

无线通信设备电路设计系列丛书

射频小信号放大器 电路设计

■ 黄智伟 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

TN722.1/17

2008

—无线通信设备电路设计系列丛书—

射频小信号放大器电路设计

黄智伟 编著

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书共 8 章, 分别介绍了射频电路设计基础, 射频小信号放大器电路结构, 低噪声放大器设计基础, 晶体管小信号放大器电路, 低噪声放大器电路, 宽带放大器电路, 宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路以及 GPS 接收机低噪声放大器电路。另外, 书中还详细介绍了各个电路实例的主要技术性能、引脚端封装形式、内部结构、电原理图、印制电路板图和元器件参数等内容, 频率范围从直流(DC)到几十吉赫兹。其电原理图、印制电路板图和元器件参数等可以直接在工程设计中应用。

本书突出先进性、工程性、实用性, 可以作为从事无线通信、移动通信、无线数据采集与传输系统、无线遥控和遥测系统、无线网络、无线安全防范系统等应用研究的工程技术人员在进行射频小信号放大器设计时的参考书或工具书, 也可以作为高等院校通信、电子等相关专业本科生或研究生的专业教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

射频小信号放大器电路设计/黄智伟编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.1

(无线通信设备电路设计系列丛书)

ISBN 978-7-5606-1928-6

I. 射… II. 黄… III. 高频放大器—电路设计 IV. TN722.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 158078 号

责任编辑 张 媛 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http: //www. xduph. com E-mail: xdupfxb@pub. xaonline. com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 20.625

字 数 485 千字

印 数 1~4000 册

定 价 32.00 元

ISBN 978-7-5606-1928-6/TN·0393

XDUP 2220001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

本书是无线通信设备电路设计系列丛书之一，主要介绍与射频小信号放大器电路设计相关的内容。该系列丛书包含《射频小信号放大器电路设计》、《射频功率放大器电路设计》、《混频器电路设计》、《调制器与解调器电路设计》、《锁相环与频率合成器电路设计》和《单片无线发射与接收电路设计》。

射频小信号放大器是无线接收机系统的重要组成部分。本书介绍了射频电路设计基础，射频小信号放大器电路结构，低噪声放大器设计基础，晶体管小信号放大器电路，低噪声放大器电路，宽带放大器电路，宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路以及 GPS 接收机低噪声放大器电路。其中，还包括了各个电路实例的主要技术性能、引脚端封装形式、内部结构、电原理图、印制电路板图和元器件参数等内容，频率范围从直流(DC)到几十吉赫兹。其电原理图、印制电路板图和元器件参数等可以直接在工程设计中应用。

本书共分 8 章。第 1 章介绍了射频电路设计基础，包括频谱，时域、频域与调制域，无源元件的射频特性，非线性器件特性，传输线，Smith 圆图，网络与网络参数，滤波器电路，天线等内容。

第 2 章介绍了射频小信号放大器电路结构，包括射频小信号放大器电路特点和主要技术指标，射频小信号调谐放大器，宽频带小信号放大器和集中选频放大器等内容。

第 3 章介绍了低噪声放大器设计基础，包括电路中的噪声源，放大器的噪声模型，噪声系数及其测量，低噪声放大器抗干扰的基本措施，噪声匹配网络，S 参数在放大器设计中的应用等内容。

第 4 章介绍了晶体管小信号放大器电路，包括 AT 系列、ATF 系列、MBC 系列、MMBR 系列晶体管小信号放大器电路，工作频率可达到 18 GHz。

第 5 章介绍了低噪声放大器电路，包括 MAX 系列、NJG 系列 1 GHz 以下低噪声放大器(LNA)电路，NJG 系列、SMA 系列、TQ 系列、VG 系列、 μ PC 系列 1~2 GHz 低噪声放大器(LNA)电路，MBC 系列、MC 系列、NJG 系列、RF 系列 1.8/1.9/2.1/2.4 GHz 低噪声放大器(LNA)电路，AMMC 系列、MAX 系列 5 GHz 以上低噪声放大器(LNA)电路。

第 6 章介绍了宽带放大器电路，包括 ABA 系列、AD 系列、AH 系列、ECG 系列、MGA 系列、NBB 系列、NLB 系列、RF 系列、SCG 系列、VG 系列宽带放大器电路，频率范围为 DC~12 GHz。

第 7 章介绍了宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路，包括 ABA 系列、AD 系列、ADA 系列、LT 系列、MAX 系列、RF 系列、 μ PC 系列宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路，频率范围为 DC~8 GHz。

第8章介绍了GPS接收机低噪声放大器(LNA)电路,包括ALM系列、ATR系列、BFP系列、BGA系列、MAX系列、NE系列、NJG系列、 μ PC系列GPS接收机LNA电路。

本书内容突出先进性、工程性、实用性,可以作为从事无线通信、移动通信、无线数据采集与传输系统、无线遥控和遥测系统、无线网络、无线安全防范系统等应用研究的工程技术人员在进行射频小信号放大器设计时的参考书或工具书,也可以作为高等院校通信、电子等相关专业本科生或研究生的专业教材或教学参考书。

由于各公司生产的器件和集成电路芯片类型繁多,限于篇幅,本书仅精选了其中的很少部分。读者可根据电路设计实例举一反三,利用在参考文献中给出的大量的公司网址,查询更多的电路设计应用资料。

本书在编写过程中,参考了大量的国内外著作和资料,得到了许多专家和学者的大力支持,听取了多方面的宝贵意见和建议,李富英高级工程师对本书进行了审阅。参加本书编写的还有王彦、朱卫华、陈文光、李圣、王新辉、刘辉、邓月明、张鹏举、肖凯、简远鸣、钟鸣晓、林杰文、余丽、张清明、申政琴、王凤玲、熊卓、贺康政、黄松、王怀涛、张海军、刘宏、蒋成军、胡乡城、曾力、潘策荣、刘晓闽、苏道文、何吉强、曹佳、田婷、李琳、陈媚、丁子琴、王晶晶、曹小静、赵鹏、潘天君等人。

由于我们水平有限,错误和不足在所难免,敬请各位读者批评斧正。

黄智伟

2007年5月于南华大学

目 录

第 1 章 射频电路设计基础	1
1.1 频谱	1
1.2 时域、频域与调制域	2
1.2.1 信号在时域中的相关概念	2
1.2.2 信号在频域中的相关概念	2
1.2.3 信号在调制域中的相关概念	4
1.3 无源元件的射频特性	6
1.3.1 电阻(器)的射频特性	7
1.3.2 电容(器)的射频特性	7
1.3.3 电感(器)的射频特性	8
1.3.4 石英晶体谐振器的射频特性	9
1.3.5 压电陶瓷元件的射频特性	10
1.3.6 SAW 滤波器的射频特性	12
1.4 非线性器件特性	13
1.4.1 非线性电阻特性	13
1.4.2 非线性电容特性	15
1.4.3 非线性电感特性	15
1.4.4 非线性器件的频率变换作用	15
1.4.5 非线性器件的指数律特性	16
1.4.6 非线性器件的双曲正切特性	16
1.4.7 非线性器件的折线特性	18
1.4.8 非线性器件的平方律特性	18
1.5 传输线	19
1.5.1 传输线的定义	19
1.5.2 传输线的类型与特性	19
1.5.3 微带线的设计	21
1.6 Smith 圆图	27
1.6.1 等反射圆图	27
1.6.2 等电阻圆图和等电抗圆图	28
1.6.3 Smith 圆图(阻抗圆图)	29
1.7 网络与网络参数	30
1.7.1 线性网络	30
1.7.2 阻抗矩阵和导纳矩阵	32
1.7.3 混合矩阵和转移矩阵	33
1.7.4 网络的连接	36
1.7.5 散射参数(S 参数)	38

1.8 滤波器电路	40
1.8.1 滤波器的基本结构和特性	40
1.8.2 滤波器的基本参数	42
1.8.3 集总参数滤波器设计	44
1.8.4 天线分离滤波器	47
1.9 天线	47
1.9.1 天线的种类	47
1.9.2 天线的基本参数	50
第2章 射频小信号放大器电路结构	55
2.1 射频小信号放大器电路特点和主要技术指标	55
2.1.1 射频小信号放大器电路特点	55
2.1.2 射频小信号放大器电路主要技术指标	56
2.2 射频小信号调谐放大器	59
2.2.1 LC 谐振回路	59
2.2.2 单级单调谐放大电路	70
2.2.3 调谐放大器的级联	72
2.2.4 调谐频率相同的多级调谐放大器	73
2.2.5 参差调谐放大器	73
2.3 宽频带小信号放大器	75
2.3.1 宽频带放大器的特点	75
2.3.2 宽频带放大器电路技术	76
2.4 集中选频放大器	78
2.4.1 集中滤波器元件	78
2.4.2 集中选频放大器电路模型	80
第3章 低噪声放大器设计基础	81
3.1 电路中的噪声源	81
3.1.1 电噪声的定义与分类	81
3.1.2 电阻中的噪声	82
3.1.3 双极晶体管的内部噪声	83
3.1.4 场效应管的内部噪声	84
3.2 放大器的噪声模型	87
3.2.1 噪声模型基础	87
3.2.2 放大器的噪声二端口网络	87
3.2.3 放大器的 $E_n - I_n$ 噪声模型	88
3.2.4 放大器的 $A_n - B_n$ 噪声模型	89
3.2.5 放大器的 $R_n - G_n$ 噪声模型	89
3.3 噪声系数及其测量	90
3.3.1 噪声性能评价指标	90
3.3.2 噪声系数的计算	93
3.3.3 噪声系数的测量	94
3.3.4 噪声系数测量方法实例	98
3.4 低噪声放大器抗干扰的基本措施	108
3.4.1 形成干扰的因素	108
• 2 •	

3.4.2 抑制噪声和干扰的基本措施	108
3.5 噪声匹配网络	110
3.5.1 直接耦合方式	110
3.5.2 噪声匹配网络	113
3.6 S参数在放大器设计中的应用	117
3.6.1 S参数	117
3.6.2 S参数与功率传输	120
3.6.3 放大器的稳定性	122
3.6.4 按照增益要求设计放大器	123
3.6.5 按照噪声系数要求设计放大器	128
3.6.6 单向传输引入的增益误差	130
第4章 晶体管小信号放大器电路	132
4.1 AT-32032 NPN 晶体管放大器电路	132
4.2 AT-41532 NPN 晶体管放大器电路	134
4.3 ATF-36077 2~18 GHz 超低噪声高电子迁移率晶体管	135
4.4 MBC13900 NPN 低噪声晶体管放大器电路	136
4.5 MMBR901LT1/D 低噪声高频晶体管放大器电路	139
4.6 MMBR941LT1/D 低噪声高频晶体管放大器电路	141
第5章 低噪声放大器电路	144
5.1 1 GHz 以下低噪声放大器(LNA)电路	144
5.1.1 MAX2371/2373 100 MHz~1 GHz LNA 电路	144
5.1.2 NJG1102F1 800~1000 MHz LNA 电路	152
5.1.3 NJG1106KB2 800 MHz LNA 电路	153
5.1.4 NJG1127HB6 800 MHz LNA 电路	155
5.2 1~2 GHz 低噪声放大器(LNA)电路	157
5.2.1 NJG1103F1 1.5/1.9 GHz LNA 电路	157
5.2.2 NJG1107KB2 1.5/1.9 GHz LNA 电路	158
5.2.3 NJG1110PB1 800 MHz 和 1500 MHz 双频带 LNA 电路	160
5.2.4 SMA427A 1~2 GHz 50 Ω LNA 电路	162
5.2.5 TQ3631/3632 1960 MHz LNA 电路	163
5.2.6 VG112 1.8~2.2 GHz 高动态范围的可变增益放大器电路	168
5.2.7 μ PC8231TK 1.575~2.4 GHz LNA 电路	170
5.3 1.8/1.9/2.1/2.4 GHz 低噪声放大器(LNA)电路	172
5.3.1 MBC13720 400 MHz~2.4 GHz LNA 电路	172
5.3.2 MBC13916 0.1~2.4 GHz LNA 电路	179
5.3.3 MC13820/13821 1~2.4 GHz 带旁路开关的 LNA 电路	180
5.3.4 NJG1101F 850 MHz~2.5 GHz 宽带放大器电路	183
5.3.5 NJG1116BHB3 2.1 GHz LNA 电路	184
5.3.6 NJG1119PB4 WCDMA 双频带 LNA 电路	185
5.3.7 NJG1125PB5 800 MHz、2.1 GHz 和 1.7 GHz 三频带 LNA 电路	188
5.3.8 NJG1126HB6 2.1 GHz LNA 电路	190
5.3.9 RF2304 300 MHz~2.5 GHz LNA 电路	193
5.3.10 RF2369 150 MHz~2.5 GHz LNA 电路	194

5.4	5 GHz 以上低噪声放大器(LNA)电路	195
5.4.1	AMMC-6241 26~43 GHz 高增益 LNA 电路	195
5.4.2	AMMC-6220 6~20 GHz 低噪声 MMIC 放大器电路	196
5.4.3	MAX2648 5~6 GHz LNA 电路	197
第6章	宽带放大器电路	201
6.1	ABA53563 DC~3.5 GHz 低噪声放大器电路	201
6.2	AD8353/8254 1 MHz~2.7 GHz 宽带固定增益线性放大器电路	203
6.3	AD8369 LF~600 MHz 45 dB 数控可变增益放大器(VGA)电路	205
6.4	AD8370 LF~750 MHz 数控可变增益放大器(VGA)电路	216
6.5	ADL5330 10 MHz~3 GHz 60 dB 数控可变增益放大器电路	222
6.6	AH1 250~4000 MHz 高动态范围放大器电路	229
6.7	AH11 150~3000 MHz 高动态范围放大器电路	230
6.8	ECG001~ECG008 DC~6 GHz InGaP HBT 放大器电路	232
6.9	MGA-725M4 0.1~6 GHz 带旁路开关的宽带 LNA 电路	234
6.10	MGA-53543 450 MHz~6 GHz 高线性 LNA 电路	236
6.11	MGA-71543 0.1~6 GHz 带旁路开关的宽带 LNA 电路	237
6.12	MGA-85563 0.8~6 GHz 低噪声放大器电路	239
6.13	MGA-87563 0.5~4 GHz 3 V 低电流 LNA 电路	243
6.14	NBB-300/310 DC~12 GHz 宽带 MMIC 放大器电路	245
6.15	NBB-302/312 DC~12 GHz 宽带 MMIC 放大器电路	246
6.16	NBB-500 DC~4 GHz 宽带 MMIC 放大器电路	247
6.17	NBB-502 DC~4 GHz 宽带 MMIC 放大器电路	248
6.18	NLB-300/310 DC~10 GHz 宽带 MMIC 放大器电路	248
6.19	NLB-400 DC~6 GHz 宽带 MMIC 放大器电路	249
6.20	RF2472 DC~6 GHz 低噪声放大器电路	249
6.21	SCG002 DC~6 GHz InGaP HBT 放大器电路	253
6.22	VG025 50~2200 MHz 高线性可变增益放大器(VGA)电路	254
第7章	宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路	257
7.1	ABA-54563 DC~3.4 GHz IF 放大器电路	257
7.2	AD6630 差分低噪声 IF 放大器电路	258
7.3	AD8351 低失真差分 RF/IF 放大器电路	262
7.4	ADA-4543/4643 DC~2.5 GHz IF 放大器电路	266
7.5	LT5514 LF~850 MHz 增益可编程 IF 放大器电路	268
7.6	LT5524 LF~540 MHz 增益可编程 IF 放大器电路	272
7.7	MAX2027 IF 数控可变增益放大器电路	276
7.8	RF2044/2045/2047 DC~6 GHz 宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路	279
7.9	RF2046 DC~3 GHz 宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路	281
7.10	RF2048 DC~8 GHz 宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路	281
7.11	RF2333/2335/2336/2337 DC~6 GHz 宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路	281
7.12	RF3374/3375/3376/3377/3378 DC~6 GHz 宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路	282
7.13	RF3394/3395/3396/3397/3398 DC~6 GHz 宽带 IF 或 RF 缓冲放大器电路	284
7.14	μ PC2745TB/ μ PC2746TB 3V 宽带缓冲放大器电路	285

第 8 章 GPS 接收机低噪声放大器(LNA)电路	287
8.1 ALM-1106 GPS 接收机 LNA 电路	287
8.2 ATR0610 GPS 接收机 LNA 电路	289
8.3 BFP640 GPS 接收机 LNA 电路	292
8.4 BGA622 GPS 接收机 LNA 电路	293
8.5 MAX2641 GPS 接收机 LNA 电路	294
8.6 MAX2654/2655/2656 GPS 接收机 LNA 电路	296
8.7 NE38018 GPS 接收机 LNA 电路	298
8.8 NJG1107HA8 GPS 接收机 LNA 电路	300
8.9 NJG1107HB3 GPS 接收机 LNA 电路	302
8.10 NJG1108HA8 GPS 接收机 LNA 电路	304
8.11 μ PC2749TB GPS 接收机 LNA 电路	305
8.12 μ PC8211TK GPS 接收机 LNA 电路	309
8.13 μ PC8215TU GPS 接收机 LNA 电路	310
8.14 μ PC8230TU GPS 接收机 LNA 电路	311
8.15 μ PG2311T5F GPS 接收机 LNA 电路	312
参考文献	314

第 1 章 射频电路设计基础

1.1 频 谱

由电气和电子工程师学会(IEEE)建立的频谱分段见表 1.1.1。频率与波长的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1.1)$$

式中: $c = 3 \times 10^8$ m/s, 为真空中的光速; f 单位为 Hz; λ 单位为 m。

表 1.1.1 IEEE 频谱

频 段	频 率	波 长
ELF(极低频)	30~300 Hz	10000~1000 km
VF(音频)	300~3000 Hz	1000~100 km
VLF(甚低频)	3~30 kHz	100~10 km
LF(低频)	30~300 kHz	10~1 km
MF(中频)	300~3000 kHz	1~0.1 km
HF(高频)	3~30 MHz	100~10 m
VHF(甚高频)	30~300 MHz	10~1 m
UHF(特高频)	300~3000 MHz	100~10 cm
SHF(超高频)	3~30 GHz	10~1 cm
EHF(极高频)	30~300 GHz	1~0.1 cm
亚毫米波	300~3000 GHz	1~0.1 mm
P 波段	0.23~1 GHz	130~30 cm
L 波段	1~2 GHz	30~15 cm
S 波段	2~4 GHz	15~7.5 cm
C 波段	4~8 GHz	7.5~3.75 cm
X 波段	8~12.5 GHz	3.75~2.4 cm
Ku 波段	12.5~18 GHz	2.4~1.67 cm
K 波段	18~26.5 GHz	1.67~1.13 cm
Ka 波段	26.5~40 GHz	1.13~0.75 cm
毫米波	40~300 GHz	7.5~1 mm
亚毫米波	300~3000 GHz	1~0.1 mm

1.2 时域、频域与调制域

信号可以在时间域(简称时域)中描述,也可以在频率域(简称频域)中描述。任何信号都可以用这两种方法表示。

1.2.1 信号在时域中的相关概念

1. 连续信号与离散信号

连续信号是指强度随时间连续平稳变化的信号。离散信号是指其强度在某段时间内保持某一恒定值,而在另一段时间内则改变为另一恒定值的信号。

2. 周期信号与非周期信号

周期信号随时间的进展不断重复相同的信号形状。在数学上表示为

$$s(t+T) = s(t) \quad (-\infty < t < +\infty) \quad (1.2.1)$$

式中,常量 T 是周期信号的周期。不符合上面条件的信号则属于非周期信号。

3. 振幅、频率与相位

正弦波是一种基本的连续信号。一般的正弦波可用振幅(A)、频率(f)与相位(φ)这三个参数来描述。一般的正弦波可以表示为

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1.2.2)$$

4. 波长

对于频率为 f 的正弦波信号,当在自由空间传播的时候,其波长定义为

$$\lambda = \lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{30(\text{cm})}{f(\text{GHz})} \quad (1.2.3)$$

式中, c 是真空中光速,数值为 3×10^8 m/s。

5. 测量仪器

示波器和时域反射(TDR, Time Domain Reflection)分析仪是观察时域信号的典型仪器。

1.2.2 信号在频域中的相关概念

1. 电磁波信号的构成

电磁波信号由基频信号与谐波信号构成。在实际应用中,电磁波信号由多个频率信号构成。例如信号

$$s(t) = \sin(2\pi f_1 t) + \frac{1}{3} \sin[2\pi(3f_1)t] \quad (1.2.4)$$

其波形如图 1.2.1 所示。

由图 1.2.1 可见:

(1) 谐波频率是基频的整数倍。信号的所有频率都是某一频率的整数倍时,就称该频率是基频。

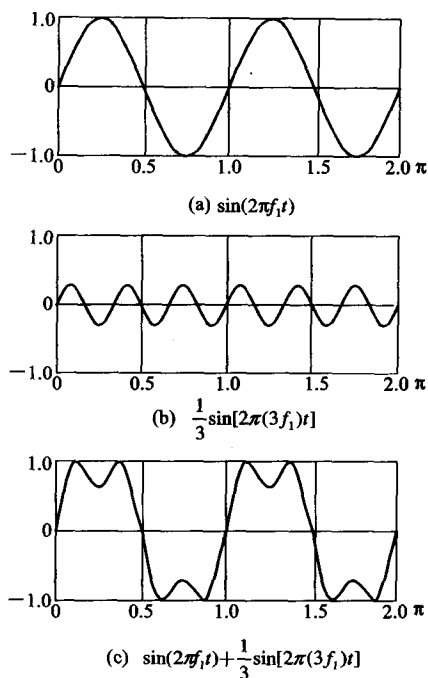


图 1.2.1 时域函数波形(两个频率分量相加的情况, $T=1/f_1$)

(2) 整个信号的周期等于基频的周期。分量 $\sin(2\pi f_1 t)$ 的周期是 $T=1/f_1$, 图 1.2.1(c) 所示信号 $s(t)$ 的周期也是 T 。

由傅里叶分析可以证明: 任何规范的周期性波形都可以表示成一系列频率为基频整数倍的正弦波/余弦波的叠加, 当然有时也加上直流分量。

2. 时域函数与频域函数

每一个信号都存在一个时域函数 $s(t)$, 它规定每一时刻信号的振幅。同样, 每个信号还有一个频域函数 $S(f)$, 它规定构成该信号的各个频率分量。图 1.2.2 描绘了图 1.2.1(c) 中所示信号 $s(t) = \sin(2\pi f_1 t) + (1/3)\sin[2\pi(3f_1)t]$ 的频域函数波形。

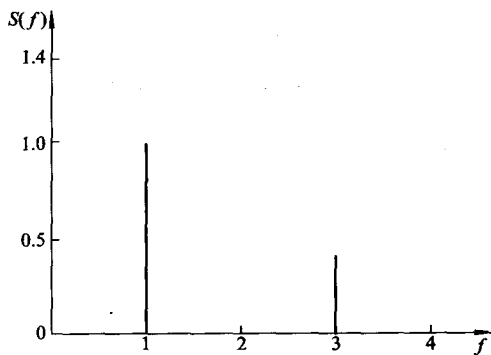


图 1.2.2 图 1.2.1(c) 中所示信号的频域函数波形

注意, 图 1.2.2 的 $S(f)$ 是离散函数。在 f 轴线上 1 点处的直线是频率为 f_1 的正弦波信号 $(\sin(2\pi f_1 t))$ 的频域(Frequency Domain)表示形式。在 f 轴线上 3 点处的直线是频率为 $3f_1$ 的正弦波信号 $[(1/3)\sin(2\pi(3f_1)t)]$ 的频域表示形式。注意, 在频域中表示信号时没有给出信号的相位, 因此图 1.2.2 也可以作为余弦波的频域表示形式。

3. 信号频谱、信号带宽和信道带宽

信号的频谱是指信号所包含频率分量的组成范围。对于图 1.2.1(c) 中所示信号的频谱是 $f_1 \sim 3f_1$ 。信号的绝对带宽是其频谱的宽度, 即所包含的频率范围。在图 1.2.1(c) 中信号的带宽是 $2f_1$ 。从图 1.2.2 可见, 信号中的大部分能量都集中在相对较窄的频带上, 人们通常把这一频带称为有效带宽或信号带宽。除信号带宽外, 在传输中人们还经常提到信道带宽。信道带宽指信道上能够传送信号的最大频率范围。

4. 直流分量

如果信号包括零频率分量, 该分量就称为直流分量或恒定分量。

5. 测量仪器

网络分析仪和阻抗分析仪是观察频域信号的典型测量仪器。

1.2.3 信号在调制域中的相关概念

1. 调制域的基本概念

调制域(Modulation Domain)是 20 世纪 80 年代末提出的新概念。如图 1.2.3 所示, 时域(Time Domain)反映幅度 A 与时间 T 的关系, 频域(Frequency Domain)反映幅度 A 与频率 F 的关系, 而调制域是反映频率 F 和时间 T 之间关系的。这样, 对于一个调制信号可以进行三维观测, 从时域、频域和调制域三个方面去分析研究。调制域为人们观测信号提供了一个新的窗口, 一些在时域和频域无法观察到的现象, 在调制域中却能比较容易地看到。

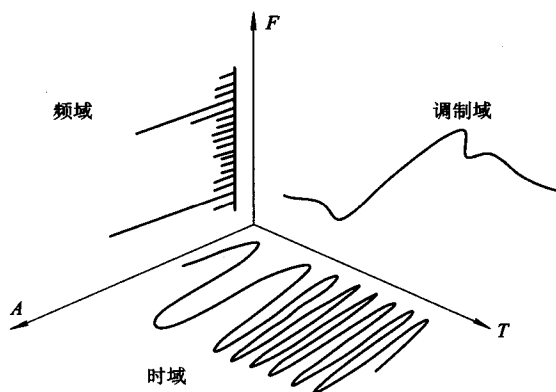


图 1.2.3 一个频率跳变信号的三维波形

例如, 图 1.2.4 所示的锁相环路中, 压控振荡器(VCO)的频率阶跃响应能从调制域分析仪屏幕上直观地显示环路的捕捉过程, 能精确地测出阶跃前后的频率, 跃变中的过冲、振铃、上升时间及新频率的建立时间, 这些数据都可在屏幕上部分显示出来。

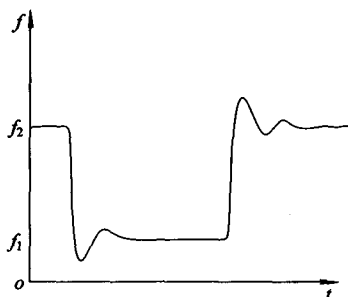


图 1.2.4 锁相环路中 VCO 的频率阶跃响应

2. 调制域分析的关键技术

调制域分析主要是研究频率随时间的变化情况，其关键技术是实现动态连续地测量频率。由于采用通用的电子计数器进行频率的测量，其基本原理是定时计数，频率测量过程按“复零准备→开门计数→关门读数”的程序进行，因此存在“开门计数”之外丢失被测信号的“死区”时间，不能连续不断地进行测频。

无死区时间计数器(Zero Dead Time Counter)，简称 ZDT 计数器，解决了动态连续测量变化频率的问题。ZDT 计数器从原理上讲，主要是由两路计数器组成的，如图 1.2.5 所示^[54]。

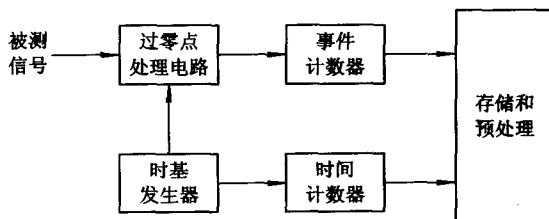


图 1.2.5 ZDT 计数器原理框图

一路称为事件计数器(Event Counter)，对被测信号经过处理的过零点进行计数；另一路称为时间计数器(Time Counter)，对时基脉冲进行连续计数。作为定时的时间单位，时基脉冲间隔越小测量精度越高。两路计数器是同步对应工作的。现以频率测量为例，其工作过程如图 1.2.6 所示。设输入的被测信号是两个不同频率的正弦波，经过零点处理电路放大、微分、整形后，得到图 1.2.6(d)所示的脉冲列，然后送到图 1.2.5 所示的事件计数器计数。这里的“事件”是指信号一个周期的时间间隔，如图 1.2.6(d)中的 T_1 和 T_2 。与此同时，图 1.2.5 中的时间计数器对时基脉冲(设其周期为 T_0)进行同步计数，其波形如图 1.2.6(e)所示(图中略去了触发同步等信号)。经过存储和数据处理，可求得 T_1 、 T_2 与 T_0 的对应关系，即求得被测信号的频率 f_1 、 f_2 。

$$T_1 = N_1 T_0, \quad f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{f_0}{N_1}$$

$$T_2 = N_2 T_0, \quad f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{f_0}{N_2}$$

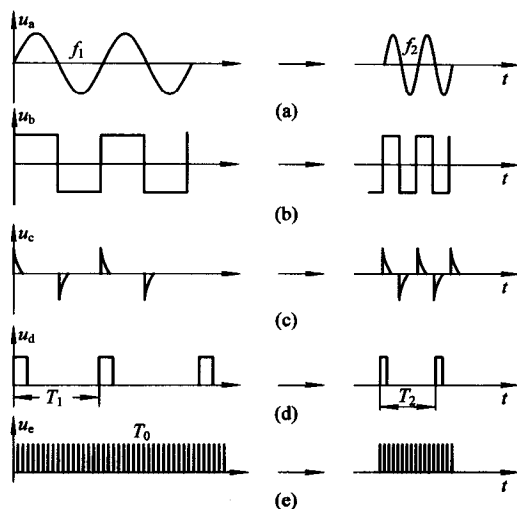


图 1.2.6 ZDT 计数器工作原理波形图

从原理上讲,只要出现一个“事件”,即一个周期就可测出频率,故 ZDT 计数器可以动态地进行瞬时频率的测量。不过事实上,载波信号不会只有一个周期,故可通过多个“事件”计数,然后求平均频率,这样精确度会更高。同理,相位或时间间隔也可以作为“事件”,而且“过零”处理交叉点的阈值可以由用户设定。故此,同样可以用来分析相位或时间间隔与时间的关系。

无死区计数器的实现可以有多种方案,如双路计数法、周期计时法、移位存储法和双路计数器加内插补偿法等。美国 HP 公司采用 ZDT 计数器原理制作了专用集成电路,并先后推出了如 HP5372A 等几种型号的调制域分析仪。

3. 调制域分析仪的应用

调制域分析仪的主要测量对象为频率,周期,时间间隔(正负时间间隔、连续时间间隔),实时运算的时间间隔直方图,相位偏移(单通道)和 A 相对 B 的相位,时间偏差(抖动),专门测量(包括脉冲宽度、占空比和上升/下降时间)等,可直接通过各种不同的测量方法获取结果。

调制域分析仪的主要分析功能有频率、相位、时间间隔相对于时间轴的变化显示,单次或多次平均,任何测量结果的直方图显示,测量结果数值显示,调制分析(峰-峰偏移、中心频率、调制速率),抖动频谱分析,各种参数统计(平均、最大、最小、方差、均方差、有效值、概率),阿伦方差计算等。抖动和调制都可利用机内的分析功能方便地进行定量分析。另外,仪器还具有组合触发和选通功能,用于捕获复杂输入信号的特定部分。

1.3 无源元件的射频特性

在高频(30~300 MHz)以下波段,即波长大于 1 m 的情况时,元器件的尺寸远远小于波长,参数为集总参数形式,参数集中在 R、L、C 等元件中,可以认为与导线和路径无关。

在微波(300 MHz~300.GHz)以上波段,即波长小于 1 mm 的情况时,元器件的尺寸等于或者小于波长,参数为分布参数形式,参数分布在器件的腔体、窗口、微带线中,与导线和路径有关。

在射频频段,集总电阻、集总电容和集总电感的特性是不具有“纯”的电阻、电容和电感的性质,这是在射频电路设计、模拟和布线过程中必须注意的。

1.3.1 电阻(器)的射频特性

一个电阻(器)的高频等效电路如图 1.3.1 所示。图中,两个电感 L 等效为引线电感,电容 C_b 表示电荷分布效应, C_a 表示引线间电容,与标称电阻相比较,引线电阻常常被忽略。从图 1.3.1 可见,在低频时电阻的阻抗是 R ,随着频率的升高,寄生电容的影响成为引起电阻阻抗下降的主要因素,然而随着频率的进一步升高,由于引线电感的影响,电阻的总阻抗上升。在频率很高时,引线电感会成为一个无限大的阻抗,甚至开路。一个金属膜电阻的阻抗绝对值与频率的关系如图 1.3.2 所示。

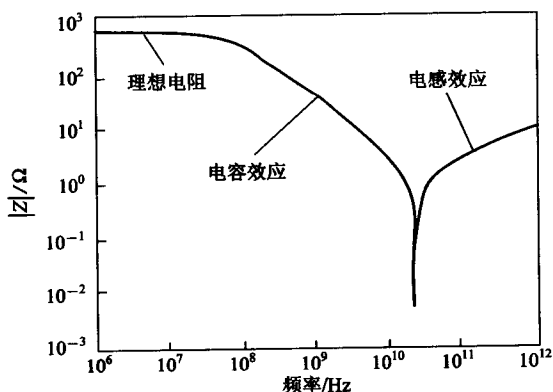
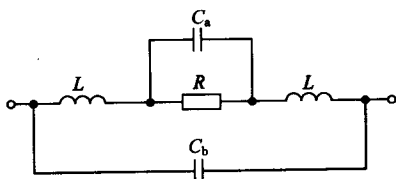


图 1.3.1 一个电阻(器)的高频等效电路 图 1.3.2 一个金属膜电阻的阻抗绝对值与频率的关系

目前,在射频电路中主要应用的是薄膜片式电阻,该类电阻的尺寸能够做得非常小,可以有效地减少引线电感和分布电容的影响。片式电阻的形式有 0603、0805、1206、2010、2512,功率范围为 1/10~1 W,阻值范围为 0.1 Ω ~10 M Ω 。例如,0603 的封装尺寸仅为 1.60 mm(长)×0.8 mm(宽)×0.45 mm(高)。

1.3.2 电容(器)的射频特性

一个电容(器)的高频等效电路如图 1.3.3 所示。图中,电感 L 等效为引线电感,电阻 R_s 表示引线导体损耗,电阻 R_c 表示介质损耗。由图 1.3.3 可见,电容器的引线电感将随着频率的升高而改变电容器的特性。如果引线电感与实际电容器的电容谐振,这将会产生一个串联谐振,使总电抗趋向为 0 Ω 。由于这个串联谐振产生一个很小的串联阻抗,因而非常适合在射频电路的耦合和去耦电路中应用。然而,当电路的工作频率高于串联谐振频率时,该电容器将表现为电感性而不是电容性。一个电容(器)的阻抗绝对值与频率的关系如图 1.3.4 所示。