

文章编号: 2095-4980(2015)02-0251-05

## S波段 1 kW 连续波磁控管拓展注入锁频带宽

霍飞向, 刘征宇, 黄何平, 银振宇, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要:** 注入锁频技术是实现多只磁控管相干功率合成的关键技术。对 S 波段 1 kW 连续波磁控管输出信号频谱的改善进行研究, 分析了灯丝电流对磁控管输出特性的影响, 通过降低灯丝电流使磁控管自由振荡下的输出微波频带宽度由 10 MHz 降低至 300 kHz。通过提高参考信号的注入功率, 有效地拓展了连续波磁控管的注入锁频带宽, 最终获得了高达 14 MHz 的注入锁频带宽。在不同注入功率比的情况下, 该连续波磁控管的外观品质因数  $Q_E$  为 52~72。

**关键词:** S 波段; 连续波磁控管; 注入锁频; 功率合成

中图分类号: TN123

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201502.0251

## Inject-locking bandwidth expansion of a 1 kW Continuous Wave magnetron at S-band

HUO Feixiang, LIU Zhengyu, HUANG Heping, YIN Zhenyu, LIU Changjun

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

**Abstract:** The inject-locking on a magnetron is a key technique to achieve coherent power combining to extend the power capacitance of magnetrons. The improvement on the output spectrum of a 1 kW Continuous Wave(CW) magnetron at S-band is presented. The influence of the filament current on output characteristics of the magnetron is studied. The bandwidth of the free oscillating magnetron is reduced from 10 MHz to 300 kHz by decreasing its filament current. The inject-locking bandwidth of the CW magnetron has been expanded to 14 MHz by increasing the injection signal power. The External Quality Factor( $Q_E$ ) of the magnetron evaluated from the Adler equation varies from 52 to 72 at various injecting power ratios.

**Key words:** S-band; Continuous Wave(CW) magnetron; inject-locking; power combining

磁控管是一种效率高、功率大的微波源, 在军事领域和工业生产中得到了广泛应用。从输出功率、转换效率和成本综合考虑, 磁控管在工业应用中具有一定优势<sup>[1-2]</sup>。工业应用中的微波作用对象体积大, 对功率要求高。单只磁控管输出功率有限, 在功率、散热和寿命等方面的设计水平和制造工艺尚不能满足工业应用的要求<sup>[3-4]</sup>, 故需要进行多只磁控管的功率合成来获得大功率的连续波输出。多磁控管的非相干功率合成的成本低, 但应用存在一定的局限性。相干功率合成具有合成效率高, 工作稳定等优点, 但其要求各个合成源具有相同的频率和相位。单只磁控管自由振荡状态下, 输出微波频谱较宽, 频率不稳定, 相位不可控, 同时相同型号不同批次磁控管的输出微波频谱也有较大差异, 这都使相干功率合成增加了难度。

为了实现相干功率合成, 首先需要改善磁控管的输出信号频谱宽度, 得到稳定的输出频率。为了实现多只磁控管的相干功率合成, 克服磁控管加工工艺一致性差的缺点, 需要拓展磁控管的锁定频带宽度。对于磁控管输出微波频谱的改善, Brown 提出“内部反射”<sup>[5-6]</sup>方案, 日本京都大学 Tomohiko Mitani 等人提出减小磁控管供电电源的波纹系数, 增加磁控管谐振腔阴极、阳极间的距离, 关闭灯丝电源, 加入锁相环反馈系统等方案<sup>[7-8]</sup>。本文利用自制高压电源, 通过降低磁控管灯丝电流和引入注入锁频技术来改善磁控管的输出微波频谱。通过提高参考信号注入功率来拓展磁控管的锁定频带宽度。本文研究了参考信号注入功率对磁控管锁频带宽和输出功率的影响, 利用 Adler 公式计算得到了磁控管的外观品质因数(External Quality Factor,  $Q_E$ )。

收稿日期: 2014-09-30; 修回日期: 2014-11-13

基金项目: 国家973计划资助项目(2013CB328902); 国家自然科学基金资助项目(NSFC 0971051); 新世纪人才资助项目(NCET-12-0383)

## 1 连续波磁控管注入锁频技术

早在 20 世纪五六十年代 Adler 等<sup>[9]</sup>就对微波振荡器的锁频进行了理论方面的研究,此后各国学者对微波振荡器注入锁频产生了浓厚的兴趣。连续波磁控管注入锁频是指在连续波磁控管中注入一低电平的高稳定外部参考微波信号,该信号频率接近于磁控管的固有振荡频率 $f_0$ ,经过环行器直接注入到连续波磁控管中,当注入信号幅度达到相当数量级时,受高压控制的连续波磁控管振荡频率与被注入信号的频率同步。在锁频范围内,磁控管的输出频率与锁定频率为同一值,磁控管的输出频率直接由注入信号频率控制。2003 年,美国空军实验室 Gilgenbach R M 等人对 2 450 MHz 的微波炉磁控管进行了注入锁频实验,锁定频率为 2 448 MHz~2 452 MHz,锁频带宽为 4 MHz<sup>[10]</sup>。2008 年,韩国 Gil Wong Choi 等人通过自注入锁频技术获得了 1 MHz 的锁频带宽<sup>[11]</sup>。2008 年,电子科技大学完成了 S 波段的注入锁频实验,锁定频率为 2 437 MHz~2 448 MHz<sup>[12]</sup>。一般注入锁频系统见图 1,磁控管供电网络使磁控管工作在自由振荡状态下,外部参考微波信号通过环行器输入端口注入至磁控管谐振腔,在锁频带宽内三端口环行器的输出端口将输出频率稳定、相位稳定的微波信号。著名的 Adler 公式给出了一般情况下注入锁频带宽与锁频信号功率的关系:

$$\Delta f = \frac{2f_0\rho}{Q_E} \quad (1)$$

式中: $\Delta f$ 为锁频带宽; $\rho$ 为注入比,表示注入功率 $P_1$ 与被锁定磁控管的输出功率 $P_0$ 的比值的开方,即 $\rho = \sqrt{P_1/P_0}$ ;  $f_0$ 为磁控管自由振荡频率; $Q_E$ 为磁控管外观品质<sup>[9]</sup>。从式中可以看出要获得一定的锁定带宽 $\Delta f$ 就必须有足够的注入功率 $P_1$ 。

本文选用民用连续波磁控管作为研究对象,研究连续波磁控管注入功率与锁频带宽和输出功率的关系,有效拓展了连续波磁控管注入锁频带宽,通过计算得到所选用的连续波磁控管的外观品质因数 $Q_E$ 。

## 2 磁控管注入锁频实验系统

磁控管注入锁频实验研究的实验系统框图见图 2。磁控管的供电系统由直流高压源和灯丝电源组成,均是自制模拟电源。磁控管自由振荡时输出微波信号经激励腔、波导环行器、波导定向耦合器传输至大功率水冷负载 1 吸收,这是磁控管的输出路径。

本实验由 Agilent E8267C 信号发生器作为外部参考信号源,经过同轴环行器、Mini Circuits HL-30W-262+功率放大器、定向耦合器、波导环行器和激励腔注入至磁控管谐振腔,最后再经过磁控管的输出路径输出具有稳定频率和稳定相位的微波信号。由于 E8267C 信号发生器在 S 波段的最大输出功率较小,为了获得更大的锁频带宽,增加最大输出功率为 30 W 的功率放大器来提高注入功率。系统使用中电集团第 41 所的 AV2434 峰值功率计测量微波输出功率,使用 R&S 公司 FSP7 频谱分析仪测量输出频谱。

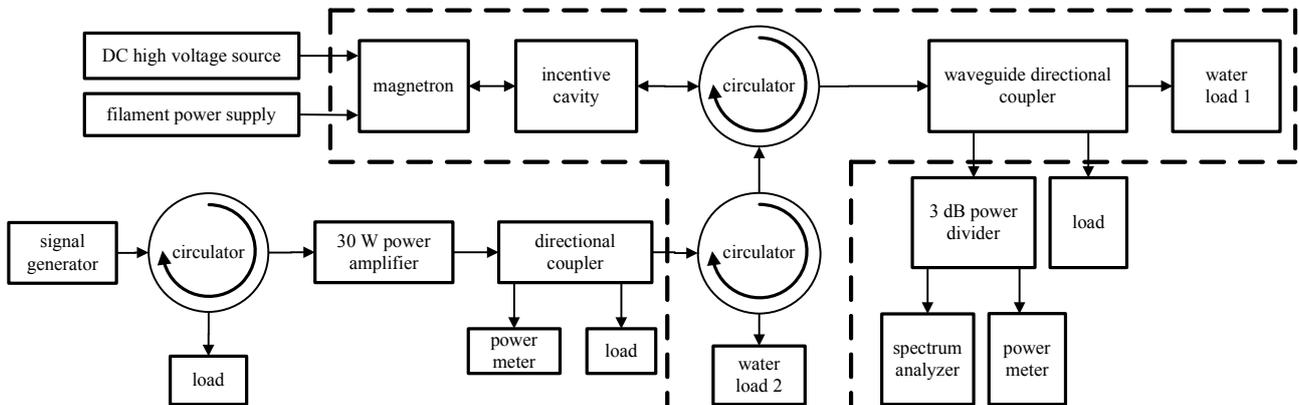


Fig.2 Experimental diagram for magnetron inject-locking system  
图 2 磁控管注入锁频系统实验框图

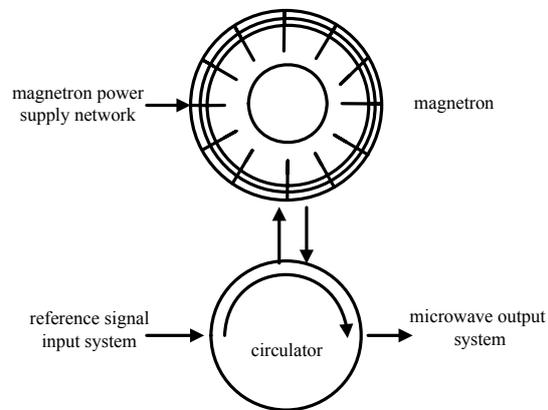


Fig.1 Schematic for inject-locking system  
图 1 注入锁频系统框图

### 3 实验结果与分析

本文选用阳极额定电压为 4.1 kV, 灯丝电流  $I_f$  为 10 A, 阳极电流为 300 mA, 冷却方式为水冷, 额定输出功率为 900 W 的松下 2M210-M1J1 连续波磁控管。系统布局见图 3, 对应于图 2 中的虚线方框, 图 3 中 RBW(Resolution Bandwidth)为分辨带宽, VBW(Video Bandwidth)为视频带宽, SPAN 为扫描范围。磁控管在自由振荡状态下, 调节灯丝电源使磁控管灯丝电流  $I_f$  分别为 10 A 和 0 A, 磁控管的输出微波频谱见图 4。  $I_f=10$  A 时, 磁控管输出信号频带宽度约为 10 MHz, 中心频率约为 2 458 MHz。从图 4 可以发现在磁控管稳定工作时降低磁控管灯丝电流  $I_f$  至 0 A 可有效改善磁控管自由振荡情况下的输出信号频带宽度。磁控管稳定工作后, 阴极灯丝发射的电子会有一部分重新返回至阴极灯丝, 这被称为电子回轰。电子回轰会引起阴极灯丝的温度升高并且导致电子发射过剩, 严重影响磁控管的使用寿命, 同时这些过剩电子会引起更强的热噪声。当降低磁控管灯丝电流后, 部分电子回轰至阴极灯丝, 维持其正常工作温度, 从而保证磁控管工作的稳定性。此时, 磁控管的阴极灯丝工作在正常温度范围内, 可改善磁控管输出频谱宽度, 并有效延长磁控管的使用寿命。

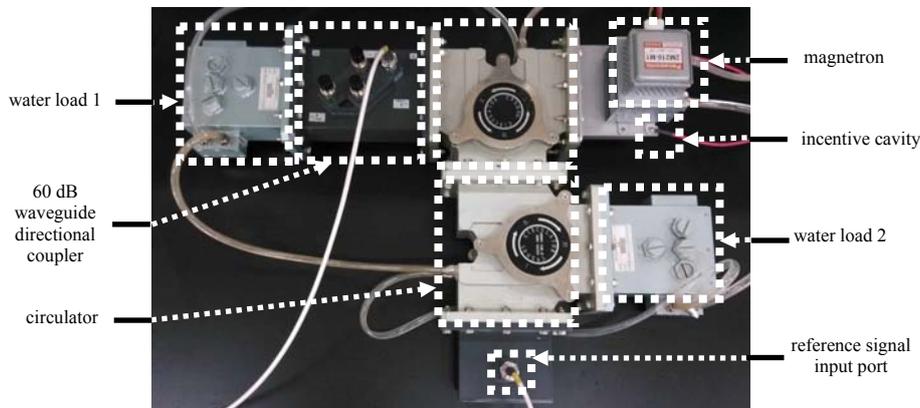
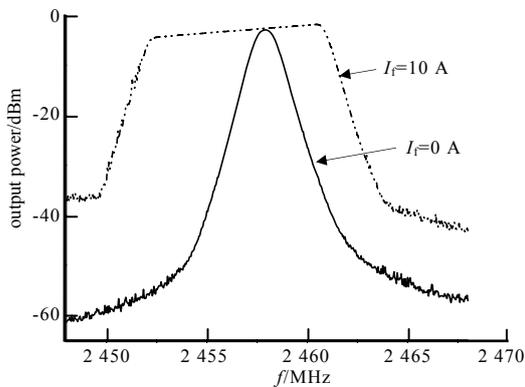
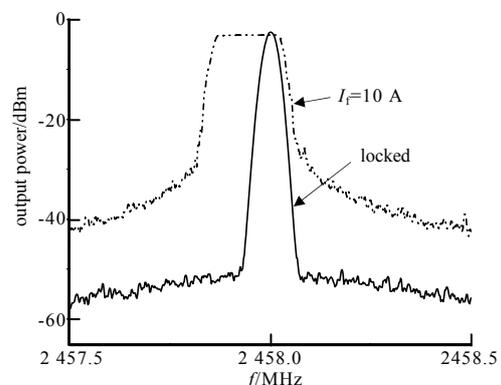


Fig.3 Configuration of inject-locking experimental system  
图3 注入锁频实验系统布局图

图 5 为更窄的频带范围内看到的输出微波频谱, 可以发现  $I_f=0$  A 时磁控管输出微波频带宽度约为 300 kHz, 但是在 2 458 MHz 附近处仍有较大的边带噪声, 这是由电源的波纹引起的。引入注入锁频技术可以获得更为稳定的输出频率。通过环形器注入频率为 2 458 MHz, 功率为 100 mW 的高稳定参考微波信号, 磁控管的输出频谱见图 5, 可见磁控管被成功地锁定在 2 458 MHz 处, 相比于  $I_f=0$  A 获得了更加锋利的频谱, 相位噪声达到  $-94$  dBc/Hz@100 kHz(R&S FSP7 频谱分析仪测量得到), 说明注入锁频大幅降低了磁控管的输出信号的边带噪声, 同时使得输出信号频率稳定在一个固定值。这对相干功率合成提供了有利条件。利用泰克 DPO 7254 示波器进行注入信号波形和磁控管输出信号波形的监测发现两者有一个固定相位差, 且这一个相位差不会随着注入功率的改变而改变。



RBW=1 MHz, VBW=3 MHz, SPAN=20 MHz  
Fig.4 Spectrum of free oscillating magnetron  
图4 自由振荡状态下磁控管输出频谱



RBW=30 kHz, VBW=100 kHz, SPAN=1 MHz  
Fig.5 Spectrum of magnetron at  $I_f=0$  A and locked  
图5  $I_f=0$  A 与注入锁定状态下磁控管输出频谱

改变参考注入信号的频率和功率, 进行了注入功率对磁控管锁定频率和输出功率的影响实验, 结果见表 1。实验结果表明参考信号注入功率的增大可有效拓展磁控管的注入锁频带宽, 同时不同锁定频率下磁控管的输出功率也存在差异。当注入功率为 10 dBm 时, 锁定频率为 2 457.5 MHz~2 457.8 MHz, 带宽为 0.3 MHz, 输出功率变

化范围为 969.5 W~970.5 W；当注入功率为 44 dBm，锁定频率为 2 449.7 MHz~2 463.7 MHz，带宽达到 14 MHz，输出功率变化范围为 980 W~1 000 W。出于系统效率和成本的考虑，实验所测试的最大注入功率为 44 dBm。

表1 注入功率对磁控管锁频带宽和输出功率的影响

$P_i$ /dBm	locking frequency/MHz	$\Delta f$ /MHz	$P_o$ /W
10	2 457.5~2 457.8	0.3	970±0.5
20	2 457.4~2 458.1	0.7	978±2
23	2 456.9~2 457.9	1.0	960±3
26	2 456.7~2 458.1	1.4	960±5
29	2 456.4~2 458.7	2.3	966±4
32	2 456.1~2 459.1	3.0	970±2
35	2 454.9~2 459.6	4.7	990±10
38	2 453.9~2 460.7	6.8	990±8
41	2 452.2~2 462.0	9.8	989±11
44	2 449.7~2 463.7	14.0	990±10

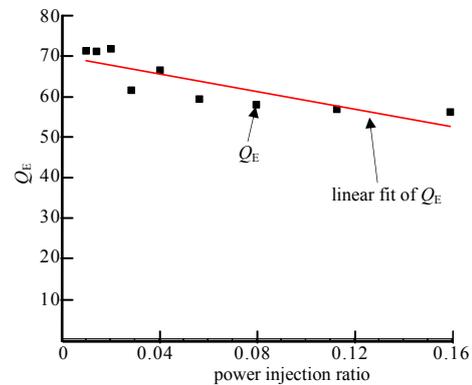


Fig.6 Values of the magnetron external  $Q$  factor  
图6 磁控管外观品质因数  $Q_E$  值

根据表1中的注入功率  $P_i$ 、锁定带宽  $\Delta f$ 、输出功率  $P_o$ 、磁控管自由振荡中心频率  $f_0$  和式(1)反向推算出磁控管外观品质因数  $Q_E$ ，见图6，可以看出磁控管外观品质因数  $Q_E$  范围为 52~72。

#### 4 结论

本文通过降低灯丝电流和引入注入锁频技术成功改善了 S 波段 1 kW 连续波磁控管的输出频谱，通过提高参考信号注入功率有效拓展了连续波磁控管的注入锁频带宽。磁控管起振正常工作后，降低灯丝电流使得磁控管输出频带宽度由 10 MHz 收敛至 300 kHz，在获得更好输出频谱的同时也延长了磁控管的寿命。在降低灯丝电流状态下，通过注入锁频，磁控管输出微波频率被锁定在注入微波信号频率上，在 2 458 MHz 频率下相位噪声达到 -94 dBc/Hz@100 kHz。通过提高参考信号注入功率拓展连续波磁控管的注入锁频带宽到 14 MHz，为基于磁控管的功率合成奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] 岳松,张兆传,高冬平. 阻抗匹配条件下磁控管的注入锁频[J]. 物理学报, 2013,62(17):509-516. (YUE Song,ZHANG Zhaochuan,GAO Dongping. Injection-locking of magnetrons with matched impedance[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17):509-516.)
- [2] Choi J J,Choi G W. Experimental observation of frequency locking and noise reduction in a self-injection-locked magnetron[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2007,54(12):3430-3432.
- [3] 刘长军,吴昕. 微波能工业应用研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(4):451-455. (LIU Changjun,WU Xin. Research progress on microwave energy industrial applications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(4):451-455.)
- [4] 谢文楷,蒙林. 高功率微波振荡器功率合成中的锁频与锁相[J]. 电子科技大学学报, 1994,23(4):393-399. (XIE Wenkai, MENG Lin. Phase and frequency locking on the power combining of high power microwave oscillators[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1994,23(4):393-399.)
- [5] Brown W C. The SPS transmitter designed around the magnetron directional amplifier[J]. Space Power, 1988,7(1):37-49.
- [6] Brown W C,Eves E E. Beamed microwave power transmission and its application to space[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992,40(6):1239-1250.
- [7] Mitani T,Shinohara N,Matsumoto H,et al. Experimental study on oscillation characteristics of magnetrons after turning off filament current[J]. Electronics and Communications in Japan, Part II:Electronics, 2003,86(5):1-9.
- [8] Mitani T,Shinohara N,Matsumoto H. Development of a pulse-driven phase-controlled magnetron[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference 2007(IVEC '07). Kitakyushu:[s.n.], 2007:1-2.
- [9] Adler R. A study of locking phenomena in oscillators[J]. Proceedings of the IRE, 1946,34(6):351-357.
- [10] Gilgenbach R M,Necluaes V B,Lopez M,et al. Mode locking and mode control in non-relativistic and relativistic magnetrons[C]// 2003 4th IEEE International Conference on Vacuum Electronics. [S.l.]:IEEE, 2003:336-337.

(下转第 261 页)

- [6] Beale Guy O, LI Mengli. Robust temperature control for microwave heating of ceramics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997,44(1):124-131.
- [7] WU X, Thomas J R Jr. Control of thermal runaway in microwave resonant cavities[J]. Journal of Applied Physics, 2002,92(6):3374-3380.
- [8] Nelson S O, Bartley P G Jr. Measuring frequency-and temperature-dependent permittivities of food materials[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002,51(4):589-692.
- [9] Parris P E, Kenker V M. Thermal runaway in ceramics arising from the temperature dependent of the thermal conductivity[J]. Phys. Status Solidi B, 1997,200(1):39-47.
- [10] 黄卡玛, 卢波. 微波加热化学反应中热失控条件的定量研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009,39(2):266-271. (HANG Kama, LU Po. The precise condition of thermal runaway in microwave heating on chemical reaction[J]. SCIENCE CHINA: Technological Sciences, 2009,39(2):266-271.)
- [11] 刘长军, 闫丽萍, 黄卡玛. 微波加热中“热失控”的一维数值模拟[C]// 2005 全国微波毫米波会议论文集(第 3 册). 广东, 深圳:[s.n.], 2005:1040-1043. (LIU Changjun, YAN Liping, HUANG Kama. One dimensional numerical simulation on the thermal runaway during microwave heating[C]// Microwave&Millimetre-wave Symposium of China(2005'CNMWS). Shenzhen, Guangdong, China:[s.n.], 2005:1040-1043.)
- [12] Kriegsmann G A. Thermal runaway in microwave heated ceramics-A one-dimensional model[J]. Journal of Applied Physics, 1992,71(4):1960-1966.
- [13] WANG Sen, HE Tingshu, SUN Yuanjun, et al. Temperature and power control in microwave drying of molybdenum[C]// 2011 International Conference on Information Science and Technology(ICIST). Nanjing, Jiangsu, China:[s.n.], 2011:402-405.

#### 作者简介:



李荣昆(1983-), 男, 四川省资阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为智能控制技术. email:rongkunlee@163.com.

周新志(1966-), 男, 成都市人, 博士, 教授, 主要研究方向为人工智能、智能控制技术的应用、分布式测控系统等.

雷印杰(1983-), 男, 成都市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为模式识别、智能系统.

(上接第 254 页)

- [11] Choi Gil Wong, Kim Hae Jin, Kim Hyoung Jong, et al. The self-injection-locked magnetron[C]// 2008 Vacuum Electronics Conference(IVEC 2008). Monterey, CA:IEEE, 2008:445-446.
- [12] 魏惠月. L 波段磁控管锁相及功率合成技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (WEI Huiyue. Research of magnetron phase-locking and power combining at L band[D]. Chengdu Sichuan, China:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)

#### 作者简介:



霍飞向(1990-), 男, 陕西省渭南市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术. email:huofeixiang@gmail.com.

刘征宇(1989-), 男, 四川省绵阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

黄何平(1987-), 女, 河南省南阳市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为电路与系统、无线电物理.

银振宇(1990-), 男, 四川省乐山市人, 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, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场与微波技术.