

频谱分析仪技术及 测试应用指南

詹志强 何 昭 编著
李建宇 陆福敏



中国质检出版社
中国标准出版社

频谱分析仪技术及测试应用指南

詹志强 何 昭 李建宇 陆福敏 编 著

中国质检出版社
中国标准出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

频谱分析仪技术及测试应用指南/詹志强等编著. —北京:中国质检出版社, 2016. 5
ISBN 978-7-5026-4268-6

I. ①频… II. ①詹… III. ①频谱分析仪—测试技术指南 IV. ①TM935.21-62
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 055511 号

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 23.5 字数 528 千字

2016 年 5 月第一版 2016 年 5 月第一次印刷

*

定价:78.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

频谱分析仪是一种能把电信号的能量分布作为频率的函数显示出来的测量仪器。它是一种多用途的电子测量仪器,在通信、雷达、导航、电路设计及电子对抗等无线电电子学领域中均有广泛应用。在某些射频和微波测量参数的校准系统配置中,它起着重要的作用,参数的标准量值往往可以体现在频谱分析仪的测量结果中。

频谱分析仪是一种相对复杂的测量仪器,使用者仅凭阅读使用说明书或校准规范等技术文件,并不一定能正确、灵活地使用仪器,充分发挥其潜在的功能。加之对影响其测量结果的测量不确定度来源不甚了解,不掌握有关注意事项和使用技巧,不能确保其测量结果的准确可靠。

现代频谱仪在窄脉冲与载频脉冲、相位噪声、失真与调制、网络特性和电磁干扰等的测量中,其测量结果的准确可靠也在很大程度上依赖于它的正确使用。

本书4位作者中,既有多年从事频谱分析仪校准并主持编写其校准规范的专家,又有频谱分析仪生产历史最悠久的制造商的对口技术支持资深工程师,他们的丰富使用经验和体会使本书的功能非常实用,可谓是一本集频谱分析仪理论基础、参数定义、结构和工作原理、性能指标解读、使用技巧和注意事项、测试应用、测量结果不确定度评定、新型频谱仪介绍、常用测量量纲及转换等内容于大成的书籍,是一本值得认真阅读的实用工作指南。

本书适用于各行各业从事与使用频谱分析仪有关的专业人士使用,也可作为大专院校相关专业的参考书,更适于作为相关专业的培训教材。

频谱分析仪是无线电测量中最常用的测试仪器,在扫频式频谱分析仪的基础上,通过添加选件和硬件,就成为了矢量信号分析仪和实时频谱分析仪。为了满足不同场合的频谱测量需求,频谱分析仪又衍生出模块化频谱分析仪和手持式频谱分析仪。为了满足毫米波和太赫兹信号的测量需求,通过添置相应的模块,可以实现毫米波和太赫兹信号的测量。可以说,频谱分析仪已经成为一台综合性的测量仪表。

本书以图文并茂的方式通俗易懂地介绍了频谱分析仪以及频谱分析仪的使用,少见大量的公式介绍和推导,非常实用。4名作者均是工程师出身,以非常平实的语言写作了本书。第1章主要介绍了时域参数、傅里叶级数、傅里叶变换和频谱,在频谱分析仪使用和校准中使用的常用测量量纲、常用参数的定义。第2章介绍了频谱分析仪的结构及原理。第3章介绍了频谱分析仪性能指标的解读。第4章介绍了频谱分析仪的校准。第5章介绍了频谱分析仪的使用注意事项及使用技巧。第6章介绍了频谱分析仪的测量应用,包括正弦波信号测量、交调性能测试、噪声信号测量、模拟调制信号测量、脉冲调制信号测量、无线通信信号测量、器件测量、吸波材料反射系数测量、电磁屏蔽材料屏蔽效能测量。第7章介绍了矢量信号分析技术和测试应用,包括矢量信号分析仪的功能、矢量信号分析技术、矢量信号分析仪的解调设置、矢量信号分析显示结果简介、矢量信号分析仪的测试应用。第8章介绍了频谱分析仪参数校准时的测量不确定度评定、测量不确定度的评定方法、频谱分析仪参数校准时的测量不确定度评定实例。第9章介绍了使用频谱分析仪进行幅度测量和频率测量的不确定度评定。第10章介绍了实时频谱分析仪和测试应用。实时频谱分析仪主要用于瞬时脉冲信号的捕获。第11章介绍了模块化频谱分析仪和测试应用。模块化频谱分析仪是频谱分析仪的发展方向之一,在现场测试、无线通信的MIMO测试中应用广泛。第12章介绍了在现场测试中经常使用的手持式频谱分析仪,介绍了手持式频谱分析仪的特点和测试应用。第13章介

绍了频谱分析仪的毫米波和太赫兹测量。第14章介绍了各种类型的频谱分析仪的选型指南。在书的最后附有名词解释、频谱分析仪校准记录表格及参考文献。

作者多年来从事频谱分析仪的使用、校准及频谱分析仪校准规范的编写、频谱分析仪测试方案的制定、频谱分析仪的技术支持,对于频谱分析仪的技术和发展有深入的研究。陆福敏(上海市计量测试技术研究院)完成了第1章、第2章和第9章的编写,何昭(中国计量科学研究院)完成了第3章、第4章和第5章的编写,詹志强(上海市计量测试技术研究院)完成了第6章、第8章、第13章、第14章、附录A和附录B的编写,詹志强与李建宇[是德科技(中国)有限公司]共同完成了第7章、第10章、第11章、第12章的编写,全书由詹志强统稿。

在本书的写作过程中,得到了中国计量科学研究院方向院长,信息与电子计量科学和测量技术研究所吴钊所长、高秋来副所长、刘欣萌副所长的支持,同时也得到了同事张爱敏、赵科佳、黄见明等的大力支持,在此一并致谢!

在本书的写作过程中,还得到了上海市计量测试技术研究院各级领导的支持和帮助,感谢邵力院长和电子所分管副院长吴建英对本书写作的支持,感谢电子和电气计量技术研究所来磊所长、石雷兵副所长、桑昱副所长、蔡青副所长的支持和帮助,感谢同事于磊、张东、夏俊雯、高建强和王韵灵的支持和帮助,于磊、张东帮助完成了诸多插图的绘制,在此一并致谢。

感谢席德熊研究员、韩立忠研究员在本书写作过程中给予本书的大力支持和帮助,中国工程院张钟华院士为了鼓励我们将多年的积累总结出来,在百忙之中为本书作序,在此深表感谢!

由于作者水平有限,书中肯定存在不少问题,诚恳希望读者批评指正。

编者
2015年12月

第 1 章 频谱分析基础	1
1.1 时域参数	1
1.2 傅里叶级数	3
1.3 傅里叶变换与逆变换	5
1.4 离散傅里叶变换	6
1.5 快速傅里叶变换	7
1.6 什么是频谱	7
1.7 为什么要测量频谱	7
1.8 频谱测量类型	10
1.9 常用测量量纲	10
1.10 常用参数的定义	24
第 2 章 频谱分析仪结构及原理	32
2.1 概述	32
2.2 频谱分析仪的分类	32
2.3 超外差式频谱分析仪的结构	36
第 3 章 频谱分析仪性能指标解读	52
3.1 频率特性指标	52
3.2 扫描时间	59
3.3 频谱分析仪内部失真	60
3.4 幅度特性	65
3.5 显示平均噪声电平(固有噪声)	67
3.6 频谱分析仪寄生响应	69
第 4 章 频谱分析仪的校准	71
4.1 计量特性和校准所用设备	71
4.2 量值溯源	75
4.3 扫频超外差式频谱分析仪的校准	75
4.4 模块化频谱分析仪的校准	94

第 5 章 频谱分析仪的使用注意事项及使用技巧 95

5.1 频谱分析仪安全使用注意事项 95

5.2 频谱分析仪的最大允许输入信号解释 97

5.3 频谱分析仪提示信息解读 98

5.4 动态范围 100

5.5 频谱分析仪测试时的参数设置技巧 105

5.6 改进频谱分析仪测量准确度的其他技巧 121

第 6 章 频谱分析仪的测量应用 124

6.1 正弦波信号测量 125

6.2 交调性能测试 137

6.3 噪声信号测量 141

6.4 模拟调制信号测量 145

6.5 脉冲调制信号测量 154

6.6 无线通信信号测量 161

6.7 器件测量 168

6.8 吸波材料反射系数测量 176

6.9 电磁屏蔽材料屏蔽效能测量 177

第 7 章 矢量信号分析技术和测试应用 180

7.1 矢量信号分析仪的功能 181

7.2 矢量信号分析技术 186

7.3 矢量信号分析仪的解调设置 191

7.4 矢量信号分析显示结果简介 200

7.5 矢量信号分析仪的测试应用 205

第 8 章 频谱分析仪参数校准时的测量不确定度评定 219

8.1 测量不确定度评定方法 219

8.2 频谱分析仪参数校准时的测量不确定度评定实例 224

第 9 章 频谱分析仪幅度测量和频率测量不确定度评定 238

9.1 频谱分析仪幅度测量不确定度 238

9.2 频谱分析仪频率测量结果不确定度 242

第 10 章 实时频谱分析仪和测试应用 244

10.1 实时频谱分析技术简介 244

10.2 扫频频谱分析仪、矢量信号分析仪及实时频谱分析仪的区别 247

10.3 实时频谱分析仪的工作原理 251

10.4 实时频谱分析仪的工作方式 254

10.5	实时频谱分析仪的测试输出	260
10.6	实时频谱分析仪的频域测量	266
10.7	实时频谱分析仪的典型应用	267
第 11 章	模块化频谱分析仪和测试应用	271
11.1	模块化仪表的概念	271
11.2	模块化频谱分析仪的优势和特点	273
11.3	模块化频谱分析仪的工作原理	278
11.4	模块化仪表的总线介绍	280
11.5	模块化频谱分析仪的主要性能指标	283
11.6	模块化频谱分析仪的测试速度	283
11.7	模块化频谱分析仪的测试应用	285
11.8	LabVIEW 简介	289
第 12 章	手持式频谱分析仪和测试应用	292
12.1	手持式频谱分析仪现场使用的特点	292
12.2	手持式频谱分析仪功能介绍	293
12.3	手持式频谱分析仪与台式频谱分析仪的比较	295
12.4	手持式频谱分析仪测量干扰介绍	296
第 13 章	毫米波和太赫兹测量	301
13.1	使用谐波混频器扩展频谱分析仪至毫米波和太赫兹频段	301
13.2	使用外接谐波混频器扩展频谱分析仪频率范围的关键技术	305
13.3	毫米波和太赫兹宽带调制信号分析	312
13.4	毫米波和太赫兹测试时的注意事项和优化测试结果的措施	313
第 14 章	频谱分析仪选型指南	321
14.1	频谱分析仪选型基础知识	321
14.2	扫频台式频谱分析仪的选型	327
14.3	矢量信号分析仪(信号分析仪)的选型	336
14.4	实时频谱分析仪的选型	337
14.5	模块化频谱分析仪的选型	340
14.6	手持式频谱分析仪的选型	343
14.7	有关公司的网站地址	346
附录 A	名词解释	347
附录 B	频谱分析仪校准记录表格	354
参考文献		365

第 1 章 频谱分析基础

频谱分析是观察和测量信号幅度、信号失真的一种快速方法，其显示结果可以直观地反映出输入信号傅里叶变换后的幅度值。信号频域分析的幅度测量范围非常大，可以超过 140 dB，频率上限范围可达太赫兹。基于以上特点，使得频谱分析仪成为适合现代通信和微波领域的多用途仪器而广泛使用于设备的研发、生产和测试。

频谱分析其实质是考察信号发生器、功率放大器、天线系统或信号分配系统的幅度与频率的关系，并给出有关信号的重要信息，比如稳定度、失真、幅度以及调制的类型和质量。

由于时域与频域之间是可以互相转换的（这种转换就是傅里叶级数和傅里叶变换），为了更好地了解频谱分析仪的频域测量，下面先简单介绍时域测量。

1.1 时域参数

在时域中，信号的幅度随时间变化，因此描述电信号最直观的途径是采用时域表象方式，给出电压或电流随时间变化的关系。早期的信号观察最主要的测量仪器为示波器，在时域内观察实际电信号瞬时值随时间的变化；在时域内，时间为水平轴，垂直轴为信号幅度值。用示波器观察信号波形，也称为时域分析。

下面来简单介绍脉冲参数，图 1-1 为常见的脉冲参数的实际波形。

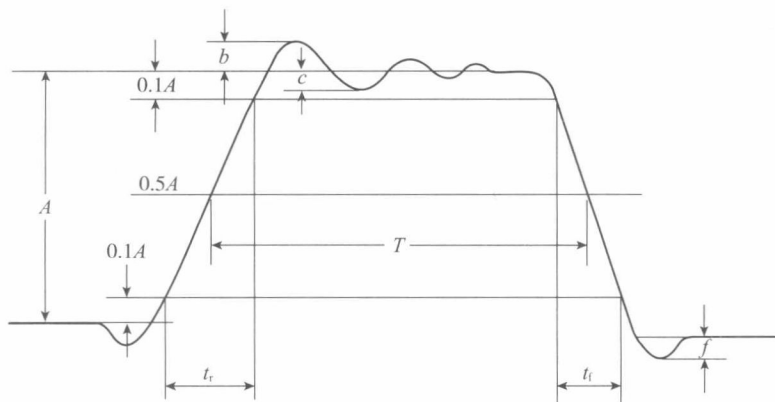


图 1-1 脉冲参数波形图

脉冲波形主要的参数有：脉冲幅度、脉冲宽度、脉冲、周期、脉冲占空比、脉冲前沿（上升时间）、脉冲、后沿（下降时间）、脉冲上冲、脉冲下冲、脉冲平顶倾斜、

脉冲顶部不平坦度等，下面介绍这些在时域中测量的参数的定义。

1.1.1 脉冲幅度

脉冲幅度也称为脉冲基本幅度，其定义为：

矩形脉冲信号中的一个稳定状态突变到另一个稳定状态的幅度。即脉冲顶值与底值之差 A 。

1.1.2 脉冲宽度

脉冲宽度也称为脉冲持续时间，其定义为：

脉冲信号基本幅度 50% 处的前沿与后沿上两点之间的时间间隔。即在脉冲幅度为 50% 的两点之间的时间 τ 。

1.1.3 脉冲周期

脉冲周期是指一个脉冲波形上的任意一点到相邻脉冲波形上的对应点之间的时间间隔 T 。

1.1.4 脉冲前沿

脉冲前沿也称为上升时间或前过渡时间，其定义为：一个矩形脉冲前沿的电压或电流从稳态幅度 A 的 10% ~ 90% 所经过的时间间隔，即冲幅度的 10% 上升到 90% 的这段时间间隔 t_r 。

1.1.5 脉冲后沿

脉冲后沿也称为下降时间或后过渡时间，其定义为：脉冲幅度的 90% 下降到 10% 的这段时间间隔 t_f 。

1.1.6 脉冲上冲

脉冲上冲也称为前过冲，其定义为：脉冲上升时间后，超过顶值部分的值 b ，一般用脉冲幅度 A 的百分比表示。

$$S_b = \frac{b}{A} \times 100\% \quad (1-1)$$

1.1.7 脉冲下冲

脉冲下冲也称为后过冲，其定义为：紧接着脉冲下降时间后，低于底值部分的值 f ，一般用脉冲幅度 A 的百分比表示。

$$S_f = \frac{f}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

1.1.8 脉冲平顶倾斜

脉冲平顶倾斜，其定义为：脉冲顶部倾斜下降量与脉冲幅度 A 的百分比表示。

$$S_e = \frac{e}{A} \times 100\% \quad (1-3)$$

1.1.9 衰减振荡幅度

衰减振荡幅度也称为阻尼振荡或振铃，是指在脉冲上冲后，低于顶值部分的数值 c ，一般用与脉冲幅度的百分比表示。

$$S_c = \frac{c}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

1.1.10 脉冲顶部不平坦度

脉冲顶部不平坦度是指衰减振荡幅后、脉冲顶部的波形失真的峰峰值与脉冲幅度

之比的百分数，即

$$S_w = \frac{A_w}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

1.1.11 脉冲预冲

脉冲预冲是指在脉冲上升时间前，波形的一个下降失真，其值大小等于低于底值的部分，一般用与脉冲幅度之比的百分比来表示。

$$S_d = \frac{d}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

1.1.12 脉冲宽度占有率

脉冲宽度占有率也就是脉冲占空比。其定义为：脉冲宽度与周期之比，即

$$S_\tau = \frac{\tau}{T} \times 100\% \quad (1-7)$$

实际测量时，我们可以按照以上的定义来测量脉冲参数。现在的许多示波器已经具有了一键式测量功能，使用其一键式测量功能可以直接测量出以上的参数，极大地方便了使用。

1.2 傅里叶级数

由于时域测量得到的是信号的波形信息，如果信号中存在干扰或者含有失真，在时域上将无法区分出干扰信号和失真信号（除非干扰信号或失真信号很大），而在频域，则可以准确地测量有用信号和无用信号的各种参数。频域测量表示电信号随频率的变化情况，可以用频谱分析仪进行测量。在频域测量，水平轴表示频率，垂直轴表示幅度，用频谱分析仪测量信号响应随频率的变化波形，称为频域分析。

这是否意味着时域测量不是很重要？也不尽然。对于许多测量来说，时域测量比起频域测量效果会更好些，并且有些测量只能在时域进行。例如，脉冲参数中的脉冲上升沿、下降沿、脉冲信号的过冲和振铃等这些时域参数就只能在时域中测量。

信号的时域分析和频域分析都可以用来反映信号的特征，但是分析的角度不同，各有适用的场合。时域分析研究信号的瞬时幅度和时间的关系，常用于阶跃响应和脉冲响应测量。频域分析研究信号的各频率分量的幅度与频率的关系，常用于测量信号的幅频特征、频率响应、频谱纯度和谐波失真等，频域分析常用分析仪器为频谱分析仪。

既然时域和频域两种分析方法都能表示同一信号特征，那么它们之间一定是可以相互转换的，这种转换可以用傅里叶级数和傅里叶变换来表示。傅里叶级数和傅里叶变换理论是频谱分析的基础。

根据傅里叶理论，任何时域的电信号均是由一个或多个不同频率、幅度和相位的正弦波组成。换言之，时域信号可以转换成频域信号。理论上，完成从时域到频域的转换，信号必须在全部时间内进行，也就是说时间从 $-\infty \rightarrow +\infty$ ；但实际上，我们都是在利用有限的时间周期进行测量。傅里叶逆变换可以把频域信号变换成时域信号；从理论上讲，所有的频谱分量计算在整个频率范围内进行，也就是说频率从 $-\infty \rightarrow +\infty$ 。

但实际上，在进行测量时，亦是在有限带宽内捕获大部分信号能量得到可接受的测量结果。

大多数周期信号都可以用正弦和余弦级数的展开式来表示，一个周期信号函数的傅里叶级数可表示为

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \tag{1-8}$$

式(1-8)中：
直流系数

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \tag{1-9}$$

余弦分量系数

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt \tag{1-10}$$

正弦分量系数

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt \tag{1-11}$$

式(1-8) ~ 式(1-11)中：
 $f(t)$ —— 时域信号；

$\frac{a_0}{2}$ —— 直流分量；

n —— 谐波阶数；

$\omega = 2\pi f_0$ ；

a_n —— 余弦分量的幅值；

b_n —— 正弦分量的幅值；

T —— 周期信号的周期；

$$f_0 = \frac{1}{T}。$$

利用傅里叶级数，周期信号可以展开成无限多个正弦项和余弦项之和。这些正弦项的加权系数由 a_n 和 b_n 给出。将函数与各系数相关的正弦或余弦相乘后进行积分（在一个周期内），便可求出这些系数所有的正弦项和余弦项均为 f_0 的谐波， $\frac{a_0}{2}$ 项直接反映了波形的直流值，常用直观的方法求得。

可以用适当的幅度和相位两项合成一个单独的正弦信号，表达式为

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n [\cos(n\omega t - \varphi_n)] \tag{1-12}$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{1-13}$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n} \tag{1-14}$$

式(1-12) ~ 式(1-14)中：
 A_n —— 各频率分量的幅值；

φ_n ——各频率分量的初始相位。

傅里叶级数亦可以采用复数形式来表示, 式(1-15)为傅里叶级数的复数形式

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{j2\pi nft}$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} y(t) e^{-j2\pi nft} dt \quad (1-15)$$

根据傅里叶级数, 可以得到周期信号的频谱具有如下特点:

- (1) 周期信号的频谱具有离散型: 频谱是离散的, 由无穷多个冲激函数组成;
- (2) 周期信号的频谱具有谐波性: 频谱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者是相位信息;
- (3) 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少;
- (4) 时域内的重复周期与谱域内谱线的间隔成正比, 周期越大, 谱线越密集。当时域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谱线。

1.3 傅里叶变换与逆变换

1.3.1 傅里叶变换

傅里叶级数表示仅限于周期信号, 非周期信号可以通过傅里叶变换在频域中表示。一个时域信号 $x(t)$ 的傅氏变换为

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1-16)$$

式中:

$Y(f)$ ——信号的频域;

$y(t)$ ——信号的时域;

f ——频率。

傅里叶变换将时域信号变换成连续的频域信号。傅里叶级数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。

傅里叶变换不仅可以表示离散的频率, 而且可以表示频域中的连续分布, 例如时域脉冲也可以在频域中表示, 下面以单个时域脉冲为例, 说明傅里叶变换的方法。

单个脉冲信号的时域函数可表示为

$$Y(f) = \begin{cases} 1, & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, & t > \frac{T}{2} \text{ 或 } t < -\frac{T}{2} \end{cases} \quad (1-17)$$

则单个脉冲的频域函数为

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j2\pi ft} dt = T \frac{\sin(\pi fT)}{\pi fT} \quad (1-18)$$

图1-2为单个脉冲信号的时域波形, 图1-3为单个脉冲信号的频谱。

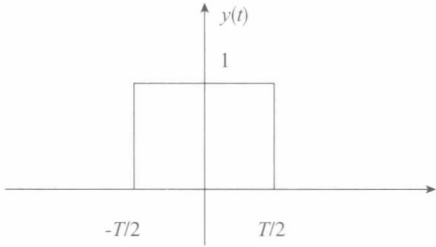


图 1-2 单个脉冲信号的时域波形

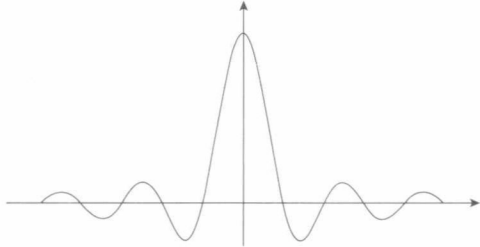


图 1-3 单个脉冲信号的频谱

1.3.2 傅里叶逆变换

傅里叶逆变换就是将频域函数变回到时域函数，利用式（1-19）确定时域函数

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(f) e^{j2\pi ft} dt \tag{1-19}$$

由此可见，傅里叶理论不仅提供了将时域信号变换成频域信号的手段，而且也提供了将频域信号变换成时域信号的手段。信号的时域表示和频域表示统称为傅里叶变换对，其独特之处在于每个时域表示形式都只有一个频域表示式与之对应，反之亦然。

1.4 离散傅里叶变换

离散傅里叶变换（DFT）是傅里叶变换的离散形式，它能将时域中的取样信号变换成频域中的取样信号。对时域中真实信号进行数字化，并完成离散傅里叶变换，便可得到形成信号的频域表示。因此，离散傅里叶变换不仅是一种信号分析工具，也可用在频谱分析仪或者是网络分析仪中直接计算所需要的结果。

前面讨论了傅里叶级数的复数形式，若将式（1-15）中的周期 T 用 t_p 来代替，谐波次数 n 用 k 代替，则复数傅里叶级数的系数可以表示为

$$c_k = \frac{1}{t_p} \int_{-\frac{t_p}{2}}^{\frac{t_p}{2}} y(t) e^{-j2k\pi ft} dt \tag{1-20}$$

现在来研究周期的正弦信号，假定对它的一个周期进行取样，傅里叶级数可以应用于这个取样波形，其微小变化在于时域波形是不是连续波形，这意味着 $y(t)$ 将用 $y(nT)$ 代替，这里 T 是取样的时间间隔。另一个不同之处是将结果乘以取样的时间间隔 T ，完成对取样波形的离散求和，而不是进行积分。

$$c_k = \frac{T}{t_p} \sum_{n=0}^{N-1} y(nT) e^{-j2\pi kfnT} \tag{1-21}$$

注意，这里的 n 的范围是 $0 \sim N-1$ ，形成 N 个取样，这个特定的范围不是强制性的，但它是定义离散傅里叶变换所常用的。基频 f 还是离散频率点之间的间隔，这里用 F 代替 f ，并尽可能给出相一致的符号。离散傅里叶变换通常被定义为 N 乘以复数傅里叶级数的系数，则

$$Y(kF) = Nc_k \tag{1-22}$$

$$Y(kF) = \frac{NT}{t_p} \sum_{n=0}^{N-1} y(nT) e^{-j2\pi kFnT} \tag{1-23}$$

式中:

N ——取样数;

T ——时域中的取样周期。

由于取样数 N 乘以取样时间 T 等于周期 t_p , 则离散傅里叶变换可简化成

$$Y(kF) = \sum_{n=0}^{N-1} y(nT) e^{-j2\pi kFnT} \quad (1-24)$$

离散傅里叶变换的逆运算, 即离散傅里叶逆变换 (IDFT) 由式 (1-25) 确定

$$y(nT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(nF) e^{-j2\pi kFnT} \quad (1-25)$$

离散傅里叶逆变换提供了离散频域信息变换成离散时域波形的手段。离散傅里叶变换和离散傅里叶逆变换所具有的特性与相应的连续傅里叶变换十分相似。

1.5 快速傅里叶变换

快速傅里叶变换 (FFT) 是离散傅里叶变换的一种快速而有效的计算方法, 它的出现使傅里叶理论在实践中的广泛使用成为可能。

离散傅里叶变换所需要的计算次数大约为 N^2 , 这里的 N 是取样数或记录长度, 而与之相应的 FFT 所需要的计算次数为 $N \log_2 N$ 。最常见的 FFT 算法要求 N 是 2 的幂次。频谱分析仪中的典型记录长度可能是 2^{10} (1024), 这意味着离散傅里叶变换要求计算 1 048 576 次, 而 FFT 则只要计算 10 240 次, 假设所有的计算耗费的时间均相等, 则 FFT 可以在不到 1% 的离散傅里叶变换计算时间内完成计算, 这就是现代仪器中广泛采用 FFT 的原因之一。

1.6 什么是频谱

前面介绍的有关傅里叶理论是频谱分析仪的理论基础, 下面则介绍频谱。什么是频谱呢? 频谱是一组正弦波经适当组合, 形成被测量的时域信号。图 1-4 显示了一个复合信号的波形。假设我们希望看到的是正弦波, 但图 1-4 显示的信号并不是纯粹的正弦形, 而仅靠观察又很难确定其中的所包含的成分。图 1-5 同时在时域和频域显示了这个复合信号。频域图形描绘了频谱中每个正弦波的幅度随频率的变化情况, 在这种情况下, 信号频谱正好由两个正弦波组成。现在我们便知道了为何原始信号不是纯正弦波, 因为它还包含第二个正弦分量, 在这种情况下第二个正弦波是二次谐波。

1.7 为什么要测量频谱

介绍完频谱后, 下面介绍为什么需要测量频谱。

1.7.1 谐波、杂散测量

频域测量的主要特点是更适于确定信号的谐波分量, 在无线通信领域, 人们非常关心信号的谐波分量、带外辐射和杂散辐射。例如, 在蜂窝无线通信系统的各种规范

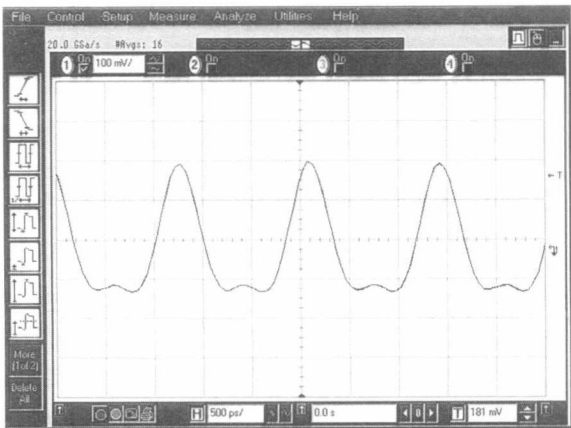


图 1-4 复合时域信号

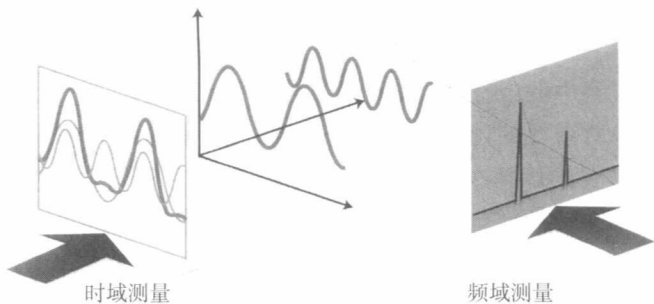


图 1-5 信号的时域和频域关系

和标准中，除了关心载波外，还必须检查载波信号的谐波分量、带外辐射和杂散辐射，以防止对其他有用信号产生干扰。

1.7.2 三阶交调测量

两个信号的三阶交调分量测量是非常重要的测量参数，因为三阶交调分量有可能落入信号的接收频带内而无法滤除。

1.7.3 频谱监测

频谱监测是频域测量的又一重要领域。政府管理机构（如各级无线电管理委员会）会对各种各样的无线业务分配不同的频段，其中就包括广播电视、无线通信、移动通信、警务和应急通信等其他业务。保证不同的业务工作在其被分配的信道带宽内是至关重要的，在这些通信系统中，针对功率放大器和其他模块的一项重要测量是检测泄漏到邻信道的功率值以及由此所引起的干扰。

1.7.4 电磁干扰测量

电磁干扰（EMI）是用来研究来自不同发射设备的有意或无意的无用辐射。电磁干扰测量主要关心的是，无论是辐射干扰还是传导干扰（通过电力线或其他互导连线产生），其引起的干扰是否会影响其他系统的正常运行。因此，根据有关电磁兼容的相关标准，几乎任何产品均需要进行电磁干扰测量，对辐射电平与频率的关系进行测试。