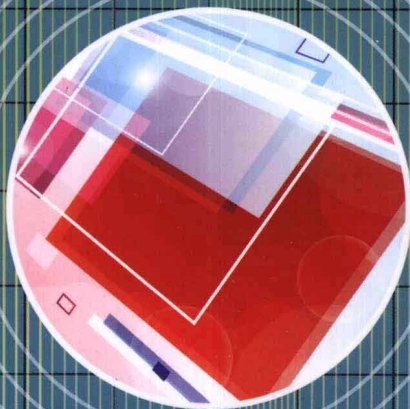
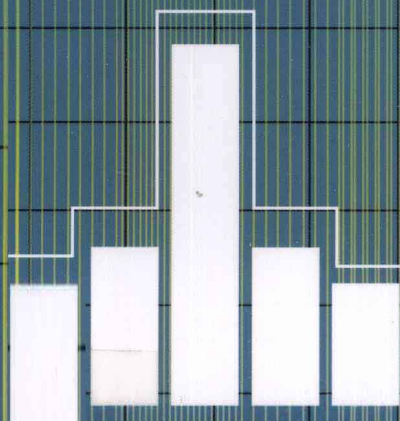


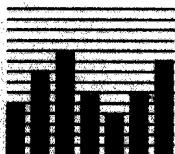
无线通信测试工程师
实用技术丛书

频谱分析仪 与测量技术基础

■ 李剑雄 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



无线通信测试工程师
实用技术丛书

频谱分析仪 与测量技术基础

■ 李剑雄 编著 ■

人民邮电出版社

北 京

前 言

由于无线通信技术（包括移动通信、卫星通信）和计算机技术的迅猛发展，射频和微波电路得到了广泛的应用。特别是移动通信，其设计、测试与制造领域得到了业界的特别关注。在移动通信方面，可以预见的是，不论是 2G 还是 3G，或是将来的 4G 通信，我国都具有非常庞大的市场。

对于任何的无线通信设备来说，测试是研发、生产、维护等工作结果验证的重要手段，也是保证产品质量的重要手段。任何电子产品都是离不开测试。测试技术总是先于产品本身的。

无线通信测试所涉及的范围很宽，如 GSM 测试、CDMA 测试、WCDMA 测试、TD-SCDMA 测试、蓝牙测试等。无线通信测试不仅要解决相关的理论问题，还要解决一系列的技术问题，如测试规范的制定、测试设备的研发与生产，产品的研发、生产测试，产品的各种认证测试等。

随着质量的进一步要求，硬件测试工作在产品研发阶段的投入比例已经向测试倾斜，许多知名的国际企业，硬件测试人员的数量要远大于开发人员。然而，即使是进入手机或无线通信相关企业的技术人员，相当多的人员在初始阶段都在寻求与无线通信测试技术相关的资料。

鉴于以上原因，我们通过长时间的准备，收集整理了大量的相关资料，决定组织编辑一套与无线通信测试技术相关的技术丛书。

该系列丛书的一个重要特点就是面向实际应用，从测量实践出发对知识点予以描述。在该系列丛书的编写过程中，力求从“技术”与“技巧”层面来描述无线通信测试技术各方面的相关知识点，该系列丛书中对相关理论的讨论大部分也不依赖于繁复的数学推导，丛书的内容深入浅出，语言简明扼要，通俗易懂。

该系列丛书可作为电子、通信、电气等相关专业选为高职（或中职）教材或教学参考书，也适用于手机生产企业、手机代工厂的生产测试技术人员，适用于社会上的相关从业人员（包括手机维修人员）与电子爱好者，特别是从事电子工程和通信领域的测量工作人员。

《频谱分析仪与测量技术基础》比较全面地介绍了频谱分析仪的原理和各方面知识，并结合实际应用介绍了大量的测量技巧。书中没有复杂的理论与数学推导，而是从实用的角度出发，着重于基本概念与知识点的分析，并结合实际电路进行讲解，让读者易于快速理解。本书可作为相关从业人员及广大电子爱好者的自学教材，对于射频、通信及其测试相关专业的学生来说，也是一本难得的参考书。

我们衷心希望本书能满足读者的需求。但由于条件和水平所限，难免会出现一些不妥，甚至错误。敬请读者予以批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 频谱测量基础	1	3.1.5 高频段的前级电路	48
1.1 信号	1	3.2 中频信号处理	55
1.1.1 信号的参数	1	3.2.1 中频放大器	55
1.1.2 信号的类型	3	3.2.2 中频滤波器	55
1.2 信号的功率及强度	4	3.3 视频信号处理	58
1.2.1 分贝	4	3.3.1 包络检波	59
1.2.2 绝对分贝值	6	3.3.2 视频滤波	62
1.3 时域与频域中的信号	7	3.4 视频检波器	64
1.3.1 时域中的信号	7	3.4.1 取样检波	65
1.3.2 时域和频域的关系	8	3.4.2 峰值检波	65
1.4 频域测量	12	3.4.3 自动峰值检波	66
1.4.1 什么是频谱	12	3.4.4 其他检波模式	66
1.4.2 为什么测量频谱	12	3.5 轨迹处理	67
1.4.3 测量的类型	15	3.6 频谱仪的本振	68
1.4.4 信号分析仪的类型	15	3.6.1 本振	69
第 2 章 频谱分析仪基础	18	3.6.2 相位噪声	69
2.1 多通道滤波器式分析仪	18	3.6.3 本振馈通	71
2.2 FFT 分析仪	19	第 4 章 频谱分析仪的性能指标	73
2.2.1 FFT 分析仪的原理与结构	19	4.1 内部失真	73
2.2.2 FFT 分析仪	20	4.1.1 非线性失真	73
2.3 扫频频谱分析仪	21	4.1.2 1 dB 压缩点	77
2.3.1 滤波器式分析仪	21	4.2 频率特性	78
2.3.2 超外差式频谱分析仪	22	4.2.1 分辨率带宽	78
2.4 主要设置参数	29	4.2.2 滤波器的形状因子	81
2.4.1 频率显示范围	30	4.2.3 相位噪声	84
2.4.2 电平显示范围	33	4.2.4 剩余调频	86
2.4.3 频率分辨率	34	4.3 幅度特性	86
2.4.4 扫描时间	34	4.3.1 显示的线性度	87
2.4.5 频谱仪的显示	35	4.3.2 阻抗失配	87
第 3 章 超外差频谱分析仪原理	38	4.3.3 输入衰减器的影响	87
3.1 射频输入单元	38	4.3.4 输入滤波器的影响	88
3.1.1 输入阻抗	38	4.3.5 中频单元的影响	88
3.1.2 射频衰减器	39	4.4 噪声和灵敏度	88
3.1.3 低通滤波器	40	4.4.1 固有噪声	88
3.1.4 混频器	40	4.4.2 灵敏度	91

4.4.3 噪声系数	94	5.3.3 分辨频率接近幅度 不等的信号	113
4.5 动态范围	94	5.4 测量低电平信号	114
4.5.1 什么是动态范围	94	5.5 失真测量	116
4.5.2 电平显示范围	95	5.5.1 测量正弦信号的谐波	116
4.5.3 最大动态范围	96	5.5.2 三阶互调失真	117
4.5.4 动态范围和内部失真	97	5.6 噪声测量	120
4.5.5 噪声对动态范围的影响	99	5.6.1 关于噪声测量	120
4.6 抗干扰	100	5.6.2 相位噪声测量	121
4.6.1 镜像频率	100	第 6 章 频谱分析仪的增强功能	125
4.6.2 中间频率处的中频馈通	100	6.1 1 dB 压缩点测试	125
4.6.3 杂散响应	100	6.2 放大器的增益测量	126
第 5 章 频谱分析仪的基础测量	102	6.3 测量脉冲信号	127
5.1 频谱仪的最大输入电平	102	6.4 调制测量	128
5.2 频谱仪的设置问题	103	6.4.1 测量调幅信号	128
5.2.1 频谱仪带宽的设置	103	6.4.2 测量调频信号	131
5.2.2 参考电平与射频衰减	105	6.5 其他测量	132
5.2.3 过载	107	6.5.1 测量插入损耗	132
5.2.4 失真测试结果的真实性	107	6.5.2 测量回波损耗	133
5.3 测量正弦信号	109	6.5.3 时间选通测量	133
5.3.1 测量已知频率的信号	109	参考文献	136
5.3.2 分辨等幅信号	112		

第 1 章 频谱测量基础

1.1 信号

1.1.1 信号的参数

在描述电信号的参数时，常常涉及信号的频率（frequency）、幅度（amplitude）、相位（phase）。在频谱分析仪的操作应用中，更是经常涉及信号的频率与幅度（或信号的电平），这里有必要再来了解（回顾）一下以上 3 个参数的相关知识。

1. 信号的频率

在绝大多数情况下，频率概念是分析了解电路中信号的关键。通过区分信号的频率，可将一个电信号与另一个电信号分离，也可以区分不同的信号、电路与无线应用。

不论是设计电路，还是测试电路中的信号，首先需要关注的通常是信号的频率（ F ）。频率是指单位时间内信号发生周期性变化的次数，其基本单位是赫兹（Hz），还有千赫兹（kHz）、兆赫兹（MHz）、吉赫兹（GHz）等。

射频通常是指从 30 MHz 到 1 GHz 的频率。而将 1 GHz 到 30 GHz 的信号称为微波。30 GHz 以上的信号则被称为毫米波。人们熟知的 GSM 手机、CDMA 手机就工作在 900MHz、1 800 MHz 及 1 900 MHz 频段。

在一般观念上，检测信号频率的首选设备是频率计。频率计的操作最简单。但是频率计比较难以检测到微弱的射频信号。当电路存在多个射频信号时（比如混频电路），频率计显示的信号频率只是最强信号的频率。通常所见的频率计只适用于检测 1 GHz 以内的连续波无线射频信号。对于 GSM 手机等采用了数字技术的无线通信设备中的射频信号，需要有专门的设备才能准确地检测到其发射射频信号的频率。

对射频电路来说，测量信号频率的首选设备还是频谱分析仪，它可检测电路中微弱的射频信号。即使电路中有多个相近的射频信号，它也能清楚地显示出来。高档的频谱分析仪可以准确地反映出射频信号的频率，同时还可观察射频信号的幅度与频谱。

示波器也可测试信号的频率。但是，需要通过读取信号的周期来计算，很麻烦，而且误差也比较大（一般的示波器很难获取准确的信号周期）。同时，一般的示波器的测试范围通常是 20 MHz、40 MHz、100 MHz，根本满足不了射频通信电路中射频信号测试的需求。示波器是不可能用来检测诸如 GSM 手机、CDMA 手机、WCDMA 手机一类无线通信设备中的射频信号的。

2. 信号的幅度

除信号的频率外，在许多情况下，必须关注信号的幅度。如放大器的输入信号幅度——信号幅度过大可能导致失真，信号幅度过小则可能导致放大器的输出不能满足后级电路（如

混频电路)对信号幅度的需求。

幅度是指周期性变化波的最大上升值和最大下降值。图 1-1 所示的就是模拟信号幅度的示意图。可以看到,信号 A 和信号 B 在单位时间内的变化次数是一样的,即信号的频率相同。但信号 A 的幅度比信号 B 的幅度小。

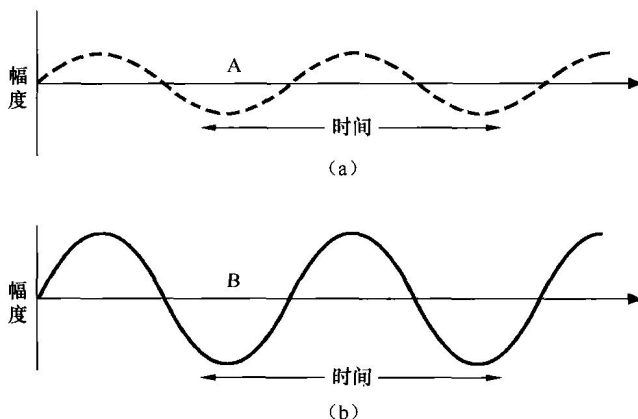


图 1-1 模拟信号幅度示意图

频谱分析仪与示波器都可以用来检测信号的幅度。但是,示波器的测量范围太窄,只适合测量低频信号。对于射频信号来说,最好用频谱分析仪来检测。在示波器上观察信号的幅度类似于对图 1-1 中信号的观察。图 1-2 所示的则是安泰信频谱分析仪显示屏的图片。图 1-2 (a) 中的信号幅度比图 1-2 (b) 中的信号幅度大。

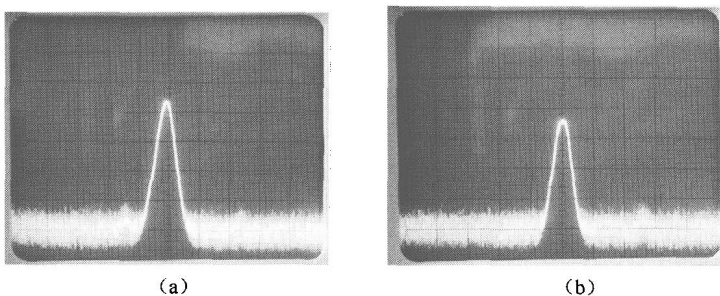


图 1-2 频谱分析仪上信号幅度的比较

3. 信号的相位

利用电压值能表示正弦波的幅度,频率或周期可以表征正弦波完成一个周期变化的频繁程度。但频率相同的两个正弦波信号可能在同一时刻不在零点相交。因此,需要通过正弦波的相位来确定它们在时间轴上的位置。相位的单位为度($^{\circ}$),正弦波一个周期的相位分成 360° 。

相位可作为描述正弦波变化的物理量在某一时刻或某一位置的状态的一个数值。它是指周期变化或波动的相对位置。图 1-3 所示的就是一个模拟信号的相位图。信号 A 和信号 B 的相位就相差 90° 。但两个信号在单位时间内周期性变化的次数相同,也就是其频率相同。从图上也可以看到两个信号的幅度也是相同的。

在大多数情况下,需要考虑信号的频率与幅度,只有对特定的系统或信号才考虑相位,如 GSM 发射信号。一般的示波器与频谱分析仪都无法反映出信号的相位信息。测试信号的相位通常需要特殊的设备(如相位测量仪)。

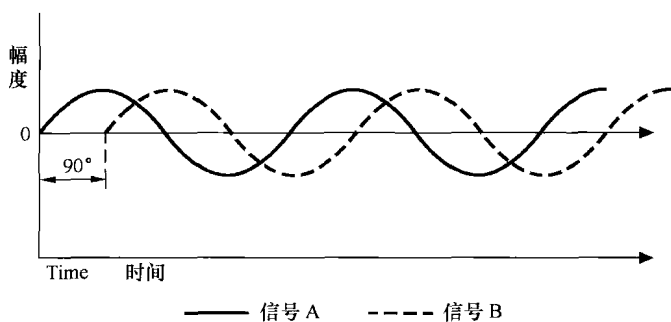


图 1-3 模拟信号相位示意图

1.1.2 信号的类型

电路中的信号分类方法很多，信号可分为模拟信号和数字信号，可分为高频信号、低频信号，可分为直流信号、交流信号等。

还可根据信号的特性，将信号分为非调制连续波信号（CW 信号）、调制信号；根据存在形式，信号可分为连续稳定信号、周期变化信号（如脉冲 TDMA 信号）、瞬变信号等。除了上述信号种类之外，还有很多分类方法，如确定信号和随机信号、连续时间信号和离散时间信号、周期信号与非周期信号。

1. 周期信号和非周期信号

一个信号若满足下列关系便是周期信号（periodic signal）：

$$X(t) = X(t + T) \quad (\text{对所有的 } t)$$

上式中， T 是信号的周期， t 是时间。

换句话说，周期函数若在时间上恰好变化一个周期，所得到的信号函数看上去仍同原来的函数一样。时间的周期函数每隔 T 秒便重复出现（见图 1-4）。而图 1-5 所示的则是一个非周期信号。

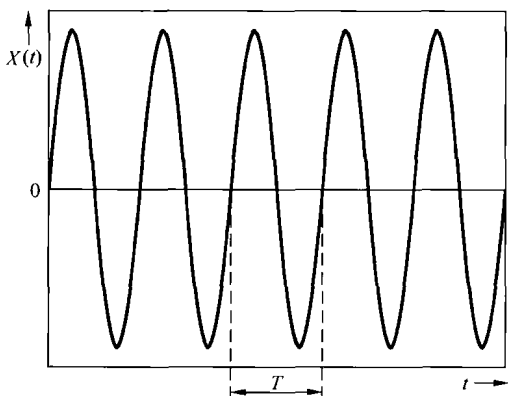
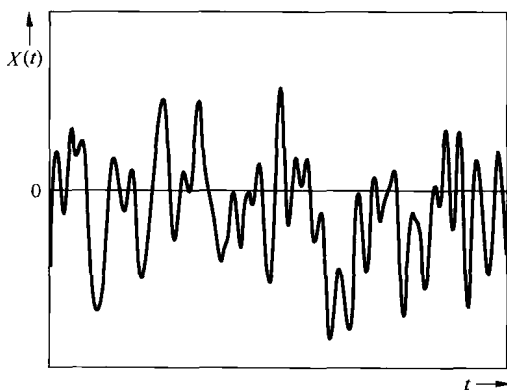
图 1-4 周期信号每隔 T 秒便重复出现

图 1-5 非周期信号

2. 连续波射频与脉冲射频

无线通信可分模拟与数字无线通信两大类。早期的 ETACS 模拟手机就属于模拟无线通信，如今的 GSM、CDMA 手机则属于数字无线通信。

采用模拟技术的发射机与采用数字技术的发射机输出的射频信号是有很大差异的。最明显

的不同是“连续波（CW，Continuous Wave）射频信号”与“脉冲（pulsed）射频信号”的区别。

如果一个发射机一直工作，并且发射机的射频信号不间断地一直输出，这个射频信号被称为“连续波射频信号”。最早的 ETACS 模拟手机中的射频信号属于这一种，如图 1-6 所示。

如果一个发射机的关闭与打开快速地交替进行，并且它的射频信号不是连续的，这个射频信号可被称为“脉冲射频信号”，如图 1-7 所示。GSM 手机发射出的射频信号就属于这一种。

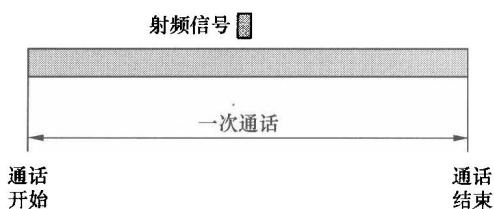


图 1-6 连续波射频信号示意图



图 1-7 脉冲射频信号示意图

图 1-8 与图 1-9 所示的则是连续波射频信号与脉冲射频信号在安泰信、惠美等频谱分析仪上所显示的频谱图，可以看到它们有明显的区别。其中，图 1-8 所示的则是一个模拟手机的发射信号频谱图，图 1-9 所示的则是一个 GSM 手机的发射信号频谱图。

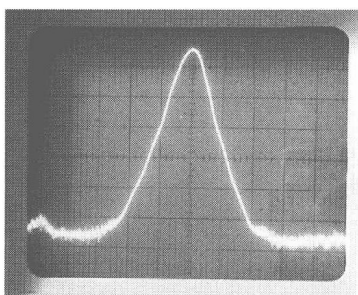


图 1-8 连续波射频信号频谱图

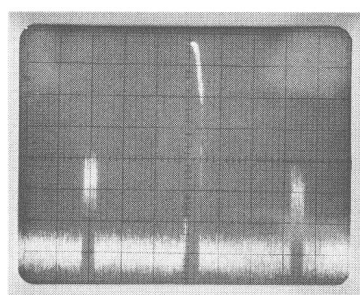


图 1-9 脉冲射频信号频谱图

1.2 信号的功率及强度

在描述信号时，通常会讲到它的强度（幅度、电平）和功率。为了计算方便，射频及微波工程中信号的功率或强度通常以对数形式来表示。

在许多时候，人们用分贝（dB）来表示电参量，这是一种比较方便的形式。几乎所有的频谱分析仪都用校准为分贝的显示刻度（显示器）来显示测量结果。

1.2.1 分贝

分贝（dB）是一种以对数的形式作为参考来表达电压、功率、增益、损耗和频率的一种标准，其典型的基准包括伏特、瓦特。

在许多仪器上（如频谱分析仪、网络分析仪）都是用它们校准为 dB 的显示器来显示测量结果。dB 在这类应用中如此普及的原因是——它能按对数方式压缩大范围变化的信号电平，使信号幅度相差很大（如 90 dB）的两个信号能同时显示在仪器的显示器上。例如，1 V 信号和 10 μ V 信号能同时出现在动态范围为 100 dB 的显示器上，而用线性刻度则不可能以清晰的图形同时显示这两个信号。

dB 也用于增益与损耗的计算。这时，乘法运算变成较为方便的加、减法运算。

分贝的定义是依据两种功率电平之比 (R_p)，其计算表达式是：

$$R_p(\text{dB}) = 10 \lg \left(\frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} \right)$$

需注意的是，dB 是无量纲单位，是一个表征相对值的值，只表示两个量的相对大小关系，当考虑甲的功率相比于乙功率大或小多少个 dB 时，按下面计算公式：

$$10 \lg \left(\frac{\text{甲功率}}{\text{乙功率}} \right)$$

如果采用两者的电压比计算，用下面的计算公式：

$$20 \lg \left(\frac{\text{甲电压}}{\text{乙电压}} \right)$$

对于 dB 的计算，有一些简单的概念。

(1) 0 dB 对应的比值为 1（适于电压与功率）。电路的增益或损耗为 0 dB 时，表明电路的输出等于输入。

(2) 3 dB 的对应功率比值为 2。功率电平变化 -3 dB，表明功率降到原来的一半 (1/2)；功率电平变化 +3 dB，表明功率增加一倍 (乘以 2)。

(3) 6 dB 的对应电压比值为 2。电压变化 -6 dB，表明电压降到原来的一半 (1/2)；电压变化 +6 dB，表明电压增加一倍 (乘以 2)。

(4) 10 dB 对应功率比为 10。在这一点，dB 值和功率比值相同，这是唯一的一点。

分贝 (dB) 至少有两种特性使人们使用方便。

(1) 分贝将多种电参量大大地压缩成易处理的对数，如功率范围从 100 W 至 1 mW，比值为 100 000 与 1 之比，但用 dB 表示时，该比值则只为 50 dB。

(2) 通过电路如衰减器、放大器、滤波器后的增益与损耗，当用 dB 表示时，可以加到一起获得总增益或总损耗。只需简单的加、减处理即可完成等效的运算 (dB 只能进行加减，不能进行乘除)。比如，图 1-10 所示电路的总增益为：13 - 3.5 + 10 = 19.5 dB。图 1-10 中标注为 “+” dB 值表示电路的增益，标注为 “-” dB 值的表示电路的损耗。

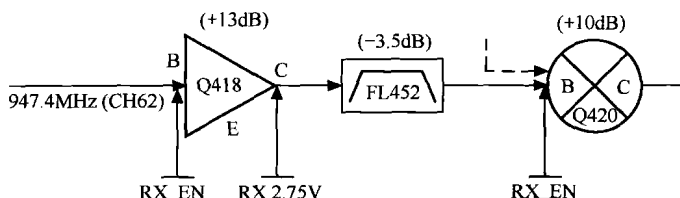


图 1-10 摩托罗拉 GSM328 手机部分射频框图

表 1-1 列出分贝的一些常用基本数据。

表 1-1 关于分贝的常用数据

电压比	功率比	分贝
1	1	0 dB
1.44	2	3 dB
2	4	6 dB
3.16	10	10 dB
10	100	20 dB

1.2.2 绝对分贝值

分贝除了表达功率比值和电压比值之外，还可以用来确定绝对电压或绝对功率。但要确定功率参考值或电压参考值。常见的绝对分贝值有毫瓦分贝（dBm）、伏特分贝（dBV）。

为了仪表的使用方便，一种方便且常用的功率参数为毫瓦（1 mW 或 0.001 W），由此导出毫瓦分贝（dBm），计算公式为：

$$P_{(\text{dBm})} = 10 \lg \left(\frac{\text{功率}}{0.001} \right)$$

dBm 是一个表示功率绝对值的值，也可以认为是以 1 mW 功率为基准的一个比值。其中，有几个典型的值可见表 1-2。

表 1-2 典型 dBm 对应参考值

功率	功率 (dBm)	电压幅度
1 W	+30	10 V
10 mW	+10	1.0 V
1 mW	0	0.316 V
0.1 mW	-10	0.1 V
10^{-9} mW	-90	10 μ V

例，如果功率为 1 mW，折算为 dBm 后为 0 dBm。

对于 40 W 的功率，按 dBm 单位进行折算后的值应为：

$$10 \lg \left(\frac{40}{0.001} \right) = 10 \lg (40\,000) = 46 \text{ dBm}$$

GSM 手机的最大输出功率是 2 W = $10 \lg \left(\frac{2}{0.001} \right) = 33 \text{ dBm}$ 。

需注意的是，dBm 是功率绝对值；dB 是相对值，应注意它们的区别。

比如，放大器输出信号是 20 dBm，输入信号是 10 dBm。放大器的输出信号功率之比（ R_p ）可作如下计算：

因，10 dBm 相当于 10 mW 20 dBm 相当于 100 mW

$$R_p(\text{dB}) = 10 \lg \left(\frac{\text{甲功率}}{\text{乙功率}} \right)$$

所以，放大器输入输出功率比为：

$$10 \lg \left(\frac{100}{10} \right) = 10 \text{ dB}$$

我们可以说放大的输出信号比输入信号大 10 dB，即输出为输入的 10 倍，而不是说大 10 dBm（放大器的输出比输入大 90 mW）。

如果描述成放大器的输出信号比输入信号大 10 dBm，则输出比输入只大 10 mW——输入为 10 mW，输出为 20 mW，这样，放大器的输入输出功率之比仅为 3 dB。

除分贝毫瓦外，还有一个伏分贝。伏分贝的自然参考值是 1 V，一次导出伏分贝（dBV）：

$$U(\text{dBV}) = 20 \lg \left(\frac{V}{1} \right) = 20 \lg(V)$$

1.3 时域与频域中的信号

1.3.1 时域中的信号

人的思维对时间概念比较敏感，每时每刻都与时域事件发生联系。在时域中，信号的幅度随时间而变化，这是示波器常用的显示模式。

描述电信号最直观的途径是采用时域表象方式——给出电压和电流随时间变化的关系。早期的信号观察主要依赖于示波器在时域内观察信号。示波器所显示的是信号的时域表象，它显示了实际电信号的瞬时值随时间的变化，即在时域中观察信号的波形。图 1-11 所示的就是示波器检测到的一个 20MHz 的信号波形（正弦波），图 1-12 所示的则是一个复杂的时域波形。

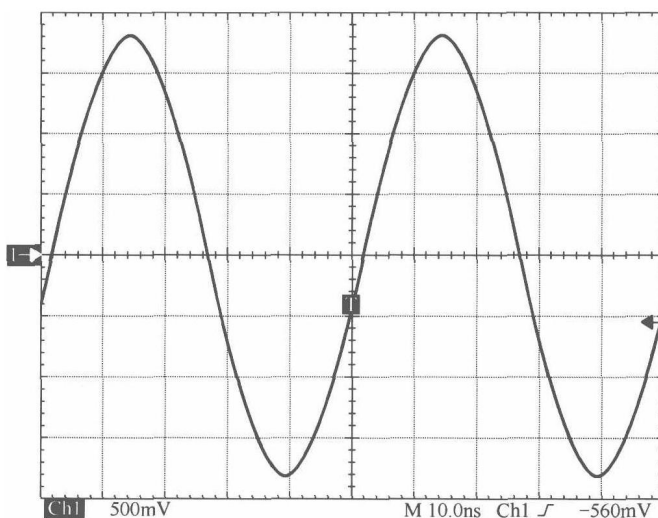


图 1-11 示波器观察到的一个 20MHz 信号波形

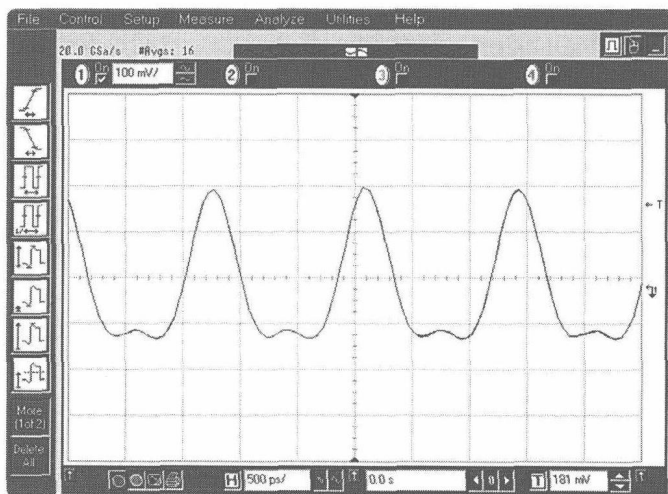


图 1-12 一个复杂的时域波形

1.3.2 时域和频域的关系

我们在时域中观察如图 1-11 所示的信号，好像是一个单一的正弦波信号。但是，如果用频谱分析仪观察这个 20 MHz 的正弦波信号，会发现——除 20 MHz 的信号外，还有 20 MHz 信号的谐波，如图 1-13 所示。

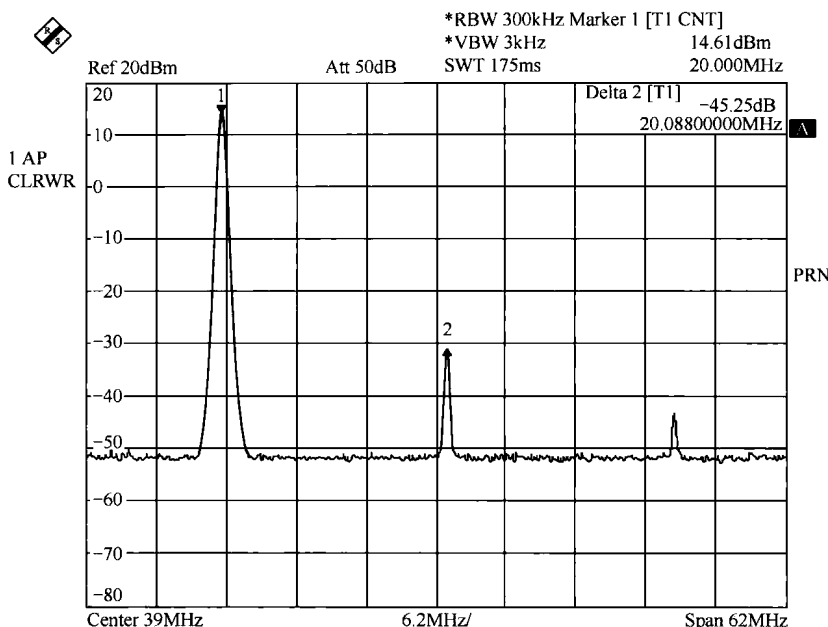
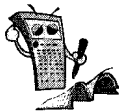


图 1-13 频谱分析仪观察到的图 1-11 中的正弦信号

比较信号在时域内观察的结果（见图 1-11）和频域内观察的结果（见图 1-13），可以清楚看出信号在频域观察的必要性。



时域得到的是信号的波形信息，不能测量混合信号，如果存在干扰或失真信号，在时域上无法区分有用信号和无用信号。在频域上可以准确地测量有用信号和无用信号的各种参数。

这是否意味着我们无须时域测量？也不尽然，对于许多测量来说，实施时域测量会更好些，而有些测量则只能在时域进行。例如，脉冲的上升沿、下降沿，测量过冲和振铃等就只能在时域中测量。

电子信号可用示波器在时域中观察，也可通过频谱分析仪在频域中观察。但应用示波器无法观察到频域内信息。应用频域测量，就能以频谱的形式显示出每个正弦波的幅度随频率变化的情况。

1. 傅氏级数

信号在时域和频域中的显示通过傅里叶变换来进行联系。沟通频域与时域之间的联系的那些基本知识通常被称为傅氏理论¹（傅里叶原理）。傅氏理论告诉我们：任何时域内电信号都是由一个或多个不同频率、不同幅度和不同相位的正弦波组成的（见图 1-14）。

¹ 傅氏理论是为了纪念法国数学家 Jean Baptiste Joseph Fourier (1768—1830) 而取名的。它包括级数表示（即傅氏级数）和变换方法（即傅氏变换）。关于傅氏理论，读者可参阅其他相关的书籍。

图 1-12 所示为复杂的时域波形可用图 1-15 来表示它在时域与频域显示之间的关系。

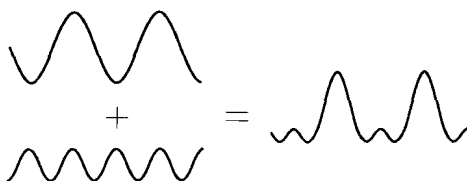


图 1-14 任何实际的信号都可以由正弦波相加得到

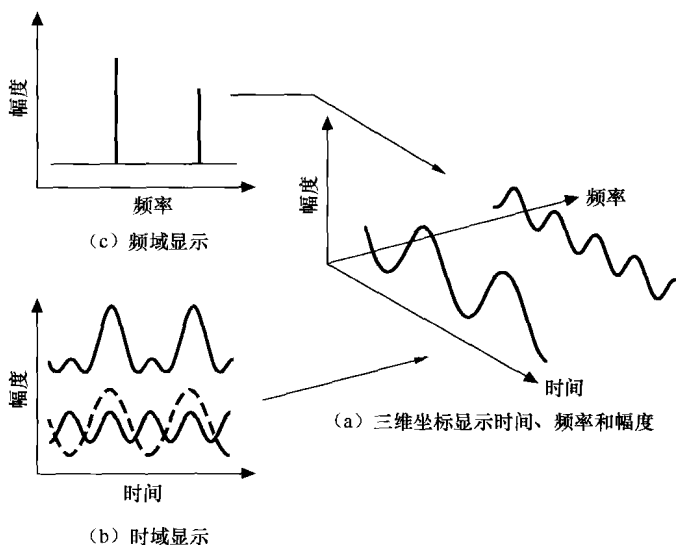


图 1-15 时间与频率的关系

每个时域中的信号变量都有一个频谱表象。依照傅氏理论，时域中的任何周期信号都来自于不同频率、不同幅度的正弦信号和余弦信号的组合。时域中的周期信号可通过傅里叶级数（正弦和余弦级数）展开。

一个周期函数的傅氏级数表示具有下列形式：

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f_0 t + b_n \sin 2\pi n f_0 t)$$

式中

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos 2\pi n f_0 t$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin 2\pi n f_0 t$$

式中，

$x(t)$ = 时域中的信号， $\frac{a_0}{2}$ = 直流分量， n = 谐波的阶次， f_0 = 基频 (Hz)， T = 信号周期，

T 和 f_0 之间的关系为：

$$f_0 = 1/T$$

以弧度/秒表示的角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。

图 1-16 所示的是一些周期信号在时域和频域中的显示。

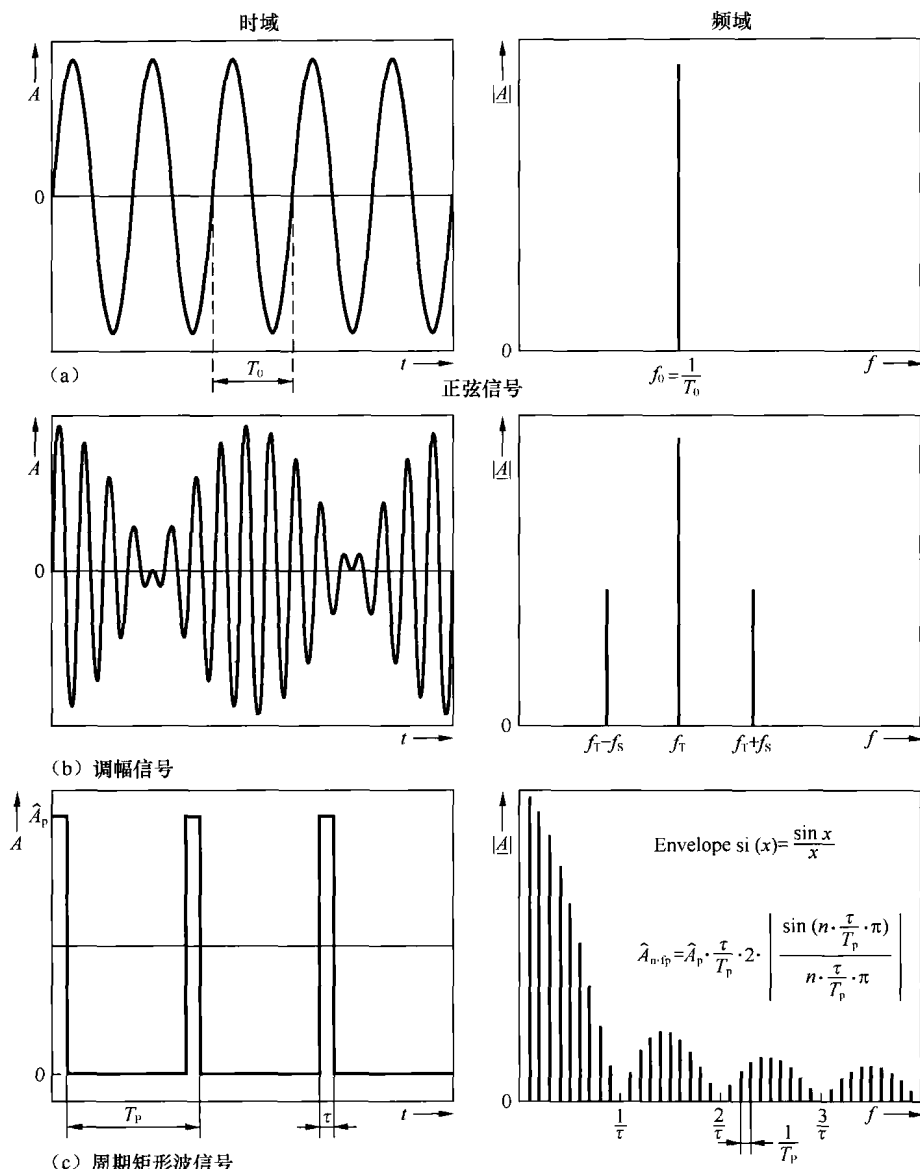
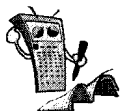


图 1-16 时域和频域中的周期信号（幅度谱）



周期信号的频谱有如下的特点。

周期信号的频谱具有离散性：频谱是离散的，由无穷多个冲激函数组成。

周期信号的频谱具有谐波性：谱线只在基波频率的整数倍上出现，谱线代表的是基波及其高次谐波分量的幅度或相位信息。

周期信号的频谱具有收敛性：各次谐波的幅度随着谐波次数的增大而逐渐减小。

时域内的重复周期与频域内谱线的间隔成反比，周期越大，谱线越密集。当时域内的波形向非周期信号渐变时，频域内的离散谱线会逐渐演变成连续频谱。

2. 傅氏变换

傅氏级数表示仅限于周期信号。非周期信号可以通过傅氏变换在频域中表示。

一个时域信号 $x(t)$ 的傅氏变换是：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

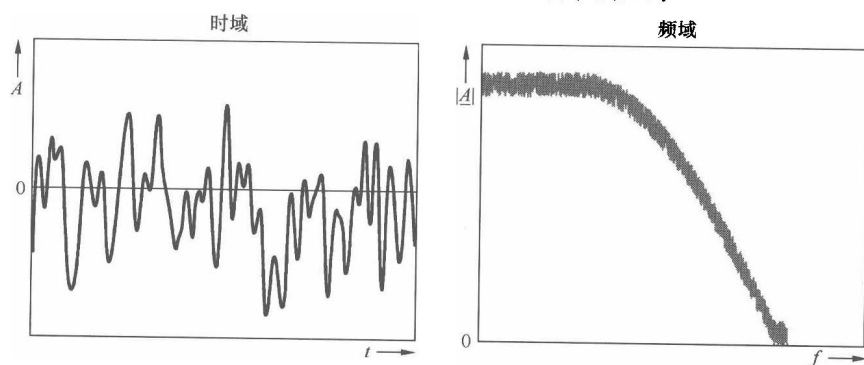
式中，

$X(f)$ = 信号的频域表示

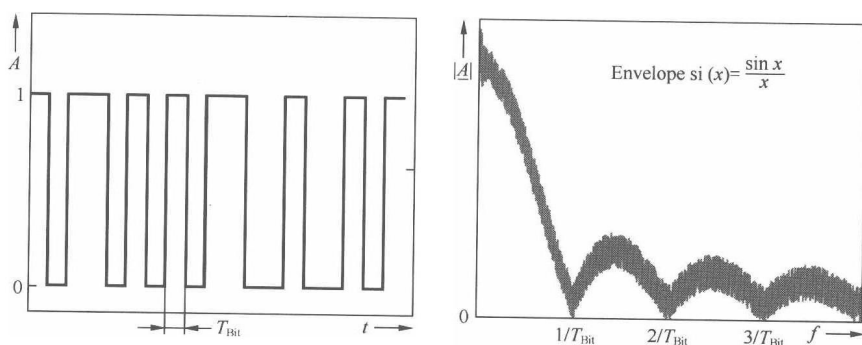
$x(t)$ = 信号的时域表示

按照定义，傅氏级数的表达式中只包含基频及其谐波。它的频谱不仅是离散的，而且只在谐波处才出现。

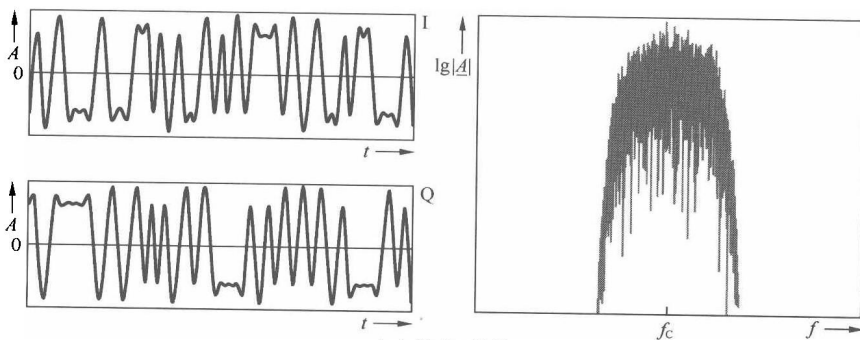
傅氏变换将时域信号变换成连续的频域表达形式。傅氏变换则不仅可以表示离散频率，而且更经常用来表示频域中的连续分布，因此，时域中的单次时间（如脉冲）也可以在频域中表示。图 1-17 所示的是一些非周期信号在时域和频域中的显示。



(a) 带限噪声



(b) 随机比特序列



(c) QPSK 信号

图 1-17 非周期信号在时域和频域中的显示

傅氏变换不直接用在测量系统中去反映信号的频域表示。离散傅氏变换 (DFT) 是傅氏变换的离散形式。它能将时域中的取样信号变换成频域中的取样信号表达形式。对时域中的真实信号进行数字化并完成离散傅氏变换, 便形成信号的频域表示。因此, 傅氏变换不仅仅是一种分析工具, 它可以用在频谱或网络分析仪中直接计算所需要的结果。

快速傅氏变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 是实现离散傅氏变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 的一种极其迅速而有效的算法。FFT 的基本原理是 J. W. Cooley 和 J. W. Tukey 于 1965 年提出来的。FFT 算法经过仔细选择和重新排列中间计算结果, 使最终完成速度较之离散付氏变换有了明显的提高。可以将它看作一种有效的时-频域分析手段, 在数字式频谱仪中有着广泛的应用。

1.4 频域测量

除信号的频率、幅度、相位外, 在许多情况下, 对于电路中的信号 (特别是无线通信应用), 还需要观察信号的频谱、谐波等。

在我们深入描述频谱分析仪的细节之前, 先有两个问题: 什么是频谱和为什么要进行频谱分析。

1.4.1 什么是频谱

究竟什么是频谱?

广义上, 信号频谱是指组成信号的全部频率分量的集合, 频谱测量就是在频域内测量信号的各种频率分量, 以获得信号的多种参数。狭义上, 在一般的频谱测量中常将随频率变化的幅度谱称为频谱。

图 1-15 中展示了图 1-12 所示信号在时域和频域的两个方面。在频域方面, 显示了每个正弦波的幅度随频率变化的情况。从图 1-15 可以看到, 复杂的信号实际上包含不同频率的正弦波, 它告知我们为什么原来的波形不是一个纯净的正弦波——原来的信号中还包含一个二次谐波。

频谱测量的基础是傅里叶变换。对信号进行频域分析就是通过研究频谱来研究信号本身的特性。从图形来看, 信号的频谱有两种基本类型: 离散频谱, 又称线状谱线; 连续频谱。实际的信号频谱往往是上述两种频谱的混合。被测信号频谱中除了基频、谐波和寄生信号所对应的谱线之外, 还会有随机噪声所产生的连续频谱基底。

1.4.2 为什么测量频谱

频谱测量有其独特的优势。

从图 1-12、图 1-15 中可以看到, 通过频域测量, 可确定信号的谐波分量。时域得到的是信号的波形信息, 不能测量混合信号, 如果存在干扰或失真信号, 在时域上无法区分有用信号和无用信号。在频域上可以准确地测量有用信号和无用信号的各种参数。同时, 在时域中, 很难分辨小信号; 在频域中, 小信号很容易分辨出来。

从事无线通信技术的人员更关心带外和杂散信号。例如, 对移动电话系统, 必须检查载波信号的谐波分量——这些谐波分量可能会干扰其他工作在同一谐波频率下的其他系统。工程技术人员也非常关心调制到载波上的调制信号的失真情况。其中, 三阶互调的失真分量可能会落入工作频带内, 无法被滤除, 从而影响系统 (或设备) 的工作。