雷达信号的选择与处理

张 直 中 编著

国防工业出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

雷达信号的选择与处理

张直中　编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书深入浅出地介绍了雷达取得目标距离、速度、方位、仰角四维信息及其处理的方法，并指出了这四维信息之间的共性和个性以及它们之间既相互联系又相互制约的内在原因。

本书可供从事雷达体制、信号、接收机和抗干扰研究和设计的人员参考，亦可作为大专院校有关专业师生的参考书。

雷达信号的选择与处理

张直中 编著

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行　　各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32　印张 7 7/8　197 千字

1979年8月第一版　1979年8月第一次印刷　印数：00,001—10,000册

统一书号：15034·1824　　定价：1.45元

目　录

绪　论……1
第一章　雷达信号的形式和选择方法……5
§1.1　引言……5
§1.2　波形与频谱……6
1.2.1　傅里叶变换式……6
1.2.2　常用变换对和规则……11
§1.3　匹配滤波器和雷达作用距离……16
1.3.1　信号通过线性网络的输出……16
1.3.2　匹配滤波器和雷达作用距离……20
§1.4　关于测量精度问题……25
§1.5　关于分辨力问题……31
§1.6　脉冲压缩信号……38
1.6.1　为什么要研究脉冲压缩信号……38
1.6.2　脉冲压缩信号的条件和压缩比……39
§1.7　复合自相关函数和模糊图及其应用……40
1.7.1　复合自相关函数和正型模糊图……40
1.7.2　模糊图与匹配接收机输出波形的关系……47
1.7.3　模糊图主要特征及考察多目标环境的干扰……49
1.7.4　模糊图的切割和叠加……51
§1.8　用模糊图形对信号进行分类……58
1.8.1　第一类信号：刀刃形和轴线重合的信号……59
1.8.2　第二类信号：倾斜刀刃形信号……60
1.8.3　第三类信号：钉板形模糊图的信号……66
1.8.4　第四类信号：图钉形模糊图的信号……72
§1.9　设计示例……80
§1.10　结论……85
第二章　天线和信号的共性和个性及其互作用……88
§2.1　波形↔频谱与天线激励↔天线方向图之间的共性和个性……88
2.1.1　降低旁瓣的方法……90
2.1.2　测量精度问题……93

2.1.3 相控电扫描……96
2.1.4 成对回波原理与量化旁瓣……97
§2.2 天线方向图和方位-仰角自相关函数……104
§2.3 信号模糊图和天线方向图之间的共性与个性……111
§2.4 四维 A 函数……113
§2.5 信号与天线之间的互作用……114
2.5.1 端馈频扫天线……114
2.5.2 相控天线……119
2.5.3 利用信号和天线互作用改善天线方向图……122
2.5.4 利用信号和天线互作用改善信号模糊图……127
§2.6 信号处理天线……129
2.6.1 角波瓣压缩技术……130
2.6.2 合成孔径天线……133
第三章 信号处理的基本原理和方法……136
§3.1 信号处理是回波信号模糊图的再现……136
§3.2 用点元法再现模糊图——相关接收……138
§3.3 用线切割法再现模糊图……140
§3.4 二维全面再现模糊图——光学处理……142
§3.5 几类基本处理方法——引言……142
§3.6 集总参数元件组成的网络……143
§3.7 超声波迟延器件……146
3.7.1 体声波迟延器件……147
3.7.2 表面声波迟延器件……156
§3.8 光学透镜的二维处理……160
3.8.1 基本作用原理……160
3.8.2 全面再现信号模糊图……163
3.8.3 光学透镜处理的主要优缺点……166
3.8.4 空间复信号的一种形成法……167
3.8.5 光学实时处理技术……169
§3.9 数字处理技术……172
3.9.1 时间间隔 T 应取多少……173
3.9.2 分层带来的误差……175
3.9.3 如何处理信号的相位……179
3.9.4 数字处理的优缺点……181
§3.10 电荷耦合器件……183
3.10.1 工作原理简述……184
3.10.2 电荷耦合器件在雷达信号处理中的应用……186

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第四章　对各类信号的若干典型处理法 ……190
§4.1　引言 ……190
§4.2　对第一类信号（固定载频脉冲信号）的处理 ……190
§4.3　对第二类信号（线性调频脉冲信号）的处理 ……192
4.3.1　线性调频脉冲压缩雷达——模拟处理法 ……192
4.3.2　数字式线性调频脉冲压缩雷达 ……195
§4.4　对第三类信号（等间隔脉冲列信号）的处理 ……202
4.4.1　引言 ……202
4.4.2　平行线切割法 ……204
4.4.3　斜线切割法 ……211
4.4.4　数字脉冲列匹配处理 ……218
§4.5　对第四类信号（二位相位编码信号）的处理 ……224
4.5.1　模拟式匹配滤波器 ……224
4.5.2　模拟式相关积分器 ……226
4.5.3　二位相位编码信号的时间跟踪——精确测距 ……228
4.5.4　二位相位编码信号的数字处理 ……230
参考资料 ……232

绪论　从雷达发展史看推动雷达技术迅速发展的根本矛盾

雷达的发展，其内因是由于电磁波固有的特性，以及人们对雷达这门特殊无线电技术客观规律的不断深入地理解，其外因是雷达所要解决的任务越来越多（特别是飞行器所提出的任务），以及雷达目标迅速发展所起的推动作用。

在复杂的事物发展过程中，有许多矛盾存在，其中必有一种是主要的矛盾，由于它的存在和发展，规定或影响着其他矛盾的存在和发展。

雷达要完成它的任务，必须解决它和目标之间的许多矛盾，诸如：目标测定精度的矛盾、目标参数多维的矛盾、目标空域大小的矛盾、目标数目多少的矛盾、作用距离的矛盾、背景干扰的矛盾，等等。对于某一个特定的任务，可能其中某一项是起决定作用的主要矛盾。例如：目标形态的识别，目标参数多维是主要矛盾；以低空飞机或地面车辆为目标的机载警戒雷达，背景干扰是主要矛盾；靶场测量，测量精度是主要矛盾，等等。对于不同的矛盾需用不同的方法来解决，例如：解决测量精度的矛盾，可用精密跟踪体制；大空域和多目标是主要矛盾的时候，用相控阵体制来解决；地球曲率对作用距离的限制成为主要矛盾的时候，用超视距雷达来解决。

由此可见，不同的特定任务有不同的主要矛盾。但是就雷达发展的全过程来说，什么矛盾是最根本的呢？我认为最根本的是目标参数多维的矛盾。因为从雷达发展的全进程来看，它是在发展史中起主导作用的一种矛盾。它和其他的矛盾是互相依赖又互

相矛盾的。对于这个问题，只要我们回顾一下雷达发展史，就能看得出来。

下面让我们简要地回顾一下雷达发展概况。雷达从三十年代作为探测电离层高度的科研工具开始，至今约有四十多年了，大体上可分为五个发展阶段，即：

（1）电离层探测。时间在三十年代，这是雷达的创始和命名年代，人们开始懂得用脉冲无线电波可以测距。

（2）对海、对空警戒。时间在二次世界大战前期——1938～1941年。由于战争的需要，雷达技术得到了迅速的发展。利用雷达可以看到用其他方法看不到（由于距离太远或黑夜、云雾等）的敌机、敌舰。了解敌机、敌舰的位置需要方位和距离二维数据，对精度要求不高。

（3）炮瞄和引导拦截敌机。时间在二次世界大战后期——1942～1945年。这时发展了自动跟踪的微波雷达以及V形波束和机械波束扫描的三维雷达，这些雷达都能测定目标的方位、仰角和距离三维数据，测定的精度比前一阶段提高了一个数量级。

（4）五十年代，对导弹、人造卫星的测量和制导成为雷达的尖端任务，这种测量要求高精度的四维信息，即方位、仰角、距离、速度信息，测定的精度又比前一阶段提高了一个数量级。

（5）六十到七十年代，对导弹和人造卫星的防御和识别是雷达要解决的新任务，这就要求精确地测量方位、仰角、距离、速度、极化、大小以及与形状动态有关的其他信息。

由此可见，在雷达和目标的斗争中，后者促使雷达一步步地向多维、高精度的方向发展。在这些发展阶段内，其中一个问题是雷达把目标看成怎样一个目标。对人为的目标，诸如飞机、船舰之类，雷达原先是把它们看成一个点的。这是因为雷达的分辨单元从任何一维来说都比目标尺寸大得多（可能大若干个数量级），因此雷达看这些目标确确实实是一个点，静止的点或移动的点。由于雷达测量精度不断提高，当测量精度提高到接近于目

标尺寸的时候，情况就起了质的变化，雷达看到这个点开始不“老实”了，这个点的位置是上下、左右、前后迅速地随机跳动着的，因此雷达再不能像原先那样顺利地不断提高测定精度，就是说继续提高测定精度受到了目标噪声的限制。

目标噪声是运动着的立体目标各部位反射的电磁波矢量和的变化，随着目标的幌动而引起的必然结果，矢量和的变化是由于目标上各反射点相对位置的变化所致。

显而易见，如果目标是一个真正的点，那么它的反射信号只有一个矢量，就不会有目标噪声。但由于目标是一个复杂形状的立体，它的反射信号由许多大小不同的矢量相加而成，这些矢量的幅度变化是缓慢的，但相对相位变化却很快，使总的反射回波（矢量和）变化得很快。这就是目标噪声的来源。复杂的立体目标产生五种目标噪声：（1）幅度噪声（亦称衰落）；（2）角噪声（亦称角闪烁）；（3）距离噪声；（4）多卜勒噪声；（5）极化调制。关于这些噪声的成因及其对参数测量的影响详见参考资料〔1〕。

目标噪声实际就是立体目标对发射信号的迅速调制，这里蕴藏着比点目标多得多的立体目标固有的多维信息。当我们把一个实际目标当作点目标来测量时，这些固有的多余信息就变成了累赘，限制了参数测量精确度，因此被称为“噪声”。但当我们要分辨物体的形状和动态时，就必须充分利用这些可贵的“信息”。只有通过对这些信息的分析和识别，才有可能将一种立体形状和另一种立体形状区别开来（例如球形、片形、带形、锥形、角反射体等等），将一种运动姿态和另一种运动姿态区别开来（例如旋转、翻滚、摇摆等等）。这就使坏事变成好事，是事物固有的一分为二的特性。我们称它为“噪声”，是指在某种特定情况下它的消极和有害的一面；称它为“信息”，指的是在另一种特定情况下它的积极和有利的一面。这种一分为二的特性是自然界固有的辩证法。

雷达在这短短不到四十年的发展史中，由于和目标（特别是飞行目标）矛盾的斗争，不论是作用距离、测量精度、目标数目、空间范围、数据率、抗干扰性能等，每隔五至十年就有很大的进展，但最根本的进展是测量技术从一维向多维的发展以及测量精度的不断提高。因此，下面分别论述距离、速度、方位、仰角这四维——最常用最重要的四维——理论方面的基本概念（一、二两章）和具体实践的主要方法（三、四章）。

第一章　雷达信号的形式和选择方法

§1.1 引　　言

雷达机的发射信号和通信机的发射信号有一个本质的区别，这就是通信的全部信息在发射信号内，而雷达的发射信号则毫无信息，它只是信息的运载工具。当雷达发射信号碰到目标时，目标就对发射信号进行调制并反射出去，称为回波信号。目标的全部信息就蕴藏在这个回波信号内。

那末，为什么我们要研究发射信号的形式呢？因为它和能运载的信息量有直接的关系。从理论上讲，我们希望得到尽可能多的所需要的信息，同时还想得到尽可能少的不需要的信息，或者说尽可能多地排除干扰。从实践上讲，选定的发射信号要较易形成，收到的回波信号中的有用信息要较易提取，干扰（即有害信息）要较易排除，这种提取和排除是通过接收系统的信息处理设备来实现的（接收系统实质上是回波信号的放大和处理系统，重点在于“处理”）。从这些可看出，发射信号的形成是非常重要的，特别是许多现代雷达，其任务的主要矛盾是多维、高精度和高分辨力的测量要求。这样，发射信号形式的研究和选择就成了解决矛盾的关键问题。

本章准备讨论这样几个问题：波形与频谱；匹配滤波器；测量精度；分辨力；脉冲压缩信号；模糊的含义及正型模糊图；信号波形的分类和选择方法。目的是介绍信号与距离、速度二维的关系，以及如何选择合适的发射信号以适应任务中对这二维提出的特定测量精度、分辨力和抗干扰等要求。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

§1.2 波形与频谱

1.2.1 傅里叶变换式

一个余弦波，幅度为2，频率为f_1，若取某一最大值时为$t=0$，如图1-1（a）所示，则可用数学式表示成$x(t)=2\cos 2\pi f_1 t$。这个余弦波可以用两根旋转着的矢量来合成，一根为反时针方向旋转的$e^{j2\pi f_1 t}$，另一根为顺时针方向旋转的$e^{-j2\pi f_1 t}$，如图1-1（b）所示。因此，

$$x(t)=2\cos 2\pi f_1 t=e^{j2\pi f_1 t}+e^{-j2\pi f_1 t} \tag{1.1}$$

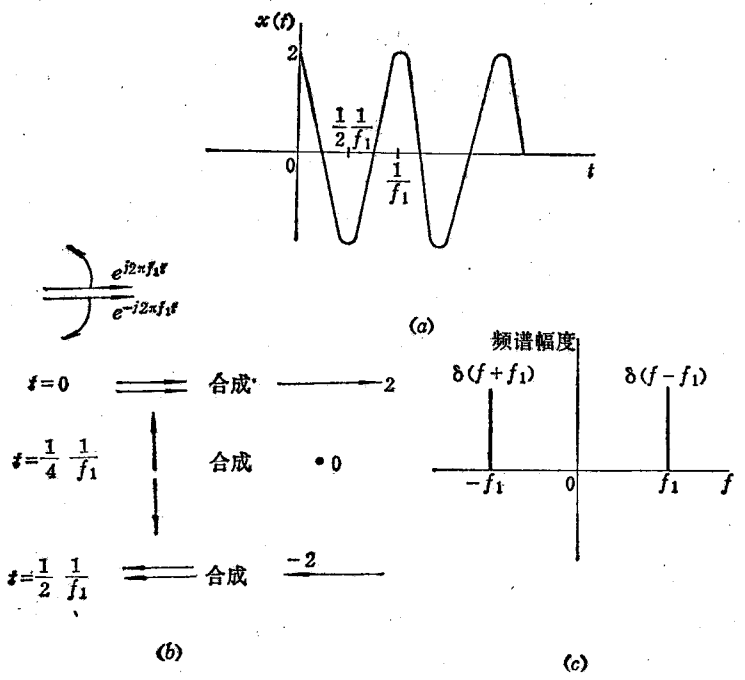


图1-1 余弦波形$x(t)$及其频谱

（a）波形$x(t)=2\cos 2\pi f_1 t$；（b）矢量随时间旋转及其合成；（c）$x(t)$的频谱。

当 $t=0$ 时，两个矢量方向相同，合成矢量为 2；

当 $t=\frac{1}{4}\ \frac{1}{f_1}$ 时，两个矢量方向相反，合成矢量为 0；

当 $t=\frac{1}{2}\ \frac{1}{f_1}$ 时，两个矢量反方向相同，合成矢量为 -2。

从频谱的角度看，每一旋转矢量可用一根谱线来表达，如图 1-1（c）所示。图中二根谱线的幅度各为1.δ（f），δ函数的定义将在1.2.2节中用式（1.13）说明。一根在 $f=f_1$ 处，因此是 $\delta(f-f_1)$，表示矢量 $e^{j2\pi f_1 t}$；另一根在 $f=-f_1$ 处，因此是 $\delta(f+f_1)$，表示矢量 $e^{-j2\pi f_1 t}$。由此得知，一个实在的正弦波形，是由对应该频率的正负两谱线合成的，两谱线在任何时候都是幅度相等、相位相反。

有时候，为了便于数学运算，只用正频率频谱来表达波形。例如：

$$x(t)=2\mathrm{Re}(e^{j2\pi f_1 t})$$

Re表示实数部分，也就是可以只用 $e^{j2\pi f_1 t}$ 对应的一根正频率的谱线 $\delta(f-f_1)$ 来表达一个频率为 f_1 的正弦波形。这时与它具有复共轭关系的负频率谱线被省略了。但应该理解该负频率部分是象影子一般始终伴随着的，只是为了表达式的简洁起见而被人为地省略了。由于这个负频率部分完全由正频率部分所决定，因此不表达出来也是可以的。

现在来看，如果有如图 1-2 所示的若干离散谱线，那么波形是怎样的呢？假设是由 f_1 至 f_n n 根离散谱线组成的实波形（正频率和负频率各有 n 根），则波形为 n 根反时针方向旋转的矢量(对应 n 根正频率谱线）之和。例如第 i 根谱线的频率分别为 f_i 和 $-f_i$，正频率谱线为 $|X(f_i)|\delta(f-f_i)e^{j\theta(f_i)}$。式中 $|X(f_i)|$ 为 δ 谱线的幅值，$\theta(f_i)$ 为它的相位；这根 δ 谱线对应的矢量为 $|X(f_i)|e^{j\theta(f_i)}e^{j2\pi f_i t}$。同样，负频率谱线为 $|X(-f_i)|\delta(f+f_i)e^{j\theta(-f_i)}$，对应的矢量为 $|X(-f_i)|e^{j\theta(-f_i)}e^{-j2\pi f_i t}$。因此波形（即矢量和）

为

$$x(t)=\sum_{f=f_1}^{f_n}|X(f)|e^{j\theta(f)}e^{j2\pi ft}+\sum_{f=-f_1}^{-f_n}|X(f)|e^{j\theta(f)}e^{j2\pi ft} \tag{1.2}$$

根据前面的论述，$x(t)$为实函数，则其频谱中每根正谱线必定与其相应的负谱线幅度相等，相位相反。即图 1-2 中的 $f=$

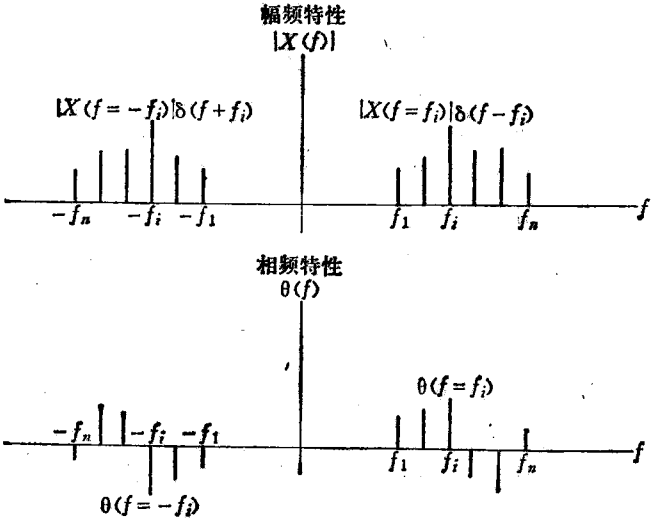


图1-2　n 根离散谱线的幅频和相频特性

f_i 和 $f=-f_i$ 这一对谱线应有 $|X(f_i)|=|X(-f_i)|$，$\theta(f_i)=-\theta(-f_i)$，亦即 $|X(f_i)|e^{j\theta(f_i)}=|X(-f_i)|e^{-j\theta(-f_i)}$。其一般化的表达式是

$$|X(f_+)|e^{j\theta(f_+)}=|X(f_-)|e^{-j\theta(f_-)} \tag{1.3a}$$

式中　$X(f_+)$——正频率部分的频谱；

$X(f_-)$——负频率部分的频谱。

上式可简写成

$$X(f_+)=X^*(f_-) \tag{1.3b}$$

符号 * 表示复共轭，即正、负频谱的幅度具有镜像关系，相位具

有相反关系。不论是频谱由若干离散的δ线条组成，或由连续的谱带组成，实波形 $x(t)$ 的频谱的正、负频率必定具有式(1.3b)复共轭的关系。

根据前面所讲，也可以只取图 1-2 中的正频谱部分，并为了信号在时域和频域上所用符号对应起见，现写成：

$$s(t)=\sum_{f=f_1}^{f_n} S(f)e^{j2\pi ft} \tag{1.4}$$

式中，$S(f)$ 为实信号的正频谱部分的两倍，即

$$S(f)=2X(f_+)=2|X(f_+)|e^{j\theta(f_+)}$$

由于舍弃了负频谱部分，因此波形 $s(t)$ 就成为复波形。其所以要取 $S(f)=2X(f_+)$，为的是使实波形 $x(t)$ 和复波形 $s(t)$ 具有如下简单关系式：

$$x(t)=\mathrm{Re}\, s(t) \tag{1.5}$$

当频谱不是由离散的δ谱线组成而是由连续的谱带组成时，如图 1-3 所示，可以把谱带分成许多小条，例如图中示出了在 f_i 处的一小条，这一小条的面积 $|S(f_i)|df$ 就是 f_i 处δ谱线的幅值，它的相位为 $\theta(f_i)$。这一小条谱线对应一根极小的矢量：

$$ds(t)=|S(f_i)|df e^{j\theta(f_i)}e^{j2\pi f_i t}$$

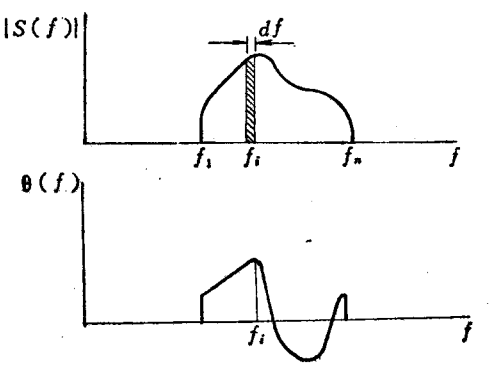


图1-3 连续谱带组成的信号谱

复信号 $s(t)$ 是所有这些极小矢量的积分，即

$$s(t)=\int ds(t)=\int_{f_1}^{f_n}|S(f)|e^{j\theta(f)}e^{j2\pi ft}df$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}S(f)e^{j2\pi ft}df \tag{1.6}$$

式(1.6)即为数学中的傅里叶反变换式。从数学关系可知傅里叶变换式为

$$S(f)=\int_{-\infty}^{\infty}s(t)e^{-j2\pi ft}dt \tag{1.7}$$

式(1.6)、式(1.7)就是信号的复频谱和复波形之间的傅里叶变换关系式，称为信号的傅里叶变换对。

我们知道，$x(t)$ 为高频实信号，$s(t)$ 为高频复信号；一般的高频信号均是在载频 f_0 上进行调制后形成的。用 $u(t)$ 表示调制信号波形，则它们之间存在如下关系：

$$s(t)=u(t)e^{j2\pi f_0t}=|u(t)|e^{j[2\pi f_0t+\phi(t)]} \tag{1.8}$$

式中，$u(t)$ 为复调制信号，$|u(t)|$ 为其幅度调制，$\phi(t)$ 为其相位调制。

它们和实信号的关系为

$$x(t)=\mathrm{Re}\,s(t)=|u(t)|\cos[2\pi f_0t+\phi(t)] \tag{1.9}$$

按式(1.8)，调制信号的频谱和 $S(f)$ 之间的关系为

$$U(f)=S(f+f_0) \tag{1.10}$$

此式表明 $U(f)$ 就是将 $S(f)$ 在频率坐标上移动了一个位置，将原来 $S(f)$ 的 $f=f_0$ 坐标移到调制信号频谱 $U(f)$ 的 $f=0$ 处，因此 $U(f)$ 必然坐在 $f=0$ 的正、负频率两边，而它的正、负频谱并无共轭关系，如图 1-4 所示。

当然，$u(t)$ 和 $U(f)$ 的关系仍有式(1.6)和(1.7)，即傅里叶变换对的关系：

$$u(t)=\int_{-\infty}^{\infty}U(f)e^{j2\pi ft}df$$

$$U(f)=\int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-j2\pi ft}\,df$$

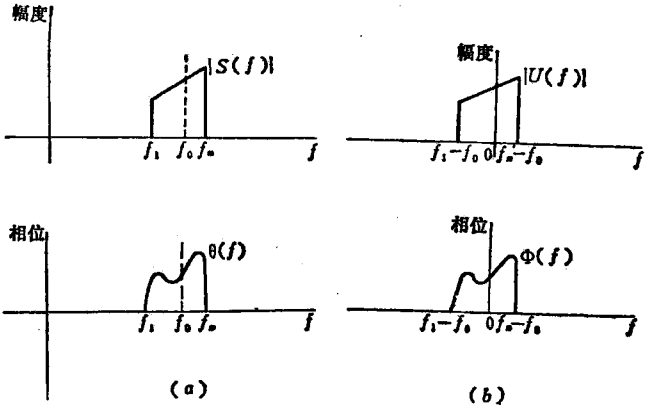


图1-4 复离频信号频谱 $s(f)$ 和复调制信号频谱 $U(f)$ 的幅频特性和相频特性（a）对应于某复信号波形 $s(t)$ 的频谱 $S(f)$ 的幅度和相位；（b）对应于复调制波形 $u(t)$ 的频谱 $U(f)$ 的幅度和相位。

由于载频相位在测量时和时间分辨中存在严重模糊而不能发挥其作用，在一般信息处理系统中用检波方法将其去掉，对测量精度和分辨能力实际上起作用的是调制信号 $u(t)$（这个问题将在本章§1.5中加以论述），因此在以后的各节中基本上都采用调制信号 $u(t)$ 来进行讨论。

1.2.2 常用变换对和规则

文中经常要碰到一些波形与频谱的问题，这些问题也正是日常工作中经常碰到的，为了以后应用方便起见，现列出几个常用变换对以及变化规则：

变换对 1　　$\mathrm{rect}\longleftrightarrow\mathrm{sinc}$

说明：rect 表示矩形，并定义如下（以波形为例）：

$$\mathrm{rect}\,t=\begin{cases}1, & |t|\leqslant\dfrac{1}{2}\\ 0, & |t|>\dfrac{1}{2}\end{cases}\qquad(1.11)$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com