

引用格式: 周湘, 钟智勇, 杜培贤, 等. 超短波通信射频功放保护控制电路设计及应用 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(2): 161-165.  
ZHOU X, ZHONG Z Y, DU P X, et al. Design and application of RF power amplifier protection control circuit for ultrashort wave communication[J].  
Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(2): 161-165.

# 超短波通信射频功放保护控制电路设计 及应用



周 湘<sup>1,2\*</sup>, 钟智勇<sup>1</sup>, 杜培贤<sup>2</sup>, 何 放<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 611731; 2. 成都亚光电子股份有限公司, 成都 610066)

**摘要:** 结合超短波通信中射频功放的实际工程应用, 设计构建了一种复合型功放系统的检测电路及保护电路, 并对其功能进行了研究。该设计的检测保护电路能够对脉宽范围 50~110  $\mu\text{s}$  的信号进行实时监测, 对应的占空比为 4%~30%, 在 -35~0 dBm 功率范围内对电路做出响应, 开关的插入损耗 $\leq 2.6$  dB, 已在最新机载设备上获得应用, 对提高功放的可靠性和使用寿命具有积极意义。

**关键词:** 功率放大器; 保护电路; 过脉宽; 检测

中图分类号: TN72

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024017

## Design and application of RF power amplifier protection control circuit for ultrashort wave communication

ZHOU Xiang<sup>1,2\*</sup>, ZHONG Zhiyong<sup>1</sup>, DU Peixian<sup>2</sup>, and HE Fang<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Chengdu Yaguang Electronics Co., Ltd, Chengdu 610066, China)

**Abstract:** In recent years, there has been a tendency to increase the output power of radio frequency (RF) to meet the demands of long-distance communication. RF power amplifiers, serving as the final stage of communication systems, are highly susceptible to damage due to their high power output. Given that power amplifiers are relatively expensive and delicate components, it is crucial to focus on protecting them during the design phase to prevent issues such as overheating, over-temperature, over-voltage, and overloading, which can lead to amplifier failure or malfunction. Combining with the practical engineering applications of RF power amplifiers in ultra-short wave communication, this paper designs and constructs the detection circuit and protection circuit of a composite power amplifier system, and studies their operational capabilities, respectively. The designed detection and protection circuits enable real-time monitoring of signals with pulse widths ranging from 50  $\mu\text{s}$  to 110  $\mu\text{s}$ , corresponding to the duty cycle 4% to 30%, the circuit power response range -35 dBm to 0 dBm, and the switch insertion loss  $\leq 2.6$  dB. This circuitry has already been applied in the latest airborne equipment, demonstrating its positive impact on enhancing the reliability and lifespan of power amplifiers.

**Key words:** power amplifier; protection circuit; over pulse width; detection

射频功放作为通信系统的最末级, 因功率大而极易损害。由于功率放大器是一种相对比较昂贵, 且比较脆弱的器件, 因此在设计功率放大器时, 应重点关注如何保护功率放大器, 以避免过热、过温、过压、过载等造成功放故障或者失效<sup>[1-4]</sup>。

射频功放保护控制电路的发展历程源远流长,

从早期的模拟保护方法到现代的数字化控制策略, 经历了多个阶段的演进。

早期, 射频功放的保护主要依赖于模拟保护电路。在 20 世纪 70—80 年代, 功放过载保护通常使用硅限制二极管 (PIN 二极管) 进行功率检测, 当功率超过设定阈值时, 电路会通过开关动作实现功

收稿日期: 2024-01-19

作者简介: 周湘, 博士生, 主要从事微波电路设计、射频功率检测方面的研究。

\*通信作者 E-mail: 977907806@qq.com

放的断开。这种保护方法虽然简单，但受限于硬件元器件的性能，难以实现高精度和快速响应<sup>[5-6]</sup>。

随着集成电路技术的进步，功放保护控制电路开始向数字化方向发展。20 世纪 90 年代，高速模数转换器（ADC）和数字信号处理器（DSP）的应用使得功放的实时监测和控制成为可能。这一时期功放的各种参数如输出功率、工作温度等可以通过数字化方式进行监测，从而实现更精确的保护。

近年来，随着射频技术的不断发展，功放的输出功率不断提升，通信系统对功放保护控制的要求越来越高。同时，通信系统中的复杂性和多样性不断增加，如多通道、多频段、多模式等。因此，功放保护控制电路需要适应更广泛的应用场景，引入了更多的技术和策略。

射频功放保护控制电路的设计和应用涉及多个关键技术领域，其中硬件设计、数字信号处理和智能算法等方面都取得了显著的进展。

在硬件设计方面，功放保护控制电路的关键是实时监测功放器件的工作状态。文献 [7] 提出了一种新颖的功放过载保护方法，利用信号采样技术对功放输出信号进行实时监测。此外，文献 [8] 通过设计基于反射系数的保护电路，实现了对功放器件匹配情况的实时监测和保护，提高了系统的稳定性。

数字信号处理技术的应用使得功放保护控制电路能够实现更精确的保护策略。文献 [9] 提出了一种基于 FPGA 的功放过热保护方法，该方法通过实时监测功放器件的温度，动态调整功放工作状态，防止过热损坏。

近年来，深度学习技术的引入为功放保护控制电路带来新的可能性。文献 [10] 提出了一种基于深度学习的功放过载保护方法，通过训练神经网络对功放过载特征进行识别，实现了对过载状态的准确检测和保护。此外，功放保护控制电路在 5G 通信和毫米波技术等领域也得到广泛应用。文献 [11] 中设计了适用于毫米波通信的功放保护电路。

本文详细介绍了工程上常采用的功放伺服控制保护电路，包括功放过激励、过脉宽、过占空比保护电路的应用，通过电路原理设计实现了一款功放系统的检测及保护电路产品。

## 1 功放过激励、过脉宽、过占空比保护电路设计

功率放大器<sup>[12]</sup>的输出功率随着输入功率的增大而增加，相应的输出端噪声功率也会增加，一个

二端口网络的噪声系数  $F$  公式为：

$$F = \frac{N_0}{GkTB}$$

式中， $N_0$  为输出端噪声功率； $G$  为带宽  $B$  内网络的可用增益； $k$  为波尔兹曼常数； $T$  为温度。

由此可见，对于增益固定的放大器，过激励导致输出端噪声功率升高，进而恶化系统的噪声系数。同样地，工作在脉冲条件下的雷达发射机对触发脉冲的宽度和占空比要求非常严格。较窄的脉冲可以提供更好的距离分辨率，因为信号更集中，有更好的时间分辨能力；相反，宽的脉冲（过脉宽）会导致距离分辨率变差。除此之外，占空比会影响平均功率，较高的占空比（过占空比）意味着系统在较长时间内处于高功率状态，这会导致器件因长时间热量积累而损坏。因此，在这些异常情况下，当功率放大器超过安全工作范围时，需要对功放实施保护。通过对功放的输入信号的功率、脉宽、占空比进行监测，设置门限值，一旦发现功放过激励、过脉宽、过占空比，会自动切断输入信号，达到保护功放的目的。

功放保护电路<sup>[13]</sup>工作的原理框图如图 1 所示。当输入信号  $P_i$  的输入功率、占空比、脉冲宽度超过预先设定值时，检测模块立刻驱动射频开关衰减信号（衰减量如 20 dB 或 30 dB），保护系统功放。

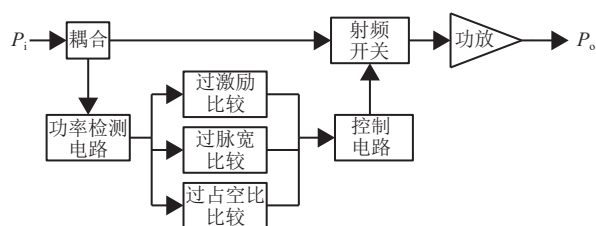


图 1 过激励、过脉宽、过占空比保护电路工作原理图

图 1 中过激励、过脉宽、过占空比的检测电路可独立工作，也可以集成到一个器件内，电路设计灵活，应用简单。

### 1.1 检测模块工作原理

射频信号通过检波电路进行功率检测<sup>[14-15]</sup>，当功率检测模块的电压信号中的电压值大于门限电压，则输出高电平提示，该高电平可控制开关、衰减等模块断开功放系统链路，通过断开链路的方式来保护功放，同时，该电路中增加了延时电路设计，延时可达到微秒级，可应用到射频微波固态功率放大器中。

射频信号过激励检测电路原理图和电路图如图 2 和图 3 所示。

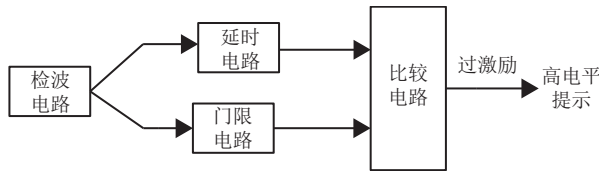


图 2 射频信号过激励检测电路原理

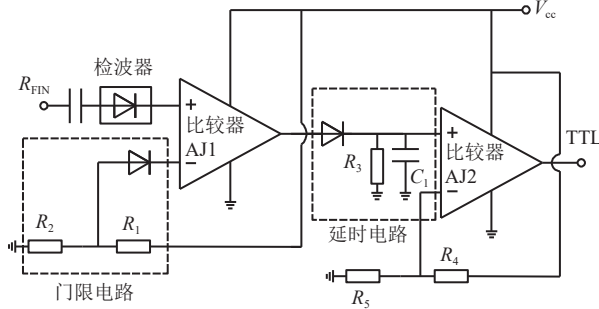


图 3 射频信号过激励检测电路图

比较器 AJ1 的输出为:

$$U_{AJ1} = \begin{cases} U_1 & U_{RF} > U_G \\ 0 & U_{RF} \leq U_G \end{cases}$$

式中,  $U_1$  为 AJ1 的工作电压;  $U_{RF}$  为通过检波器的输出电压;  $U_G$  为门限电路输出电压:

$$U_G = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{DD} \right) V$$

在实际的电路中, 门限电路所用到的二极管有开启电压损耗, 因此实际的  $U_G$  可修正为:

$$U_G = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{DD} - V_{ON} \right) V$$

式中,  $V_{ON}$  为二极管的开启电压, 一般为  $0.3 \sim 0.7 \text{ V}$ 。

比较器 AJ2 的输出电压为:

$$U_{AJ2} = \begin{cases} U_2 & U_{AJ1} > U_T \\ 0 & U_{AJ1} \leq U_T \end{cases}$$

式中,  $U_2$  为 AJ2 的工作电压;  $U_T$  为:

$$U_T = \left( \frac{R_4}{R_4 + R_5} V_{DD} \right) V$$

此设计的目的是当输入信号是脉冲信号时, 通过 RC 延时电路将脉冲展宽, 经过两级比较器的输出, 可得到展宽的 TTL 高电平输出。

### 1.2 功放过空比保护电路

占空比<sup>[16]</sup>是指信号的高电平时间与一个完整

周期的比例, 通常表示为:

$$D = \frac{\text{高电平时间}}{\text{一个周期的时间}} \times 100\%$$

设定一个阈值  $D_{\text{threshold}}$ , 当占空比超过这个阈值时, 触发保护机制。

过占空比保护电路中将射频信号转换为带有射频包络信息的直流信号, 再通过脉冲信号保宽电路转换为与输入信号脉冲宽度一致的 TTL 保宽信号。然后将 RC 微分电路的电压与门限电压相比, 当过占空比时输出高电平提示。同样地, 该高电平可控制开关、衰减等模块断开功放系统链路, 通过断开链路的方式来保护功放。

射频信号过空比检测的电路原理图和电路图如图 4 和图 5 所示。

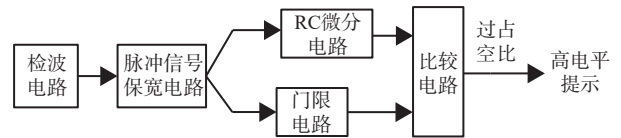


图 4 射频信号过空比检测电路原理

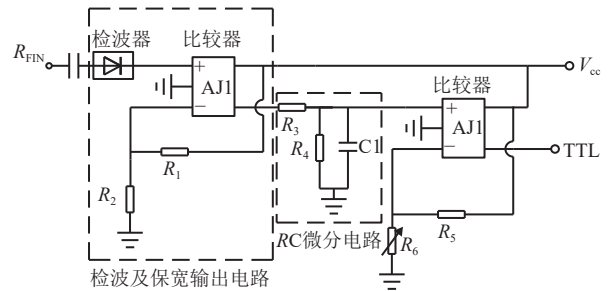


图 5 射频信号过空比检测电路图

### 1.3 功放过脉宽保护电路

脉宽是脉冲信号在时间上的持续时间。通常表示为  $T_{\text{脉宽}}$ , 过脉宽是指脉宽占脉冲周期的比例, 通常以百分比表示:

$$T_D = \frac{T_{\text{脉宽}}}{T_{\text{脉宽周期}}} \times 100\%$$

过脉宽保护电路中, 射频脉冲信号通过耦合或者直接输入等方式进入检波器进行检波, 将射频信号转换为带有射频包络信息的直流信号, 再通过脉冲信号保宽电路转换为与输入信号脉冲宽度一致的 TTL 保宽信号。该 TTL 保宽信号分两路, 一路进行脉冲前沿的提取, 产生一个基准脉宽, 即所需设定的标准脉冲宽度, 产生的基准脉宽与 TTL 保宽信号通过比较电路进行比较, 当 TTL 保宽信号的脉冲宽度大于基准脉宽时, 输出高电平, 此高电

平可作为射频开关、功放电源等可控电路的驱动控制信号,进而实现保护功放正常运行的目的。

射频信号过脉宽检测的电路原理图和电路图如图 6 和图 7 所示。

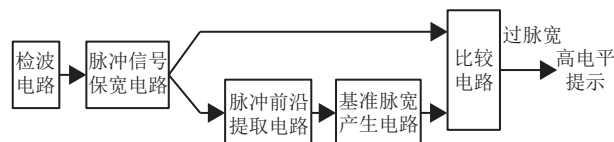


图 6 射频信号过脉宽检测电路原理

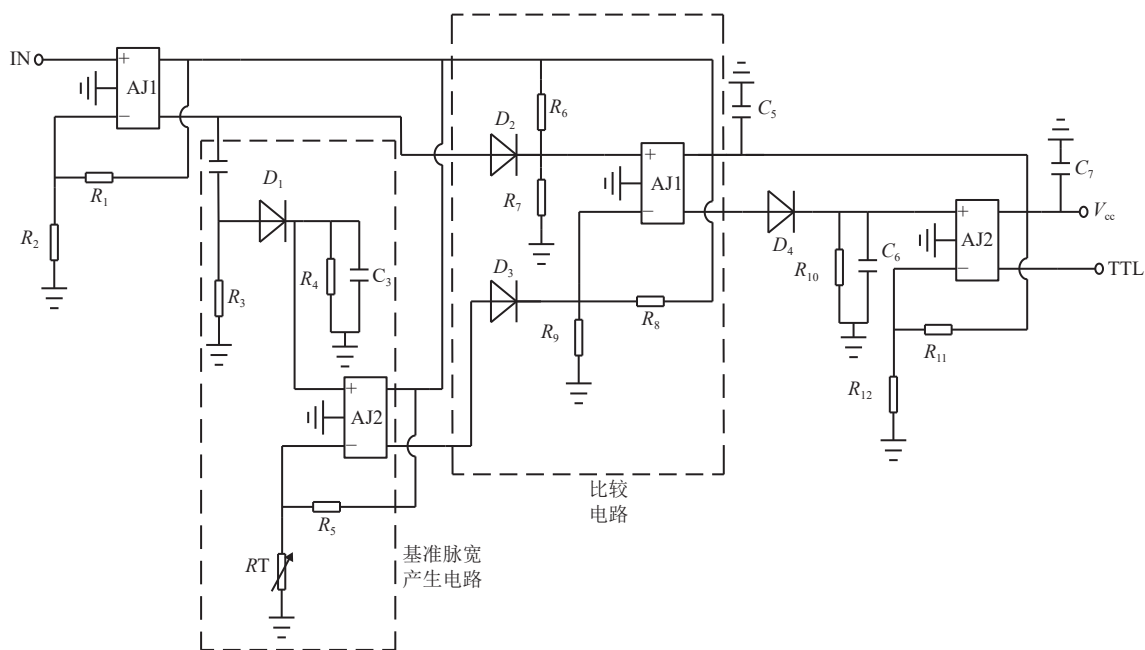


图 7 射频信号过脉宽检测电路图

## 2 产品实物及测试结果

为测试此 3 种检测保护电路的性能,依照图 3、图 5 及图 7 的电路,设计了一款功放过激励、过脉宽、过占空比保护电路,并与耦合器、开关等单元电路整合形成一款功放系统的检测及保护电路产品,产品实物如图 8 所示,现场测试如图 9 所示。



图 8 产品实物图

功放过激励、过脉宽和过占空比保护电路的测试,是为了验证这些保护机制在实际工作中是否能够有效地检测并响应可能对功放系统造成损害的异常情况。

功放过激励测试:通过逐渐增加输入信号的强度,观察保护电路是否能够及时检测到过激励,并

采取相应的措施,如降低放大器增益或切断输入信号。

过脉宽测试:发送具有不同脉冲宽度的信号,观察保护电路是否能够准确地识别并采取保护措施,如限制输入脉冲宽度或切断信号。

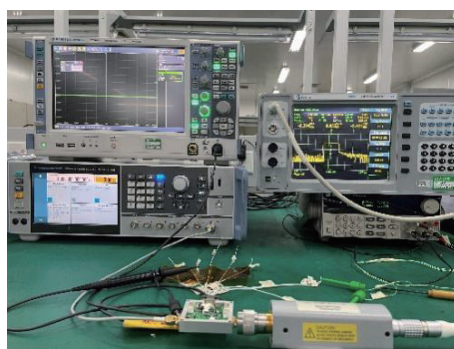


图 9 现场测试图

过占空比测试:发送具有不同占空比的信号,观察保护电路是否能够检测到过占空比,并采取相应的保护措施,如限制占空比或切断信号。

采用此功率检测保护电路来验证方案的实际性能。输入信号采用 R&S 的 SMA100B 信号源,测试频率范围 1~4 GHz,功率范围 -35~20 dBm,并以 Boonton 的峰值功率计 4500 b 测得的功率为

标准进行比较, 测试结果如表1所示。

根据表1, 本文设计的检测保护电路能够对脉宽范围50~110  $\mu\text{s}$  的信号进行实时监测, 对应的占空比为4%~30%, 在-35~0 dBm 功率范围内对电路做出响应。此外, 开关的插入损耗 $\leq 2.6$  dB, 保证了当输入信号的功率、脉宽、占空比低于设置门限值时, 射频通道正常传输功率。当输入信号过激励、过脉宽、过占空比时, 开关切换成隔离状态, 对应的隔离度 $\geq 35$  dB, 有效地切断了射频通道的信号输入, 以达到保护功放的目的, 该电路产品已经在最新机载设备上获得应用, 用户反馈良好。

表1 测试结果

指标	测试值
开关插损/dB	$\leq 2.6$
开关隔离/dB	$\geq 35$
脉宽检测门限/ $\mu\text{s}$	50~110
占空比检测门限/%	4~30
功率检测门限/dBm	-35~0

### 3 结束语

保护控制电路在功率放大器的正常运行中起着十分重要的作用, 本文中的几种功放伺服控制保护电路都有实际的工程应用经验, 电路简单实用, 对功放过激励、过脉宽、过占空比以及功率波动等情况, 能够自动控制保护, 增加了功放的可靠性和使用寿命, 可以广泛应用于机载设备等对可靠性要求高的场景。

射频功放保护控制电路在通信系统中的重要性不断上升, 未来发展将聚焦于智能化保护、多频段和多模式适应、高性能硬件设计等方向<sup>[17-20]</sup>。

### 参考文献

- [1] RATHI A, SRINIVASAN P, GUARIN F, et al. Temperature-dependent study of large-signal reliability of p-FET-based power amplifier for mmWave applications[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2023, 23(3): 412-418.
- [2] TONG Z K, YE Z C, RIVAS-DAVILA J. Class DE switch-mode power amplifier using GaN power HEMTs: High-efficiency power amplifier for 13.56 MHz[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2022, 23(3): 72-79.
- [3] LYU H F, CAO Y C, CHEN K L. Linearity-enhanced and highly efficient Doherty power amplifier: 16th high efficiency power amplifier student design competition[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2021, 22(10): 62-69.
- [4] GU L, ZULAUF G, ZHANG Z M, et al. Push-pull class  $\Phi$  RF power amplifier[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(10): 10515-10531.
- [5] SANABRIA-BORBON A, JAYASANKARAN N G, HU J, et al. Analog/RF IP protection: Attack models, defense techniques, and challenges[J]. *Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on*, 2020, DOI: 10.1109/TCSII.2020.3040725.
- [6] LEONHARD J, SAYED A, LOUËRAT M M, et al. Analog and mixed-signal IC security via sizing camouflaging[J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2021, 40(5): 822-835.
- [7] HAO R R, ZHANG X D, GAO H, et al. A novel high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) protection circuit for RF applications[J]. *Microelectronics Journal*, 2019, 84: 1-8.
- [8] L-3 Communications Corporation. Patent issued for combined active and passive high-power RF protection circuit: America, 10038477[P]. 2018-05-16.
- [9] LOWATON A C, BAÑEZ L F L. ESD protection circuit for V-band RF applications in a 65nm CMOS technology[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 600(1): 012025.
- [10] HAO R, ZHANG X, GAO H, et al. A novel high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) protection circuit for RF applications[J]. *Microelectronics Journal*, 2019, 84: 1-8.
- [11] GONZALEZ J L, SOLAR H, ADIN I, et al. A 16-kV HBM RF ESD protection codesign for a 1-mW CMOS direct conversion receiver operating in the 2.4-GHz ISM band[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(9): 2318-2330.
- [12] CHU C H, DHAR S K, ZHOU X Y. Young professionals' experience during high efficiency power amplifier student design competition young professionals[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2023, 24(3): 85-88.
- [13] YU W T, LIU S Q. Design of protection circuit for current-mode power amplifier[J]. *Power Electronics*, 2007, DOI:10.1002/jrs.1570.
- [14] BOCH M, KARL S, SLADKY R, et al. Tailored haemodynamic response function increases detection power of fMRI in awake dogs (Canis familiaris)[J]. *NeuroImage*, 2021, 224: 117414.
- [15] SHAYGAN M, WANG Z X, ELSAYED M S, et al. High performance metal-insulator-graphene diodes for radio frequency power detection application[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(33): 11944-11950.
- [16] OLUWASOGO E S, CHA H, NGUYEN T T. Beta-quasi-Z-source ( $\beta$ -qZS) DC-DC converter without duty cycle constraint for wide input voltage applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(12): 12784-12794.
- [17] ZHANG Z Q, LIAO X P. N<sup>+</sup> GaAs/AuGeNi-Au thermocouple-type RF MEMS power sensors based on dual thermal flow paths in GaAs MMIC[J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1426.
- [18] THAKUR S K. Design and performance of high voltage power supply with crowbar protection for 3- $\Phi$  high power RF amplifier system of cyclotron[J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 11(7): 1-14.
- [19] AKHILESH T, AMRITA S, SACHIN R, et al. FPGA based control and protection unit of a multichannel pulsed power supply for solid state RF amplifiers[J]. *I-Manager's Journal on Electrical Engineering*, 2020, 13(4): 49.
- [20] REN F, LIU M, JI Z P, et al. Development of a power supply protection circuit for synthetic aperture radar array[J]. *Space Electronics Technology*, 2017, 14(1): 90-94.