



频谱分析仪

的原理、操作与应用



秦顺友 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

014031940

TM935.21
03

频谱分析仪的原理、 操作与应用

秦顺友 编著



西安电子科技大学出版社



北航

C1719974

TM 935.21
03

内 容 简 介

本书是关于频谱分析仪原理、操作与应用的专著，主要内容包括频谱分析基础、超外差频谱分析仪的工作原理、频谱分析仪的基本特性；以 Agilent 8560EC 系列频谱分析仪为例，简述了频谱分析仪的操作和使用方法，给出了相应的操作硬软键菜单和操作测量示例；着重介绍了频谱分析仪在无线电测量领域中的应用及其测量方法，并给出了大量的工程测量实例。

本书通俗易懂，具有较强的操作性和实用性。

本书可供从事通信、无线电测量与计量、测试仪器与仪表、微波测量、电磁干扰测量等方面工作的工程技术人员阅读，亦可供大专院校相关专业的老师、高年级学生和研究生用作参考书。

图书在版编目(CIP)数据

频谱分析仪的原理、操作与应用/秦顺友编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2014. 2
ISBN 978 - 7 - 5606 - 3298 - 8

I. ①频… II. ①秦… III. ①频谱分析仪—基本知识 IV. ①TM935.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 016818 号

策 划 马乐惠

责任编辑 马武装 王维芳

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

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18.75

字 数 353千字

印 数 1~3000册

定 价 42.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3298 - 8/TM

XDUP 3590001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

频谱分析仪是研究给定电信号在频率谱上能量分布的工具，它基本上是一个带有扫描本振的超外差接收机，可测量信号的频谱、幅度和频率。频谱分析仪是射频工程师必不可少的测试工具，广泛应用于无线电技术的各个领域，如电子对抗、卫星通信、移动通信、散射通信、雷达、遥控遥测、侦察干扰、射电天文、卫星导航、空间技术和频谱监测等。频谱分析仪可测量各种类型信号的不同特性，如信号的传输和反射特性、调制特性、失真、交调、激励响应、载噪比、相位噪声、卫星频谱、互调和电磁干扰等。

本书是一本关于频谱分析仪的专著。全书系统介绍了频谱分析基础，超外差频谱分析仪的原理，频谱分析仪的基本特性；以典型频谱分析仪为例，介绍了频谱分析仪的操作和使用方法；系统介绍了频谱分析仪在射频测量中的典型应用，并给出了大量的工程测量实例。本书为广大射频测试工程师提供了参考和指导，有助于工程技术人员建立射频信号测量系统和扩展频谱分析仪的应用范围。

本书分为三篇，共 14 章。

第一篇为频谱分析仪的原理，包括第 1~4 章。第 1 章频谱分析仪的发展及分类，简述了频谱分析仪的发展历史及现代频谱分析仪的发展趋势，频谱分析仪的分类及其简单的工作原理；第 2 章频谱分析基础，介绍了时域与频域的关系、傅里叶变换与逆变换；第 3 章超外差频谱分析仪的原理，详细论述了超外差频谱分析仪的工作原理、结构组成及功能，频谱分析仪的调谐方程和测量信号的过程；第 4 章频谱分析仪的基本特性，包括了频率特性、幅度特性和扫描时间等。

第二篇为频谱分析仪的操作使用方法，包括第 5 章和第 6 章。第 5 章 Agilent 8560EC 系列频谱分析仪，内容包括前面板、后面板、显示器的屏幕注解及其主要技术指标；第 6 章频谱分析仪的硬软键功能与操作，以 Agilent 8560EC 系列频谱分析仪为例，介绍了频谱分析仪的基本功能键、码刻功能键、控制功能键、仪器状态功能键和数据控制键，简述了各硬键的功能及其相

应的软键菜单的操作使用方法，并给出了大量的操作测量实例。

第三篇为频谱分析仪的应用，包括第7~14章。第7章幅度与频率测量，幅度和频率测量是频谱分析仪测量的基础，本章以频谱分析仪的校准输出信号为例，说明了频谱分析仪测量信号幅度和频率的方法，介绍了频率相近的两个信号的测量方法并给出了测量实例，介绍了低电平信号的测量方法，阐述了通过合理设置频谱分析仪状态参数来改善低电平信号测量精度的措施，并给出了低电平信号测量的修正曲线；第8章传输与反射特性测量，包括插入损耗测量、增益测量、1 dB压缩点测量、电压驻波比测量和吸波材料反射电平测量；第9章调制特性测量，包括幅度调制信号分析及其测量方法，频率调制信号分析及其测量方法和脉冲调制信号频谱分析及其测量方法；第10章失真特性测量，包括失真信号模型及分析，谐波失真测量原理和方法，三阶互调失真测量原理和方法；第11章噪声特性测量，首先简述了噪声系数与等效噪声温度的基本概念，然后论述了与噪声特性相关的常见无线电参数测量原理和方法，主要包括接收机噪声系数测量、低噪声放大器的噪声温度测量、天线噪声温度测量、地球站系统 G/T 值测量和相位噪声测量，最后讨论了噪声功率测量的误差修正方法；第12章电磁干扰测量，以地球站电磁环境和辐射灾害测量为例，说明了频谱分析仪在电磁干扰测量中的应用，简述了地球站电磁干扰的形成、干扰允许限值、测试系统组成、测试系统灵敏度分析、干扰测试方法和干扰计算，简述了电磁辐射安全标准、地球站功率密度的计算和测量原理方法；第13章时域特性测量，简述了频谱分析仪时域测量原理以及在调制信号测试和天线方向图测量中的应用；第14章卫星通信系统性能测量，以卫星通信系统性能测量为例，简述了频谱分析仪在系统性能测量中的应用。

该书显著的特色是可操作性和实用性强，给出了大量的频谱分析仪操作使用图例和测量示例。希望该书能对从事射频测量、计量测试等工作的工程技术人员和高校师生等都有所裨益。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免存在不足，恳请读者批评和指正。

秦顺友

2013年6月

目 录

第一篇 频谱分析仪的原理

第 1 章 频谱分析仪的发展及分类	3
1.1 频谱分析仪的历史与发展趋势	3
1.2 频谱分析仪的分类	5
1.2.1 带通滤波器分析仪	5
1.2.2 快速傅里叶变换分析仪	6
1.2.3 扫频频谱分析仪	7
1.2.4 实时频谱分析仪	8
第 2 章 频谱分析基础	9
2.1 频域与时域的关系	9
2.2 傅里叶级数	11
2.3 傅里叶变换与逆变换	14
2.3.1 傅里叶变换	14
2.3.2 傅里叶逆变换	15
2.4 离散傅里叶变换	15
2.5 快速傅里叶变换	16
第 3 章 超外差频谱分析仪的原理	17
3.1 超外差频谱分析仪的原理及组成	17
3.1.1 超外差频谱分析仪的原理结构图	17
3.1.2 RF 输入衰减器	18
3.1.3 低通滤波器或预选器	20
3.1.4 混频器	20
3.1.5 本地振荡器	21
3.1.6 中频增益放大器	21
3.1.7 中频滤波器	21
3.1.8 包络检波器	22
3.1.9 视频滤波器	23
3.1.10 显示器	24

3.2	超外差频谱分析仪的调谐方程	25
3.3	超外差频谱分析仪测量信号的应用举例	28
第4章	频谱分析仪的基本特性	30
4.1	频率特性	30
4.1.1	频率范围	30
4.1.2	频率分辨率	31
4.1.3	频率精度	36
4.2	幅度特性	38
4.2.1	幅度范围	38
4.2.2	噪声系数与灵敏度	39
4.2.3	动态范围	44
4.2.4	幅度精度	47
4.3	扫描时间	48
4.3.1	模拟滤波器对扫描时间的影响	48
4.3.2	数字滤波器对扫描时间的影响	50
4.4	频谱分析仪常用术语汇编	50

第二篇 频谱分析仪的操作使用方法

第5章	Agilent 8560EC 系列频谱分析仪	55
5.1	前面板	55
5.2	后面板	58
5.3	显示器的屏幕注解	59
5.4	主要技术指标	62
5.4.1	频率技术指标	62
5.4.2	幅度技术指标	63
第6章	频谱分析仪硬软键功能与操作	67
6.1	基本功能键	67
6.1.1	【FREQUENCY】频率键	67
6.1.2	【SPAN】扫频宽度键	72
6.1.3	【AMPLITUDE】幅度键	73
6.2	码刻功能键	76
6.2.1	【MKR】功能键	76
6.2.2	【MKR→】功能键	80
6.2.3	【FREQ COUNT】功能键	81
6.2.4	【PEAK SEARCH】功能键	82

6.3 控制功能键	83
6.3.1 【SWEEP】硬键	83
6.3.2 【BW】硬键	84
6.3.3 【TRIG】硬键	86
6.3.4 【AUTO COUPLE】硬键	88
6.3.5 【TRACE】硬键	89
6.3.6 【DISPLAY】硬键	94
6.4 仪器状态功能键	97
6.4.1 【PRESET】硬键	97
6.4.2 【CONFIG】硬键	99
6.4.3 【CAL】硬键	101
6.4.4 【AUX CTRL】硬键	103
6.4.5 【COPY】硬键	104
6.4.6 【MODULE】硬键	106
6.4.7 【SAVE】硬键	108
6.4.8 【RECALL】硬键	109
6.4.9 【MEAS/USER】硬键	109
6.5 数据控制键	111

第三篇 频谱分析仪的应用

第7章 幅度与频率测量	115
7.1 频谱分析仪校准信号测量	115
7.1.1 校准信号测量的原理	115
7.1.2 校准信号测量的方法	116
7.2 两个频率相近的信号测量	120
7.2.1 两个等幅信号测量	120
7.2.2 两个不等幅信号测量	122
7.3 低电平信号的测量	124
7.3.1 利用 RF 衰减器测量低电平信号	124
7.3.2 利用分辨带宽测量低电平信号	125
7.3.3 利用视频带宽测量低电平信号	126
7.3.4 利用视频平均测量低电平信号	127
7.3.5 低电平信号测量的应用举例	128
7.3.6 低电平信号测量的修正	131
第8章 传输与反射特性测量	133
8.1 插入损耗测量	133
8.1.1 两端口待测件插入损耗测量	133

8.1.2	单端口待测件插入损耗测量	136
8.1.3	无端口待测件插入损耗测量	145
8.2	增益测量	149
8.2.1	高功率放大器的增益测量	149
8.2.2	低噪声放大器的增益测量	150
8.3	1 dB 压缩点测量	152
8.3.1	1 dB 压缩点的概念	152
8.3.2	低噪声放大器的 1dB 压缩点测量	153
8.4	电压驻波比测量	154
8.4.1	双端口待测件电压驻波比测量	155
8.4.2	单端口待测件电压驻波比测量	156
8.5	吸波材料反射电平测量	157
8.5.1	测量原理	158
8.5.2	测量方法	159
第 9 章	调制特性测量	160
9.1	幅度调制特性测量	160
9.1.1	幅度调制信号分析	160
9.1.2	幅度调制信号测量	163
9.2	频率调制特性测量	165
9.2.1	频率调制信号分析	165
9.2.2	频率调制信号测量	168
9.3	脉冲调制信号测量	171
9.3.1	脉冲调制信号频谱	172
9.3.2	脉冲调制信号参数测量	173
第 10 章	失真特性测量	177
10.1	失真信号分析	177
10.1.1	失真信号模型	177
10.1.2	谐波失真信号分析	178
10.1.3	互调失真信号分析	180
10.2	谐波失真测量	182
10.2.1	谐波失真测量原理	182
10.2.2	谐波失真测量方法	183
10.3	三阶互调失真测量	187
10.3.1	互调失真测量方法	187
10.3.2	高功率放大器的互调失真测量	189
10.3.3	低噪声放大器的互调失真测量	190
10.3.4	无源互调失真测量	192

第 11 章 噪声特性测量	193
11.1 噪声特性参数的表征	193
11.1.1 噪声系数	193
11.1.2 等效噪声温度	194
11.1.3 工作噪声温度	195
11.2 接收机噪声系数测量	196
11.2.1 测量原理	196
11.2.2 测量方法	197
11.3 低噪声放大器的噪声温度测量	198
11.3.1 测量原理	198
11.3.2 测量方法	199
11.4 天线噪声温度测量	199
11.4.1 天线噪声温度的概念及组成	199
11.4.2 天线噪声温度的计算	200
11.4.3 天线噪声温度的测量方法	201
11.5 地球站 G/T 值测量	203
11.5.1 射电源法测量地球站 G/T 值	203
11.5.2 载噪比法测量地球站 G/T 值	207
11.6 相位噪声测量	211
11.6.1 相位噪声定义及表征	211
11.6.2 相位噪声测量方法	212
11.6.3 相位噪声测量应注意的问题	215
11.7 噪声功率测量的修正	217
第 12 章 电磁干扰测量	219
12.1 地球站电磁环境测量	219
12.1.1 地球站电磁干扰的形成	220
12.1.2 地球站电磁干扰允许限值	220
12.1.3 电磁干扰测试系统及灵敏度	222
12.1.4 电磁干扰测试方法和干扰计算	225
12.1.5 地球站电磁干扰测量的工程实例	227
12.2 地球站辐射灾害测量	232
12.2.1 电磁辐射安全标准介绍	232
12.2.2 地球站辐射功率密度的计算	235
12.2.3 地球站辐射功率密度的测量原理	239
12.2.4 地球站辐射功率密度的测量方法	240
12.2.5 地球站辐射功率密度测量的工程实例	241
第 13 章 时域特性测量	242
13.1 频谱分析仪时域测量原理	242

13.2 时域测量的应用	243
13.2.1 时域测量在调制信号测试中的应用	243
13.2.2 时域测量在天线方向图测量中的应用	246
第 14 章 卫星通信系统性能测量	253
14.1 地球站发射 EIRP 测量	253
14.1.1 间接法测量地球站 EIRP	254
14.1.2 标准站法测量地球站 EIRP	257
14.2 地球站系统 G/T 值测量	258
14.2.1 间接法测量地球站系统 G/T 值	259
14.2.2 比较法测量地球站系统 G/T 值	261
14.3 功率和频率稳定度测量	264
14.3.1 功率和频率稳定度的表示	264
14.3.2 地球站上行功率和频率稳定度的测量	265
14.3.3 卫星信标 EIRP 和频率稳定度的测量	266
14.4 系统幅频特性测量	267
14.4.1 上行分系统幅频特性测量	267
14.4.2 下行分系统幅频特性测量	268
14.5 地球站带外辐射特性测量	270
14.5.1 杂散辐射测量	270
14.5.2 上行互调产物辐射测量	272
14.6 系统相位噪声特性测量	273
14.6.1 上行分系统相位噪声测量	273
14.6.2 下行分系统相位噪声测量	275
14.7 指向精度与跟踪精度测量	277
14.7.1 指向精度测量	277
14.7.2 跟踪精度测量	278
14.8 卫星转发器的频谱特性测量	280
参考文献	282
致谢	288

第一篇

频谱分析仪的原理

第1章 频谱分析仪的发展及分类

1.1

频谱分析仪的历史与发展趋势

频谱分析仪是研究给定电信号在频率谱上能量分布的工具，它基本上是一个带有扫描本振的超外差接收机。频谱分析仪可以将复杂的信号分解为单一的组成部分，并显示幅度与频率的对应关系，可以测量出信号的频率和幅度；除此之外，频谱分析仪还可以进行如调制信号的 RF 包络、信号失真、交调和噪声边带等各种参数的测量。

自 20 世纪 30 年代末发明阴极射线管以来，工程师们就开始利用随之出现的第一批频谱分析仪来观察信号功率和频率的关系，帮助他们研制并实现雷达的基本功能。20 世纪 40 年代的频谱分析仪是以扫频的射频接收机为基础的。20 世纪 50~60 年代才真正有了台式频谱分析仪，这种模拟的扫频接收机带有大量开关和控制旋钮，操作复杂，需要完全手动控制扫速、频率范围、分辨率和衰减量。由于参数之间相互影响，操作者要细心地选择正确的设置，才能使测量结果有效。自 1964 年美国 HP 公司在市场上推出了第一台半自动的频谱分析仪，即 HP8551 微波频谱分析仪以来，HP 公司在频谱分析仪领域一直处于领先地位。Marconi 公司和 TEK 公司也是高性能模拟频谱分析仪的生产商，为频谱分析仪的发展作过积极的贡献。

20 世纪 70 年代，随着 YIG 调谐器、集成电路、高性能微波晶体管和固体微波器件的成功研制以及采样技术、频率合成技术、微波混合集成技术和数字化技术的发展与应用，频谱分析仪得到了快速的发展，实现了宽频带、高分辨率、高灵敏度和大动态范围，包括全景显示的多状态扫频以及幅度频率绝对值定标，成为高性能、多功能的测量仪器。1977 年 HP 公司推出了第一台基于微处理器的 HP8568A 射频频谱分析仪，1978 年则有 HP8566A 微波频谱分析仪问世。

从 20 世纪 80 年代开始，随着计算机、微处理器的发展和广泛应用，频谱分析仪向智能化和自动化方向大步迈进，先后出现了一大批智能频谱分析仪和自动

频谱分析仪，如 HP 公司推出的 HP8560E 系列频谱分析仪。它是目前最好的实验室频谱分析仪之一，由于其高性能，HP8560E 系列频谱分析仪可以满足现代各种应用的测试需求，如射频与微波通信、军事用途、卫星通信、雷达、对空观察以及信号监测和 EMC/EMI 测量等。利用以数字手段实现的 1~100 Hz 分辨率带宽滤波器，可以显著地提高其分辨率，并获得 109 dB 的优良三阶动态范围；还可以利用这种频谱分析仪超凡的相位噪声优点和跨越 50 GHz 满扫宽的宽广动态范围测量低电平信号。

1986 年，HP 公司推出了 HP8590A 频谱分析仪，这种灵活通用的频谱分析仪可根据需要来改变它们的测试设备。目前 HP8590E 系列频谱分析仪为工程师们提供了各种各样的应用解决方案，如射频无线通信、有线电视、EMI 预符合性、扫描噪声系数、数字无线电和广播电视等。

微处理器的普及和数字技术的应用，促进了频谱分析仪的快速发展。目前频谱分析仪实现了高分辨率、大动态范围、高灵敏度、CRT 数字显示乃至数字储存和高可靠性。现代计算机技术和数字信号处理技术在频谱分析仪中的使用成为现代频谱分析仪的发展趋势。国外频谱分析仪技术发展迅速，如美国的 Agilent 公司、Tektronix 公司、德国 R/S 公司和日本的 ANRITSU 公司等都不断地推出高性能的频谱分析仪，并且以频谱分析仪为基础，不断扩展其功能。未来频谱分析仪的发展方向有：

1. 更宽频带、高灵敏度、高分辨率和大动态范围

现代频谱分析仪的频率范围更宽，灵敏度更高，分辨率高，动态范围大，测量精度高，测量速度更快，更易于实现测量过程的自动化和仪器的小型化。代表性的产品是美国 Agilent 公司的 8565EC 频谱分析仪，其频率范围为 9 kHz~50 GHz，分辨率带宽为 1 Hz~2 MHz，最佳灵敏度可达 -147 dBm，噪声边带为 -113 dBc/Hz(10 kHz 频偏)，同时可以向更高频率扩展，具有相位噪声和数字无线电测试功能，使用非常灵活方便。

2. 宽带高速实时

实时频谱分析可以对信号进行实时测试，可以在时域、频域、调制域和码域等多域内，同时对信号的指标进行全景式的观察、监测和分析。利用专用的信号分析软件完成复杂的测量任务是现代通信分析仪的发展趋势。

实时频谱分析仪可以在一台仪表中同时实现宽带矢量信号分析仪和频谱分析仪的功能，并具备独有的触发—捕获—分析能力。典型的代表产品是美国 Tektronix 公司的 3086 实时频谱分析仪，它可以一次采集整块频谱，连续分析全帧信号，同时具有多种灵活的触发方式，对猝发信号、瞬变信号和时控信号的分析测量非常方便。

1.2

频谱分析仪的分类

频谱分析仪是用来分析信号中所含有的频率成分的专用仪器。随着无线电和电子技术的不断发展,频谱分析仪的技术性能和测试功能日益完善。

频谱分析仪按其结构原理可分为两大类,即模拟式频谱分析仪和数字式频谱分析仪。早期的频谱分析仪属于模拟式,目前模拟式频谱分析仪仍在广泛使用。数字式频谱分析仪是以数字滤波器或快速傅里叶变换为基础构成的,由于数字式频谱分析仪受到数字系统的工作速度的限制,因此此类频谱分析仪多半使用于低频段。此外,现代一些新颖高档的频谱分析仪,既能用来测量低频信号,又能用来测量高频信号,其结构属于以上两种类型的混合,常称为“模拟-数字”混合式频谱分析仪。

依据频谱分析仪的实现方法和频谱测试的实现技术,频谱分析仪一般可分为带通滤波器分析仪、快速傅里叶变换(FFT)分析仪、扫频式频谱分析仪和实时频谱分析仪。

1.2.1 带通滤波器分析仪

早期实现频谱分析仪的方法就是:将待测信号同时引入一系列带宽相同、但中心频率以带宽为步进等差递增的带通滤波器,再分别通过各频率检波器检波得到各频率点功率的大小,最后通过显示屏显示出来。这种频谱分析仪称为带通滤波器频谱分析仪。

图1-1所示为带通滤波器分析仪的原理图。带通滤波器频谱分析仪的最小频率分辨带宽是由带通滤波器的带宽决定的。假设带通滤波器的带宽是100 kHz,那么带通滤波器频谱分析仪的频率精度只有100 kHz。这是因为多条频率的功率谱线如果出现在同一带通滤波器的100 kHz频率范围内,那么带通滤波器频谱分析仪的测试结果在此100 kHz范围内只显示一条功率谱线,带通滤波器将测出其频率范围内的能量,而不管多少频谱分量产生这一总能量。因此对紧密相邻的频谱分量,其最小频率分辨率带宽受制于带通滤波器的带宽。

带通滤波器频谱分析仪的最大优点是能迅速跟踪信号频谱随时间的变化,但其最大弱点是为了保证最小频率分辨率带宽,需要使用窄带滤波器,并且所需窄带滤波器的数量随着带通滤波器频谱分析仪的测量频率范围的增大及最小频率分辨率的减小而增加。因此,带通滤波器频谱分析仪主要用在可容纳分辨率带宽非常宽的场所。

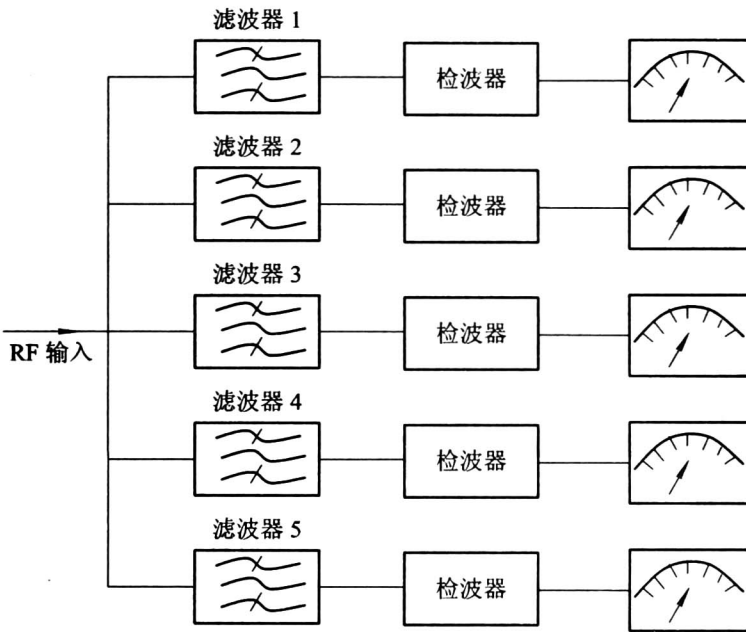


图 1-1 带通滤波器分析仪的原理图

1.2.2 快速傅里叶变换分析仪

快速傅里叶变换(FFT)可用来确定时域信号的频域表示形式(频谱)。信号必须在时域中被数字化,然后执行 FFT 算法来求出频谱。图 1-2 所示为 FFT 频谱分析仪的简化原理图。

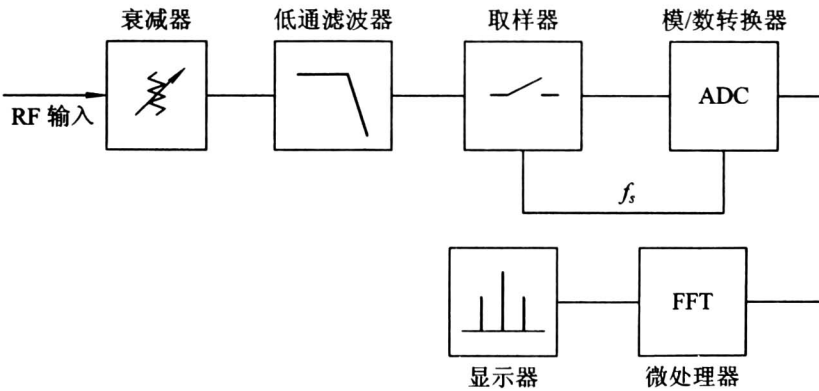


图 1-2 FFT 频谱分析仪的简化原理图

由图 1-2 可知,FFT 频谱分析仪的工作原理是:首先 RF 输入信号通过一个可变衰减器,以提供不同的测量范围;然后信号通过低通滤波器,滤去频谱分析仪频率范围之外的不希望的高频分量;通过取样器,对信号波形进行取样,再用取样电路和模/数转换器的共同作用变为数字形式;利用 FFT 计算波形的频谱,并将结果显示在显示器上,从而测量出信号频谱。