

课程内容

1 绪论

- 1.1 研究雷达信号的目的意义
- 1.2 雷达信号的复数表示
- 1.3 雷达信号的相关特性

2 最佳线性滤波器

3 雷达测量精度和分辨力

- 3.1 “点目标”回波的数学模型
- 3.2 雷达测距精度
- 3.3 雷达测速精度
- 3.4 信号的非线性相位特性对测量精度的影响
- 3.5 雷达不定原理
- 3.6 距离分辨力
- 3.7 速度分辨力

4 模糊函数

- 4.1 模糊函数的推导
- 4.2 模糊函数与分辨力的关系
- 4.3 模糊函数与匹配滤波器输出响应的关系
- 4.4 模糊函数的主要性质
- 4.5 模糊图的切割
- 4.6 模糊函数与精度的关系
- 4.7 利用模糊函数对典型脉冲雷达信号进行分析

5 调频脉冲信号

- 5.1 线性调频脉冲信号的产生
- 5.2 线性调频脉冲信号的频谱
- 5.3 线性调频脉冲信号的波形参量

5.4 线性调频脉冲信号的模糊函数

5.5 线性调频脉冲信号的性能

5.6 线性调频脉冲信号的处理方法

5.7 线性调频脉冲信号的加权处理

6 相位编码脉冲信号

6.1 二相编码信号

6.2 二元伪随机序列

6.3 巴克（Barker）序列

6.4 巴克码的处理

6.5 巴克码旁瓣的抑制

6.6 增加巴克码长度的方法

6.7 相位编码信号多普勒敏感问题

6.8 多相编码信号简介

7 相干脉冲串信号

- 7.1 相干脉冲串信号
- 7.2 均匀脉冲串信号的频谱
- 7.3 均匀脉冲串信号的模糊函数
- 7.4 均匀脉冲串信号的处理
- 7.5 均匀脉冲串信号的性能
- 7.6 其它脉冲串信号介绍

参考书：

- 1、贾鸿志， 《雷达信号分析》， 南理工
- 2、林茂庸， 《雷达信号理论》， 国防工业出版社
- 3、N. LEVANON, E. MOZESON, **RADAR SIGNALS**,
A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION
- 4、W.S. BURDIC, **RADAR SIGNAL ANALYSIS**

1 绪论

研究雷达信号的目的意义

一、雷达所面临的问题

- 电子干扰(干扰机, 欺骗式)
- 低空突防(巡航导弹)
- ARM(百舌鸟反辐射导弹)
- 隐身(F117A隐身攻击机)

二、雷达与通信发射信号

与通信不同，信息在回波中，
与发射信号形式有关。不同用途
雷达发射信号不同。

三、雷达发射信号的发展

SP、LFM (NLFM)、
B (Q) PSK、PS、PD、FS



四、雷达性能与所发射的信号

- 测距
- 测速
- 测角
- 成像
- 抗干扰

五、新型雷达信号的要求

- 不易被对方侦察和模拟(LPI)，应采用复杂的调制
- 有良好的分辨力和抗消极干扰的能力，要求信号应又有“图钉”型的模糊函数
- 具有极宽的频带，使任何快速侦察干扰系统均无法施行瞄准式干扰
- 容易进行最佳信号处理

六、本课程的意义和特点

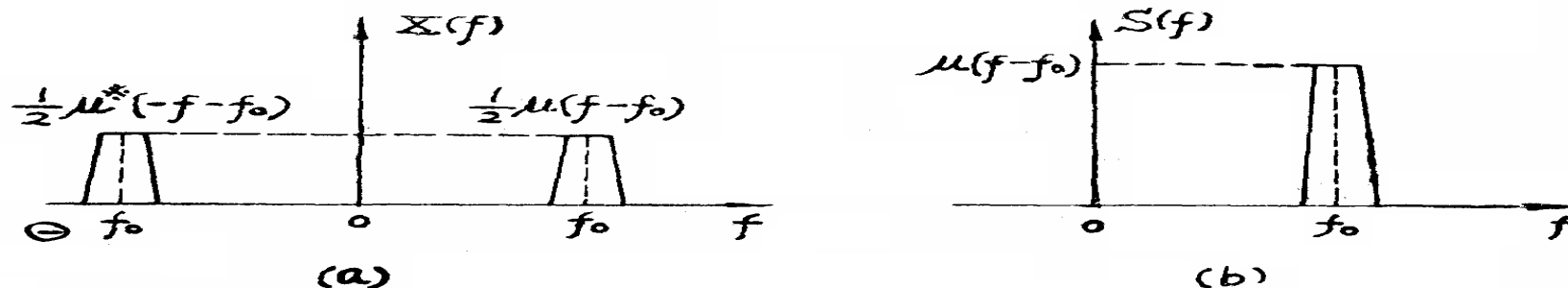
意义：新体制理论基础、对系统指导作用

特点：基本概念、基本理论、基本方法、数学近视、框图、信号决定雷达性能（固有分辨力和最大理论精度）

1.2 雷达信号的复数表示

一、目的

实窄带信号频谱由正、负组成，简化运算用复信号。



(a)实窄带信号的频谱，

(b)复指数表示的频谱

二、实窄带信号 ($B \ll f_0$)

$$x(t) = a(t) \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)]$$

实窄带信号的能量：

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} [a(t)]^2 dt$$

说明：

- 实窄带信号的能量可用实包络表示
- 相位函数不改变能量，也不会使包络失真

三、实窄带信号的复数表示

1、复解析表示法（去掉负谱、正谱加倍）

$$x(t) \Leftrightarrow X(f)$$

$$S_a(f) = \begin{cases} 2X(f) & f > 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases} \quad S_a(f) = 2X(f)U(f)$$

$$s_a(t) = 2x(t) * \left[\frac{1}{2} \delta(t) - \frac{1}{2j\pi t} \right]$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau + j \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

$$= x(t) + \hat{j} x(t)$$

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) * \frac{1}{\pi t}$$

2、复指数表示法

$$s_e(t) = a(t)\cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)] + ja(t)\sin[2\pi f_0 t + \varphi(t)]$$

$$= a(t)e^{j[2\pi f_0 t + \varphi(t)]} = \mu(t)e^{j2\pi f_0 t}$$

$$\mu(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}$$

$$x(t) = \text{Re}[s_e(t)]$$

$u(t)$ 称为复包络

3、区别

- 复解析表示法——频域，任意实信号
- 复指数表示法——时域，窄带信号

1.3 雷达信号的相关特性

相关特性对随机信号和确知的规则信号都很重要!

一、相关特性的一般概念

相关特性是表征两个信号或一个信号相隔时间 T 的两点之间相互关联程度的大小。

互相关函数定义:

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) s_2^*(t - \tau) dt = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t + \tau) s_2^*(t) dt$$

$$R_{21}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_2(t) s_1^*(t - \tau) dt = \int_{-\infty}^{\infty} s_2(t + \tau) s_1^*(t) dt$$

自相关函数:
$$R_{11}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t-\tau)dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t+\tau)s^*(t)dt$$

性质:

- 1、共轭对称性: 实偶函数的相关函数是 τ 的偶函数;
- 2、自相关函数在原点的值等于信号能量($\tau=0$);
- 3、原点的值最大;
- 4、相关函数的面积等于信号面积模的平方;
- 5、复信号自相关函数的付里叶变换是正实函数, 与复信号的相谱无关。

若两个复信号在时域上具有不同的波形, 但在频域上如具有相同的能谱, 这两个信号的相关函数就完全相同。

二、相关与卷积的关系

区别：相关运算中被积函数之一没有折迭过程；
卷积运算中被积函数之一有折迭过程。

关系： $R_{12}(\tau) = s_1(\tau) * s_2^*(-\tau)$

$s_2(t)$ 共轭对称（实偶函数）有： $R_{12}(\tau) = s_1(\tau) * s_2(\tau)$

自相关函数： $R_{11}(\tau) = s_1(\tau) * s_1^*(-\tau)$

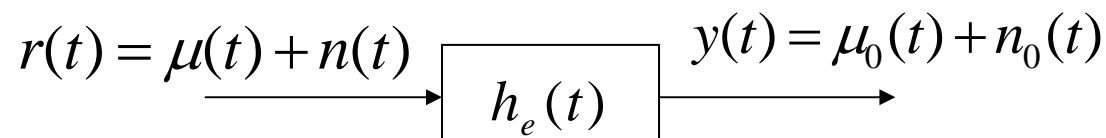
$s_1(t)$ 共轭对称（实偶函数）： $R_{11}(\tau) = s_1(\tau) * s_1(\tau)$

2 最佳线性滤波器

噪声的影响：信号的检测能力下降、测量精度降低。

一、最佳线性滤波器的准则

准则的要求：①物理可实现；②唯一解答；③能求解的数学表达式。



1、输出信号的峰值功率： $\hat{P} = |\mu_0(t_0)|^2 = \left| \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \mu(t_0 - \tau) h_e(\tau) d\tau \right|^2$

2、输出的噪声平均功率： $\bar{P}_N = \frac{N_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} |h_e(\tau)|^2 d\tau$

3、信号噪声比（SNR）： $\rho = \frac{\hat{P}}{\bar{P}_N}$

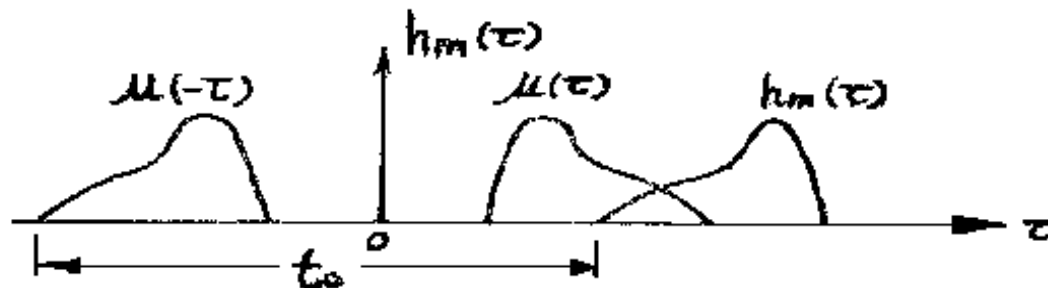
二、匹配滤波器的脉冲响应特性

$$\rho = \frac{\hat{P}}{P_N^-} = \frac{\left| \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \mu(t_0 - \tau) h_e(\tau) d\tau \right|^2}{\frac{N_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} |h_e(\tau)|^2 d\tau}$$

①变分法解；②许瓦兹不等式。

$$\rho = \frac{\hat{P}}{P_N^-} \leq \frac{1}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} |\mu(t_0 - \tau)|^2 d\tau = \rho_m$$

由等号成立的条件得： $h_m(\tau) = C\mu^*(t_0 - \tau)$

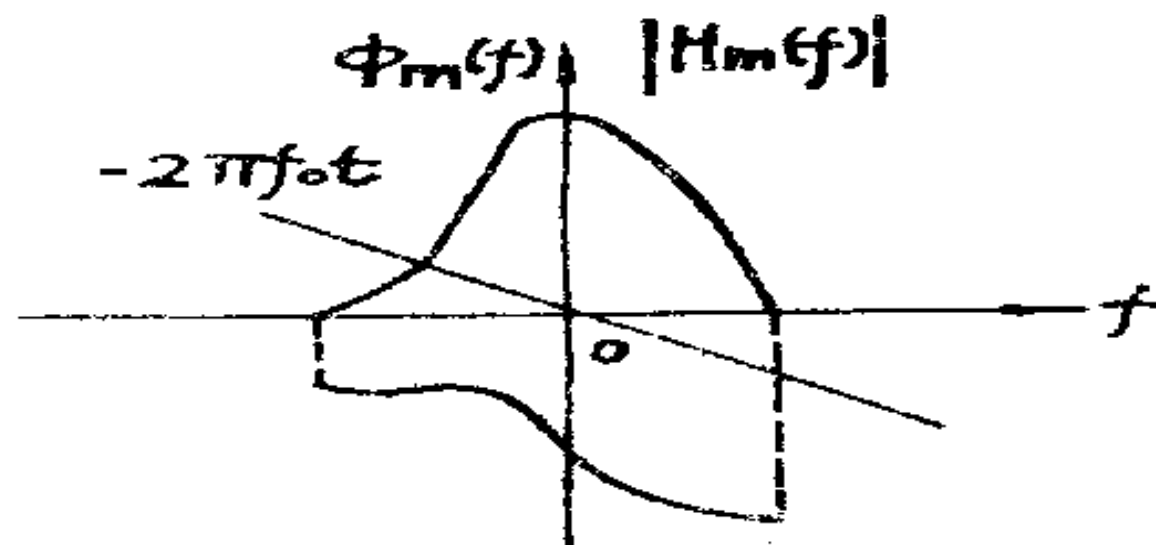
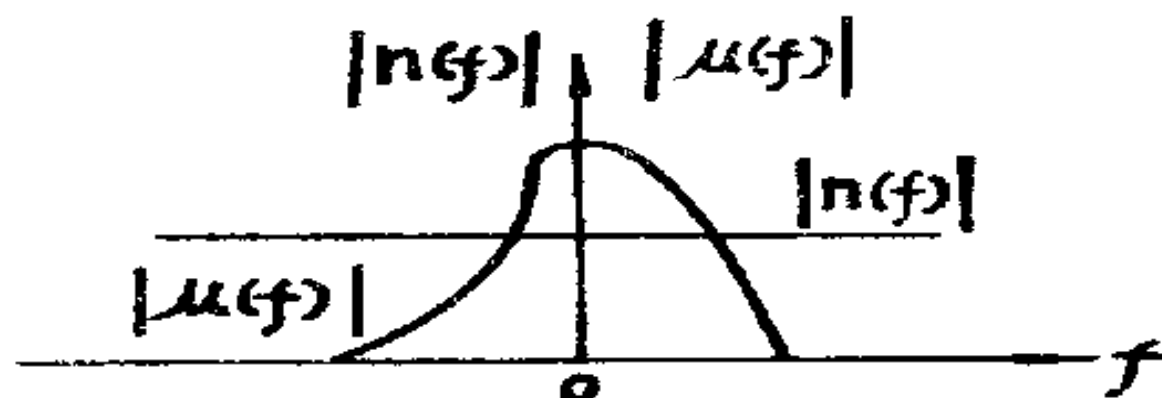


三、匹配滤波器的频率特性

$$\begin{aligned} H_m(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \mu^*(t_0 - t) e^{-j2\pi f t} dt \\ &= \left[\int_{-\infty}^{\infty} \mu(t_0 - t) e^{j2\pi f t} dt \right]^* = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \mu(t) e^{j2\pi f (t_0 - t)} dt \right]^* \\ &= \mu^*(f) e^{-j2\pi f t_0} \end{aligned}$$

$$H_m(f) = |\mu(f)| e^{-j\theta(f)} e^{-j2\pi f t_0}$$

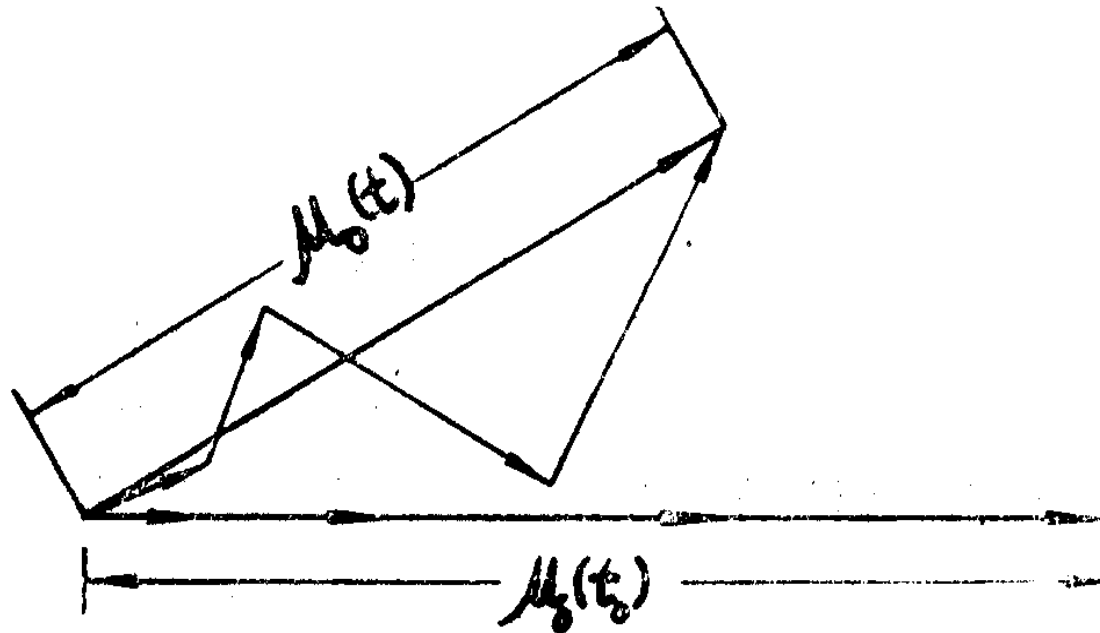
- 1、幅谱 $|H_m(f)| = |\mu(f)|$
- 2、相谱 $\phi_m = -\theta(f) - 2\pi f t_0$



$$\mu_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |\mu(f)|^2 e^{j2\pi(t-t_0)f} df$$

$$\mu_0(t) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} |\mu(f_K)|^2 e^{j2\pi(t-t_0)f_K} \Delta f$$

$$\mu_0(t) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} a_K e^{j\varphi_K}$$



四、匹配滤波器中几个问题的讨论

1、输出功率信噪比：

$$\rho_m = \frac{1}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} |\mu(t_0 - \tau)|^2 d\tau = \frac{1}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} [a(t)]^2 dt = \frac{2E}{N_0}$$

2、时间 t_0 。的意义及选择

3、准则问题

4、相位影响（引起平均3dB的SNR损失）

5、时延和频移的适应性（作业）

6、与相关器的关系（作业）