

文章编号:1005-6122(2012)06-0084-05

# 一种高灵敏度 TD-LTE 通信接收机设计\*

凌云志

(中国电子科技集团公司 第四十一研究所,蚌埠 233006)

**摘要:** TD-LTE 接入方式、可变大带宽等新技术的运用,对测试仪表接收端性能提出了很高的要求,特别是在大带宽下提高接收灵敏度成为设计重点和难点。基于本振馈通抵消技术,设计了一种高灵敏度 TD-LTE 通信接收机,降低了本振信号馈通,避免了本振馈通引起的杂散、噪声等问题,从而提升了接收机的灵敏度和动态范围。对接收机的测试和理论对比表明,该接收机具有结构简单、易仿真、高指标等特点,可以推广到各种通信制式的测试设备、基站等产品中,具有广泛应用前景。

**关键词:** TD-LTE 通信,超外差接收机,本振馈通抵消技术,射频输入动态范围,射频带宽,接收灵敏度

## A High Sensitivity Receiver Design for the Communication of TD-LTE

LING Yun-zhi

(The 41th Research Institute of CETC, Bengbu 233006, China)

**Abstract:** With the new techniques' application, such as TD-LTE access and variable wide bandwidth technique etc., it requests the high performance of test instrument receiver. How to improve the receiver's sensitivity, especially under condition of wide bandwidth, becomes to the crucial and difficult points of its design. Based on the local oscillator (LO) feed-through offset technique, we have designed a high sensitivity receiver for TD-LTE communication, which can decrease feed-through of LO signal, avoid the spurious and noise problems produced by LO feed-through. Thus, it can promote the sensitivity and dynamic range greatly. The results of tests and theory analysis indicate that it can be extend to use for various modes communication test equipment and will have a great application prospect, because of its characters such as simple structure, easy to simulate, high performance and so on.

**Key words:** TD-SCDMA long term evolution communication, super heterodyne receiver, LO feed-through offset technique, RF dynamic input range, RF bandwidth, receiving sensitivity

## 引言

随着 3G 在全球范围内,尤其是在中国的部署和运营,用户对移动互联网的需求与日俱增。在这种背景下,3G 演进技术 LTE 已日益成为移动通信产业界关注的焦点,学术界、标准化领域以及产业界对它给予高度关注<sup>[1]</sup>。在 TD-LTE 快速发展的进程中,终端、系统等设备研发、生产线测试以及射频故障定位离不开测试仪表的支持<sup>[2]</sup>。然而,TD-LTE 接入方式、可变大带宽、MIMO 等新的技术运用,对于信号的频域分析以及测试仪表接收端性能提出了很高的要求,从而使 TD-LTE 射频测试仪表成为产业链的薄弱环节。

根据 3GPP36.521 标准要求,TD-LTE 通信系统

的参考灵敏度测试时,信号带宽在 20MHz<sup>[3]</sup>时最小的输入信号是-94dBm,吞吐量达到 $\geq 95\%$ <sup>[4]</sup>,这将要求 TD-LTE 测试设备接收通道灵敏度高于-167dBm @ 1Hz(理论值-174dBm)。因此,如何设计大带宽高灵敏度的 TD-LTE 通信接收机成为该 TD-LTE 系统研究的一个重要内容<sup>[5]</sup>。

为了达到上述要求,采用一种基于本振馈通抵消技术的超外差式 TD-LTE 通信接收机设计方案,满足 TD-LTE 的高灵敏度、大动态、宽带的测试要求。通过本振馈通(指接收机在混频环节中本振信号泄漏到中频端口的现象)抵消技术改进 TD-LTE 通信接收通道性能,降低本振信号馈通,避免了本振馈通引起的杂散、噪声等问题,提升接收通道的灵敏度。

\* 收稿日期:2012-05-07; 修回日期:2012-09-10

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX03001-003-01)

# 1 基于本振馈通抵消技术的 TD-LTE 通信接收模型

针对 3GPP 对 TD-LTE 通信测试设备技术指标的要求,我们在基于传统超外差接收机方案的基础

上<sup>[6]</sup>,提出新的改进型超外差接收通道设计方案——基于本振馈通抵消技术的 TD-LTE 通信接收通道设计,以满足 3GPP 标准对 TD-LTE 测试设备的要求。

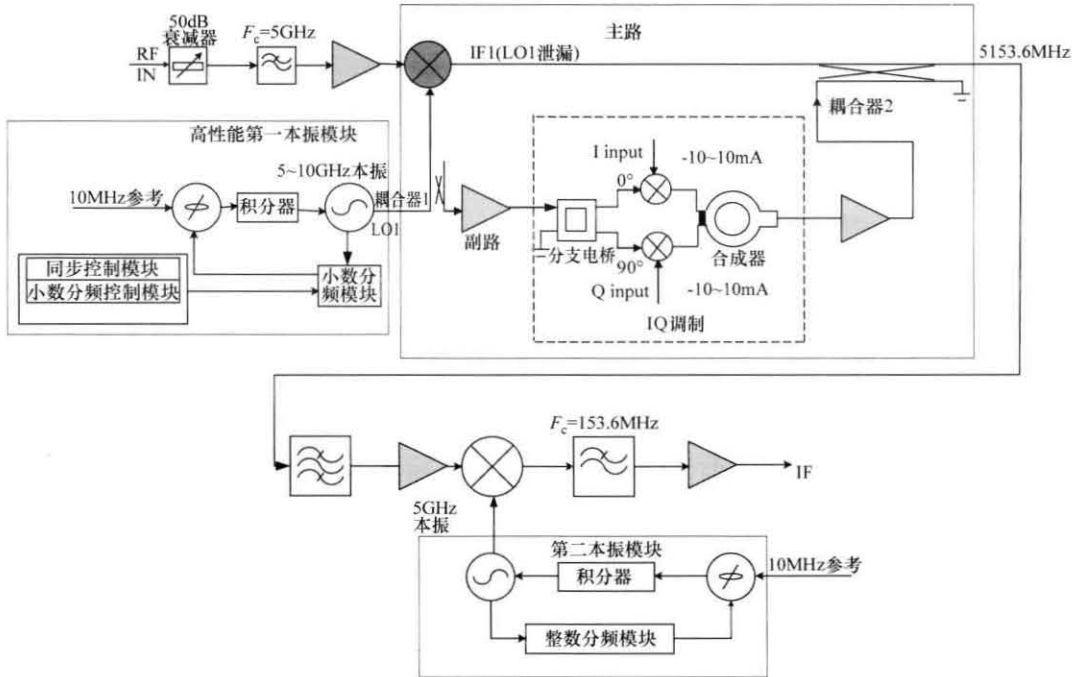


图 1 基于本振馈通抵消技术的 TD-LTE 通信接收通道的模型框图

如图 1 所示。该射频接收通道采用超外差式方案,信号先进入程控步进衰减器(0~50dB,10dB 步进),程控步进衰减器的衰减量根据输入信号电平的大小进行调整,确保满足后端电路处理要求。信号再经过低通滤波器( $f_c=5\text{GHz}$ )抑制带外和镜像响应;滤波后信号经过低噪声放大器,以提高射频通道的灵敏度。然后,信号进入第一混频模块变频为 5153.6MHz,考虑本振信号泄漏,我们采用零频抑制混频方法。第二变频模块包含滤波、放大、变频等环节,信号与 5GHz 第二本振差频得到 153.6MHz。153.6MHz 带通滤波器进一步提纯中频信号。第一混频调谐方程如下:

$$F_{1LO} - F_{SIG} = F_{5153.6\text{MHzIF}} \quad (1)$$

其中: $F_{SIG}$  频段 10Hz ~ 5GHz(频率范围主要考虑 TD-LTE 设备常用的频段,以及设备开发时中间环节测试点的频率,目前国际仪器仪表公司安捷伦、RS 公司等推出的高端信号分析仪基本都从 10Hz 开始), $F_{1LO}$  频段 5153.6-10153.6MHz, $F_{5153.6\text{MHzIF}}$  为固定的频率 5153.6MHz。第二混频调谐方程如下:

$$F_{5153.6\text{MHzIF}} - F_{2LO} = F_{153.6\text{MHzIF}} \quad (2)$$

其中: $F_{5153.6\text{MHzIF}}$  为固定的频率 5153.6MHz, $F_{2LO}$  为固

定的频率 5GHz, $F_{153.6\text{MHzIF}}$  为固定的频率 153.6MHz。

上述基于超外差式方案分析,而基于本振馈通抵消技术的混频电路与普通的混频处理电路是不同的,具体如图 2 所示。其主要是利用同频等幅反相信号叠加可抵消的原理,从变频模块混频产物中消减去本振的泄漏信号,降低本振泄漏带来的干扰,提升接收机的信号纯度。首先,主路上本振信号 LO1 与射频输入信号 RF1 进行混频产生中频信号 IF1,此时中频信号掺杂了本振信号 LO1 的泄漏信号;同时本振信号 LO1 耦合到副路上,耦合的副路本振信号进行 IQ 调制,调整其幅度和相位,使得副路本振与主路泄漏的本振信号相位相反,幅度相同,从而抵

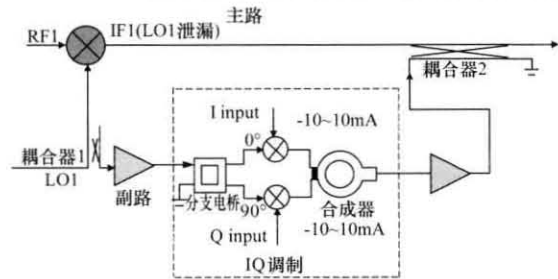


图 2 本振馈通抵消混频电路原理

消了本振泄漏信号。

图3表示和频、差频和本振泄漏信号的谱分布示意图,如果不加以抑制,本振泄漏信号很大,接近-1dBm。采取零频抑制技术后,本振泄漏信号的幅度大大降低,可达到-62dBm(如图4)。

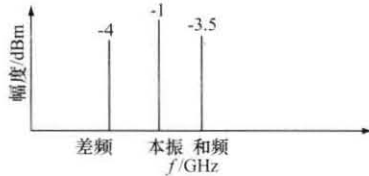


图3 未采取零频抑制混频频谱图

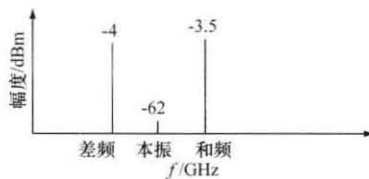


图4 采取零频抑制混频频谱图

## 2 系统性能精确分析

系统性能精确分析就是在射频模块的各级电路模块完成后,将其电路器件参数提取整理,然后对各模块对整体接收机的影响进行数学模型分析。其目的就是预估该射频模块操作于一般环境下,其整机特性是否满足规范值,同时作为器件选取的依据。除此之外,在链路预算的分析流程中也可以了解各级电路参数对于链路整体收发性能所造成的影响<sup>[7]</sup>。接收机最重要的性能指标是其灵敏度和动态范围,下面重点对这两个指标进行分析<sup>[8]</sup>。

### 2.1 接收灵敏度

根据接收机理论,最小可测量的信号电平<sup>[9]</sup>由下式决定:

$$P_{in} = -174 \text{ dBm} + f_{dB} + 10 \text{ Log} B \quad (3)$$

式中: $P_{in}$ 是最小可测量的信号电平(dBm); $f_{dB}$ 是整机噪声系数(dB); $B$ 是接收机3dB带宽;-174dBm为对应环境温度为290K时在1Hz带宽内的热噪声功率,就是所谓的噪声基底。

TD-LTE通信系统的参考灵敏度测试时,信号最大带宽为20MHz,最小的输入信号是-94dBm(3GPP中规定信号为OFDMA信号、信号带宽为20MHz、调制格式为QPSK等),要使吞吐量达到 $\geq 95\%$ <sup>[4]</sup>,这将要求TD-LTE测试设备接收机的中频带宽超过20MHz;接收灵敏度高于-94dBm@20MHz,3dB带宽近似看成噪声带宽,我们得到TD-LTE测试设备接收机要求 $F_{dB} < 7 \text{ dB}$ 。留有1.5dB余量分配整机噪声

系数及增益,分配模型见图5所示,整机噪声系数先将给部件的信号带宽折算到1Hz后再按以下级联方程计算<sup>[9]</sup>。

$$F = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 \times G_2 + \dots + (F_n - 1)/G_1 \times G_2 \dots G_n \quad (4)$$

根据前面的设计目标要求分配模型如图5所示,指标分配中假定了:

1)混频器的噪声系数 $NF = L_c \times tx$ (式中: $L_c$ 为变频损耗, $tx$ 为噪声比,这里取 $tx = 1.2$ 计算)。

2)衰减器的噪声系数 $NF = 1 + (L_a - 1) \times T_1/T_0 \approx L_a$ (式中: $L_a$ 为衰减器的有效损耗, $T_1/T_0 = 296\text{K}/290\text{K} \approx 1$ )。

3)滤波器的插损看成衰减器计算。

按最高灵敏度计算,步进衰减器零设置,图5模

型的计算结果为: $F_{dB} = 5.5 \text{ dB}$



图5 噪声系数及增益指标的分配

$$\begin{aligned} P_{in} &= -174 \text{ dBm} + f_{dB} + 10 \text{ Log} B + 1.5 = \\ &= -174 \text{ dBm} + 5.5 + 10 \text{ Log} (20 \times 10^6) + 1.5 = \\ &= -94 \text{ dBm} @ 20 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (5)$$

通过以上计算可以看出本文设计的接收通道满足整机灵敏度指标要求。

### 2.2 接收动态范围

通常对理想无损耗线性网络的定义是网络的输出响应与输入激励信号之间呈线性关系,且输出中没有额外的频率成分。但是理想的无损耗线性网络在实际中是不存在的,有损耗就会产生热噪声,导致网络在小信号输入时的非线性失真,并且在有源网络中,由于晶体管或FET等非线性器件的存在,它们本身在大信号时的特性如增益压缩、谐波失真及非线性杂散响应等,会导致网络在大信号输入时的非线性失真。混频器、放大器及接收机一般工作在输出信号与输入信号成比例变化的线性区域,即上述两者之间的区域,也就是一般定义动态范围。如图6,如果输入信号超出这个范围,输出开始饱和,如果低于这个范围,信号就会淹没在噪声中。动态范围定义为最小可检测信号MDS到1dB压缩点之间的功率范围。

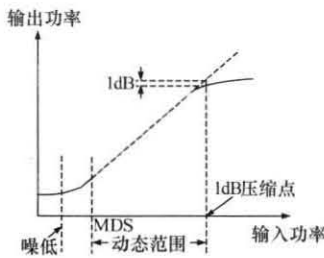


图 6 实际网络的输入输出功率响应曲线

最小可检测信号 MDS (Minimum detectable signal)<sup>[10]</sup> 定义为基底噪声以上 3dB。室温下基底噪声为 -174dBm/Hz, 则 MDS 为 -171dBm/Hz。假设系统引入噪声 NF 为 5.5dB, 系统带宽 B 为 20MHz, 则 TD-LTE 接收机的最小可检测信号为:

$$MDS = -171 \text{ dBm} + 10 \log B + NF = -171 \text{ dBm} + 10 \log 20 \text{ MHz} + 5.5 = -92.5 \text{ dBm} \quad (6)$$

1dB 压缩点是定量描述网络在最大信号输入时的失真特性, 当输入增加 10dB, 输出只增加了 9dB 处的功率点, 我们总希望电路工作在线性范围内, 所以输入一般以 1dB 压缩点为上限。

假设混频器的 1dB 压缩点  $P_{1dB}$  为 0dBm, 前置放大器增益为 10dB, 则接收机的输入 1dB 压缩点  $P_{in,1dB}$  可表示为:

$$P_{in,1dB} = P_{1dB} - G + 1 \text{ dB} = 0 \text{ dBm} - 10 \text{ dB} + 1 \text{ dB} = -9 \text{ dBm} \quad (7)$$

接收机动态范围为:

$$DR = P_{in,1dB} - MDS = -9 + 92.5 = 83.5 \text{ dB} \quad (8)$$

以上计算结果满足 TD-LTE 测试设备接收机动态范围 -80dB<sup>[4]</sup> 的指标要求。

### 3 仿真与测试

#### 3.1 接收通道增益与 1dB 压缩点指标测试

图 7 为接收机的输入输出功率特性关系的理论仿真与测试对比图, 可以计算出理论仿真的系统增益值为 25.5dB, 但是实际系统需要考虑每个单元电路之间阻抗匹配、电源与接地噪声处理等因素, 实际系统增益值比理论仿真值要小。在进行实际的系统增益测量时, 不失真的情况下, 2620MHz 处实际的增益大概为 21dB。同时在功率升高的同时, 系统的非线性失真比预想的严重一点, 输入 1dB 压缩点由理论仿真的 -9dBm 恶化到 -12.8dBm。需要指出的是, 针对一个频点进行增益测试很难说明设计的正确性, 因此, 我们从高低频段抽取多点进行测试, 测试结果为增益在 20 ~ 22.5dB 范围变化, 输入 1dB 压缩点在 -10 ~ -13.9dBm 变化。

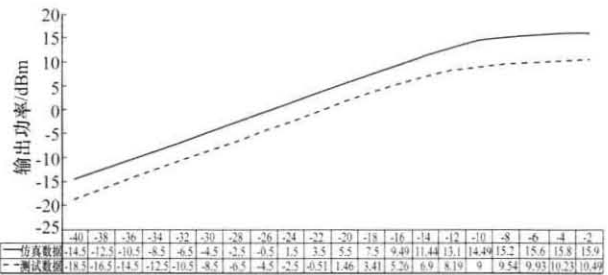


图 7 输入输出功率特性关系的理论仿真与测试对比

#### 3.2 灵敏度与动态范围指标测试

图 8 是灵敏度的测试结果图, 可以看到, 在 153.6MHz (采样时钟为 122.88MHz, 欠采样方式, 因此频率显示为 153.6MHz - 122.88MHz = 30.72MHz) 中频频谱上, 采样点数为 4096, 底噪为 -105.66dBFS 左右, 换算成 20MHz 信号带宽, 灵敏度为 -105.66 - 10log(61.44e6) - 21 + 10log(4096) + 10log(20e6) = -95.4 dBm @ 20MHz, 考虑高频段的恶化大约为 1dB, 因此, 接收灵敏度超过 -94dBm @ 20MHz, 满足 TD-LTE 测试设备要求。

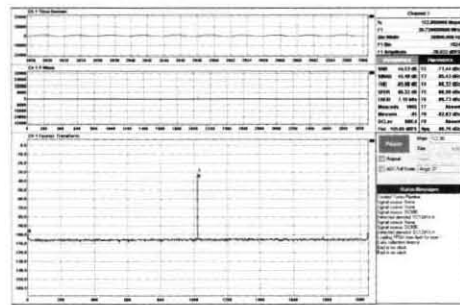


图 8 接收机灵敏度的测试结果图

同时  $DR(\text{dB}) = P_{in,1dB} - MDS$ , 可以计算出 2620MHz 处实际接收通道的动态范围  $DR(\text{dB}) = P_{in,1dB} - MDS = -12.8 + 95.4 = 82.7 \text{ dB}$ 。另外, 在频率高端处接收通道的动态范围还将恶化, 最差为 80.5dB。

通过上述指标测试, 可以看出本文设计的接收通道基本达到预期的设计要求; 同时, 随着接收频率的提高, 接收通道的指标也不断恶化, 因此本文设计方案还需对每个单元不断优化, 逐步提高接收通道的性能。

### 4 结束语

本文对 TD-LTE 测试设备接收机进行了总体阐述, 详细介绍了基于本振馈通抵消技术的改进型超外差接收机的设计原理和具体实现方法。并从具体单元模块指标着手, 对系统性能进行精确分析, 最后对改进型超外差接收机进行测试与仿真对比, 给出

输入输出功率特性关系的理论仿真与测试对比图和接收机灵敏度的测试结果图,表明本文设计的接收机性能到达预期目标,同时也展示了接收机实际性能与理论的差异,还有提高的空间。未来重点考虑系统的频段和带宽的拓展,研究噪声抵消技术提高系统接收灵敏度等。

### 参 考 文 献

- [1] Sacristan D M, Monserrat J F, Penuelas J C, et al. On the way towards fourth-generation mobile: 3GPP LTE and LTE-advanced[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009: 1-10
- [2] 王妮娜, 张治, 姜军, 等. TD-LTE 系统终端邻道泄漏功率比的测试方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2357-2362  
Wang Nina, Zhang Zhi, Jiang Jun, et al. Test method of adjacent channel leakage ratio for TD-LTE terminal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2357-2362
- [3] Bolcskei H, Gesbert D, Paulraj A J. On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(2): 225-234
- [4] 3GPP TS36. 521-1 User Equipment (UE) Conformance Specification Radio Transmission and Reception, Part 1: Conformance Testing[S]. 2011
- .....
- (上接第 79 页)
- [2] Wright P, Lees J, Benedikt J, et al. A methodology for realizing high efficiency class-J in a linear and broadband PA[J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(2): 3196-3204
- [3] Saad P, Fager C, Cao H Y, et al. Design of a highly efficient 2-4GHz octave bandwidth GaN HEMT power amplifier [J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(7): 1677-1685
- [4] Chen K L, Peroulis D. Design of highly efficient broadband class-E power amplifier using synthesized low-pass matching networks [J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(12): 3162-3173
- [5] Grebennikov A. High-efficiency transmission-line inverse class F power amplifiers for 2-GHz WCDMA systems[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2011, 21(4): 446-456
- [6] Lee Y S, Lee M W, Jeong Y H. A 40W balanced GaN HEMT class E power amplifier with 71% efficiency for WCDMA basestation [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(3): 842-845
- [5] 关义波, 邹传云, 莫延飞. 一种基于超再生原理的直扩通信系统新型接收机的设计[J]. 微波学报, 2006, 22(3): 212-216  
Guan Yibo, Zou Chuanyun, Mo Yanfei. A new design on the receiver based upon super-regenerative theory for direct-sequence spread-spectrum communications [J]. Journal of Microwaves, 2006, 22(3): 212-216
- [6] David M P. Microwave and RF wireless system [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001: 182-205
- [7] 齐丽娜, 干宗良, 朱洪波. 存在 CDMA 干扰时超宽带系统性能分析[J]. 微波学报, 2009, 25(3): 92-96  
Qi Lina, Gan Zongliang, Zhu Hongbo. Performance of ultra wideband systems in the presence of CDMA interference [J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(3): 92-96
- [8] Zhao L, Haimovich A M. Performance of ultra wideband communications in the presence of interference [J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2002, 20(9): 1684-1691
- [9] Razavi B. RF Microelectronics [M]. New York: Prentice Hall Inc, 1998
- [10] Won N, Meng T H. Direct-conversion RF receiver design [J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(3): 518-529
- 凌云志** 男, 1976 年生, 高级工程师。主要研究方向: 主要从事移动通信测试技术的研究和开发。  
E-mail: eibb@ei41.com, lyz309@sohu.com
- .....
- [7] 曹韬, 刘友江, 曾荣, 等. S 波段高效 GaN 逆 E 类功率放大器 [J]. 微波学报, 2011, 27(4): 49-52  
Cao Tao, Liu Youjiang, Zeng Rong, et al. S-band high efficiency GaN inverse-class E power amplifier [J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(4): 49-52
- [8] 董磊, 何松柏, 雷奇. 基于带通匹配网络理论的宽带高效率功放设计 [J]. 信息与电子工程, 2011, 9(4): 449-452  
Dong Lei, He Songbai, Lei Qi. Design of a high-efficiency broadband power amplifier based on band-pass match network theory [J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(4): 449-452
- [9] Dawson D E. Closed-form solutions for the design of optimum matching networks [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(1): 121-129
- 曹 韬** 男, 1985 年生, 助理研究员, 硕士。主要研究方向: 无线电测控总体技术, 高效功率放大技术等。  
E-mail: caotaog@gmail.com
- 曾 荣** 男, 1985 年生, 实习研究员, 硕士。主要研究方向: 线性高效功率放大技术, 微组装技术等。