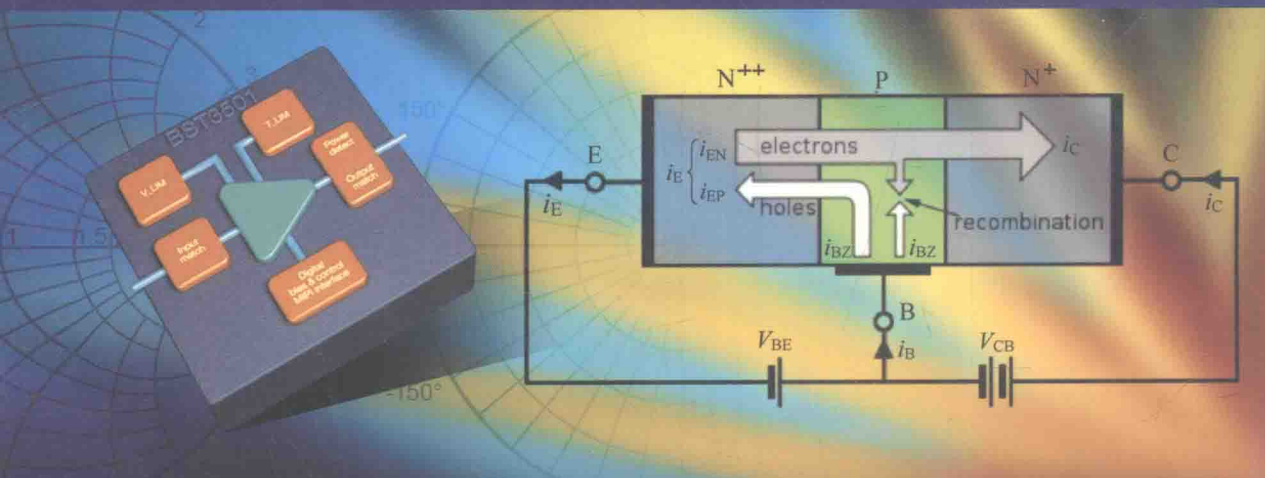


电子工程技术丛书

射频与微波功率放大器工程设计

● 黄智伟 王明华 黄国玉 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子工程技术丛书

射频与微波功率放大器工程设计

黄智伟 王明华 黄国玉 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

功率放大器是无线通信系统发射机的重要组成部分。本书从工程设计要求出发,以不同公司的射频与微波功率放大器器件为基础,通过大量的示例,图文并茂地介绍了射频与微波功率放大器器件和参数,射频与微波晶体管功率放大器电路,单片射频与微波功率放大器电路,射频与微波功率检测/控制电路和电源电路,射频与微波电路 PCB 设计和散热设计,以及电路设计和制作中的一些方法、技巧和应该注意的问题,具有很强的工程性和实用性。

本书是为从事无线通信系统电路设计的工程技术人员编写的一本学习射频与微波功率放大器电路设计与制作基本知识、方法和技巧的参考书。本书也可以作为本科院校和高职高专通信工程、电子信息工程等专业学习射频与微波功率放大器电路设计和制作的教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

射频与微波功率放大器工程设计 / 黄智伟, 王明华, 黄国玉编著. —北京: 电子工业出版社, 2015.5
(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-25925-8

I. ①射… II. ①黄… ②王… ③黄… III. ①高频放大器—设计 ②微波放大器—设计 IV. ①TN722.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 081676 号

责任编辑: 刘海艳 (lhy@phei.com.cn)

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 33 字数: 845 千字

版 次: 2015 年 5 月第 1 版

印 次: 2015 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 88.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

功率放大器是无线通信系统发射机的重要组成部分。射频与微波功率放大器的工作频率范围从兆赫兹到吉赫兹，功率从毫瓦级到千瓦级，按工作频带可以分为窄带功率放大器和宽带功率放大器。根据匹配网络的性质，可分为非谐振功率放大器和谐振功率放大器。按照电流导通角 θ 的不同，可分为甲(A)类、甲乙(AB)类、乙(B)类、丙(C)类。还有使功率器件工作于开关状态的丁(D)类放大器和戊(E)类放大器，以及F类、G类和H类的高效率放大器。功率放大器按工作状态分类可分为线性放大器和非线性放大器。工作于非线性状态的功率放大器，属于非线性电路，通常采用的分析方法是图解法和解析近似分析法。在现代通信技术飞速发展的今天，对功率放大器的各项指标的要求越来越高，功率放大器在设计制作中会受到各种条件(如效率、线性度等)的制约。

作为一个设计者，面对着功率放大器电路设计这一门成熟而又在不断发展和更新的技术，面对海量的技术资料，面对生产厂商可以提供的几十类、成百上千种型号的器件，面对数据表中的几十个参数，如何选择合适的器件，完成自己所需要的射频与微波功率放大器电路设计，实际上是一件并不容易的事情。

本书是为从事无线通信系统电路设计的工程技术人员编写的一本介绍射频与微波功率放大器电路设计与制作基本知识、方法和技巧的参考书。本书没有大量的理论介绍、公式推导和仿真分析，而是从工程设计要求出发，以不同公司的射频与微波功率放大器器件为基础，通过对器件的技术参数和特性、应用电路的介绍，并提供大量的、可选择的器件和应用电路实例，图文并茂地说明射频与微波功率放大器电路设计和制作中的一些方法和技巧，以及应该注意的问题，具有很强的工程性和实用性。

本书也可以作为本科院校和高职高专通信工程、电子信息工程等专业学习射频与微波功率放大器电路设计和制作的教材。

本书共9章。第1章射频与微波功率放大器器件基础，介绍了ADI、Avago Technologies、Freescale、NXP Semiconductors、RF Micro Devices、TriQuint Semiconductor等十几家公司可供选择的射频与微波功率放大器器件，介绍了数据表中的射频与微波功率放大器器件的技术参数，包括绝对最大值、推荐的工作条件、电特性、热特性等。

第2章射频与微波电路设计基础，介绍了频谱的划分，电阻(器)的射频特性，电容器的阻抗频率特性、衰减频率特性、ESR和ESL特性，电感器的阻抗频率特性、 Q 值频率特性和电感值频率特性，铁氧体元件、铁氧体磁珠和片式铁氧体磁珠的基本特性，铁氧体磁珠的安装位置，EMC(电磁兼容)用铁氧体，传输线的定义、类型和特性，Smith圆图的构成和应用，网络与网络参数，天线种类和基本参数，以及天线分离滤波器等。

第3章射频与微波功率放大器电路基础，介绍了功率放大器输出功率、效率、线性等主要技术指标，A、B、C、D、E、F类功率放大器电路结构，功率放大器电路的阻抗匹配网络的基本要求，集总参数和传输线变压器匹配网络，功率合成器与分配器，功率放大器的线性化技术等。

第4章射频与微波晶体管功率放大器电路，介绍了射频与微波功率晶体管的类型与主要参数，包括绝对最大值、推荐的工作条件、电特性（数据表）、特性曲线图、温度范围、热特性、测试（评估板）电路等。介绍了34个射频与微波双极性晶体管、场效应管、LDMOS晶体管功率放大器电路示例。

第5章单片射频与微波功率放大器电路，介绍了单片射频与微波功率放大器的类型与主要参数，包括绝对最大值、推荐的工作条件、电特性（数据表）、特性曲线图、温度范围、热特性、测试（评估板）电路等。介绍了通用型单片射频与微波功率放大器、单片无线局域网（WLAN）、单片WiMAX和WiFi、单片射频前端、单片驱动放大器70个应用电路示例。

第6章射频与微波功率检测/控制电路，介绍了射频与微波功率检测/控制电路主要类型与特性，19个射频与微波功率检测/控制应用电路示例。

第7章射频与微波功率放大器的电源电路，介绍了RF（射频）系统的电源要求，电源管理和电源噪声控制，以及手持设备射频功率放大器的供电电路。介绍了LDO线性稳压器电源电路，包括选择基本原则、主要参数、PSRR、电容选型等。介绍了4个超低噪声、高PSRR射频LDO线性稳压器电路示例和6个射频功率放大器电源电路示例。

第8章射频与微波电路PCB设计，介绍了PCB导线的电阻、电感和阻抗，导线的互感、电源和接地平面电感，导线的电容和平行板电容、过孔电容和电感等。介绍了PCB电源/地平面的功能、设计一般原则、叠层和层序以及负作用。介绍了PCB传输线，包括微带线、埋入式微带线、单带状线、双带状线或非对称带状线、差分微带线和带状线，介质材料对传播速度的影响，以及PCB传输线设计与制作中应注意的一些问题。介绍了射频与微波电路PCB设计的一些技巧，以及300MHz到2.4GHz 18个PCB天线设计示例。

第9章射频与微波功率放大器的散热设计，介绍了散热设计基础，包括热传递的方式、温度（高温）对元器件及电子产品的影响，温度的减额设计。介绍了射频与微波功率放大器器件的封装与热特性，包括与器件封装热特性有关的一些参数、器件封装的基本热关系和热特性、最大功耗与器件封装和温度的关系等。介绍了PCB的散热设计，包括PCB的热性能分析、基材选择、元器件的布局和布线，PCB的散热设计示例等。介绍了裸露焊盘的PCB设计，包括裸露焊盘连接的基本要求、散热通孔的设计和示例等。介绍了散热器的安装与接地。

本书在编写过程中，参考了大量的国内外著作和文献资料，引用了一些国内外著作和文献资料中的经典结论，参考并引用了Analog Devices、Avago Technologies、Freescale、NXP Semiconductors、RF Micro Devices、TriQuint Semiconductor、Texas Instruments、Maxim、Microchip Technology、Linear Technology等公司提供的技术资料和应用笔记，得到了许多专家和学者的大力支持，听取了多方面的意见和建议。南华大学王明华博士、黄国玉、王彦教授、邓贤君博士、李圣副教授、胡孝平、葛厚洋、胡景文、蒋万辉、王希勤、丑佳文、马宇辉、戴字明、邵卫龙等人为本书的编写也做了大量的工作，在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，不足之处在所难免，敬请各位读者批评斧正。

黄智伟
2015年于南华大学

目 录

| | |
|---|----|
| 第 1 章 射频与微波功率放大器器件基础 | 1 |
| 1.1 可选的射频与微波功率放大器器件 | 1 |
| 1.1.1 ADI 公司的射频与微波功率放大器器件 | 1 |
| 1.1.2 ANADIGICS 公司的射频与微波功率放大器器件 | 2 |
| 1.1.3 Avago Technologies 公司的射频与微波功率放大器器件 | 3 |
| 1.1.4 飞思卡尔半导体公司的射频与微波功率放大器器件 | 4 |
| 1.1.5 Infineon Technologies 公司的射频与微波功率放大器器件 | 5 |
| 1.1.6 Linear Technology 公司的射频与微波功率放大器器件 | 6 |
| 1.1.7 Maxim 公司的射频与微波功率放大器器件 | 8 |
| 1.1.8 Microchip 公司的射频与微波功率放大器器件 | 8 |
| 1.1.9 Microsemi 公司的射频与微波功率放大器器件 | 10 |
| 1.1.10 New Japan Radio 公司的射频与微波功率放大器器件 | 11 |
| 1.1.11 NXP Semiconductors 公司的射频与微波功率放大器器件 | 11 |
| 1.1.12 Renesas Electronics 公司的射频与微波功率放大器器件 | 12 |
| 1.1.13 RF Micro Devices 公司的射频与微波功率放大器器件 | 13 |
| 1.1.14 意法半导体 (ST) 公司的射频与微波功率放大器器件 | 14 |
| 1.1.15 Skywork 公司的射频与微波功率放大器器件 | 14 |
| 1.1.16 TI (德州仪器) 公司的射频与微波功率放大器器件 | 15 |
| 1.1.17 TriQuint Semiconductor 公司的射频与微波功率放大器器件 | 17 |
| 1.1.18 三菱电机机电 (上海) 有限公司的射频与微波功率放大器器件 | 18 |
| 1.2 数据表中的射频与微波功率放大器参数 | 19 |
| 1.2.1 绝对最大值 | 19 |
| 1.2.2 推荐工作条件 | 20 |
| 1.2.3 电特性 | 21 |
| 1.2.4 温度范围 | 24 |
| 1.2.5 热特性 | 24 |
| 第 2 章 射频电路设计基础 | 26 |
| 2.1 频谱 | 26 |
| 2.2 电阻 (器) 的射频特性 | 27 |
| 2.2.1 电阻器的射频等效电路 | 27 |
| 2.2.2 片状电阻的外形和尺寸 | 28 |

| | | |
|--------------|--------------------|-----------|
| 2.3 | 电容(器)的射频特性 | 28 |
| 2.3.1 | 电容器的阻抗频率特性 | 28 |
| 2.3.2 | 电容器的衰减频率特性 | 30 |
| 2.3.3 | 电容器的 ESR 和 ESL 特性 | 30 |
| 2.4 | 电感(器)的射频特性 | 32 |
| 2.4.1 | 电感器的阻抗频率特性 | 32 |
| 2.4.2 | 电感器的 Q 值频率特性 | 33 |
| 2.4.3 | 电感器的电感值频率特性 | 34 |
| 2.5 | 铁氧体元件 | 35 |
| 2.5.1 | 铁氧体元件的基本特性 | 35 |
| 2.5.2 | 铁氧体磁珠的基本特性 | 36 |
| 2.5.3 | 片式铁氧体磁珠 | 38 |
| 2.5.4 | 铁氧体磁珠的安装位置 | 47 |
| 2.5.5 | EMC(电磁兼容)用铁氧体 | 48 |
| 2.6 | 传输线 | 50 |
| 2.6.1 | 传输线的定义 | 50 |
| 2.6.2 | 传输线的类型与特性 | 51 |
| 2.7 | Smith 圆图 | 53 |
| 2.7.1 | 等反射圆 | 54 |
| 2.7.2 | 等电阻圆图和等电抗圆图 | 54 |
| 2.7.3 | Smith 圆图(阻抗圆图) | 56 |
| 2.7.4 | Smith 圆图的应用 | 56 |
| 2.8 | 网络与网络参数 | 69 |
| 2.9 | 天线 | 73 |
| 2.9.1 | 天线种类 | 73 |
| 2.9.2 | 天线的基本参数 | 76 |
| 2.9.3 | 天线分离滤波器 | 80 |
| 第 3 章 | 射频功率放大器电路基础 | 85 |
| 3.1 | 射频功率放大器的主要技术指标 | 85 |
| 3.1.1 | 输出功率 | 85 |
| 3.1.2 | 效率 | 87 |
| 3.1.3 | 线性 | 88 |
| 3.1.4 | 杂散输出与噪声 | 89 |
| 3.2 | 射频功率放大器电路结构 | 89 |
| 3.2.1 | 射频功率放大器的分类 | 89 |
| 3.2.2 | A 类射频功率放大器电路 | 90 |

| | | |
|------------|----------------------------|------------|
| 3.2.3 | B类射频功率放大器电路 | 93 |
| 3.2.4 | C类射频功率放大器电路 | 97 |
| 3.2.5 | D类射频功率放大器电路 | 99 |
| 3.2.6 | E类射频功率放大器电路 | 103 |
| 3.2.7 | F类射频功率放大器电路 | 106 |
| 3.3 | 功率放大器电路的阻抗匹配网络 | 110 |
| 3.3.1 | 阻抗匹配网络的基本要求 | 110 |
| 3.3.2 | 集总参数的匹配网络 | 110 |
| 3.3.3 | 传输线变压器匹配网络 | 112 |
| 3.4 | 功率合成与分配 | 115 |
| 3.4.1 | 功率合成器 | 115 |
| 3.4.2 | 功率分配器 | 119 |
| 3.5 | 功率放大器的线性化技术 | 123 |
| 3.5.1 | 前馈线性化技术 | 123 |
| 3.5.2 | 反馈技术 | 124 |
| 3.5.3 | 包络消除及恢复技术 | 126 |
| 3.5.4 | 预失真线性化技术 | 126 |
| 3.5.5 | 采用非线性元件的线性放大(LINC) | 128 |
| 3.6 | 功率晶体管的二次击穿与散热 | 129 |
| 第4章 | 射频与微波晶体管功率放大器应用电路 | 132 |
| 4.1 | 射频与微波功率晶体管的主要参数 | 132 |
| 4.1.1 | 常用的射频与微波功率晶体管类型 | 132 |
| 4.1.2 | 射频与微波功率晶体管的绝对最大值 | 136 |
| 4.1.3 | 射频与微波功率晶体管推荐的工作条件 | 138 |
| 4.1.4 | 射频与微波功率晶体管的电特性(数据表) | 140 |
| 4.1.5 | 射频与微波功率晶体管的特性曲线图 | 147 |
| 4.1.6 | 射频与微波晶体管的温度范围 | 150 |
| 4.1.7 | 射频与微波晶体管的热特性 | 150 |
| 4.1.8 | 射频与微波晶体管的测试(评估板)电路 | 152 |
| 4.2 | 射频与微波双极性晶体管功率放大器应用电路实例 | 154 |
| 4.2.1 | ISM 433MHz 功率放大器应用电路 | 154 |
| 4.2.2 | ISM 866MHz 功率放大器应用电路 | 155 |
| 4.2.3 | 1W 900MHz 3.6V 功率放大器应用电路 | 156 |
| 4.2.4 | 40~3600MHz 20dB 功率放大器应用电路 | 156 |
| 4.2.5 | 400~2200MHz 15dB 功率放大器应用电路 | 159 |
| 4.2.6 | 0~6GHz 14~20.5dB 功率放大器应用电路 | 160 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.3 | 射频与微波场效应管功率放大器应用电路实例 | 162 |
| 4.3.1 | 630mW VHF/UHF 功率放大器应用电路 | 162 |
| 4.3.2 | 7.5W VHF/UHF 功率放大器应用电路 | 162 |
| 4.3.3 | 12W VHF/UHF 功率放大器应用电路 | 163 |
| 4.3.4 | 300W 50V FM (调频) 广播功率放大器应用电路 | 163 |
| 4.3.5 | 135~175MHz 8W 7.5V 功率放大器应用电路 | 164 |
| 4.3.6 | 450~520MHz 3W 12.5V 功率放大器应用电路 | 165 |
| 4.3.7 | 520MHz 8W 7.5V 功率放大器应用电路 | 167 |
| 4.3.8 | 155~950MHz 40.2dBm 功率放大器应用电路 | 168 |
| 4.3.9 | 1GHz 30W 28V 功率放大器应用电路 | 170 |
| 4.3.10 | 1GHz 120W 28V 功率放大器应用电路 | 171 |
| 4.3.11 | 200~2100MHz 100W 功率放大器应用电路 | 173 |
| 4.3.12 | 1.8~2.2GHz 180W 功率放大器应用电路 | 174 |
| 4.3.13 | 2.110~2.170MHz 300W 功率放大器应用电路 | 175 |
| 4.3.14 | 1.7~2.7GHz 28V 23W WiMAX 功率放大器应用电路 | 176 |
| 4.3.15 | 3.3~3.8GHz 28V 15W WiMAX 功率放大器应用电路 | 177 |
| 4.3.16 | 0~4000MHz 25W 28V 功率放大器应用电路 | 178 |
| 4.4 | 射频与微波 LDMOS 晶体管功率放大器应用电路实例 | 179 |
| 4.4.1 | 45W 28V FM (调频) 广播用功率放大器应用电路 | 179 |
| 4.4.2 | 400~470MHz 4W 7.2V 功率放大器应用电路 | 180 |
| 4.4.3 | 400~500MHz 8W 12.5V 功率放大器应用电路 | 181 |
| 4.4.4 | 340~520MHz 10W 15V 功率放大器应用电路 | 182 |
| 4.4.5 | 460~540MHz 20W 13.6V 功率放大器应用电路 | 183 |
| 4.4.6 | 10~512MHz 120W 功率放大器应用电路 | 184 |
| 4.4.7 | 470~860MHz 110W DVB-T UHF 功率放大器应用电路 | 186 |
| 4.4.8 | 860~960MHz 1W 7.2V 功率放大器应用电路 | 187 |
| 4.4.9 | 860~960MHz 4W 13.6V 功率放大器应用电路 | 188 |
| 4.4.10 | 740~950MHz 5W 7.2V 功率放大器应用电路 | 189 |
| 4.4.11 | 1GHz 6W 28V 功率放大器应用电路 | 190 |
| 4.4.12 | 1GHz 18W/30W/45W/60W/70W 28V 功率放大器应用电路 | 191 |
| 第 5 章 | 单片射频与微波功率放大器应用电路 | 193 |
| 5.1 | 单片射频与微波功率放大器的主要参数 | 193 |
| 5.1.1 | 常用的单片射频与微波功率放大器类型 | 193 |
| 5.1.2 | 单片射频与微波功率放大器的绝对最大值 | 195 |
| 5.1.3 | 单片射频与微波功率放大器推荐的工作条件 | 198 |
| 5.1.4 | 单片射频与微波功率放大器的电特性 (数据表) | 199 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.1.5 | 单片射频与微波功率放大器的特性曲线图 | 202 |
| 5.1.6 | 单片射频与微波功率放大器的温度范围 | 204 |
| 5.1.7 | 单片射频与微波功率放大器的热特性 | 204 |
| 5.1.8 | 单片射频与微波功率放大器的测试(评估板)电路 | 205 |
| 5.2 | 通用型单片射频与微波功率放大器应用电路实例 | 206 |
| 5.2.1 | 150~960MHz 32dBm 功率放大器应用电路 | 206 |
| 5.2.2 | 380~960MHz 1W 功率放大器应用电路 | 208 |
| 5.2.3 | 728~756MHz 27dBm 线性功率放大器应用电路 | 209 |
| 5.2.4 | 851~894MHz 27.2dBm 线性功率放大器应用电路 | 210 |
| 5.2.5 | 800~960MHz 29dBm 线性功率放大器应用电路 | 211 |
| 5.2.6 | 810~960MHz 29.5dBm 功率放大器应用电路 | 212 |
| 5.2.7 | 800~1000MHz 250mW 增益可控功率放大器应用电路 | 213 |
| 5.2.8 | 800~1000MHz 1W 功率放大器应用电路 | 215 |
| 5.2.9 | 1200~1400MHz 90W 功率放大器应用电路 | 217 |
| 5.2.10 | 20~1500MHz 5W MMIC 功率放大器应用电路 | 218 |
| 5.2.11 | 1.2~1.85GHz 150W 功率放大器应用电路 | 218 |
| 5.2.12 | 1.7~2.2GHz 1W 功率放大器应用电路 | 219 |
| 5.2.13 | 1.8~2.5GHz 30dBm 线性功率放大器应用电路 | 220 |
| 5.2.14 | 1.8~2.5GHz 33dBm 线性功率放大器应用电路 | 220 |
| 5.2.15 | 2.4~2.5GHz 22.5dBm 线性功率放大器应用电路 | 223 |
| 5.2.16 | 2.4~2.5GHz 21dBm 线性功率放大器应用电路 | 225 |
| 5.2.17 | 400~2700MHz 1 W MMIC 线性功率放大器应用电路 | 225 |
| 5.2.18 | 2.1~2.7GHz 1W 功率放大器应用电路 | 227 |
| 5.2.19 | 3.3~3.8GHz 1W 功率放大器应用电路 | 227 |
| 5.2.20 | 6~20GHz 15dBm 线性功率放大器应用电路 | 228 |
| 5.2.21 | 18~27GHz 29dBm 功率放大器应用电路 | 229 |
| 5.2.22 | 28~31GHz 33/36dBm 功率放大器应用电路 | 229 |
| 5.2.23 | 27~32GHz 28.5dBm MMIC 功率放大器应用电路 | 229 |
| 5.2.24 | 25~33GHz 0.7W MMIC 功率放大器应用电路 | 231 |
| 5.2.25 | 25~35GHz Ka 波段 25dBm 功率放大器应用电路 | 231 |
| 5.2.26 | 36~40GHz 26dBm MMIC 功率放大器应用电路 | 232 |
| 5.2.27 | 36~40GHz 29dBm MMIC 功率放大器应用电路 | 233 |
| 5.2.28 | 37~40GHz 1W MMIC 功率放大器应用电路 | 234 |
| 5.2.29 | 40.5~43.5GHz 27.5dBm 线性功率放大器应用电路 | 234 |
| 5.3 | 无线局域网(WLAN)功率放大器应用电路实例 | 235 |
| 5.3.1 | 2.45GHz 24.5dBm 802.11g WLAN 功率放大器应用电路 | 235 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.3.2 | 2.4GHz 25dBm 802.11g/b WLAN 功率放大器应用电路 | 236 |
| 5.3.3 | 2.4GHz 20dBm 802.11b/g WLAN 功率放大器应用电路 | 237 |
| 5.3.4 | 2.4/5GHz 20dBm 802.11a/b/g WLAN 功率放大器应用电路 | 238 |
| 5.3.5 | 2.4GHz 30dBm IEEE802.11b/g 功率放大器应用电路 | 239 |
| 5.3.6 | 2.4GHz 21dBm IEEE802.11b/g/n 功率放大器应用电路 | 240 |
| 5.3.7 | 2.4GHz 27dBm IEEE802.11b/g/n 功率放大器应用电路 | 242 |
| 5.3.8 | 5GHz 802.11a/n 18dBm 功率放大器应用电路 | 242 |
| 5.3.9 | 4.90~5.85GHz 802.11a/n WLAN 功率放大器应用电路 | 243 |
| 5.3.10 | 2.4/5GHz 802.11a/b/g WLAN 功率放大器应用电路 | 244 |
| 5.3.11 | 2.4/5GHz 802.11a/b/g/n WLAN 功率放大器应用电路 | 245 |
| 5.4 | WiMAX 和 WiFi 功率放大器应用电路 | 246 |
| 5.4.1 | 2.3~2.4GHz 25dBm WiMAX 功率放大器应用电路 | 246 |
| 5.4.2 | 2.4~2.5GHz 29dBm WiFi 功率放大器应用电路 | 247 |
| 5.4.3 | 2.4~2.5GHz 28dBm WiFi 功率放大器应用电路 | 247 |
| 5.4.4 | 2.2~2.7GHz 2W WiMAX 和 WiFi 功率放大器应用电路 | 248 |
| 5.4.5 | 2.3~2.7GHz 25dBm WiMAX 和 WiFi 功率放大器应用电路 | 248 |
| 5.4.6 | 3.3~3.8GHz 25dBm WiMAX 功率放大器应用电路 | 250 |
| 5.4.7 | 4.9~5.9GHz 25dBm WiFi 功率放大器应用电路 | 250 |
| 5.5 | 射频前端应用电路实例 | 251 |
| 5.5.1 | 2.4GHz 高线性度 WLAN 前端模块应用电路 | 251 |
| 5.5.2 | 2.4~2.5GHz 802.11b/g/n WiFi 前端模块应用电路 | 252 |
| 5.5.3 | 2.4~2.5GHz 高功率前端模块应用电路 | 252 |
| 5.5.4 | 2.4GHz 22dBm 射频前端模块应用电路 | 253 |
| 5.5.5 | 802.11a/b/g/n WLAN/蓝牙射频前端模块应用电路 | 255 |
| 5.5.6 | 802.11a/b/g/n WLAN 射频前端模块应用电路 | 255 |
| 5.6 | 驱动放大器应用电路实例 | 256 |
| 5.6.1 | 700~1000MHz 27dBm 驱动放大器应用电路 | 256 |
| 5.6.2 | 700MHz~1GHz 1W 驱动放大器应用电路 | 257 |
| 5.6.3 | 700MHz~1GHz 2W 线性驱动放大器应用电路 | 258 |
| 5.6.4 | 0~1800MHz 21.0dBm 驱动放大器应用电路 | 258 |
| 5.6.5 | 5~2000MHz 24.0dBm 驱动放大器应用电路 | 258 |
| 5.6.6 | 250~2500MHz 24dBm 驱动放大器应用电路 | 260 |
| 5.6.7 | 100MHz~2.7GHz 9dBm 50Ω驱动放大器应用电路 | 260 |
| 5.6.8 | 700~2700MHz 24dBm 驱动放大器应用电路 | 262 |
| 5.6.9 | 1800~2700MHz 30.7dBm 驱动放大器应用电路 | 263 |
| 5.6.10 | 0~3500MHz 28.6dBm 驱动放大器应用电路 | 264 |

| | | |
|--------------|------------------------------------|------------|
| 5.6.11 | 40MHz~4GHz 19.5dBm 驱动放大器应用电路 | 265 |
| 5.6.12 | 400~4000MHz 29.1dBm 驱动放大器应用电路 | 265 |
| 5.6.13 | 0~5.5GHz 11.6dBm 驱动放大器应用电路 | 268 |
| 5.6.14 | 0.5~6GHz 22dBm 50Ω驱动放大器应用电路 | 269 |
| 5.6.15 | 6~20GHz 19.5dBm 驱动放大器应用电路 | 274 |
| 5.6.16 | 32~45GHz 24dBm Ka 频带驱动放大器应用电路 | 275 |
| 5.6.17 | 41~45GHz 18dBm Q 频带驱动放大器应用电路 | 276 |
| 第 6 章 | 射频与微波功率检测/控制应用电路 | 277 |
| 6.1 | 射频与微波功率检测/控制电路的主要类型和特性 | 277 |
| 6.2 | 射频信号功率检测/控制应用电路实例 | 280 |
| 6.2.1 | 100kHz~1GHz 射频功率检测器应用电路 | 280 |
| 6.2.2 | 10~1000MHz 83dB 射频功率检测器应用电路 | 281 |
| 6.2.3 | 0.8~2GHz 射频功率检测器应用电路 | 282 |
| 6.2.4 | 低频~2.5GHz 的功率、增益和 VSWR 检测器/控制器应用电路 | 283 |
| 6.2.5 | 0.1GHz~2.5GHz 75dB 对数检测器/控制器应用电路 | 287 |
| 6.2.6 | 100MHz~2.7GHz 45dB 射频功率检测器/控制器应用电路 | 289 |
| 6.2.7 | 50Hz~2.7GHz 60dB TruPwr 功率检测器应用电路 | 290 |
| 6.2.8 | 800MHz~2.7GHz 80dB 射频功率检测器应用电路 | 293 |
| 6.2.9 | 50MHz~3GHz 60dB 射频功率检测器应用电路 | 294 |
| 6.2.10 | 50MHz~3.5GHz 射频功率检测器应用电路 | 295 |
| 6.2.11 | 50MHz~4GHz 40dB 对数功率检测器应用电路 | 296 |
| 6.2.12 | 100MHz~6GHz TruPwr 功率检测器应用电路 | 297 |
| 6.2.13 | 450MHz~6GHz 45dB 峰值和 RMS 功率测量应用电路 | 297 |
| 6.2.14 | 600MHz~7GHz -26~12dB 射频功率检测器应用电路 | 300 |
| 6.2.15 | 1MHz~8GHz 70dB 对数检测器/控制器应用电路 | 301 |
| 6.2.16 | 1MHz~10GHz 50dB 对数检测器/控制器应用电路 | 303 |
| 6.2.17 | 10MHz~10GHz 67dB TruPwr 检波器应用电路 | 305 |
| 6.2.18 | 40MHz~10GHz 57dB RMS 射频功率检波器应用电路 | 309 |
| 6.2.19 | 7ns 响应时间 15GHz 射频功率检波器应用电路 | 310 |
| 第 7 章 | 射频与微波功率放大器的电源电路 | 311 |
| 7.1 | 射频系统的电源要求 | 311 |
| 7.1.1 | 射频系统的电源管理 | 311 |
| 7.1.2 | 射频系统的电源噪声控制 | 314 |
| 7.1.3 | 手持设备射频功率放大器的供电电路 | 319 |
| 7.2 | LDO 线性稳压器电源电路 | 323 |
| 7.2.1 | LDO 线性稳压器与 DC-DC 转换器的差异 | 323 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 7.2.2 | LDO 线性稳压器简介 | 325 |
| 7.2.3 | 选择 LDO 线性稳压器的基本原则 | 328 |
| 7.2.4 | LDO 线性稳压器的参数 | 329 |
| 7.2.5 | LDO 线性稳压器的 PSRR | 337 |
| 7.2.6 | LDO 线性稳压器电容选型 | 343 |
| 7.3 | 超低噪声高 PSRR 射频 LDO 线性稳压器电路实例 | 352 |
| 7.3.1 | 500mA 超低噪声、高 PSRR 射频 LDO 线性稳压器电路 | 352 |
| 7.3.2 | 200mA 超低噪声、高 PSRR 射频 LDO 线性稳压器电路 | 353 |
| 7.3.3 | 36V/1A/4.17 μ V (RMS 值) 射频 LDO 线性稳压器电路 | 354 |
| 7.3.4 | 2A 输出电流 RMS 值 6 μ V 噪声 RF LDO 线性稳压器 | 356 |
| 7.4 | 射频功率放大器电源电路实例 | 359 |
| 7.4.1 | 基带和 RFPA 电源管理单元 (PMU) | 359 |
| 7.4.2 | 用于 RFPA 的可调节降压 DC-DC 转换器 | 360 |
| 7.4.3 | 具有 MIPI [®] RFFE 接口的 RFPA 降压 DC-DC 转换器 | 370 |
| 7.4.4 | 用于 3G 和 4G 的 RFPA 降压-升压转换电路 | 380 |
| 7.4.5 | 具有 MIPI [®] RFFE 接口的 3G/4G RFPA 降压-升压转换器 | 384 |
| 7.4.6 | 300mA 3.6V RFPA 电源电路 | 387 |
| 第 8 章 | 射频与微波电路 PCB 设计 | 389 |
| 8.1 | PCB 的 RLC | 389 |
| 8.1.1 | PCB 的导线电阻 | 389 |
| 8.1.2 | PCB 导线的电感 | 389 |
| 8.1.3 | PCB 导线的阻抗 | 391 |
| 8.1.4 | PCB 导线的互感 | 392 |
| 8.1.5 | PCB 电源和接地平面电感 | 393 |
| 8.1.6 | PCB 的导线电容 | 394 |
| 8.1.7 | PCB 的平行板电容 | 395 |
| 8.1.8 | PCB 的过孔电容 | 395 |
| 8.1.9 | PCB 的过孔电感 | 396 |
| 8.1.10 | 典型过孔的 R 、 L 、 C 参数 | 396 |
| 8.1.11 | 过孔的电流模型 | 397 |
| 8.2 | PCB 电源/地平面 | 397 |
| 8.2.1 | PCB 电源/地平面的功能 | 397 |
| 8.2.2 | PCB 电源/地平面设计的一般原则 | 398 |
| 8.2.3 | PCB 电源/地平面叠层和层序 | 400 |
| 8.2.4 | PCB 电源/地平面的负作用 | 404 |
| 8.3 | PCB 传输线 | 405 |

| | | |
|--------|---------------------------------------|-----|
| 8.3.1 | 微带线 | 405 |
| 8.3.2 | 埋入式微带线 | 406 |
| 8.3.3 | 单带状线 | 407 |
| 8.3.4 | 双带状线或非对称带状线 | 408 |
| 8.3.5 | 差分微带线和差分带状线 | 408 |
| 8.3.6 | 传输延时与介电常数 ϵ_r 的关系 | 409 |
| 8.3.7 | PCB 传输线设计与制作中应注意的一些问题 | 409 |
| 8.4 | 射频与微波电路 PCB 设计的一些技巧 | 415 |
| 8.4.1 | 利用电容的“零阻抗”特性实现射频接地 | 415 |
| 8.4.2 | 利用电感的“无穷大阻抗”特性辅助实现射频接地 | 417 |
| 8.4.3 | 利用“零阻抗”电容实现复杂射频系统的射频接地 | 417 |
| 8.4.4 | 利用半波长 PCB 连接线实现复杂射频系统的射频接地 | 418 |
| 8.4.5 | 利用 1/4 波长 PCB 连接线实现复杂射频系统的射频接地 | 419 |
| 8.4.6 | 利用 1/4 波长 PCB 微带线实现电路的隔离 | 419 |
| 8.4.7 | PCB 连线上的过孔数量与尺寸 | 420 |
| 8.4.8 | 端口的 PCB 连线设计 | 420 |
| 8.4.9 | 谐振回路接地点的选择 | 421 |
| 8.4.10 | PCB 保护环 | 422 |
| 8.4.11 | 利用接地平面开缝减小电流回流耦合 | 422 |
| 8.4.12 | 隔离 | 425 |
| 8.4.13 | PCB 走线形式 | 427 |
| 8.4.14 | 寄生振荡的产生与消除 | 429 |
| 8.5 | PCB 天线设计实例 | 431 |
| 8.5.1 | 300~450MHz 发射器 PCB 环形天线设计实例 | 431 |
| 8.5.2 | 868MHz 和 915MHz PCB 天线设计实例 | 436 |
| 8.5.3 | 915MHz PCB 环形天线设计实例 | 437 |
| 8.5.4 | 紧凑型 868/915 MHz 天线设计实例 | 440 |
| 8.5.5 | 868MHz/915MHz/955MHz 倒 F PCB 天线设计实例 | 440 |
| 8.5.6 | 868MHz/915MHz/920MHz 微型螺旋 PCB 天线设计实例 | 441 |
| 8.5.7 | 2.4GHz F 型 PCB 天线设计实例 | 442 |
| 8.5.8 | 2.4GHz 倒 F PCB 天线设计实例 | 444 |
| 8.5.9 | 2.4GHz 小尺寸 PCB 天线设计实例 | 444 |
| 8.5.10 | 2.4GHz 蜿蜒式 PCB 天线设计实例 | 446 |
| 8.5.11 | 2.4GHz 折叠偶极子 PCB 天线设计实例 | 447 |
| 8.5.12 | 868MHz/2.4GHz 可选择单/双频段的单极子 PCB 天线设计实例 | 448 |
| 8.5.13 | 2.4 GHz YAGI PCB 天线设计实例 | 448 |

| | | |
|--------------|-----------------------------------|------------|
| 8.5.14 | 2.4GHz 全波 PCB 环形天线设计实例 | 450 |
| 8.5.15 | 2.4GHz PCB 槽 (slot) 天线设计实例 | 450 |
| 8.5.16 | 2.4GHz PCB 片式天线设计实例 | 451 |
| 8.5.17 | 2.4GHz 蓝牙、802.11b/g WLAN 片式天线设计实例 | 452 |
| 第 9 章 | 射频与微波功率放大器的散热设计 | 453 |
| 9.1 | 散热设计基础 | 453 |
| 9.1.1 | 热传递的三种方式 | 453 |
| 9.1.2 | 温度 (高温) 对元器件及电子产品的影响 | 454 |
| 9.1.3 | 温度减额设计 | 454 |
| 9.2 | 射频与微波功率放大器器件的封装与热特性 | 458 |
| 9.2.1 | 射频与微波功率放大器器件的封装 | 458 |
| 9.2.2 | 与器件封装热特性有关的一些参数 | 460 |
| 9.2.3 | 器件封装的基本热关系 | 462 |
| 9.2.4 | 常用 IC 封装的热特性 | 463 |
| 9.2.5 | 器件的最大功耗声明 | 468 |
| 9.2.6 | 最大功耗与器件封装和温度的关系 | 469 |
| 9.3 | PCB 的散热设计 | 473 |
| 9.3.1 | PCB 的热性能分析 | 473 |
| 9.3.2 | PCB 基材的选择 | 474 |
| 9.3.3 | PCB 元器件的布局 | 475 |
| 9.3.4 | PCB 的布线 | 477 |
| 9.3.5 | 均匀分布热源的稳态传导 PCB 的散热设计 | 479 |
| 9.3.6 | 铝质散热芯 PCB 的散热设计 | 481 |
| 9.3.7 | PCB 之间的合理间距设计 | 482 |
| 9.4 | 裸露焊盘的 PCB 设计 | 483 |
| 9.4.1 | 裸露焊盘简介 | 483 |
| 9.4.2 | 裸露焊盘连接的基本要求 | 487 |
| 9.4.3 | 裸露焊盘散热通孔的设计 | 489 |
| 9.4.4 | 裸露焊盘的 PCB 设计示例 | 491 |
| 9.5 | 散热器的安装与接地 | 495 |
| 9.5.1 | 散热器的安装 | 495 |
| 9.5.2 | 散热器的接地 | 500 |
| 参考文献 | | 503 |

第 1 章

射频与微波功率放大器器件基础

1.1 可选择的射频与微波功率放大器器件

1.1.1 ADI 公司的射频与微波功率放大器器件

ADI 公司 (<http://www.analog.com/zh/rfif-components/products/index.html>) 的 RF IC 覆盖整个 RF 信号链 (包括放大器、衰减器、VGA 和滤波器、检波器、直接数字频率合成器 (DDS) 和调制器、集成收发器、发射器和接收器、混频器和乘法器、调制器和解调器、PLL 锁相环/集成 VCO 的 PLL 锁相环、预分频器 (微波)、开关、定时 IC 和时钟), 提供 1000 多款产品来满足用户的 RF 系统设计需求。ADI 的 RF IC 提供高的性能, 并且通过广泛的免费工具、在线支持社区和 Circuits from the Lab™ 参考电路来进行支持。

ADI 的 RF 放大器采用 ADI 公司领先的放大器和 RF IC 专业技术而设计。ADI 丰富的单端输入/输出固定增益放大器系列可用于低频至高达 6GHz 频率的应用中, 包括增益模块 (Gain Blocks)、低噪声放大器 (LNAs)、中频放大器 (IF Amplifiers)、驱动器放大器 (Driver Amplifiers) 和差分放大器 (RF/IF Differential Amps) 等产品。这些器件提供高线性、低噪声系数和多种固定增益选项, 功耗低, 并且能在整个频率、温度和电源电压范围内提供额定性能, 适合各种应用。

1. ADI 公司的射频放大器产品结构树

ADI 公司的射频放大器产品结构树 (<http://www.analog.com/zh/rfif-components/rfif-amplifiers/products/index.html>) 如图 1.1.1 所示。

- 产品选型表
- ✕ Driver Amplifiers
 - ✕ Gain Blocks
 - ✕ IF Amplifiers
 - ✕ LNAs
 - ✕ RF/IF Differential Amps

图 1.1.1 ADI 公司的射频放大器产品结构树

单击图 1.1.1 所示的选项, 可以选择应用所需的射频放大器器件。

2. 设计支持

为了方便用户更好地使用 ADI 公司的射频放大器器件, ADI 公司全面提供技术文档、

设计工具和软件和应用方面的支持。

ADI 公司除了提供丰富的技术文档，包括数据表、应用手册、用户指南、选择指南、解决方案指南、模型、白皮书等，同时也提供中文技术论坛讨论、在线研讨会、教程、技术资料等多方面的支持，如图 1.1.2 所示。这些资源可以帮助用户解决射频放大器器件使用中的各种问题。

| | | |
|---|---|---|
| <p>了解RF放大器 SOT-89 放大器</p> <p>指南和在线研讨会</p> <p>频率合成基础知识，第一部分：锁相环 关于频率合成的原理分为两个部分，这是第一部分，主要介绍锁相环。本研讨会涉及：频率产生的需求；过去、现在及未来的技术；如何评估频率合成器的性能；以及实际应用。将重点关注锁相环(PLL)频率合成器。</p> <p>将高性能RF信号链集成至更小空间的解决方案 本次在线研讨会将介绍RF IC技术集成的现状，重点讨论非手机无线设备设计人员所面临的挑战，他们努力在更小的空间中实现更多的功能，有时候还要面临必须采用可在多频率下重复使用的宽带收发器等棘手问题。</p> <p>与RF器件接口 对于任何成功的RF设计，接收机和发射机内各级的接口是最重要的事情之一。如果电路各级之间的连接不当，谐波、不良衰减和其他缺陷就会凸显出来。本研讨会将介绍有助于实现RF电路最佳性能的最佳做法。</p> <p>高速印刷电路板设计技巧和诀窍 在本研讨会中，主讲人John将与您分享他过去30年来积累的关于高速印刷电路板设计的一些技巧和诀窍。</p> <p>RF检波器揭秘 RF检波器揭秘将介绍有关RF检波器的一些实用知识。一位ADI公司的RF专家将讲解不同类型的检波器，以及如何应用这些器件。</p> <p>差分放大器和设计工具简介 本次在线研讨会介绍差分放大器的基础知识和常见应用，并探讨若干设计实例。我们的放大器专家还会详细讲解必要的设计公式，并演示几款能够简化系统设计的最新全球设计工具。本研讨会将在阐明差分放大器背后的基本原理，并提供相关应用技术的实用知识。</p> <p>RF放大器技术文章</p> <p>通信系统设计的差分信号优势 了解差分信号链和架构在高噪声应用中如何改进系统性能。(RF Designline, 2/12/2010)</p> <p>直接变频接收机设计的优势 直接变频接收机信号链在3G和4G无线蜂窝应用环境中的性能和优点。(Electronic Products, 2009年6月)</p> <p>利用直接变频接收机设计实现多标准射频带操作 现代直接变频技术为现场可编程无线电设计提供了卓越的解决方案，相比传统接收机解决方案，它还具有成本优势和潜在的性能优势。(RF Designline, 2/16/2009)</p> <p>利用3G毫微微基站模拟前端实现家庭无线连接</p> <p>手册与指南</p> <p>RFIC选型指南</p> <p>RFIC解决方案通报</p> <p>数据手册</p> <p>RF放大器数据手册</p> | <p>比较、选择与评估</p> <p>参数数据库</p> <p>驱动器放大器</p> <p>增益模块</p> <p>IF放大器</p> <p>LNA</p> <p>RFIF差分放大器</p> <p>工具</p> <p>ADIsimRF™ 视频: ADIsimRF™</p> <p>ADIsimPLL™ 视频: ADIsimPLL™</p> <p>S参数</p> <p>ADL5606 S参数 (zip, 20 KB)</p> <p>ADL5605 S参数 (zip, 10 KB)</p> <p>ADL5320 S参数 (zip, 21 KB)</p> <p>ADL5535 S参数 (zip, 19 KB)</p> <p>ADL5536 S参数 (zip, 19 KB)</p> <p>ADL5604 S参数 (zip, 16 KB)</p> <p>ADL5534 S参数 (zip, 23 KB)</p> <p>ADL5531 S参数 (zip, 10 KB)</p> <p>ADL5322 S参数 (zip, 32 KB)</p> <p>AD8354 S参数 (zip, 35 KB)</p> <p>AD8353 S参数 (zip, 35 KB)</p> <p>ADL5321 S参数 (zip, 32 KB)</p> <p>ADL5601 S参数 (zip, 31 KB)</p> <p>ADL5602 S参数 (zip, 31 KB)</p> <p>ADL5523 S参数 (zip, 5 KB)</p> <p>ADL5521 S参数 (zip, 5 KB)</p> <p>ADL5542 S参数 (zip, 43 KB)</p> <p>ADL5541 S参数 (zip, 43 KB)</p> <p>ADL5530 S参数 (zip, 10 KB)</p> <p>ADL5323 S参数 (zip, 32 KB)</p> <p>工具与转换</p> <p>VRMS / dBm / dBu / dBi 计算器 功率测量和信号强度的标准单位之间的换算工具。</p> <p>RF阻抗匹配工具 该工具在给定的频率下将一个已知的复杂负载与所需的阻抗相匹配。计算器件数值并显示一个匹配网络的简单电路。</p> | <p>设计支持</p> <p>面向工程师的在线支持社区</p> <p>实验室电路</p> <p>CN-0171: 差分输入中频采样ADC的低噪声、低失真单端输入驱动电路</p> <p>CN-0049: 双中频增益模块ADL5534与高速ADC AD9640的接口</p> <p>CN-0048: 使用AD8352作为高速ADC的超低失真差分RF/AF前端</p> <p>RF放大器应用笔记</p> <p>AN-1142: 高速ADC PCB布局布线技巧 (pdf, 392 KB)</p> <p>AN-1098: 高性能差分驱动放大器与ADC之间的缓冲接口设计方法 (pdf, 167 KB)</p> <p>AN-835: 了解高速ADC测试和评估 (pdf, 985 KB)</p> |
|---|---|---|

图 1.1.2 ADI 公司提供的技术支持

1.1.2 ANADIGICS 公司的射频与微波功率放大器器件

1. ANADIGICS 公司提供的射频与微波功率放大器产品结构树

ANADIGICS 公司 (<http://www.anadigics.com/>) 是领先世界的通信产品供应商。ANADIGICS 公司为不断发展的无线宽带与无线通信市场，设计、制造射频集成电路 (RF IC) 解决方案，提供高质量的 InGaP HBT、GaAs MESFET 和 GaAs pHEMT RF IC 产品，产