

声纳原理

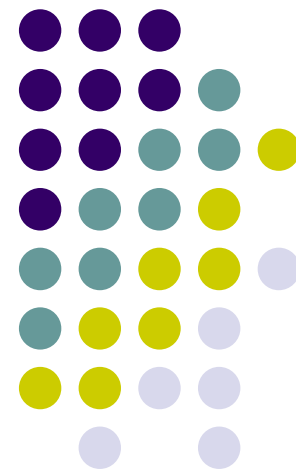
声纳系统测距方法

任课教师：杨益新

电子邮件：yxyang@nwpu.edu.cn

办公电话：88460373

办公地址：航海学院322室





声纳系统的主要任务之一是在测向的同时完成对目标距离的测定。

主动声纳测距：利用目标的回波或者是应答信号。

被动声纳测距：利用目标声源发出的信号或噪声。

本章分主动测距和被动测距来讨论。



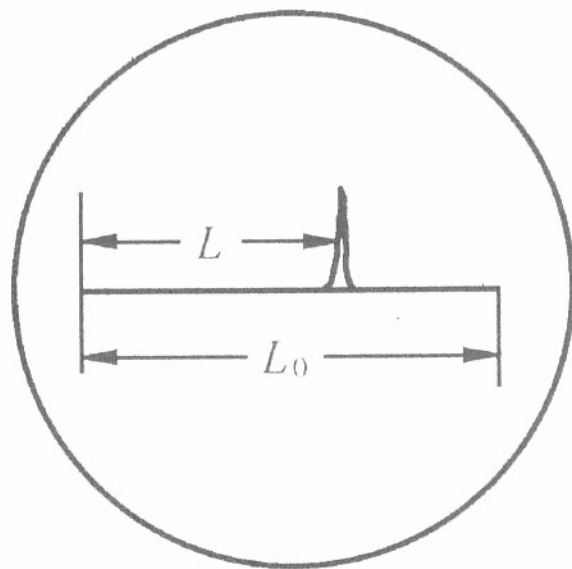
第一节 主动测距方法

1. 脉冲测距法

基本原理：利用接收回波和发射脉冲信号间的时间差来测距的方法。

$$t = \frac{2R}{c} \quad R = \frac{1}{2}ct$$

利用脉冲法测距时，脉冲重复周期必须大于最大目标距离所对应的信号往返时间，否则会出现所谓的距离模糊。





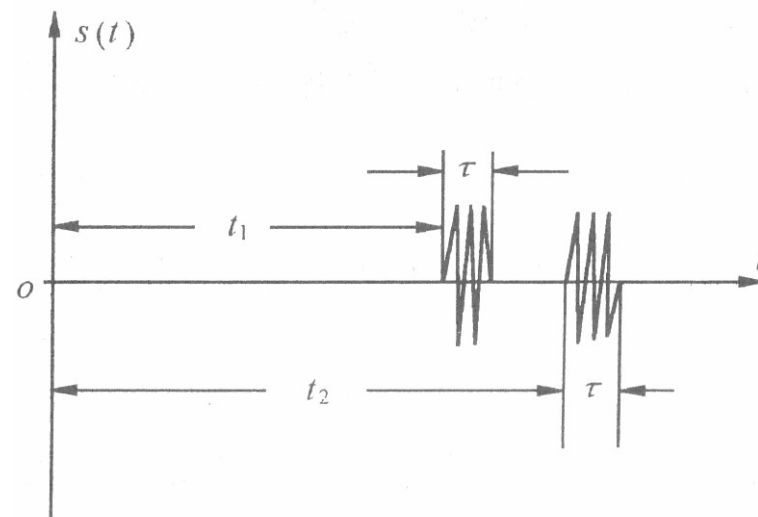
脉冲测距法的距离分辨力与脉冲宽度有关。距离分辨力是指在同一方向，声纳能分辨两个目标的最小距离差。

能分辨两个目标的条件为：

$$t_2 - t_1 \geq \tau$$

能分辨最小目标间距为：

$$\Delta R = \frac{1}{2}c(t_2 - t_1) \geq \frac{1}{2}c\tau$$



要提高距离分辨力必须使脉宽减小。

脉冲测距法的测距误差： $\Delta R = \frac{1}{2}(c\Delta t + t\Delta c)$



相对误差为：
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta c}{c}$$

可见，测距误差由测时误差和声速误差引起。通常声速测量误差是主要因素。

优点：应用范围广泛，可用于对多个目标进行测距，对固定目标也可以进行距离测量。

2. 调频信号测距法

基本原理：发射调频信号，利用收发信号的频差来测量距离。

（一）线性调频信号测距

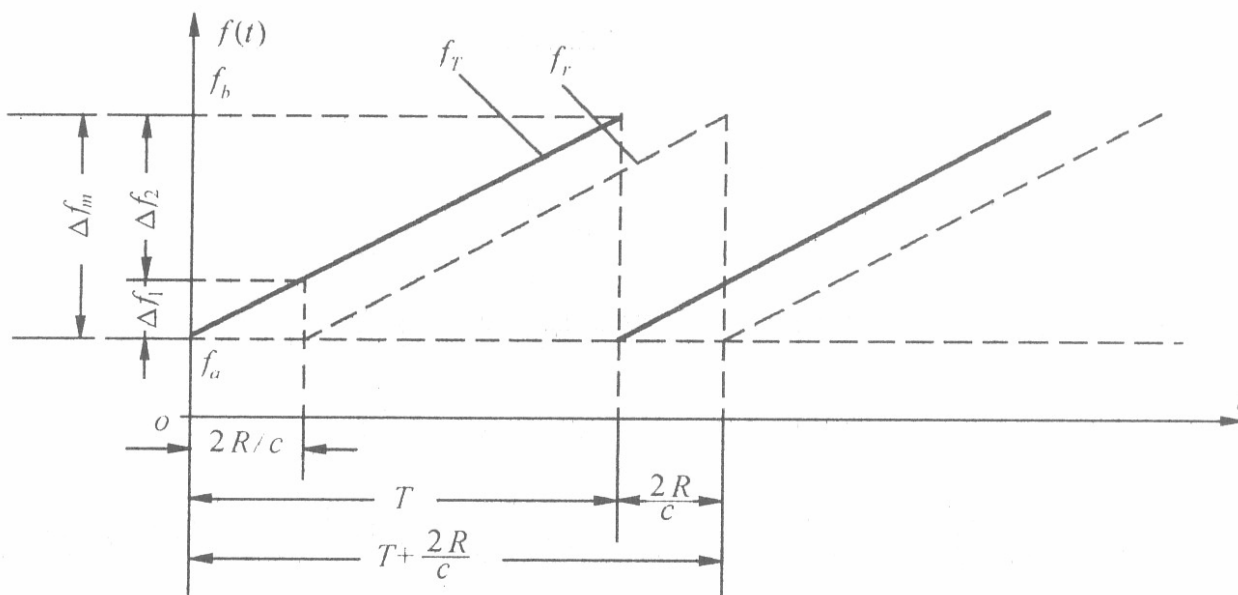


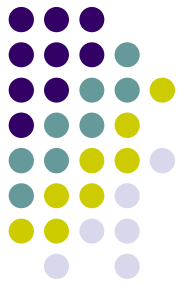
设发射机连续、周期地发射瞬时频率为下式表示的线性调频信号：

$$f_T(t) = f_a + kt \quad k = \frac{\Delta f_m}{T}$$

$$s_T = \cos(2\pi f_a t + \pi kt^2)$$

目标距离为 R 时，接收信号时间延迟 $t_0 = \frac{2R}{c}$





当目标和声纳间无相对径向运动时，当 $\frac{2R}{c} \leq t \leq T$

$$f_T(t) = f_a + kt \quad f_r(t) = f_a + k\left(t - \frac{2R}{c}\right)$$

发射信号与接收信号混频后的差频为

$$\Delta f_1 = f_T(t) - f_r(t) = k\frac{2R}{c}$$

当 $T \leq t \leq T + \frac{2R}{c}$

$$f_T(t) = f_a + k(t - T) \quad f_r(t) = f_a + k\left(t - \frac{2R}{c}\right)$$

差频为：
$$\Delta f_2 = f_r(t) - f_T(t) = k\left(T - \frac{2R}{c}\right)$$



可见, Δf_1 和 Δf_2 均是距离 R 的函数。只要测出这两个频率, 就可推算出目标距离。

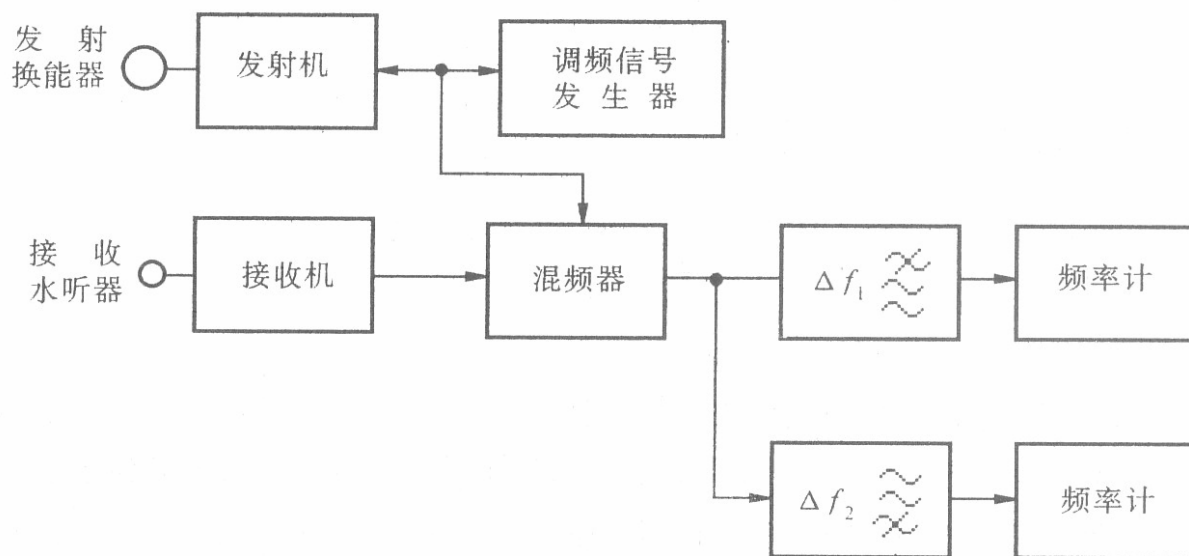


图 5-4 调频测距框图

当发射信号周期足够大, $\frac{2R_{\max}}{c} \leq \frac{T}{2}$ $T \geq \frac{4R_{\max}}{c}$



差频分量的瞬时频率满足： $0 \leq \Delta f_1 \leq \frac{1}{2}kT \leq \Delta f_2 \leq kT$

此时， Δf_1 总是小于 Δf_2 ，可用截止频率为 $\frac{1}{2}kT$ 的低通和高通滤波器分别让这两个频率分量的信号通过，即可估计出这两个频率分量，从而测出目标距离。

定义单位距离的频率数值 $\frac{\Delta f_1}{R} = \frac{2\Delta f_m}{T_c}$

提高距离分辨力，必须加大调频频偏，减小调频信号周期。

存在多普勒频移时，此方法不适用。

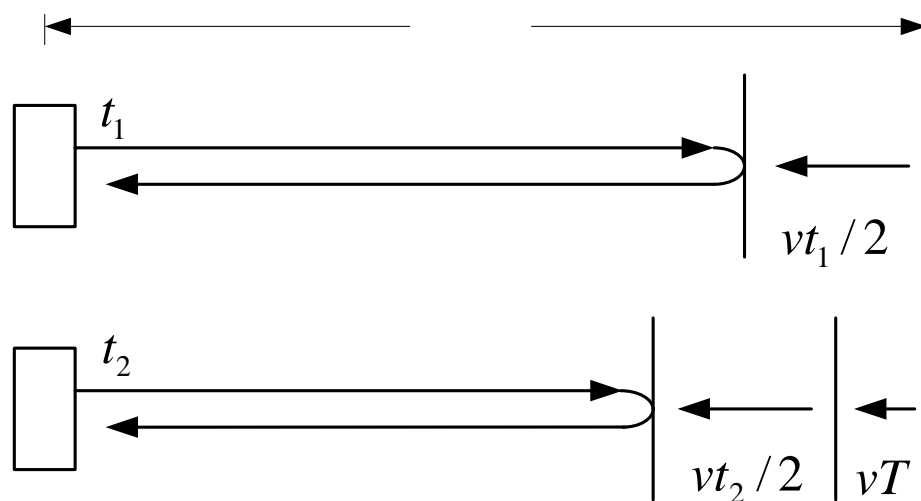
(二) 三角波调频测距

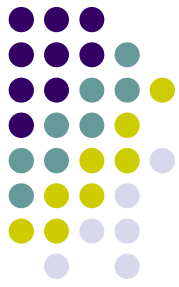


第二节 窄带信号的模糊函数

1. 信号的多普勒频移

声纳与目标间的相对运动会使接收的信号波形发生改变，表现为信号频率的偏移，称之为多普勒频移。





脉冲前沿回到发射点的时间和目标距离之间的关系：

$$L = \frac{vt_1}{2} + \frac{1}{2}ct_1 \quad \longrightarrow \quad t_1 = \frac{2L/c}{1+x} \quad x = v/c$$

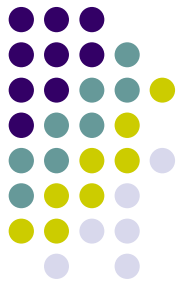
脉冲后沿回到发射点的时间和目标距离之间的关系：

$$L = \frac{vt_2}{2} + \frac{1}{2}ct_2 + vT \quad \longrightarrow \quad t_2 = \frac{2L/c - 2xT}{1+x}$$

脉冲前后沿往返时间差值为： $t_1 - t_2 = \frac{2xT}{1+x}$

接收到的脉冲宽度为

$$T_1 = T - (t_1 - t_2) = T - \frac{2xT}{1+x} = \left(\frac{1-x}{1+x} \right) T = \alpha T$$



当 $x \ll 1$ 时, $\alpha \approx (1-x)^2 \approx 1-2x = 1 - \frac{2v}{c}$

$$\delta = \frac{2v}{c} \quad \alpha = 1 - \delta$$

结论：声纳与目标间的相对运动使得脉宽为 T 的发射信号经目标反射后，在接收点变为脉宽为 αT 的信号。

当存在传播延迟 τ 时，接收信号为

$$s_r(t) = s_T \left[\frac{1}{\alpha} (t - \tau) \right] = s_T \left[\frac{1}{1 - \delta} (t - \tau) \right] \approx s_T [(1 + \delta)(t - \tau)]$$

当信号为窄带时，发射信号的复解析表示式为

$$s_T(t) = \tilde{a}(t) e^{j2\pi f_0 t}$$



接收信号为： $s_r(t) = \tilde{a}[(1 + \delta)(t - \tau)] \exp[j2\pi f_0(1 + \delta)(t - \tau)]$

目标与声纳的相对运动有两个方面的影响，即信号复包络的时间比例变化和载频的移动。

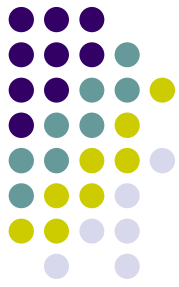
复包络的最大失真发生在脉冲信号的后沿，时间偏差为

$$\Delta t = T \cdot 2v / c$$

信号带宽为 B ，信号复包络的变化保持在 $1/B$ 秒内，那么这种影响可以忽略不计。此时要求：

$$\frac{2vT}{c} \ll \frac{1}{B} \quad BT \ll \frac{c}{2v}$$

这种情况下，多普勒频移可以简单地认为是载频偏移



$$\begin{aligned} s_r(t) &= \tilde{a}[(t - \tau)] \exp[j2\pi f_0(1 + \delta)(t - \tau)] \\ &= \tilde{a}[(t - \tau)] \exp[j2\pi f_0(t - \tau)] \exp[j2\pi f_0 \delta(t - \tau)] \\ &= s(t - \tau) \exp(j2\pi \xi(t - \tau)) \end{aligned}$$

其中 ξ 为多普勒频移。 $\xi = f_0 \delta = f_0 \frac{2v}{c}$

2. 信号的模糊函数

信号 $s(t)$ 的模糊函数定义为：

$$|\chi(\tau, \xi)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t + \tau) e^{-j2\pi \xi t} dt \right|$$

(一) 与匹配滤波器的关系

匹配滤波器的脉冲响应函数： $h(t) = s^*(t_0 - t) \quad t \geq 0$



匹配滤波器对于时延 τ_0 和频移 ξ_0 的回波的响应为

$$\begin{aligned} y(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} s_r(t) h(t - \tau) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} s_r(t) s^*[t + (t_0 + \tau_0 - \tau)] e^{j2\pi\xi_0 t} dt \\ y(\tau) &= \chi(t_0 + \tau_0 - \tau, -\xi_0) \end{aligned}$$

通过研究信号模糊函数的特性，可以了解声纳系统匹配滤波处理的效果。

（二）与模糊函数有关的概念

1、信号的模糊图



2、信号的模糊度图

3、固有分辨力

- 固有时间分辨力（距离分辨力） $\rho_\tau = 2\tau_0$
- 固有频移分辨力（速度分辨力） $\rho_\xi = 2\xi_0$

4、测量精度 $\varepsilon_\tau = \tau_0$ $\varepsilon_\xi = \xi_0$

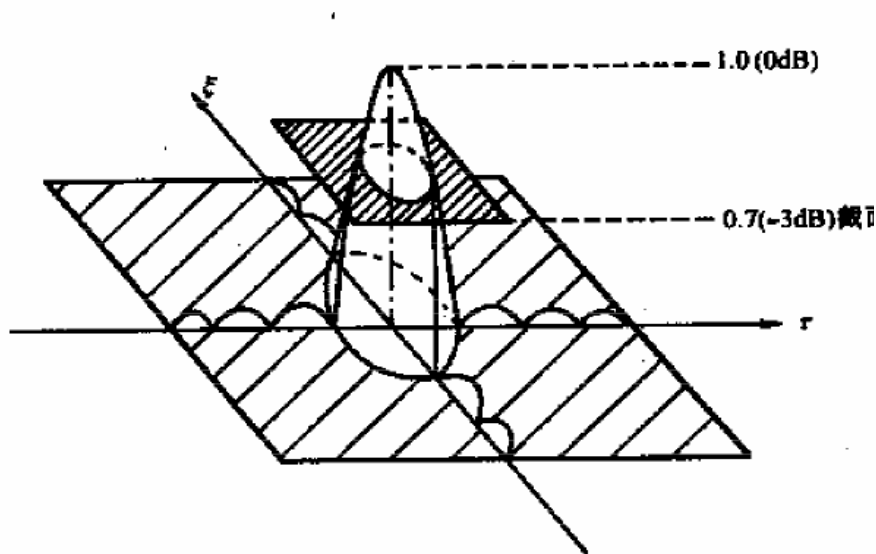


图 2-2 信号模糊图

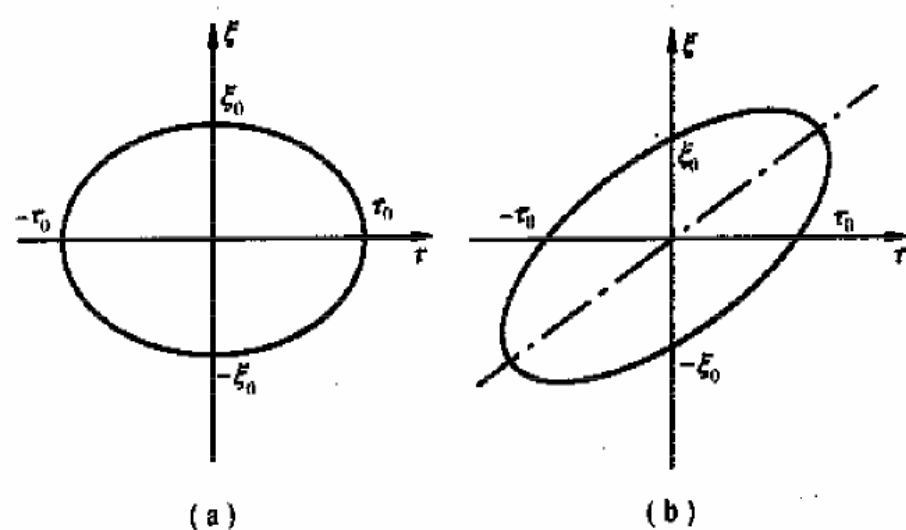
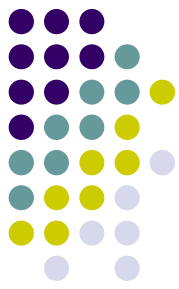


图 2-3 信号模糊度图



(三) 模糊函数的性质

1. $|\chi(\tau, \xi)|$ 与信号频谱的关系为

$$|\chi(\tau, \xi)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} S(f) S^*(f - \xi) e^{-j2\pi f\tau} df \right|$$

2. $|\chi(\tau, \xi)|$ 在原点取得最大值 $|\chi(0, 0)|$, 即

$$|\chi(\tau, \xi)| \leq |\chi(0, 0)| = E$$

其中 E 为信号的能量。

3. $|\chi(\tau, \xi)|$ 关于原点对称

$$|\chi(-\tau, -\xi)| = |\chi(\tau, \xi)|$$

4. $|\chi(\tau, \xi)|$ 体积不变性, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\chi(\tau, \xi)|^2 d\tau d\xi = |\chi(0, 0)|^2 = E^2$$

3. 常用主动声纳信号的模糊函数



(一) 单频矩形脉冲 (CW)

$$s(t) = \begin{cases} Ae^{j2\pi f_0 t} & t \in [0, T] \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$S(f) = AT \frac{\sin[\pi(f - f_0)T]}{\pi(f - f_0)T}$$

定义信号带宽 B 为频谱峰值
左右第一零点间距的一半

$$B = \frac{1}{T}$$

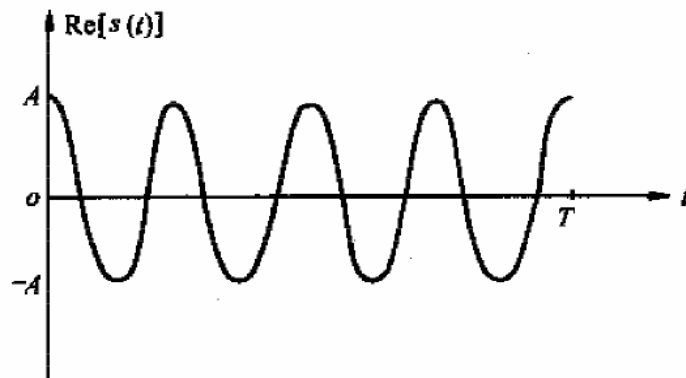


图 2-4 CW 脉冲信号波形

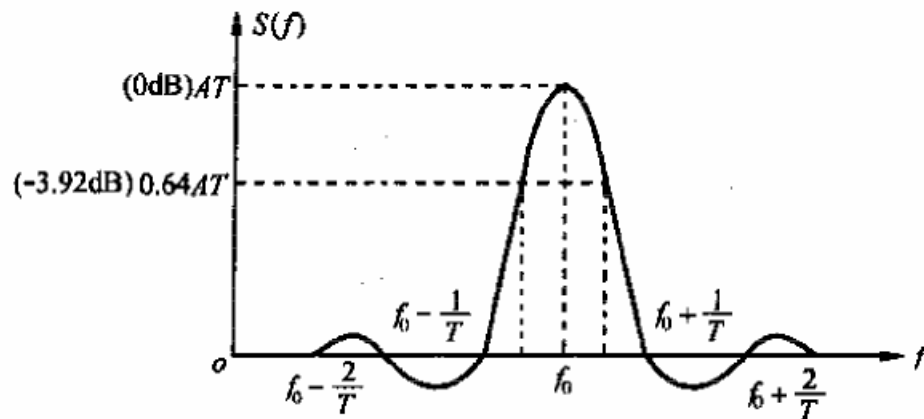


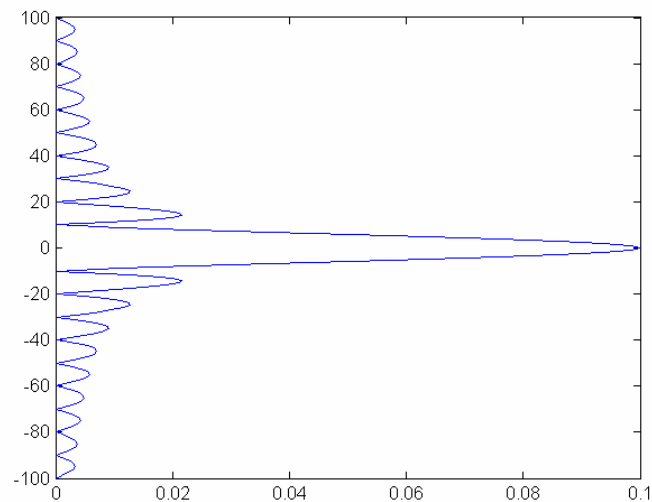
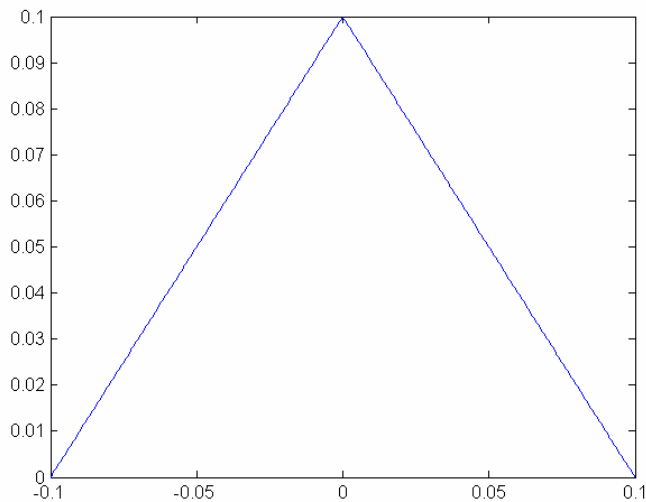
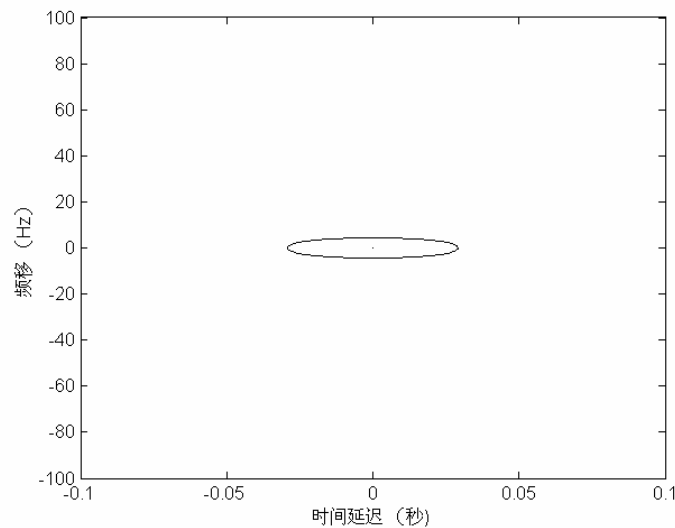
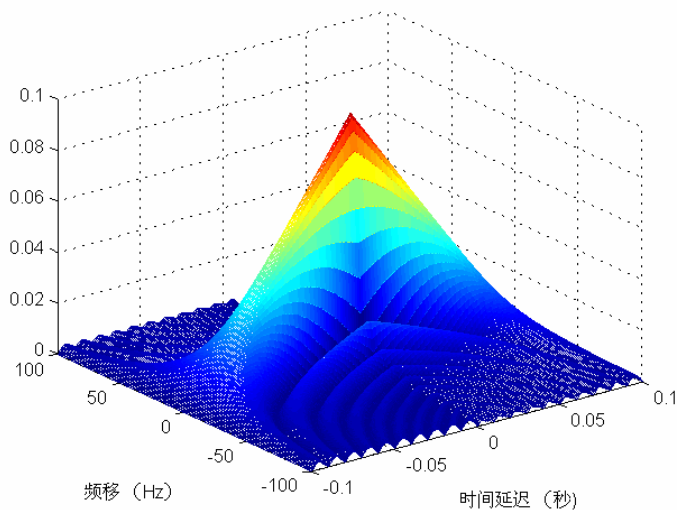
图 2-5 CW 脉冲信号频谱

模糊函数

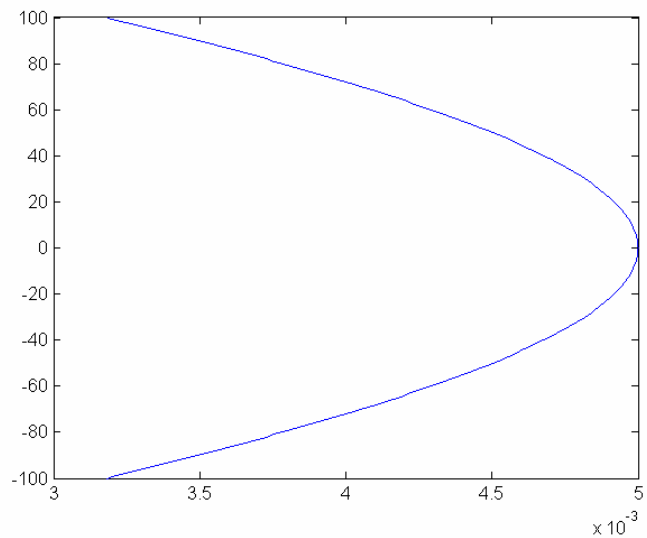
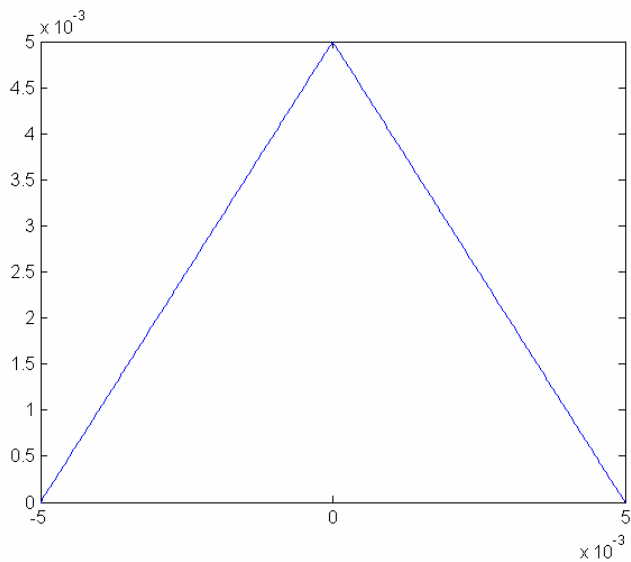
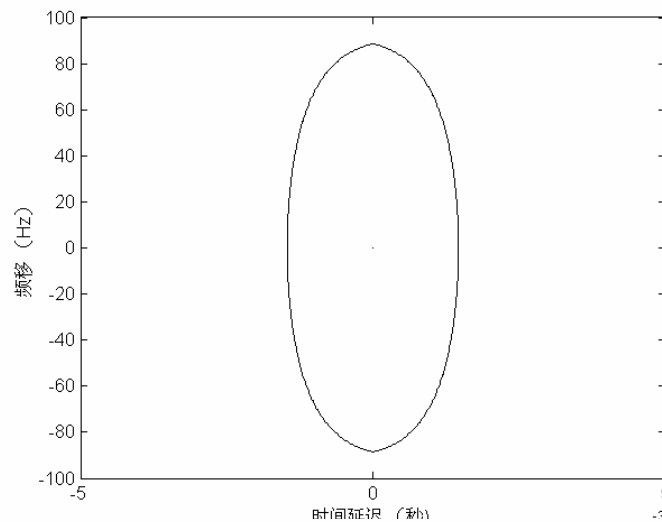
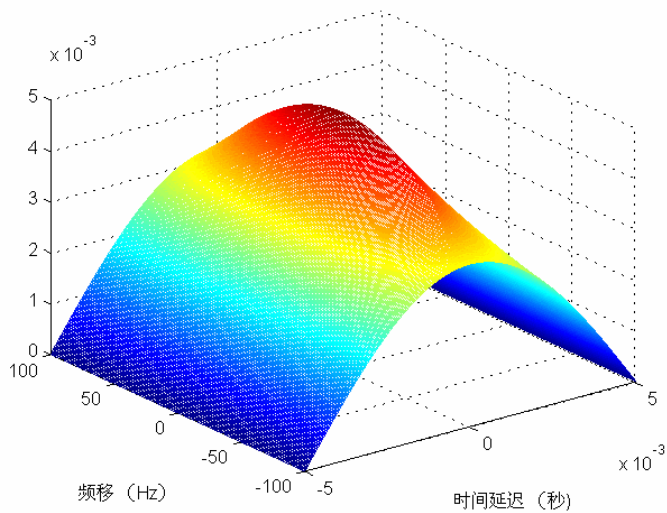
$$|\chi(\tau, \xi)| = \left| \frac{\sin[\pi\xi(T - |\tau|)]}{\pi\xi(T - |\tau|)} \cdot (T - |\tau|) \right| \quad |\tau| \leq T$$



$T = 0.1$



$T = 0.005$



(二) 线性调频信号 (LFM)

$$s(t) = \begin{cases} A \exp[j(2\pi f_0 t + \pi k t^2)] & t \in [-T/2, T/2] \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$f(t) = f_0 + kt \quad k = F/T$$

$f(t)$ 为瞬时频率， F 为调频带宽。

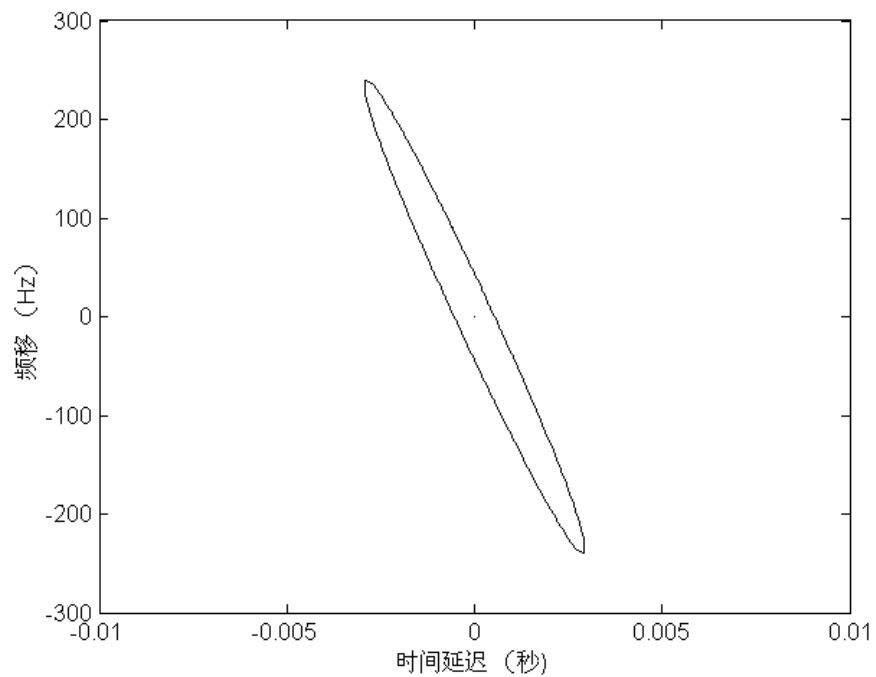
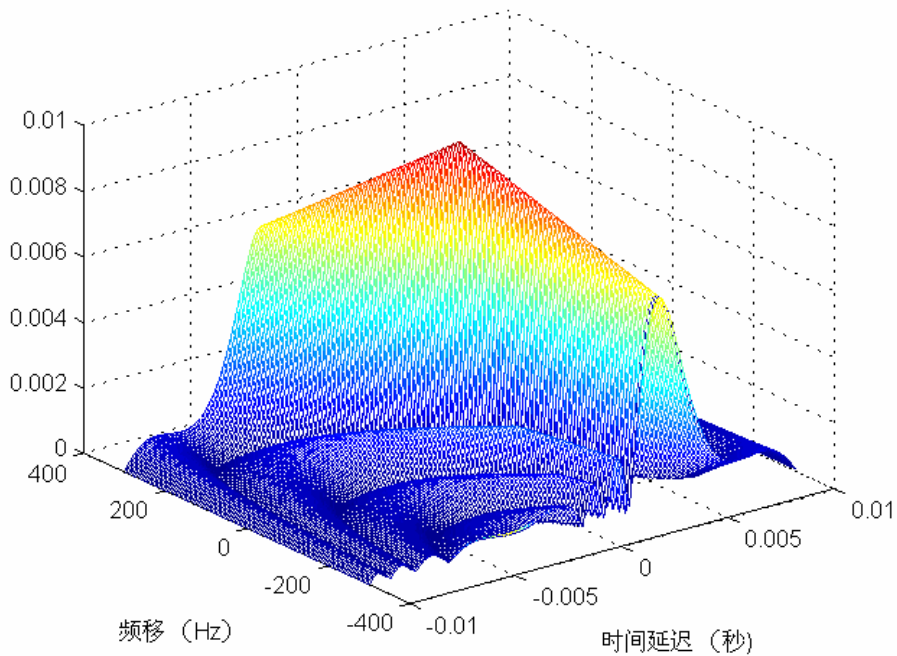
频谱函数：等高度特性

模糊函数：

$$|\chi(\tau, \xi)| = \left| \frac{\sin[\pi(k\tau + \xi)(T - |\tau|)]}{\pi(k\tau + \xi)(T - |\tau|)} \cdot (T - |\tau|) \right| \quad |\tau| \leq T$$



$$T = 0.01 \quad k = 80000 \quad F = 800$$





第三节 被动测距方法

1. 概述

基本方法：方位法和时差法

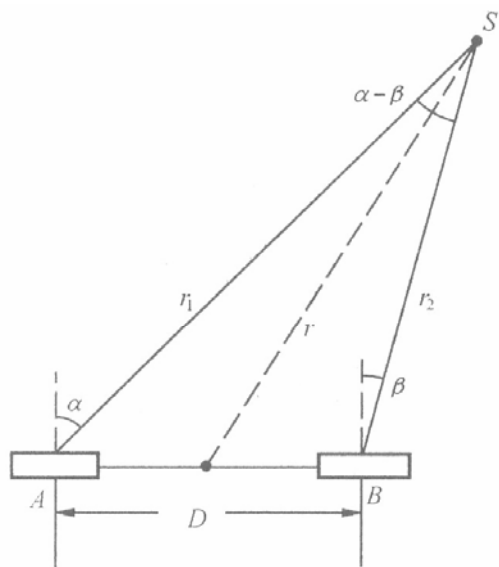


图 5-12 方位法被动测距原理

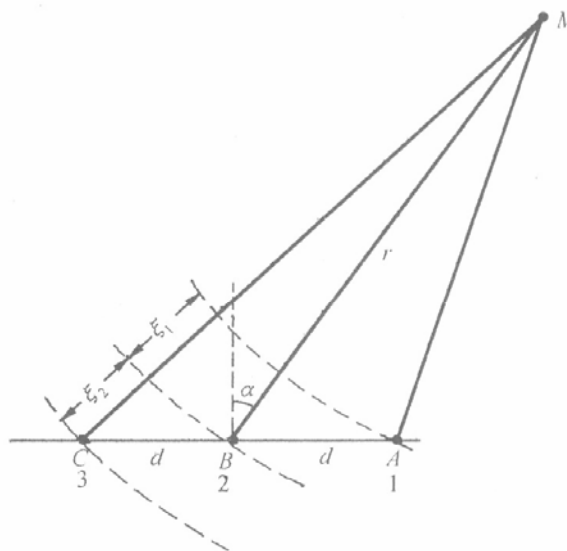


图 5-13 三元阵被动测距几何关系



方位法

$$\frac{r_1}{\cos \beta} = \frac{D}{\sin(\alpha - \beta)}$$

$$\frac{r_2}{\cos \alpha} = \frac{D}{\sin(\alpha - \beta)}$$

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{2(r_1^2 + r_2^2) - D^2}$$

一般而言，本方法测距误差较大。现在常用时差法。

2. 时差法被动测距的几何原理

如图5-13，在直线上布放三个等间距的阵元或三个子阵，间距为 d 。要测量的是点声源目标与中心阵元 B 的距离与方位角 α



利用级数展开： $(1+x)^{\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2 + \dots$,

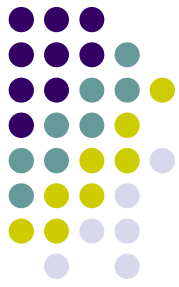
$d \ll r$ 时，可以得到：

$$MA \approx r \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2}{r^2} - \frac{2d}{r} \sin \alpha \right) - \frac{1}{8} \left(\frac{d^2}{r^2} - \frac{2d}{r} \sin \alpha \right)^2 \right]$$
$$MC \approx r \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2}{r^2} + \frac{2d}{r} \sin \alpha \right) - \frac{1}{8} \left(\frac{d^2}{r^2} + \frac{2d}{r} \sin \alpha \right)^2 \right]$$

略去 $1/r^3$ 以上的高次项，两式相加得到：

$$MA + MC = 2r + \frac{d^2}{r} (1 - \sin^2 \alpha) = 2r + \frac{d^2}{r} \cos^2 \alpha$$

$$MA + MC - 2r = \frac{d^2}{r} \cos^2 \alpha$$



所以 $\xi_2 - \xi_1 = \frac{d^2}{r} \cos^2 \alpha$ $c(\tau_{23} - \tau_{12}) = \frac{d^2}{r} \cos^2 \alpha$

目标距离为 $r = \frac{d^2 \cos^2 \alpha}{c(\tau_{23} - \tau_{12})} = \frac{d^2 \cos^2 \alpha}{\tau_d c}$

利用平面波近似，可以得到

$$\sin \alpha \approx \frac{\xi_2 + \xi_1}{2d} = \frac{c(\tau_{12} + \tau_{23})}{2d}$$

测距误差：

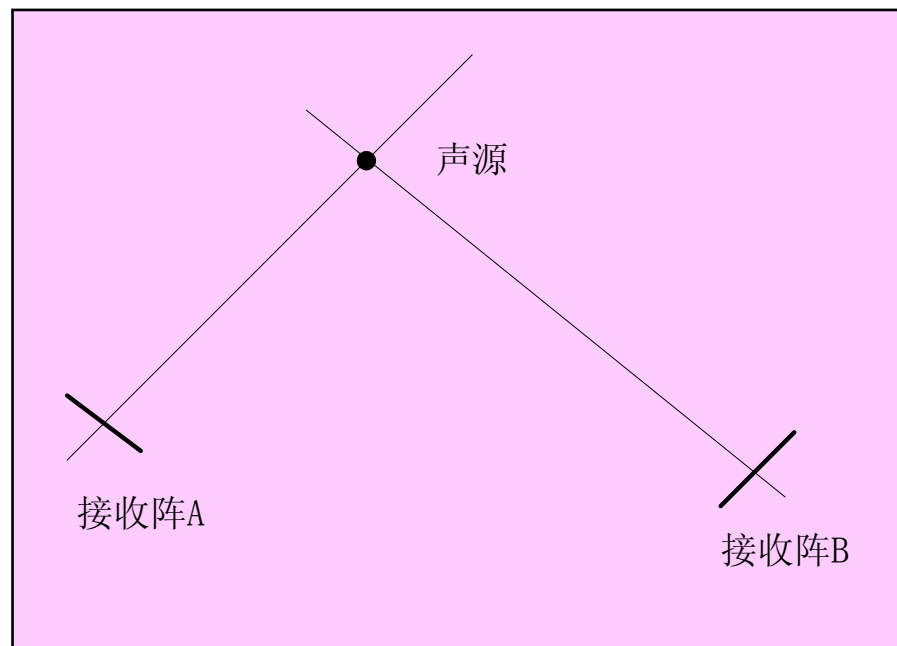
1) 随机误差

2) 阵元位置误差



第四节 水声被动定位：匹配场处理

在被动情况下，当源处于接收基阵的远场时，只可能测向，无法定位，除非使用两个以上不同位置布放的接收阵，利用几何关系来定位。



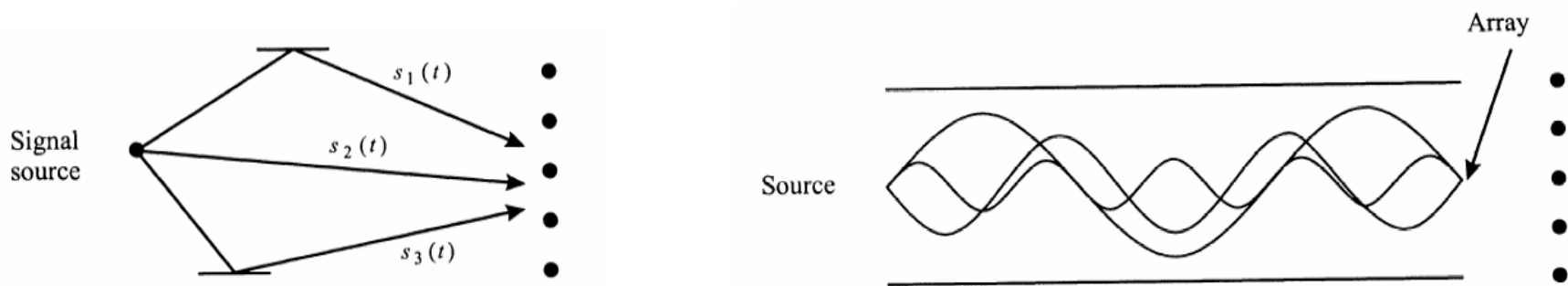


被动定位：匹配场处理

能否利用单个接收基阵来确定目标的位置（距离、深度、方位）？

Matched Field Processing — MFP

利用水声信道的特征





信道的作用

在水声环境中，被动定位有独特的条件：水声信道

由于信道的作用，接收阵上的信号是信源直达波及若干次反射波的叠加（多径），或者说，测量点的声场是多个传播波在这一点上的叠加，与声源位置参数、环境参数有关。

如果我们已知接收数据和信道特性，显然可以反演出源的信息。

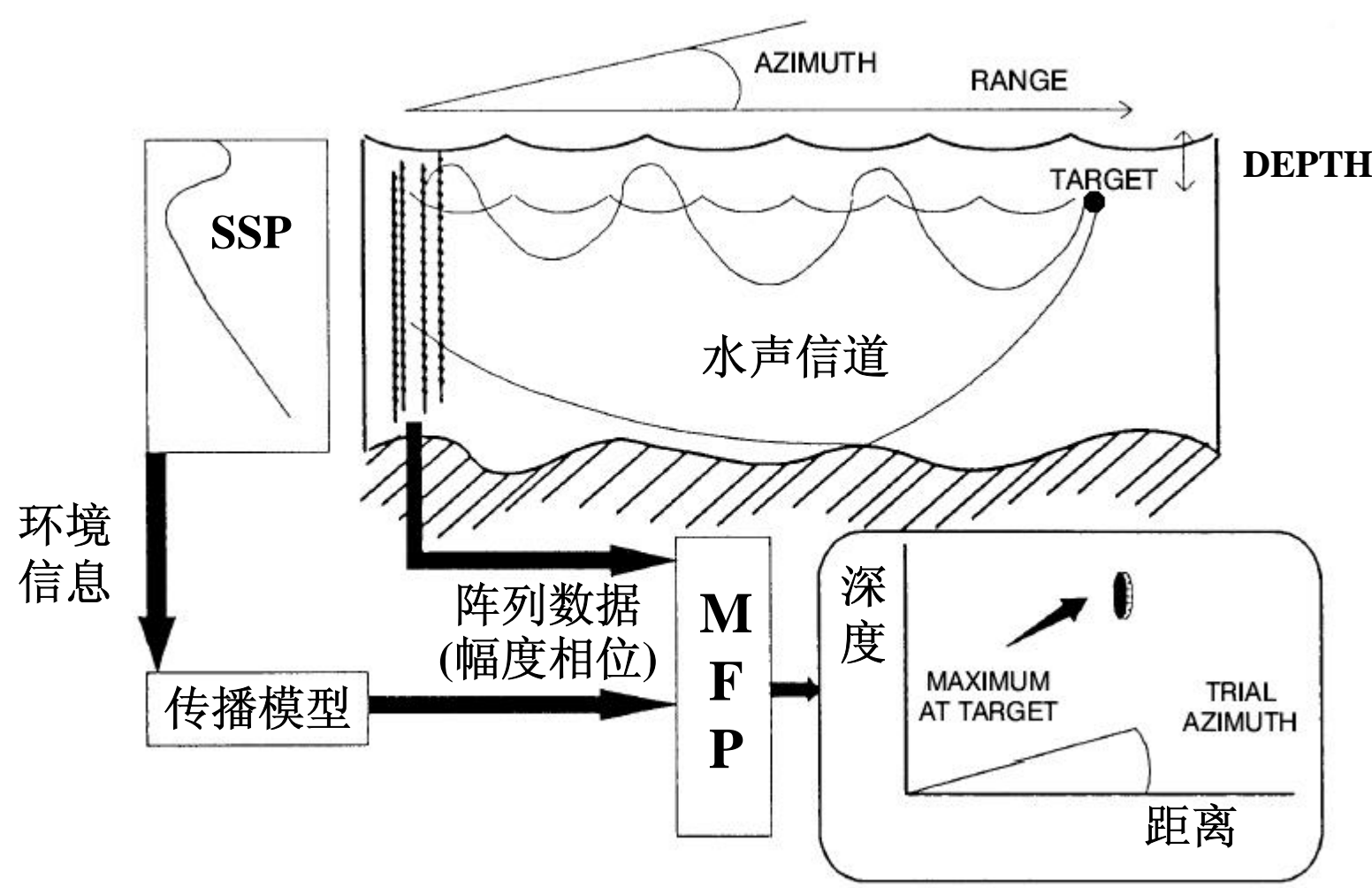
与以往的阵处理方法不同，需要在信号处理算法中加入声传播模型，以推断源的位置。



匹配场处理的基本原理

海洋中用于点声源三维定位的匹配场处理是常规一维平面波波束形成的一个推广。在平面波波束形成中，对所有的观测方向，将测量场（数据）与平面波模型下的扫描向量进行匹配，从而在方位上扫描基阵；而推广的匹配场波束形成器则对所有的源位置，将基阵上的测量场与期望场（由传播模型和环境参数计算得到）的拷贝向量进行匹配。

所谓匹配，是指计算测量场和期望场之间的某种相关，相关程度最高处，即认为是最佳匹配点，该点的源参数可看作是源的真实参数的估计。





声场传播模型

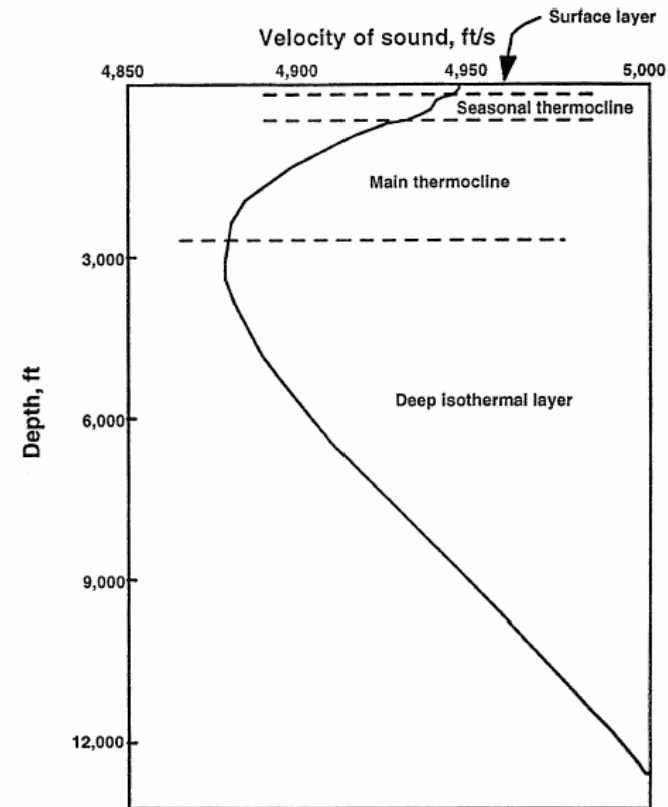
见：F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, Springer-Verlag, 2000

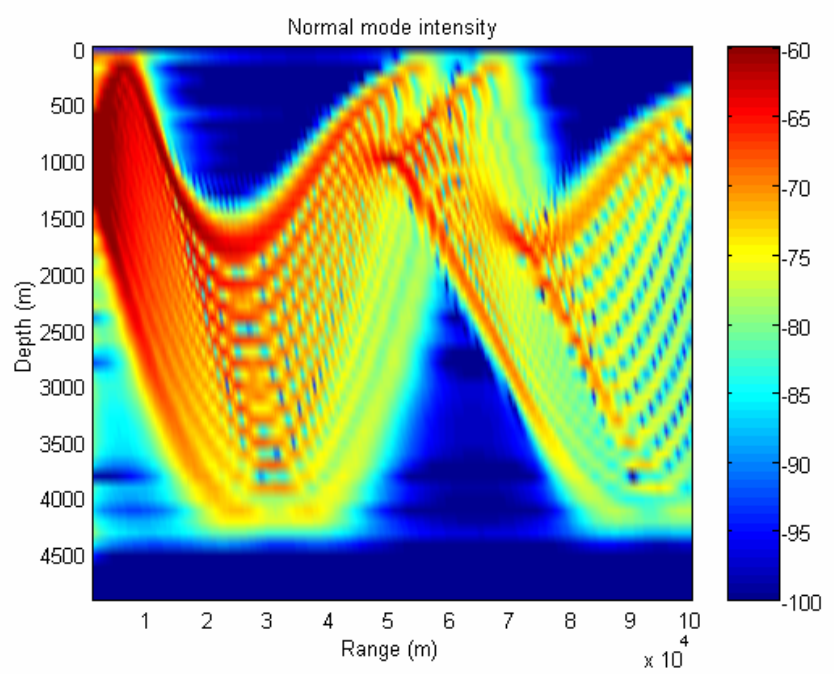
典型声场传播计算模型：

射线模型

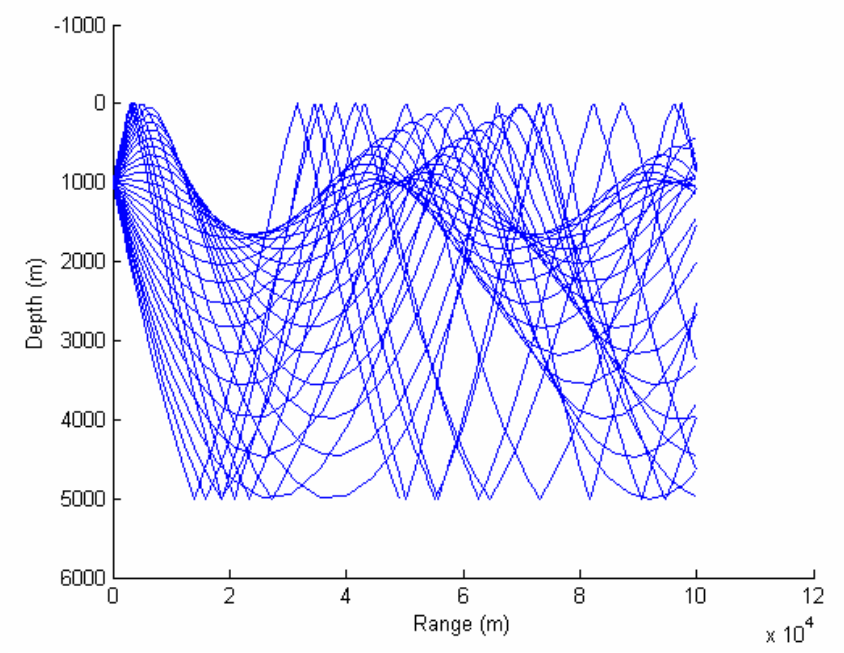
简正波模型

抛物方程模型





简正波模型



射线模型



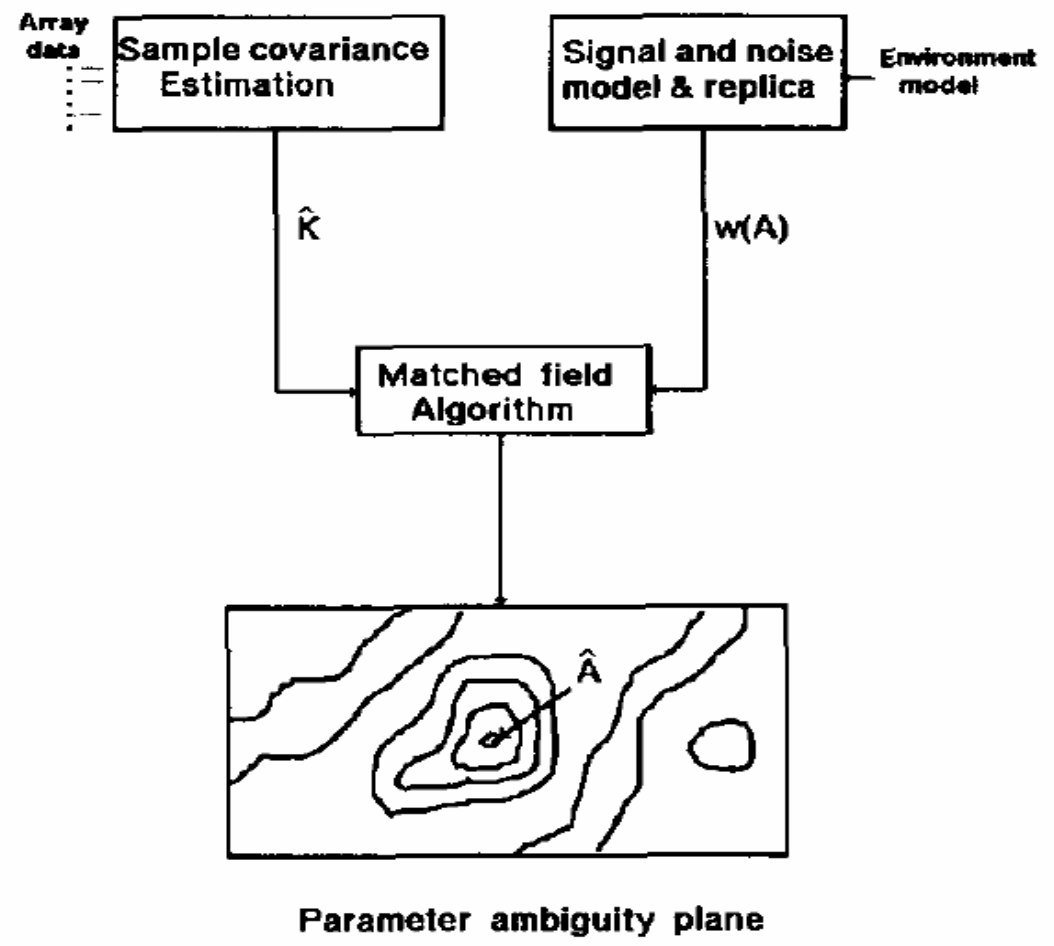
匹配处理器

线性处理器

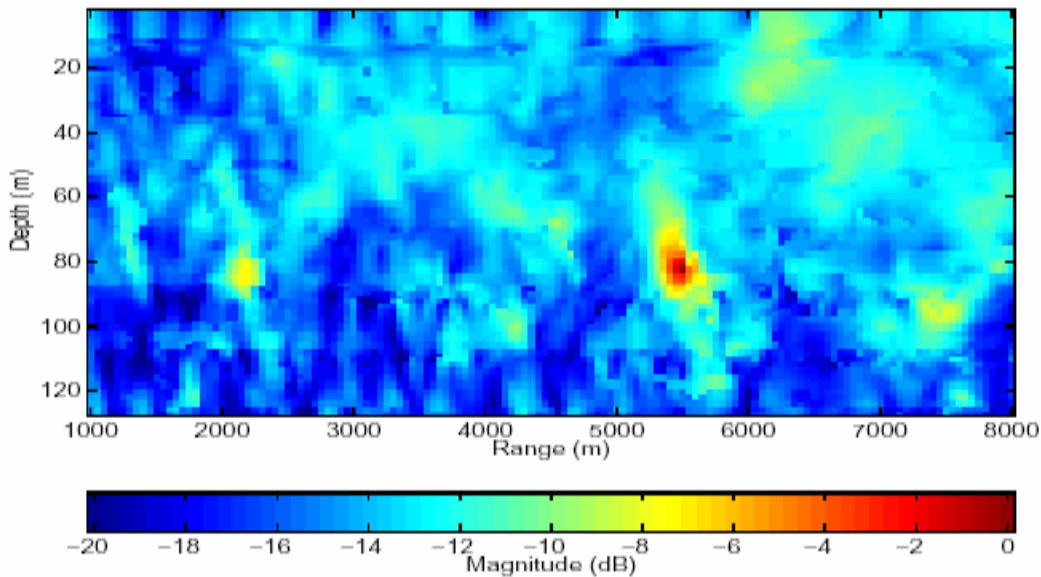
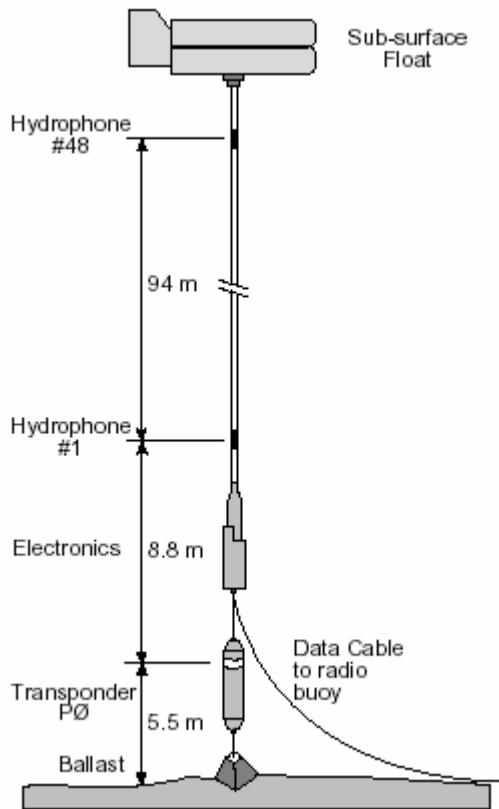
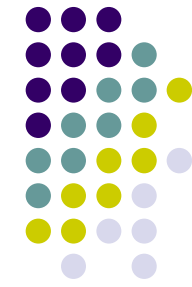
(Bartlett处理器)

非线性处理器

(最常用的是MVDR)



海上实验验证:





本章小结

- 主动测距方法
- 窄带信号的模糊函数
- 被动测距方法
- 水声被动定位