

文章编号: 2095-4980(2021)04-0684-04

宽带小型化限幅放大器设计

吕俊材, 吕立明, 曾 荣

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 基于共集共基电路的宽带小型化限幅放大器设计, 利用三极管发射结特有的 IV 特性, 将输入三极管工作在共集组态, 并在后级级联共基组态三极管, 实现输入信号非饱和削波, 达到限幅目的。由于共集与共基放大电路都具有宽带特性, 故其级联后电路特性也具有宽带特性。本文利用该结构设计了一款宽带限幅放大器, 工作带宽覆盖 10~200 MHz, 增益大于 25 dB, 限幅输出功率 2 dBm, 输入输出回波损耗均大于 20 dB。利用薄膜电路工艺设计实现小型化限幅放大器设计, 电路尺寸为 7.15 mm×8.1 mm, 与印制板(PCB)电路相比, 尺寸明显较小。该电路结构精简, 性能优越, 适合分离元件电路设计。

关键词: 限幅放大器; 共集共基电路; 宽带放大器; 薄膜电路

中图分类号: TN903

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018377

Design of broadband compact limiting amplifiers

LYU Juncai, LYU Liming, ZENG Rong

(Institute of Electronics Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Common collector common base cascaded transistor structure can compose limiting amplifiers because of special IV curve between the emitter junctions. The first transistor is common collector and the second transistor is common base so that the amplifier can limit the output wave to non-saturation, which means limiting the output power. Because both of the common collector and common base transistors have broadband structures, the final amplifiers are of broadband characteristic. A broadband limiting amplifier is designed, which operates from 10 MHz to 200 MHz, with the gain of 25 dB, the limiting power of 2 dBm, the return loss upper 20 dB. A compact limiting amplifier is designed by thin film circuit technology, whose size is 7.15 mm×8.1 mm, smaller than that by traditional Printed Circuit Board (PCB) technology. The limiting amplifier has smaller size and more excellent performance.

Keywords: limiting amplifiers; common collector common base circuits; broadband amplifiers; thin-film circuits

在雷达与通信系统中, 接收信号功率范围很大, 接收机接收到的功率为-120~0 dBm, 动态范围高达 120 dB。而目前的模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)动态范围较小, 无法处理如此大范围的信号, 因此在中频放大阶段, 普遍需要采用动态压缩技术^[1-7]。限幅放大器是结构最为简单的动态范围压缩电路, 具有瞬时压缩的特点, 可用在脉冲体制接收系统中, 也可用来保护接收机后续设备不饱和、不过载。优点是结构简单, 实现容易, 成本低; 缺点是可控范围比较窄, 而且有较大的非线性失真。

限幅放大器主要由饱和限幅结构和截止限幅结构组成。饱和结构主要利用晶体管饱和工作原理, 结构简单, 但受器件饱和恢复时间和非线性相位失真制约, 限幅性能不佳。截止限幅结构一般为差分对或平衡式限幅结构, 具有偶次谐波抑制和宽带限幅特性^[8-9]。本文从平衡式二极管限幅原理出发, 分析三极管共集共基电路限幅原理, 并利用该结构进行宽带限幅放大器小型化设计。

1 平衡式二极管限幅器的原理

平衡式二极管限幅器，按照电路结构，分为并联限幅器与串联限幅器，图 1 为平衡式二极管限幅器的电路原理图。

为获得对称的削波波形，即具有偶次谐波抑制的能力，可将 2 个二极管串联或并联组成限幅器，电路如图 1(a)与图 1(b)所示，2 个电路为互补电路，限幅特性等效。在图 1(b)中， U_{EE} 为负电压，为二极管提供正向导通的偏置，在小信号情况下，二极管 D_1 与 D_2 都导通，此时其二极管静态电流可用式(1)计算：

$$I_D = \frac{U_{EE} - 0.7}{R_1 + R_2} \tag{1}$$

式中： I_D 为二极管静态电流； R_1 与 R_2 为偏置电阻；

0.7 为二极管导通时两端电压(单位：V)，根据二极管电流电压方程^[5]，可算出其二极管导通时的动态电阻为：

$$R_D = \frac{0.026}{I_D} \tag{2}$$

式中 R_D 代表二极管导通时的动态电阻。

如图 1(b)所示，此时限幅器相当于 2 个电阻串联，调节电阻 R_2 使二极管静态电流为一合适值，限幅器小信号衰减较小。当输入信号增大时，在信号的正半周，二极管 D_1 的正极电位比负极电位高，因此始终导通。当输入信号正值不断增加到某一门限值时(正限幅点)， D_2 的负极电压比正极电压高， D_2 开始截止，此时在负载 R_L 上的输出电压近似不变，达到正向削波作用，直到输入信号重新又下降到限幅点时，输出电压才随其下降。在信号下降到某一门限值时(负限幅点)， D_1 的正极电压比负极电压低，此时 D_2 管因 U_{EE} 的作用仍然导通，故在负载 R_L 上得到一个恒定的电压输出，实现负向削波^[5]。因此，不论输入信号是正半周还是负半周，只要超过门限值，输出电压就不变，于是完成了双向削波，起到了限幅的作用，且该限幅输出频谱分量缺少偶次谐波^[10]。

在实际的二极管限幅器中，由于二极管的反向电阻与正向电阻的比值不可能无穷大，二极管在正向导通时存在扩散电容，使二极管在导通时存储电荷较多。当外加信号变化使二极管截止时，由于存储的电荷不能立即消失，表现为二极管不能马上截止；当输入电平达到门限时，削波输出并不是保持在一个恒定电压，而是有一个时间为 τ 的尖峰^[11]，该尖峰时间大约为二极管反向恢复时间 τ 。为达到好的限幅特性，对于特定使用频率，只要 τ 小于工作半周期的 1/10 即可。

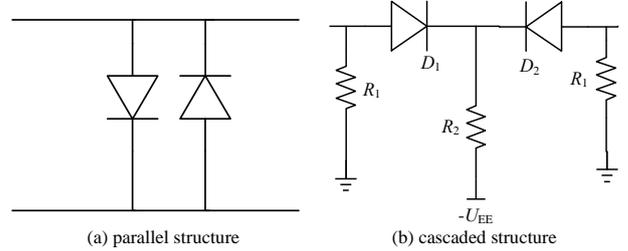


Fig.1 Structure of balanced diode limiter
图 1 平衡式二极管限幅器结构

2 基于共集共基结构限幅放大器设计

由平衡式二极管限幅器原理可引申出三极管共集共基限幅放大器的限幅原理。共集共基放大器结构如图 2(a)所示，第一级放大为共集电路，第二级为共基电路，2 个三极管发射级相连。由于三极管的 B-E 极 PN 结等效为一个二极管，将图 2(a)的电路简化为图 2(b)的等效电路图。可以发现，其等效为图 1(b)中的二极管串联限幅器级联一个受控电流源，由此推断出其具有与二极管串联限幅器相同的限幅特性。

设计共集共基组态静态偏置电路：所有晶体管静态工作电流约为 9 mA，选用的三极管为 2SC3356，特征频率 f_T 为 7 GHz。整体电路图如图 3 所示，其为两级。该电路 5 V 供电，总工作电流为 43.5 mA。三极管共集共基限幅放大器的限幅电压为：

$$U_L = I_C R_C \tag{3}$$

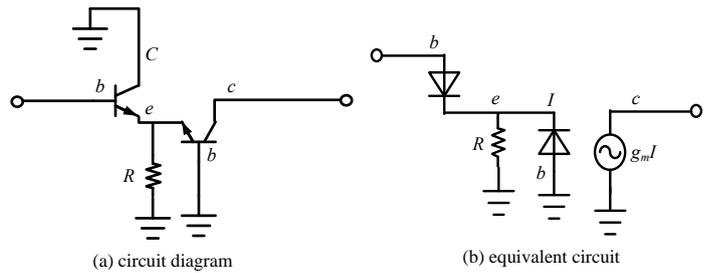


Fig.2 Common collector common base circuits
图 2 共集共基电路

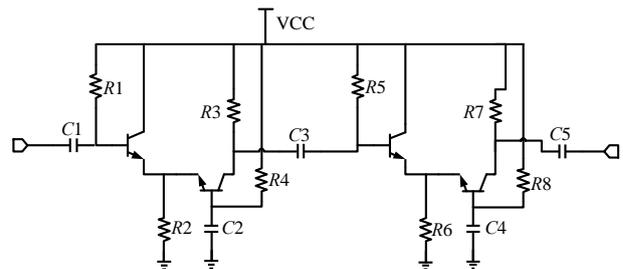


Fig.3 Schematic of the limiter
图 3 限幅放大器电路图

式中： R_C 为输出端集电极电阻； I_C 为输出端三极管集电极电流。

将该电路在 ADS 软件中进行谐波平衡仿真，仿真结果如图 4 所示。由图 4(a)可知，该放大器输入输出回波损耗均大于 17 dB，增益在 200 MHz 处为 29 dB。图 4(b)为限幅放大器输入功率在 -40~0 dBm 变化时，输出功率的变化，可以看出，当输入功率增加，频率从 50 MHz 增加至 250 MHz 时，输出功率限制在 1 dBm 左右，限幅效果良好。

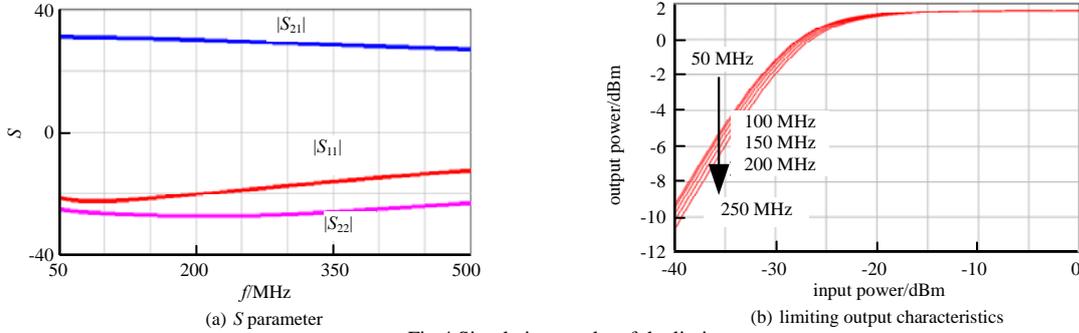


Fig.4 Simulation results of the limiter
图 4 限幅放大器仿真结果

3 小型化限幅放大器实现与测试

为实现限幅放大器小型化，采用陶瓷基板，利用薄膜电路工艺加工完成混合集成电路版图，如图 5 所示，电路板尺寸为 8.1 mm × 7.1 mm。电路板厚 0.25 mm，相对介电常数 9.9，损耗角正切 $\tan\delta$ 为 0.001；电路电阻为薄膜电阻，电阻层线宽为 0.1 mm；电路中电感采用螺旋电感，在平面电磁仿真软件里仿真确定尺寸。图 6 为限幅放大器 S 参数测试结果，从图 6 可知，当频率由 50 MHz 增至 500 MHz 时，其增益大概下降 8 dB，回波损耗在 17 dB 以上。图 7 为限幅输出特性测试结果，图 7(a)中，输出限幅功率在 50~250 MHz 范围内为 2 dBm 左右(图 4(b)为 1 dBm)；图 7(b)为输入频率为 100 MHz 时，输出二次谐波随输入功率的变化情况，结合图 7(a)可得，其二次谐波抑制在 100 MHz 处大于 22 dBc，测试结果与仿真吻合度较高。

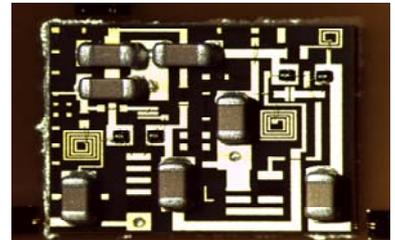


Fig.5 Photograph of the fabricated thin film circuit
图 5 限幅放大器陶瓷基板薄膜电路版图

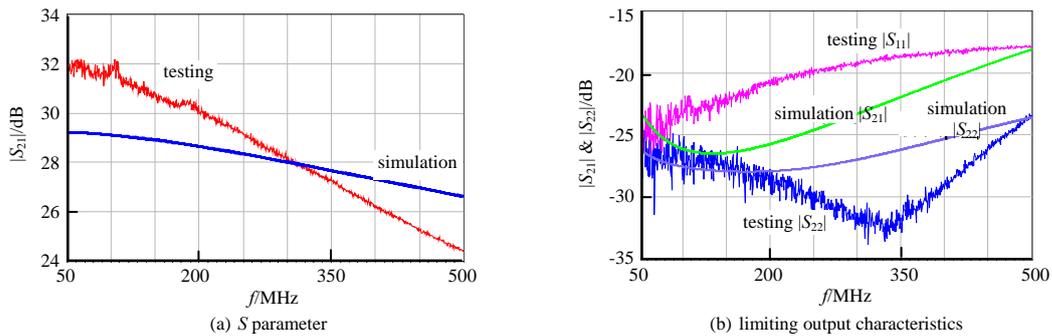


Fig.6 Simulation and measurement results of the limiter
图 6 限幅放大器 S 参数测试与仿真结果对比

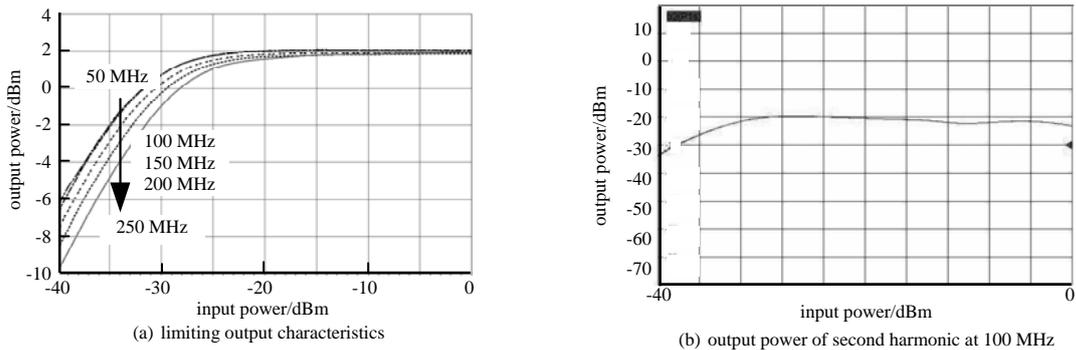


Fig.7 Measurement results of the limiter for limiting and harmonic characteristics
图 7 限幅放大器限幅特性与二次谐波抑制测试结果

4 结论

限幅放大器在中频链路中至关重要。为获得大动态范围、小尺寸的限幅放大器，本文采用共集共基电路构成结构精简的限幅放大器。仿真论证了该放大器的优异性能：3 dB 工作带宽覆盖 50~250 MHz，增益大于 28 dB，限幅输出功率 2 dBm，输入输出回波损耗均大于 17 dB。最后利用薄膜电路工艺设计完成小型化限幅放大器设计，电路尺寸为 7.15 mm×8.1 mm，与 PCB 电路相比，尺寸明显较小。该电路结构精简，性能优越，适合分离元件电路设计。

参考文献：

- [1] KLUMPERINK E A M, KLEIN C T, RUEGGERBERG B, et al. AM suppression with low AM-PM conversion with the aid of a variable-gain amplifier[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1996, 31(5):625-633.
- [2] OKI A K, KIM M E, GORMAN G M, et al. High-performance GaAs heterojunction bipolar transistor monolithic logarithmic IF amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 36(12):1958-1965.
- [3] KLUMPERINK E A M, SEEVINCK E. MOS current gain cells with electronically variable gain and constant bandwidth[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1989, 24(5):1465-1467.
- [4] WANG Z. Two CMOS large current-gain cells with linearly variable gain and constant bandwidth[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I: Fundamental Theory & Applications, 1992, 39(12):1021-1024.
- [5] JOOSSE C, WILLIGEN D V. Analysis and design considerations of hard limiters for LF and VLF navaid receivers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, 20(3):267-278.
- [6] SHIOJIMA K, TSUKAHARA T, ISHIKAWA M, et al. Silicon bipolar 2 V 2 GHz quadrature demodulator without any adjustment[J]. IEEE Electronics Letters, 1997, 33(9):771-772.
- [7] Analog Devices. IF ICs offer 3 V operation for digital and analog cellular standards[J]. Microwave Journal, 1994:144-148.
- [8] 王诚训, 张安东. 中频放大器[M]. 北京:人民邮电出版社, 1983. (WANG Chengxun, ZHANG Andong. IF amplifiers[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 1983.)
- [9] 喻梦霞, 李桂苹. 微波固态电路[M]. 成都:电子科技大学出版社, 2008. (YU Mengxia, LI Guiping. Microwave solid state circuit[M]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology Press, 2008.)
- [10] OPPENHEIM A V, WILLSKY A S, HAMID W S. Signals and systems[M]. Englewood, USA: Prentice-Hall, 1997.
- [11] 吴援明, 唐军. 模拟电路分析与设计基础[M]. 北京:科学出版社, 2006. (WU Yuanming, TANG Jun. Analysis and design basis of analog circuits[M]. Beijing: Science Press, 2006.)

作者简介：

吕俊材(1992-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为微波电路与系统. email:1097203833@qq.com.

吕立明(1980-), 男, 研究员, 主要研究方向为先进电子集成技术、系统工程.

曾 荣(1985-), 男, 副研究员, 主要研究方向为先进电子集成技术.