线倾角直方图不变矩法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(3):389–393. (WANG Kunpeng, SHANG Yang, YU Qifeng. An image matching approach based on the invariant moment of slope angle histogram[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(3):389–393.)
- [7] 聂烜, 赵荣椿, 康宝生. 基于边缘几何特征的图像精确匹配方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(12):1668–1675. (NIE Xuan, ZHAO Rongchun, KANG Baosheng. A precise image registration method by utilizing the geometric feature of edges[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(12):1668–1675.)
- [8] 吕文涛, 吕高焕. SIFT 算法在雷达图像匹配中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010, 8(4):388–392. (LYU Wentao, LYU Gaohuan. Application of scale invariant feature transform to SAR image matching[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010, 8(4):388–392.)

作者简介:



李超(1989–), 男, 湖北省荆门市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术。

刘长军(1973–), 男, 河北省邢台市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场与微波技术.email:cjliu@scu.edu.cn.