

电源调制电路在 T/R 组件中的应用与分析

葛园园¹,余振坤¹,梁东东²,罗川川²

(1. 南京电子技术研究所, 南京 210039; 2. 解放军 63612 部队, 甘肃 酒泉 735000)

摘要:简述了电源调制电路在 T/R 组件中对抑制自激和应用在氮化镓(GaN)射频放大器中的重要作用,论述了 p 型金属氧化物-半导体(p-MOS)场效应晶体管和 n 型金属氧化物-半导体(n-MOS)场效应晶体管两种调制电路的原理,对两种电路特性进行比较,n-MOS 在调制电压、电流和速度上优于 p-MOS,但由于 p-MOS 电路简单,其在低功率应用中也广泛使用。最后,对调制电路中出现的阻尼振荡产生的原因进行分析,得到了通过调整外围参数进行优化的方法。

关键词:电源调制;氮化镓;p-MOS 调制;n-MOS 调制;发射自激

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2020)02-0071-04

引用格式:葛园园,余振坤,梁东东,等. 电源调制电路在 T/R 组件中的应用与分析[J]. 现代雷达, 2020, 42(2): 71-74.

GE Yuanyuan, YU Zhenkun, LIANG Dongdong, et al. Application and analysis of power modulating circuits in T/R modules[J]. Modern Radar, 2020, 42(2): 71-74.

Application and Analysis of Power Modulating Circuits in T/R Modules

GE Yuanyuan¹, YU Zhenkun¹, LIANG Dongdong², LUO Chuanchuan²

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

(2. The Unit 63612 of PLA, Jiuquan 735000, China)

Abstract:The importance of power modulating circuits on restraining the transmission self-oscillation in T/R modules and GaN amplifiers are described. The principles of p-metal oxide semiconductor (p-MOS) and n-metal oxide semiconductor (n-MOS) field effect transistor modulating circuits are discussed. Two modulating circuits are compared, and the n-MOS modulating circuit is superior to that of p-MOS at modulating voltage, current and speed, but p-MOS modulating circuit is also widely used in low power application because of simple circuits. Finally the reason of damping oscillation in modulating circuits is analyzed, and the optimizing method by adjusting periphery circuits is realized.

Key words:power modulating; GaN; p-MOS modulating; n-MOS modulating; transmission self-oscillation

0 引言

随着相控阵雷达对 T/R 组件的需求不断提高,组件中新型大功率元件的运用和组件本身复杂度持续提升,这必然带来组件的电磁兼容和隔离度的恶化,最终致使组件和器件的稳定性下降^[1]。在有源阵列上工作时,单个组件出现发射自激将致使整个阵面的接收通道堵塞而无法工作,组件的自激故障由软故障成为整个阵面甚至电子系统的单点故障,可靠性大大降低^[2]。虽然通过阵面自激检测电路可以及时发现故障通道并处理,但电路的使用条件有限,且在任务执行的关键时期内必须确保万无一失,最有效的方法是接收支路和发射支路的供电在时间上错开,即不允许出现发射和接收同时供电的情况,这种方法可以完全杜绝自激现象。此外,第三代半导体器件在相控阵中的应用极大地提升了 T/R 组件的输出功率,该器件必须

同时配套漏极调制电路才能稳定工作^[3-4]。因此,电源调制电路成为 T/R 组件中不可缺少的部件之一,其设计的优劣直接关系到整个组件的成败。本文从基本的调制原理出发,对比分析了不同电路的优缺点与应用范围,最后通过外围电路分析了调制中出现阻尼振荡的优化方法。

1 电源调制电路的原理与分类

应用在固态射频放大器中的大功率调制电路根据主开关管类型分为 p-MOS 开关管与 n-MOS 开关管^[5-6]。两种开关管的特性决定了调制电路的形式和特点,在应用中各有优缺点。

1.1 p-MOS 调制

由于 p-MOS 开关管是通过负压开启,因此可以通过反向驱动电路自偏压分压工作实现 MOS 管的开启和关断。其原理为小信号的晶体管-晶体管逻辑(TTL)信号经过反向放大电路驱动开关管栅极电路的电平,驱动电路断开时开关管栅极和源极处于同一电位,开关管截止;驱动打开接通时,待调制的高压通过电阻和

基金项目:国防科研课题资助项目(2015AA8073039B)
通信作者:葛园园 Email:910995811@qq.com
收稿日期:2019-10-29 修订日期:2019-12-30

驱动管导通,栅极电位由于电阻分压,相对源极产生负压差,从而开启开关管,实现调制目的,其标准电路如图 1 所示。

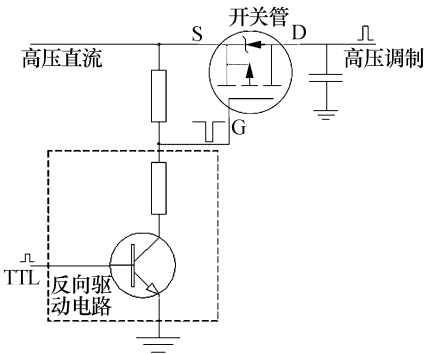


图 1 p-MOS 调制原理图

该电路输出的时延和脉宽受驱动电路放大倍数和驱动电流的影响较大,一般而言,要提高调制速度,需要减小电阻阻值,但电阻和驱动器功率需要增加,所以需要选择合适的电阻。此外,由于开关管栅极放电的原因,实际脉宽比输入有一定展宽,同时没有放电回路,后沿拖尾比较严重,这对于比较窄的脉冲和负载较轻的应用影响较大。随着调制电路的应用推广,各厂家已推出集成了驱动、调制和放电一体的集成电路,以上问题已经得到很大的改善。

1.2 n-MOS 调制

n-MOS 开关管的控制必须是正压开启,要求栅极电位高于需要调制的工作电压,这使得无法像 p-MOS 电路那样由电阻分压得到。因此,必须额外增加一路辅助电源,使其浮动在工作电源之上,通过调制辅助电源打开或关闭开关管。该电路的驱动电路已经比较成熟,下面以美国凌特公司的 LTC4444 为例分析其传统电路,如图 2 所示(辅助电源为 4 V~15 V)。

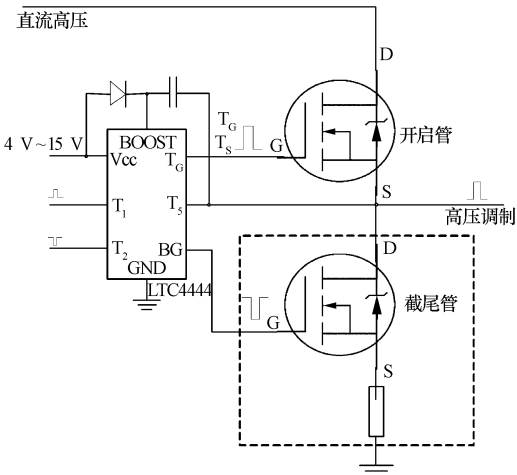


图 2 n-MOS 调制原理图

通过驱动电路对小信号的 TTL 调制信号进行放大,并且将电位抬高,使 T_G 调制电位浮动于 T_S 电位之上,

使得 $T_G - T_S = V_{cc}$ 从而打开开启管。对一些要求快速后沿的电路,可以同时串联另一个开关管作为截尾管,这时驱动电路中同时送入和调制反向的脉冲,经过放大后从 BG 连接至截尾管栅极。为防止开启管和截尾管同时打通,截尾管调制信号经过驱动电路后较开启管调制略有延迟。为保护截尾管工作时由于大电流放电而损坏器件,一般需要在放电回路中增加限流电阻。截尾管通过在脉冲结尾时将电路中的电荷放掉,实现快速放电的功能,从而具备快速下降沿的能力。

对于特殊应用的负载功率管,其本身的静态电流要求非常大,短时间内负载就可以完成放电。因此,该电路也可以简化为直接一个开启开关管,驱动电路也可以采用更加简单的单路驱动 LTC4440 即可。

1.3 调制电路比较

对目前市场上流行的这两种开关管进行比较:(1)在相同功耗条件下,n-MOS 的内阻比 p-MOS 小一个量级,这使得其调制电流更大,速度更快;(2)即使 p-MOS 电路通过外围芯片进行放电,其放电电流和直接通过 n-MOS 进行放电的电流也是无法比较的,所以 n-MOS 电路的调制脉冲前后沿远远优于 p-MOS;(3)n-MOS 器件本身的应用广泛程度远高于 p-MOS,这使得其工作电压、调制功率等指标优于 p-MOS。电路具体比较如表 1 所示。

表 1 两种调制电路比较

比较项目	p-MOS 调制	n-MOS 调制
外围电路形式	简单	复杂,需要辅助电源
调制电压/V	几十	>100
调制电流/A	几十	100~200
内阻	几十毫欧	数毫欧
调制速度	百纳秒至微妙	数十纳秒

1.4 调制电路的选择

通过上面分析,两种电路具有不同的优缺点,可以根据实际情况选择合适的电路。

在高压、大电流应用中,n-MOS 器件调制效果明显优于 p-MOS 器件,因此组件的大功率放大器的调制优选 n-MOS 电路;而对一些电流较小,开关压降影响不大的情况也可以用 p-MOS 调制。

此外,对于具有较大电容的容性负载情况,虽然 p-MOS 调制电路已经设计出可以通过驱动芯片进行放电的回路,但负载阻抗和本身静态阻抗的限制使得后沿时间较长,且放电功率较大;而 n-MOS 电路中可以设计一个专门的截尾开关管,增加了放电电流,使得后沿速度大大提高。

由于放大器自激需要额外的供电能力,也可以利用“自激电流”实现后沿放电,所以如果只是针对 T/R 组件中防止发射自激,要求电路简单可靠,p-MOS 调制

电路可以满足系统的需求。

2 调制脉冲引起的电压过阻尼对电路的影响和解决方法

放大器及其工作的调制电源由于外围电路和脉冲前后沿冲击的影响,势必产生电压和电流的阻尼振荡。当固态放大器的功率较小时,由于负载电阻较大,产生的影响不明显;当固态器件的功率大幅度增长,等效负载电阻越来越小,而调制速度越来越快时,阻尼振荡效果越来越明显,振荡频率对工作频率产生“搬移”并出现杂散,将影响雷达的正常工作^[7-8]。

固态放大器输出馈电电路的形式如图 3 所示,当调制管开关打开或关闭的瞬间, u_s 突然跳变,可以通过方程解出电阻两边的电压方程。

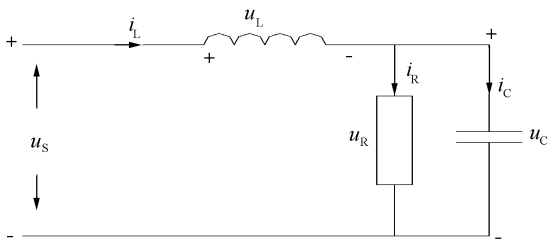


图 3 放大器馈等效电路图

图 3 中, L 为馈电电感, R 为功率管等效直流阻抗, C 为外围分布电容, u_L 为馈电电感两端压降, u_R 为功率管等效直流阻抗两端压降, u_C 为外围分布电容两端压降, u_s 为源的电压,方向见图 3,其为时间的函数; i_L 为流经馈电电感电流, i_R 为流经功率管等效直流阻抗电流, i_C 为流经外围分布电容电流,方向见图 3,其为时间的函数。

根据图 3 的电压和电流关系,得到三个恒等式

$$u_C(t) = u_R(t) \quad (1)$$

$$u_L(t) + u_R(t) = u_s(t) \quad (2)$$

$$i_C(t) + i_R(t) = i_L(t) \quad (3)$$

同时

$$i_C(t) = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{du_R}{dt} \quad (4)$$

$$i_R = \frac{u_R(t)}{R} \quad (5)$$

$$u_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = u_s(t) - u_R(t) \quad (6)$$

用 $u_R(t)$ 的方程替代式(3)中的变量,可以得到如下常数二阶微分方程

$$LC \frac{d^2 u_R}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{du_R}{dt} + u_R = u_s \quad (7)$$

其特征根方程为

$$LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1 = 0 \quad (8)$$

解得特征根为

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

R 、 L 、 C 取值不同时,特征根出现三种情况:

当 $R < \frac{1}{2\sqrt{LC}}$ 时, $s_{1,2}$ 为两个不相等的实根,此时为过阻尼情况。

当 $R = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$ 时, $s_{1,2}$ 为两个相等的实根,此时为临界阻尼情况。

当 $R > \frac{1}{2\sqrt{LC}}$ 时, $s_{1,2}$ 为共轭复数根,此时为欠阻尼情况。

调制电压波形出现振荡,就是因为电路处于欠阻尼状态。电阻 R 为功率管等效阻抗,由器件功率决定,一般无法更改,要使电路进入临界阻尼甚至过阻尼状态,可以采取的手段为增加馈电电感 L 或者减小电容 C 。但这两种手段都会使调制的前后沿恶化。因此,必须根据实际情况合理选择外围参数。

3 实例和测试结果

某项目调制负载上有较大电容,分别用 n-MOS 电路和 p-MOS 电路进行调制,得到两种电路的后沿如图 4 所示,上为 n-MOS,下为 p-MOS。由于放电原因,p-MOS 后沿明显拖尾严重。

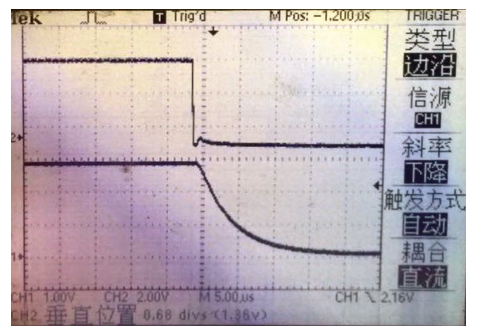


图 4 容性负载下两种调制后沿比较

某微波功率放大器需要大电流的高压调制,特别对调制前后沿有要求,由于分布电容和滤波电容较大(数万 pF),只能采用 n-MOS 调制方案,最终得到调制电流 100 A,电压 50 V,前后沿 50 ns 左右,输出电压波形如图 5 所示。

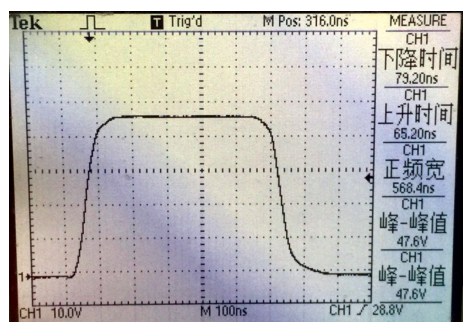


图 5 采用 n-MOS 调制输出电压波形

4 结束语

电源调制电路是 T/R 组件中的关键部件之一,选择合适的调制电路是 T/R 组件实现工程应用的关键,也是保证组件稳定可靠的前提,调制电路的性能提升是开发更大功率 T/R 组件的基础。此外,调制上升、下降沿的速度和放大器阻尼振荡相关联,不可能无限地提升该指标,必须在保证放大器稳定的前提下进行调制电路的设计。本文验证了在高压、大电流应用或具有较大电容的容性负载情况,选择使用 n-MOS 开关管调制,合理选择馈电电感 L 或者减小电容 C ,最终成功解决了阻尼振荡;同时,最大限度保证了前后沿速度,满足工程需求。

参考文献

[1] 张光义,赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
ZHANG Guangyi, ZHAO Yujie. Phased array radar technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.

[2] 葛园园,马福博. 相控阵 T/R 组件中功放自激检测电路设计与实践[J]. 现代雷达, 2017, 39(12): 67-69.
GE Yuanyuan, MA Fubo. Design and practice of self-excitation detection circuit for power amplifier in phased T/R components[J]. Modern Radar, 2017,39(12): 67-69.

[3] 郑新,李文辉,潘厚忠,等. 雷达发射机技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
ZHENG Xin, LI Wenhui, PAN Houzhong, et al. Radar transmitter technology[M]. Beijing: Publishing House of E-

lectronics Industry, 2005.

[4] BAHLI, BHARTI P. 微波固态电路设计[M]. 2版. 郑新,赵玉洁,刘永宁,等译. 北京:电子工业出版社,2006.
BAHL I, BHARTI P. Microwave solder state circuit design [M]. 2nd ed. ZHENG Xin, ZHAO Yujie, LIU Yongning, et al, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2006.

[5] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
ZHANG Zhansong, CAI Xuansan. Principle and design of switching power supply [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

[6] DHAR J, ARORA R K, GARG S K, et al. Performance enhancement of pulsed solid state power amplifier using drain modulation over gate modulation [C]// 2009 International Symposium on Signals, Circuits and Systems. Iasi: IEEE Press, 2009: 1-4.

[7] 饶婷婷. L波段宽带脉冲功率放大器的设计[D]. 成都:电子科技大学,2014.
Rao Tingting. The pulse power amplifier in the L-band with wide band [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.

[8] 余振坤,刘登宝.S波段宽带 GaN 芯片高功率放大器的应用研究[J]. 微波学报,2011,27(2): 68-71.
YU Zhenkun, LIU Dengbao. Application research on broad-band amplifier with GaN power chips in S band[J]. Journal of Microwaves,2011,27(2): 68-71.

葛园园 女,1977年生,硕士,高级工程师。研究方向为相控阵雷达有源组件控保技术。

余振坤 男,1976年生,大学本科,研究员级高级工程师。研究方向为相控阵雷达有源组件发射技术。

梁东东 男,1984年生,大学本科,工程师。研究方向为雷达总体技术。

罗川川 男,1986年生,大学本科,工程师。研究方向为雷达信号处理。

(上接第 70 页)

[5] SONG J X, LI C H, XIA W, et al. A simplified DBF channels calibration algorithm and implementation [C]// Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering Lecture Notes in Electrical Engineering. [S.l.]: Springer, 2013: 543-550.

[6] 丁坚. 数字阵列天线的阵面监测方法研究[J]. 现代雷达,2016, 38(10): 61-64.
DING Jian. A study on array monitor methods of digital array

antenna[J]. Modern Radar, 2016, 38(10): 61-64.

张玉华 男,1978年生,硕士,研究员级高级工程师。研究方向为数字接收机技术等。

肖达 男,1987年生,博士,工程师。研究方向为数字接收机技术。

刘辉 男,1989年生,硕士,助理工程师。研究方向为数字接收机技术。