

# 雷达技术研究院新生培训

---

## 第2讲：雷达方程与目标检测

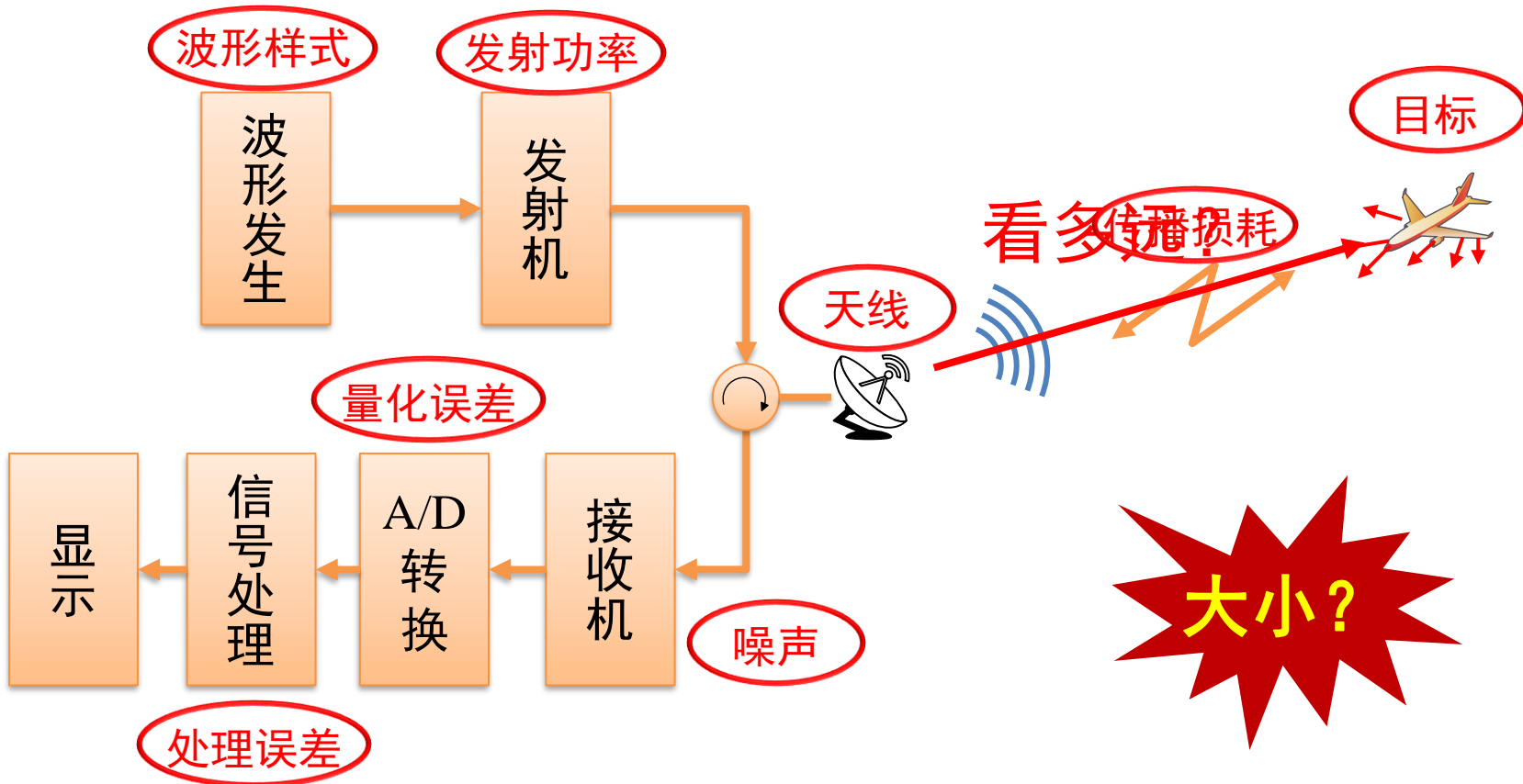


# 一、噪声中的雷达方程

## 1、接收信号功率

□ 雷达最关心的指标？ → 看多远

◆ 胡斯梅耶的探船雷达（作用距离1公里）：德国海军认为“最没用”



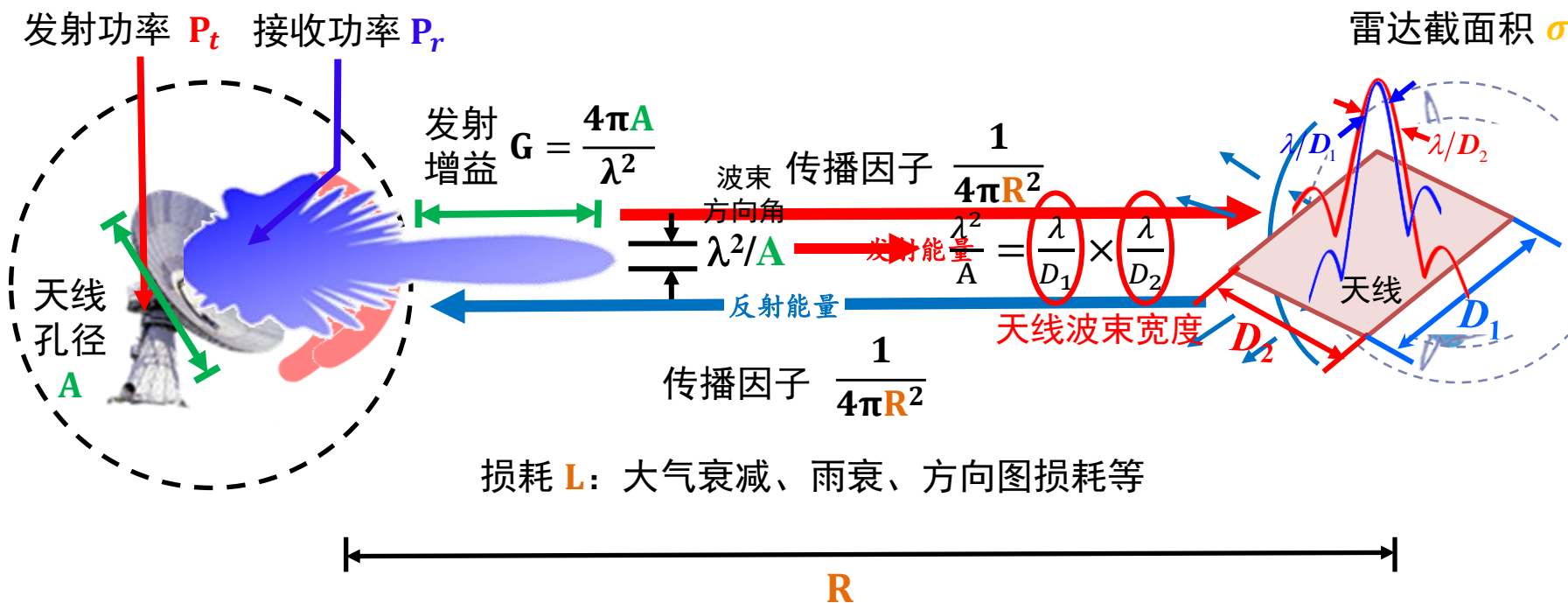
雷达的综合性能表示：雷达方程

# 一、噪声中的雷达方程

## 1、接收信号功率

接收 功率	发射 功率	发射 增益	传播 因子	损耗	雷达 截面积	传播 因子	天线 孔径
$[P_r]$	$[P_t]$	$\left[\frac{4\pi A}{\lambda^2}\right]$	$\left[\frac{1}{4\pi R^2}\right]$	$\left[\frac{1}{L}\right]$	$[\sigma]$	$\left[\frac{1}{4\pi R^2}\right]$	$[A]$

$$[P_r] = [P_t] \left[\frac{4\pi A}{\lambda^2}\right] \left[\frac{1}{4\pi R^2}\right] \left[\frac{1}{L}\right] [\sigma] \left[\frac{1}{4\pi R^2}\right] [A]$$



# 一、噪声中的雷达方程

## 1、接收信号功率

接收功率

$$P_r = \frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi\lambda^2 L R^4}$$

雷达作用距离

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi\lambda^2 L P_r}}$$

$R$ 正比于：发射功率 $P_t$ 的1/4次方  
天线面积 $A$ 的1/2次方  
天线孔径 $D$ 的1次方

雷达  
最大作用距离

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi\lambda^2 L S_{min}}}$$

最小可检测  
信号功率

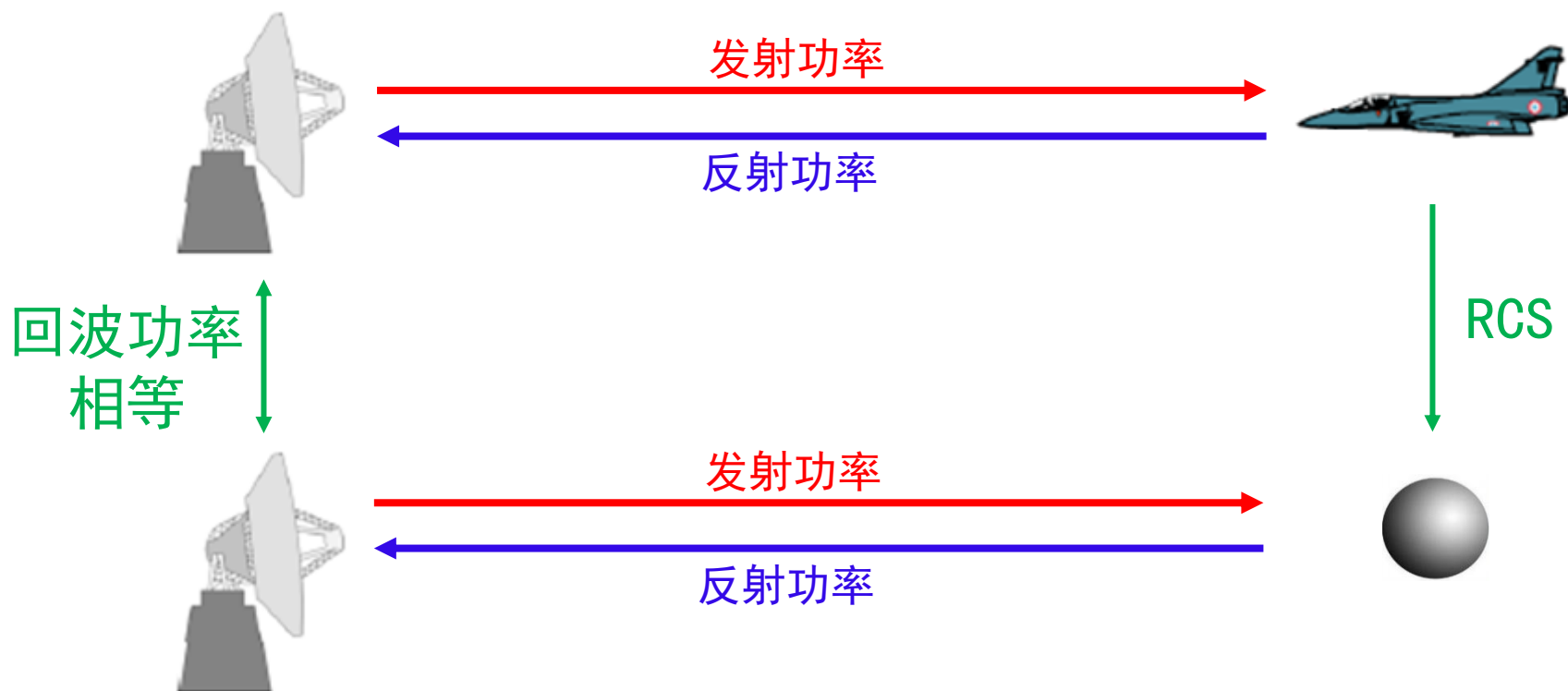
回波的功率与距离的四次方成反比：  
距离增加1倍→回波功率减小1/16（回波电压减小为1/4）

# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）

### □ 2.1 内涵与定义

- ◆ 内涵：表征目标对电磁波**反射能力强弱**
- ◆ 定义：一个**假想的**、各向均匀散射体（如**金属球**）的**面积**  
在雷达处所产生的回波功率与实际目标的**回波功率相等**



# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）

### □ 2.2 影响雷达截面积的关键要素

#### ◆ 目标的几何结构和材质

典型目标的雷达截面积

目标	典型RCS (m <sup>2</sup> )
载货小汽车	200
大型轰炸机	40
大型战斗机	6
人	1
鸟	10 <sup>-2</sup>
昆虫	10 <sup>-5</sup>

\*数据来源：《雷达系统导论（第三版）》



真实坦克：钢铁，RCS大



充气坦克：塑料，RCS小

# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（ Radar Cross Section, RCS ）

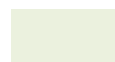
### □ 2.2 影响雷达截面积的关键要素

◆ 目标的几何结构和材质

◆ 雷达的工作频率

雷达频段的字母缩略词表示

波段	频率	典型频率	典型波长	波段	频率	典型频率	典型波长
HF	3~30MHz	16MHz	18.75 m	Ku	12~18GHz	16GHz	1.9cm
VHF	30~300MHz	165MHz	1.81m	K	18~27GHz	22GHz	1.4cm
UHF	300MHz~1GHz	650MHz	46cm	Ka	27~40GHz	35GHz	8.6mm
L	1~2GHz	1.25GHz	24cm	V	40~75GHz	60GHz	5mm
S	2~4GHz	3GHz	10cm	W	75~110GHz	77、 94GHz	3.9、 3.2mm
C	4~8GHz	5.4GHz	5.5cm	mm	110~300GHz	140、 220GHz	2.1、 1.4mm
X	8~12GHz	10GHz	3cm	太赫兹	300GHz~3THz	500GHz	0.6mm



米波



厘米波



毫米波

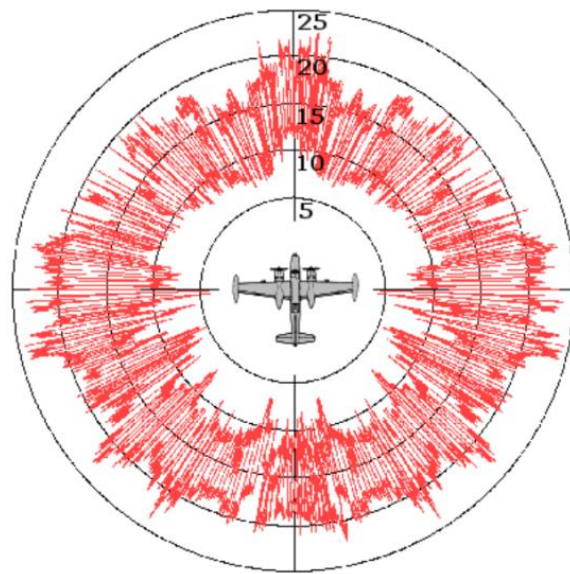
\*来源： IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands（2019）

# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）

### □ 2.2 影响雷达截面积的关键要素

- ◆ 目标的几何结构和材质
- ◆ 雷达的工作频率
- ◆ 电磁波的入射方向（RCS敏感）



A-26战斗轰炸机不同角度的RCS

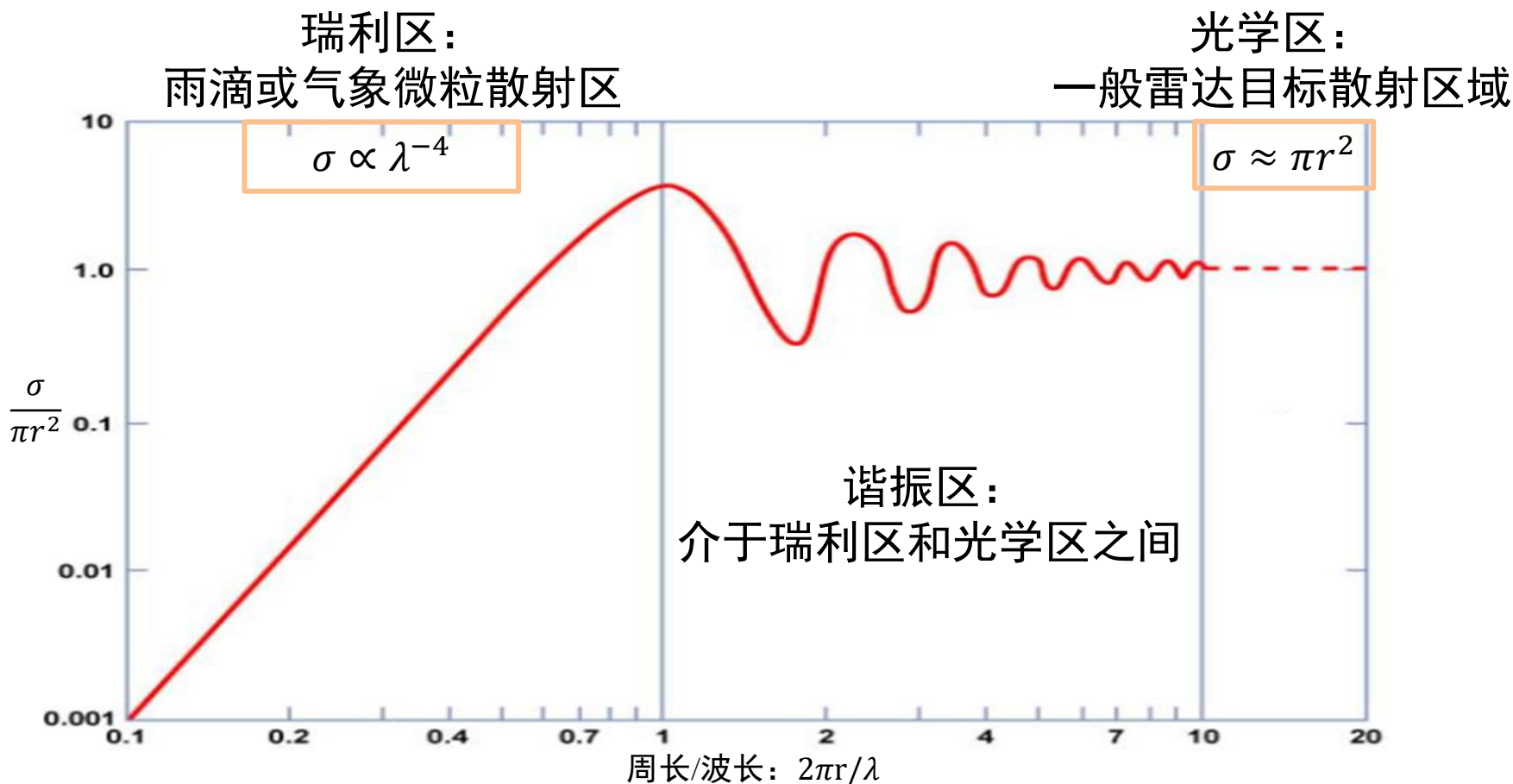


# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）

### 2.2 影响雷达截面积的关键要素

#### ◆（1）RCS与工作频率的关系



标准球体雷达截面积与工作频率的关系

# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（ Radar Cross Section, RCS ）

### □ 2.2 影响雷达截面积的关键要素

#### ◆ （2）RCS与目标大小的关系

➤ 雷达截面积  $\sigma \propto$  目标几何面积



不同几何面积目标RCS

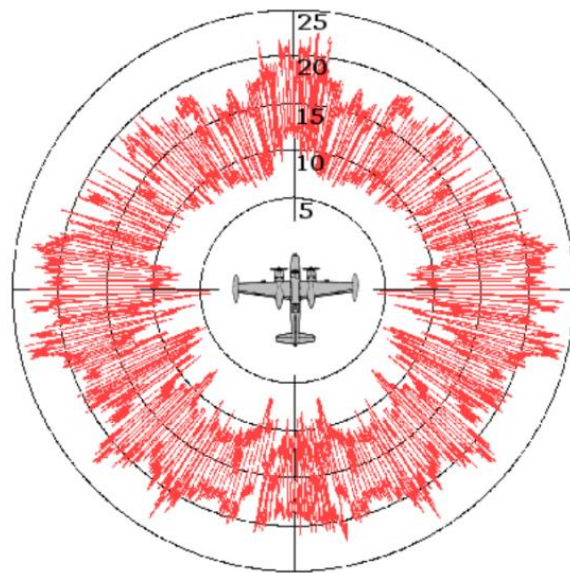
# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）

### □ 2.2 影响雷达截面积的关键要素

#### ◆ （3）RCS与目标照射方向的关系

- 雷达截面积随电磁波对目标的照射方向的变化很大
  - 原因：多散射中心回波叠加，角度敏感



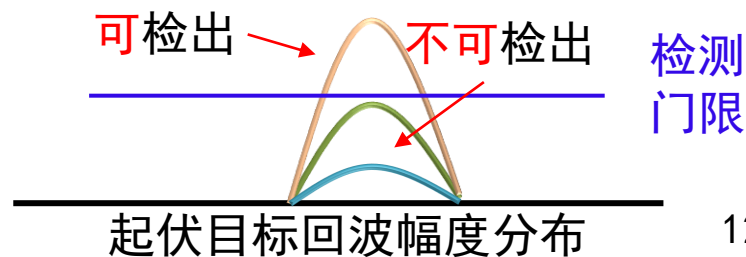
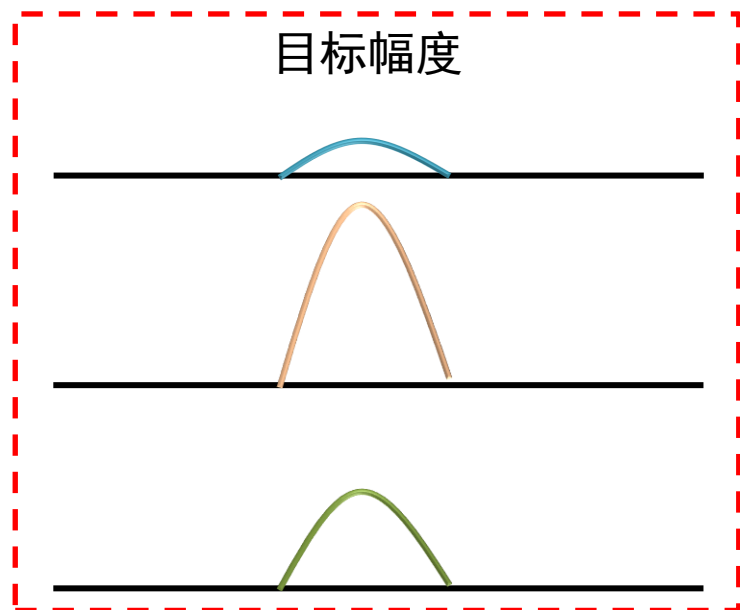
A-26战斗轰炸机不同角度的RCS

# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（ Radar Cross Section, RCS ）

### □ 2.3 复杂目标的雷达截面积：起伏

◆ 雷达截面积的起伏→雷达回波幅度的起伏→影响信号检测



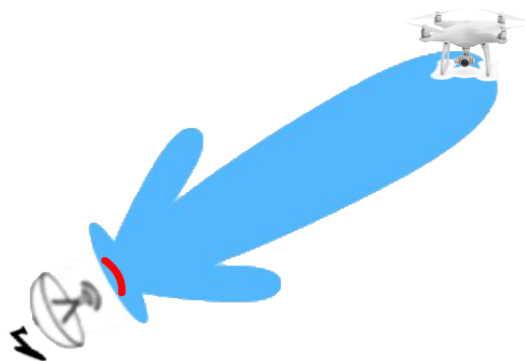
# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）

### □ 2.3 复杂目标的雷达截面积：起伏

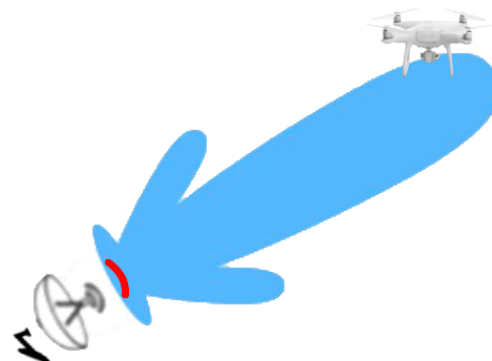
◆ 关键要素：（1）快慢

快起伏：散射脉冲间改变



扫描一

慢起伏：散射扫描间改变



扫描一

# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）

### □ 2.3 复杂目标的雷达截面积：起伏

◆ 关键要素：（2）概率

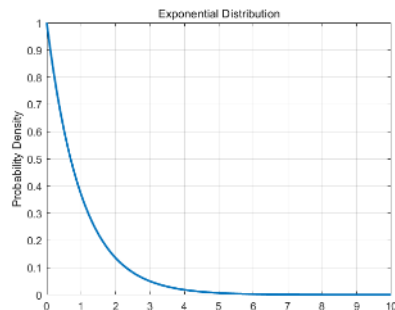
指数分布：  
多个相似散射体



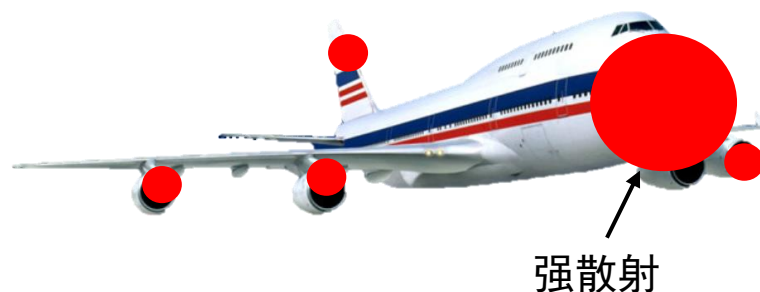
$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{av}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_{av}}\right)$$

$$\sigma \geq 0$$

均值:  $\sigma_{av}$ , 方差:  $\sigma_{av}^2$



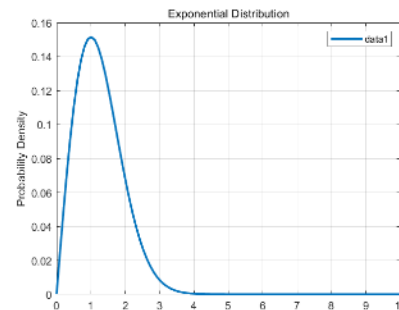
卡方分布：  
一个大散射体+多个小散射体



$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\sigma_{av}^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\sigma_{av}}\right)$$

$$\sigma \geq 0$$

均值:  $\sigma_{av}$ , 方差:  $\frac{1}{2}\sigma_{av}^2$



# 一、噪声中的雷达方程

## 2、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）

### 2.3 复杂目标的雷达截面积：起伏

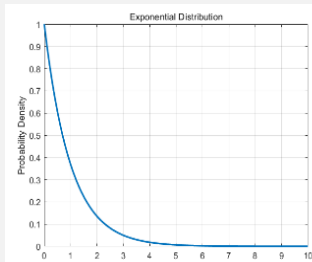
#### ◆ 复杂目标幅度变化：斯威林模型

哪一种对目标探测影响最大？

斯威林1型：指数分布，慢起伏

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{av}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_{av}}\right) \quad \sigma \geq 0$$

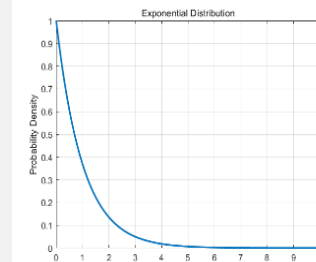
脉冲间相关、扫描间改变



斯威林2型：指数分布，快起伏

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{av}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_{av}}\right) \quad \sigma \geq 0$$

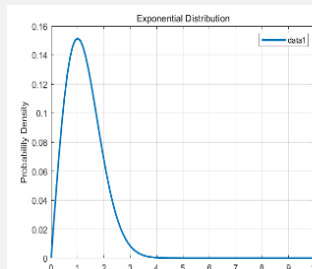
脉冲间独立、脉冲间改变



斯威林3型：卡方分布，慢起伏

$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\sigma_{av}^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\sigma_{av}}\right) \quad \sigma \geq 0$$

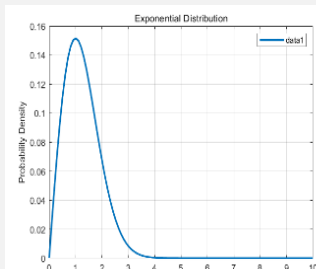
脉冲间相关、脉冲间改变



斯威林4型：卡方分布，快起伏

$$p(x) = \frac{4\sigma}{\sigma_{av}^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\sigma_{av}}\right) \quad \sigma \geq 0$$

脉冲间独立、脉冲间改变



# 一、噪声中的雷达方程

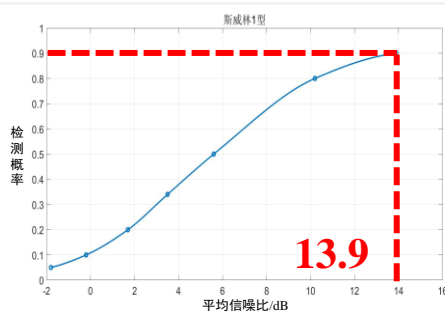
## 2、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）

### 2.3 复杂目标的雷达截面积：起伏

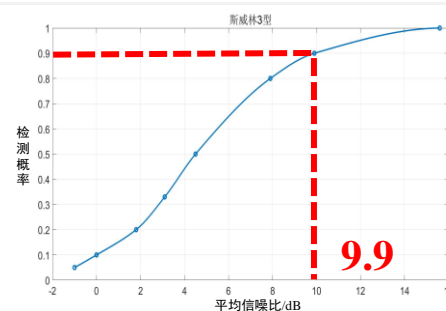
#### ◆ 影响最大：斯威林1型（指数分布，慢起伏）

- 机理：（1）相同平均RCS条件下，指数分布比卡方分布RCS波动大  
（2）相同扫描次数条件下，慢起伏比快起伏累加RCS波动大
- 结论：相同检测概率下，斯威林1型所需信噪比最大

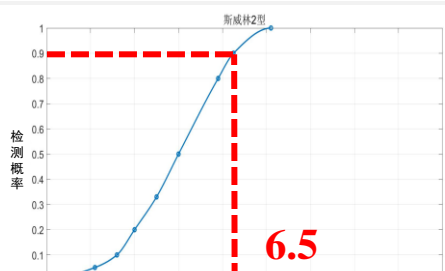
斯威林1型



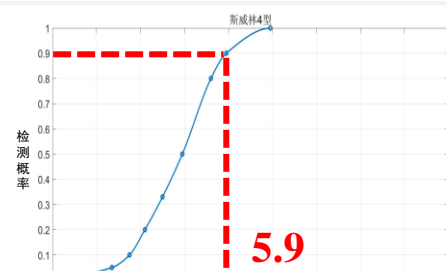
斯威林3型



斯威林2型



斯威林4型



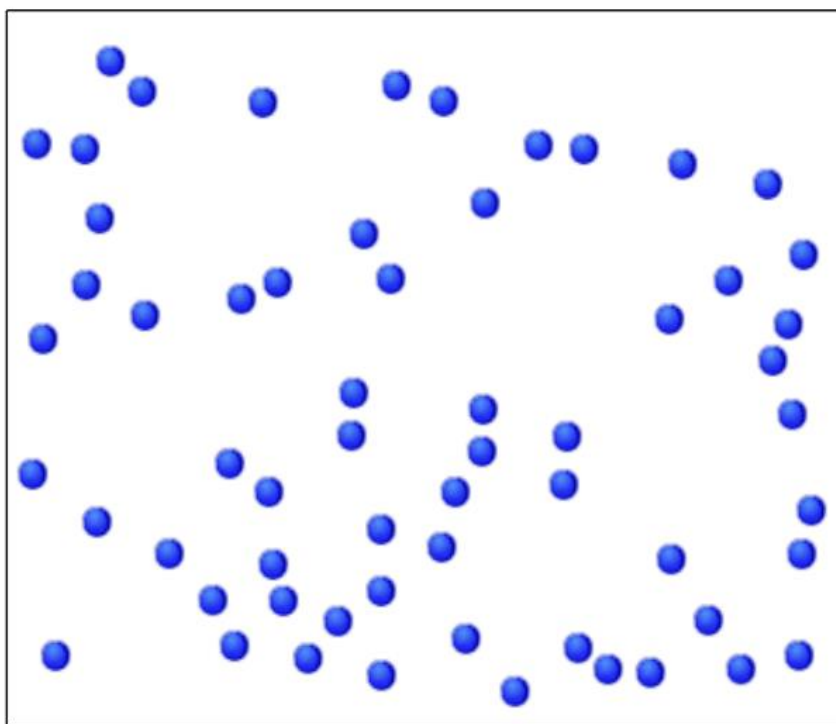
斯威林1型常被用作雷达系统性能的保守估计



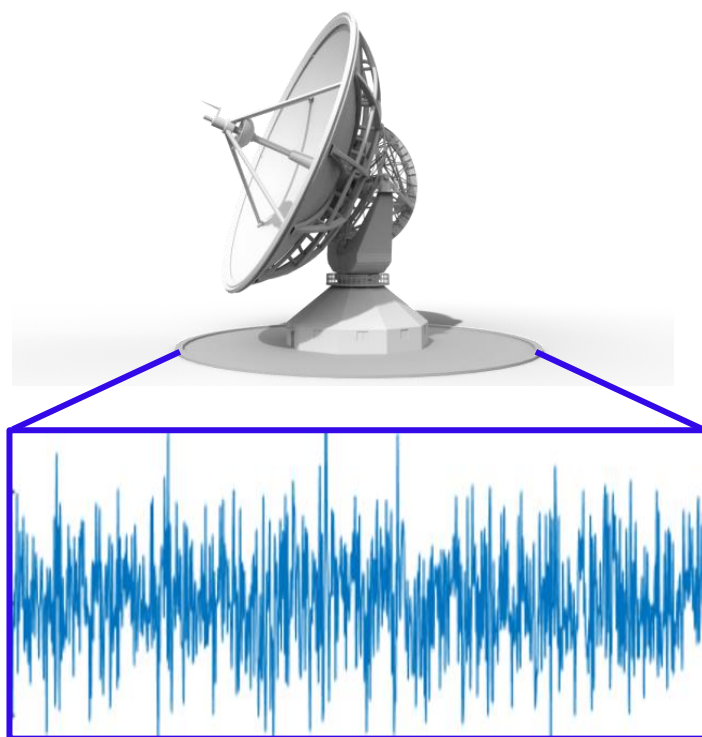
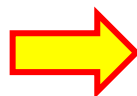
# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

### □ 3.1 接收噪声：电子的无序热运动产生



分子无序运动



接收噪声

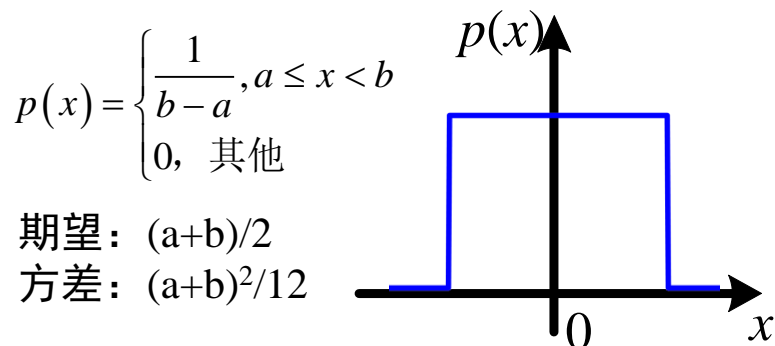
# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

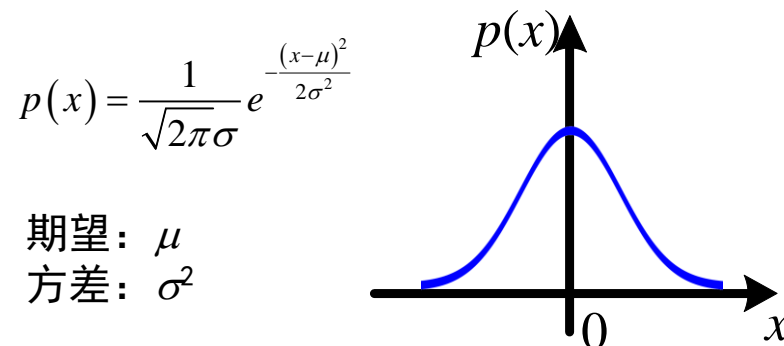
### 3.2 接收噪声描述的数学基础：概率论与随机过程

◆ **概率论**：利用**概率密度函数**描述随机变量的输出在某点的可能性  
均匀、高斯、瑞利、指数等分布

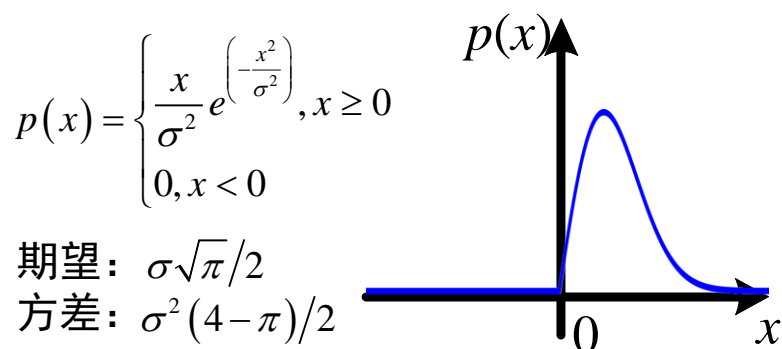
均匀分布



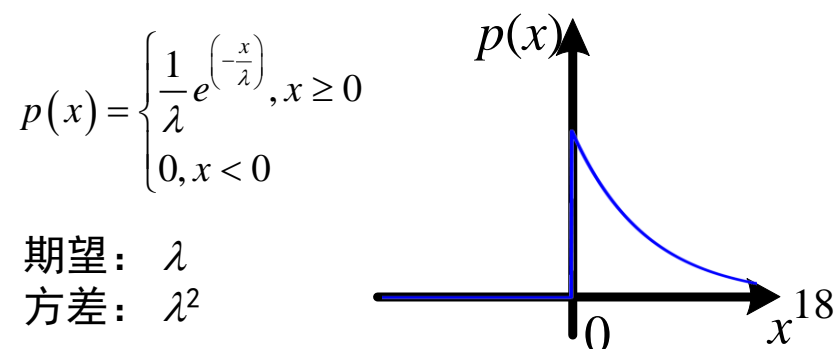
高斯分布



瑞利分布



指数分布

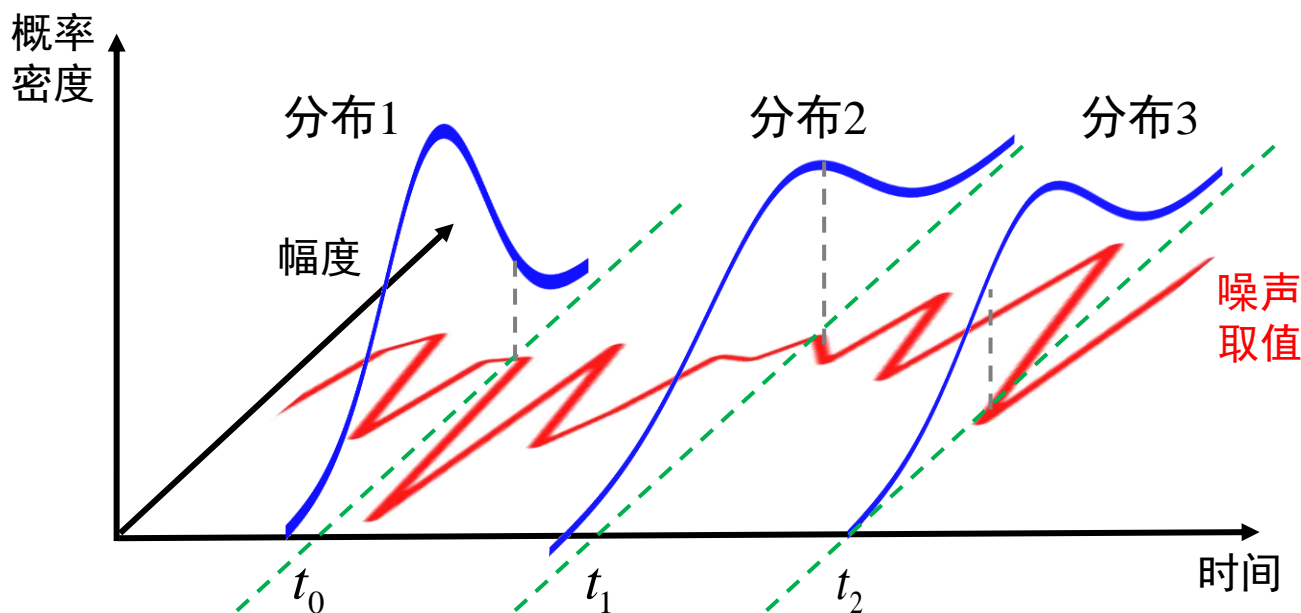


# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

### □ 3.2 接收噪声描述的数学基础：概率论与随机过程

◆ 随机过程：以时间作为变量依概率分布的随机函数



噪声的随机过程描述：  
多维联合概率密度函数

$$p[x_1(t_1), x_2(t_2), \dots, x_n(t_n), \dots]$$

# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

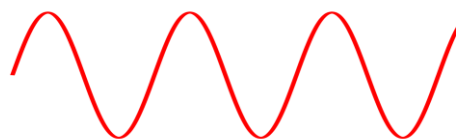
### □ 3.2 接收噪声描述的数学基础：概率论与随机过程

◆ 接收的噪声：随机过程的“一次实现”

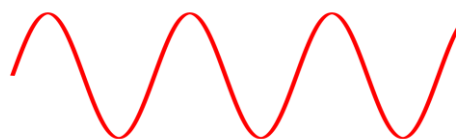
确定信号

随机信号

第1次接收



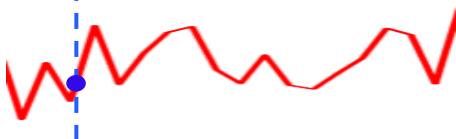
第2次接收



...

...

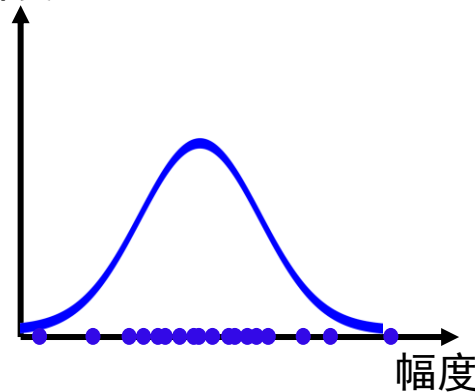
第N次接收



...



概率密度



# 一、噪声中的雷达方程

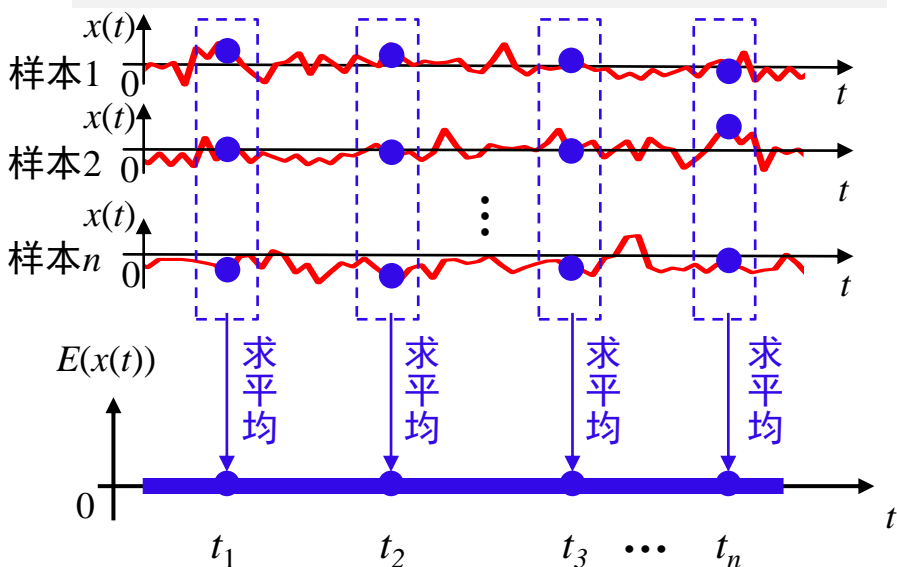
## 3、接收噪声功率

### 3.2 接收噪声描述的数学基础：概率论与随机过程

#### ◆ 随机过程的期望与相关函数

期望

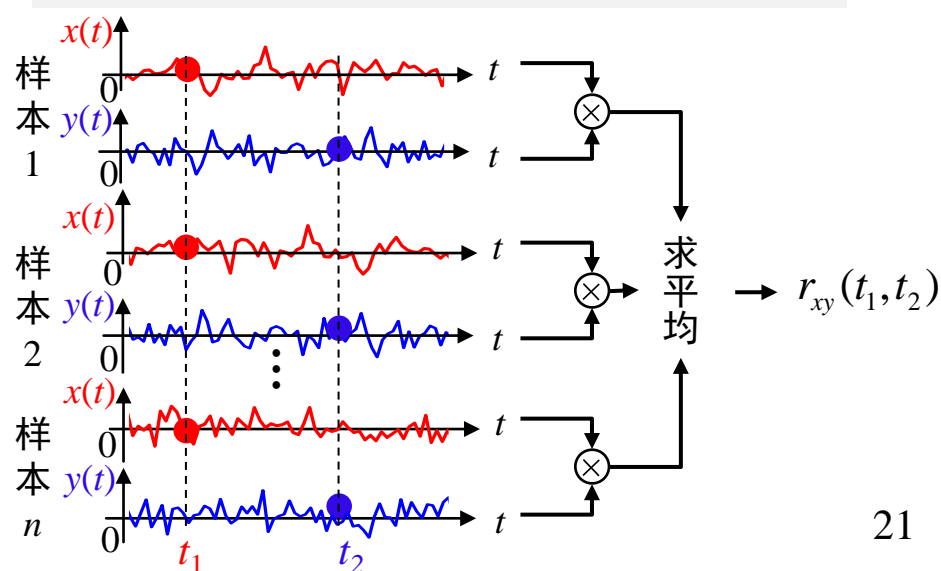
$$E(x(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} xp_x(x, t)dx$$



相关函数

$$r_{xy}(t_1, t_2) = E[x(t_1)y(t_2)]$$
$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} xyp_{xy}(x, y; t_1, t_2)dx dy$$

二维联合概率密度函数



# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

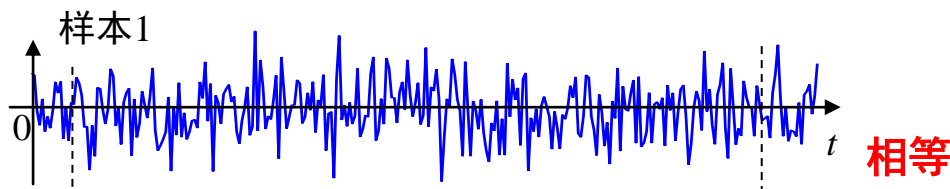
### 3.2 接收噪声描述的数学基础：概率论与随机过程

#### ◆ 随机过程的各态历经性

- 含义：随机过程的各个样本都同样经历各种可能状态，任一样本函数特性都可代表整个随机过程特性

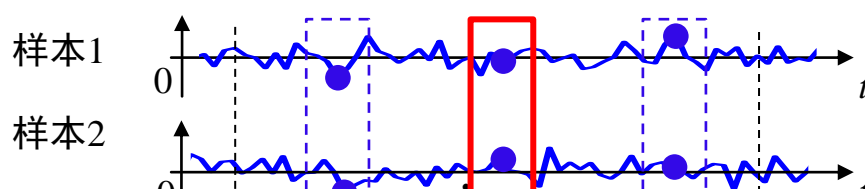
时间均值：常数

$$\begin{aligned} A\langle x(t) \rangle &= \overline{x(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \\ &= E[x(t)] = \text{常数} \end{aligned}$$



时间相关函数：只和时间差有关

$$\begin{aligned} R_x(t, t + \tau) &= \overline{x(t)x(t + \tau)} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t + \tau) dt \\ &= E[x(t)x(t + \tau)] = R_x(\tau) \end{aligned}$$



随机过程满足各态历经性时：

时间平均 = 集合平均（期望、相关函数、方差等）

# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

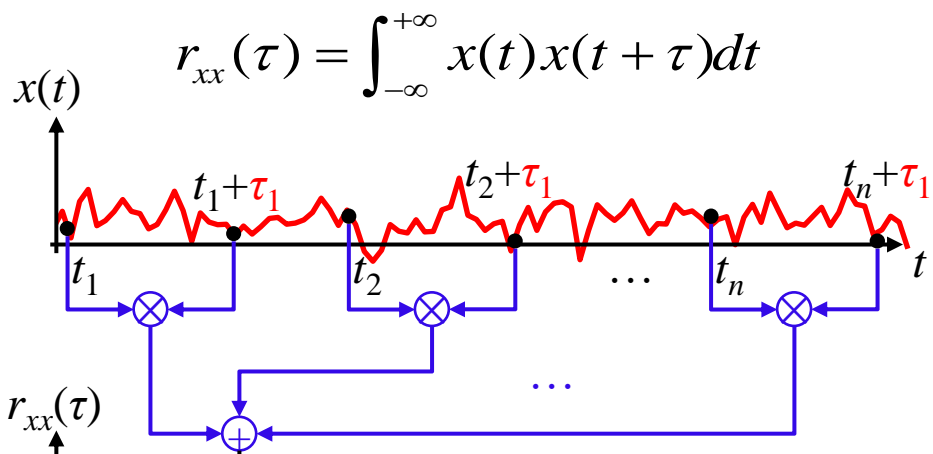
### 3.2 接收噪声描述的数学基础：概率论与随机过程

#### ◆ 随机过程的功率谱密度

自相关函数、功率谱密度函数是一对傅立叶变换

自相关函数：随机信号在不同时刻之间的相关程度

功率谱密度函数：信号功率在频率上的分布



$$\text{噪声功率 } P = \int_{f_1}^{f_2} S(f) df$$

$S$ : 功率谱密度

包围面积：  
噪声在  $f_1$  到  $f_2$  的功率  $P$

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} r_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

### □ 3.2 接收噪声描述的数学基础：概率论与随机过程

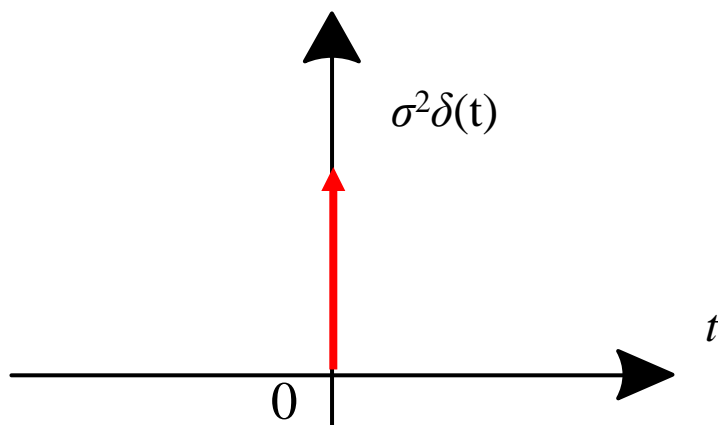
#### ◆ 典型的噪声模型：白噪声

- 定义：包含所有频率分量噪声，且所有的频率分量能量相等
- 特点：自相关函数为 $\delta$ 函数、功率谱密度为常数

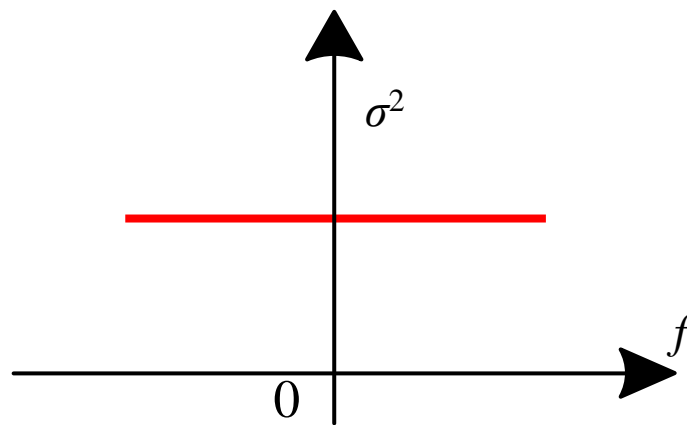
白噪声：



自相关函数



功率谱密度





# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

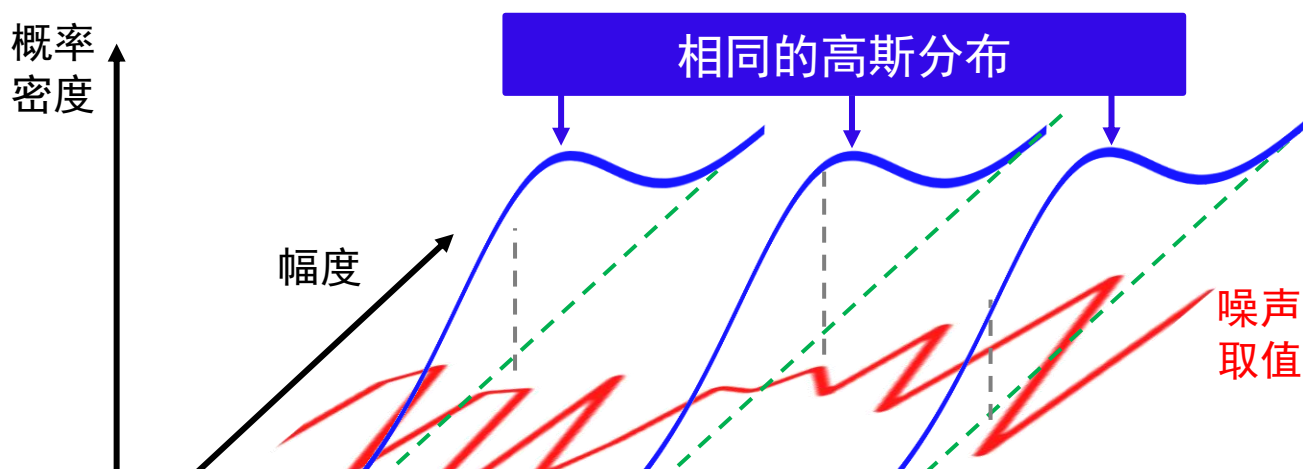
### □ 3.2 接收噪声描述的数学基础：概率论与随机过程

#### ◆ 最重要的白噪声模型：高斯白噪声

➤ 高斯：噪声每时刻取值均从高斯分布中独立随机产生

➤ 白：在所有频率上的功率谱密度相等

高斯：概率密度服从正态分布  $p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$  功率  $P = \text{方差 } \sigma^2$



高斯+白：联合概率密度函数可根据单一时刻确定  
用功率可完全描述

# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

### 3.2 接收噪声描述的数学基础：概率论与随机过程

#### ◆ 基于白噪声模型的噪声功率数学表示

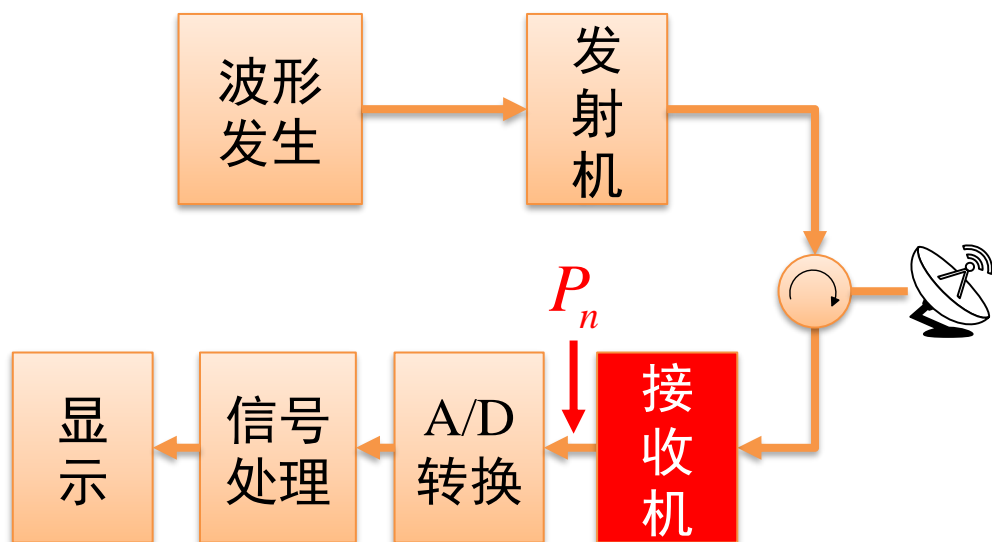
噪声功率

$$P_n = k \times T \times B_n$$

$k$  : 玻尔兹曼常数,  
 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$

$T$  : 等效噪声温度, 表征电子、  
分子等无规律运动剧烈程度

$B_n$  : 噪声带宽  
 $\approx$ 接收机带宽



对于常温:  $T = 290K$

噪声功率谱密度:

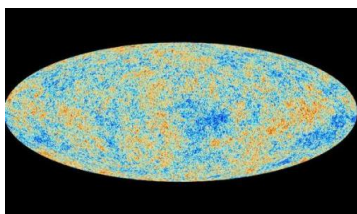
$$S_n = k \times T \approx -173.9 \text{dBm/Hz}$$

# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

### 3.3 接收噪声的来源：外部、内部

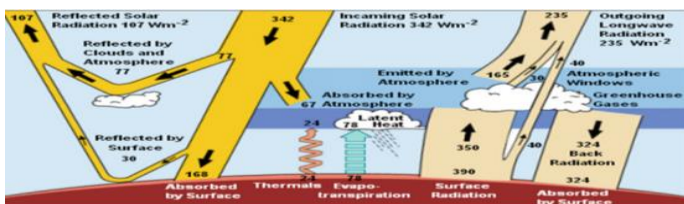
#### 外部噪声



宇宙背景辐射



太阳热辐射

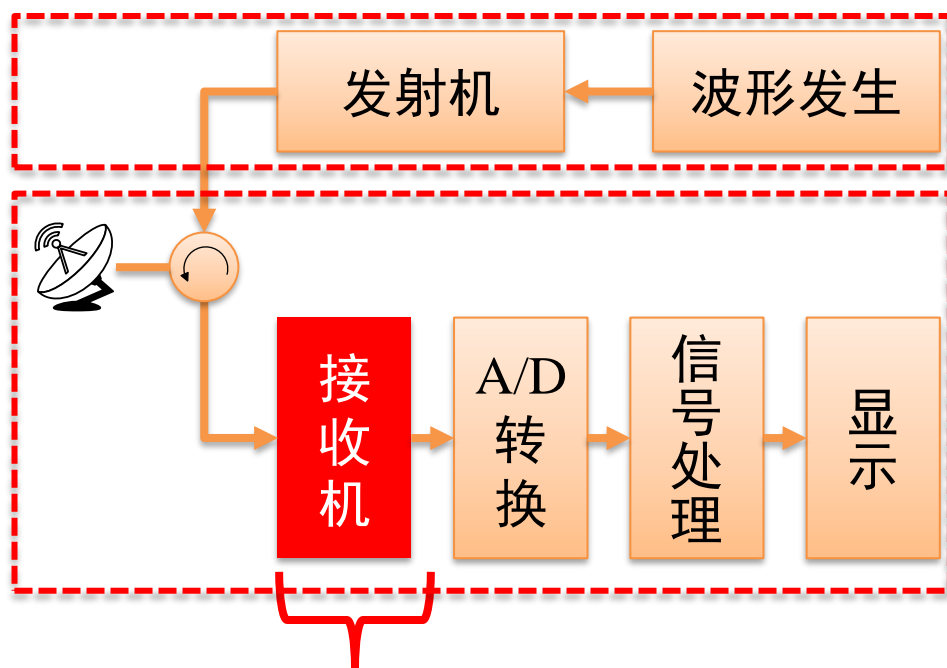


大气辐射噪声



地面环境辐射噪声

#### 内部噪声



馈线噪声、放大器噪声、  
混频器噪声等

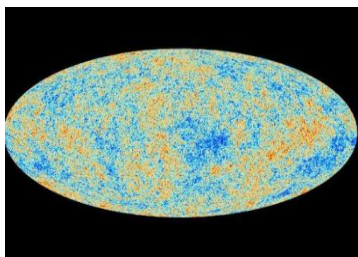
# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

### □ 3.3 接收噪声的来源：（1）外部噪声

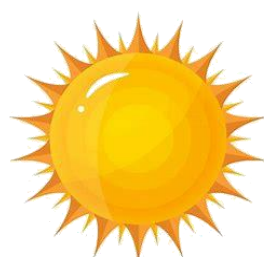
- ◆ ① 来源：宇宙背景辐射、太阳热辐射、大气辐射噪声、地面环境辐射噪声等

#### 宇宙背景辐射



来自宇宙大爆炸残留的电磁波辐射，亮温为 $2.72\text{K}$

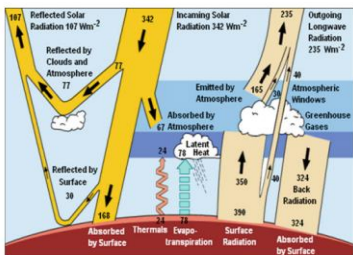
#### 太阳热辐射



太阳等星体的电磁辐射

$195750/f \text{ (K)}$  ,  
 $f$  为频率 (GHz)

#### 大气辐射噪声



高于绝对零度的大气中气体、水滴、冰滴等产生，噪温约为 $10\text{K}$

#### 地面环境辐射噪声



地表环境中产生的电磁辐射，其温度接近 $300\text{K}$

# 一、噪声中的雷达方程

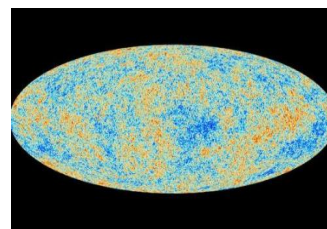
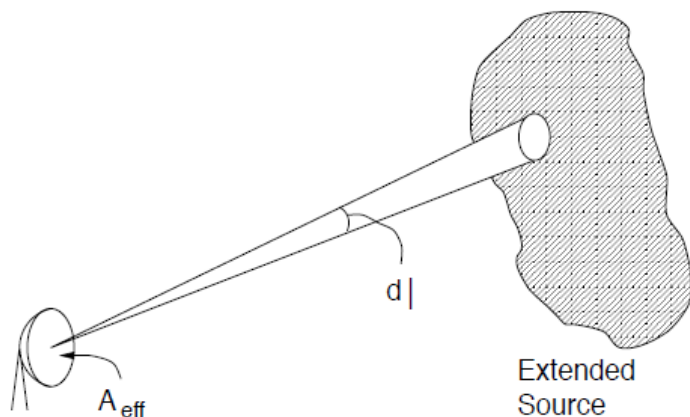
## 3、接收噪声功率

□ 3.3 接收噪声的来源：（1）外部噪声

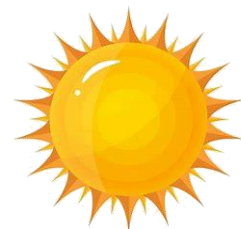
◆ ② 计算：天线“捕获”的噪声等于各角度上的噪声  
根据天线天线方向图加权平均

天线“捕获”的噪声：
$$T_{\text{外}} = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} G(\theta, \phi) T(\theta, \phi) d\Omega$$

$\downarrow$  天线方向图       $\downarrow$  辐射噪声



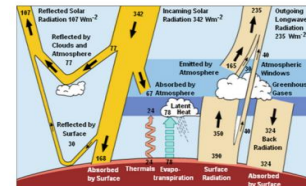
宇宙背景辐射



太阳等热辐射



地面环境辐射噪声



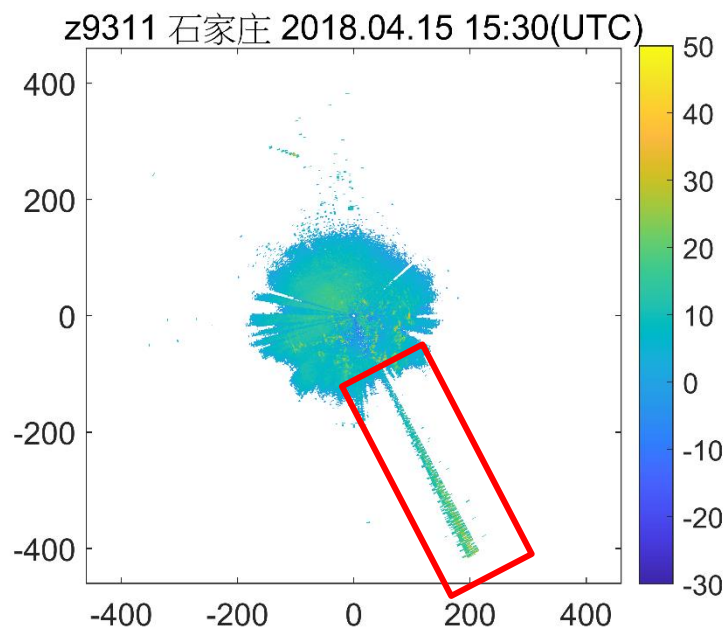
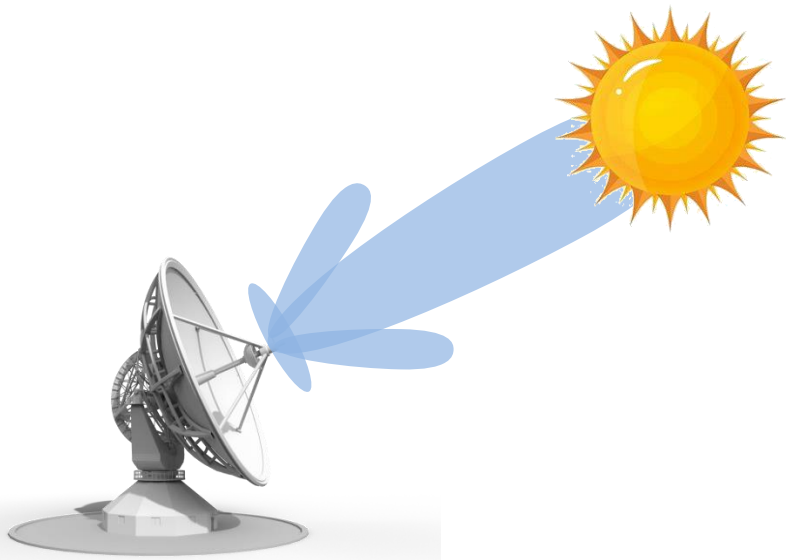
大气辐射噪声

# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

□ 3.3 接收噪声的来源：（1）外部噪声

◆ 例：太阳噪声



P显图：当雷达扫描角度对上太阳照射时

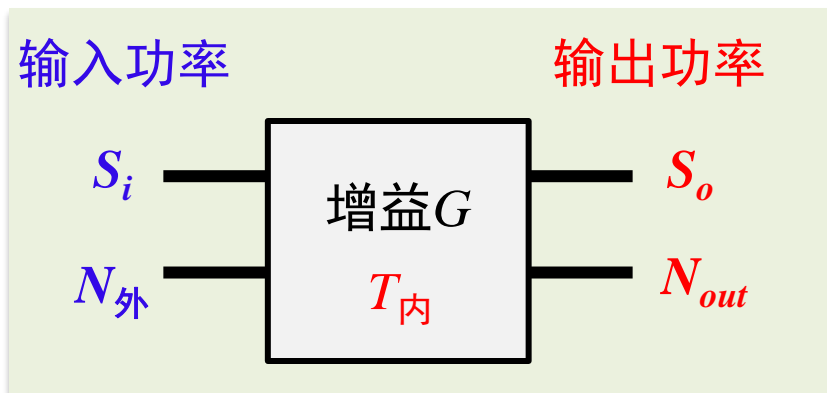
# 一、噪声中的雷达方程

## 3、接收噪声功率

### □ 3.3 接收噪声的来源：（2）内部噪声

#### ◆ 重要描述指标：噪声系数

噪声系数：环境温度为常温（ $T_{\text{外}}=T_0=290\text{K}$ ）时的输入信噪比/输出信噪比  
反应了信噪比的恶化程度， $F$  越大，噪声越大。



$$F = \frac{\text{输入信噪比}}{\text{输出信噪比}} = \frac{S_i / N_{\text{外}}}{S_o / N_{\text{out}}}$$

器件/设备	典型噪声系数	器件/设备	典型噪声系数
S波段低噪声放大器	0.7dB	无源混频器	10dB
X波段低噪声放大器	1.5dB	1dB损耗的线缆	1dB
Ku波段低噪声放大器	1.8dB	卫星通信接收机	3~5dB

# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### □ 4.1 内涵与影响要素

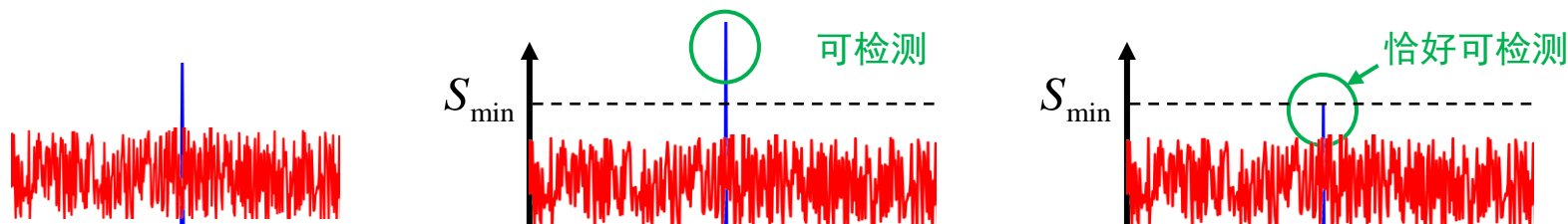
◆ 最小可检测信号：到达雷达天线的最小可检测的高频回波信号



雷达  
最大作用距离

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi\lambda^2 L \underline{S_{min}}}}$$

最小可检测信号功率



恰好可检测的信号：最小可检测信号

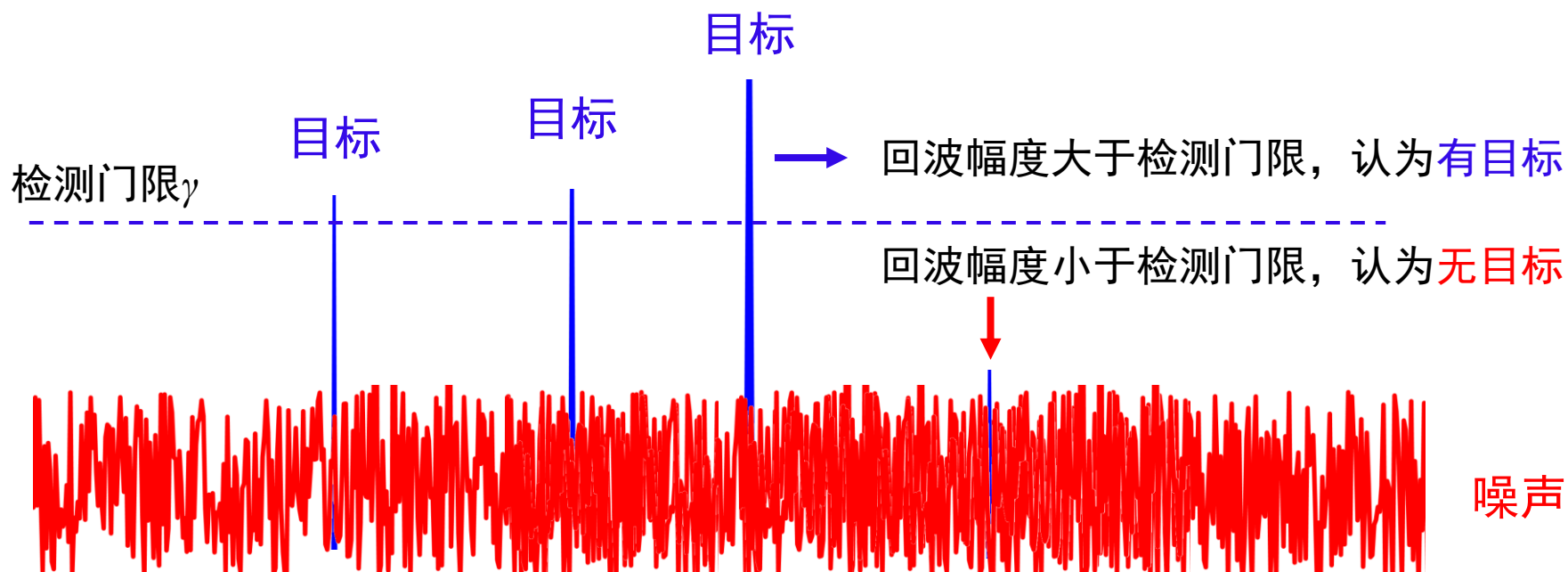


# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### □ 4.2 雷达信号检测

- ◆ 内涵：在同时包含目标和噪声的信号中发现目标
- ◆ 实现：以一定的电压值进行比较，这一比较电平称为检测门限
  - 如果雷达回波幅度大于检测门限，即认为有目标
  - 如果雷达回波幅度小于检测门限，即认为无目标

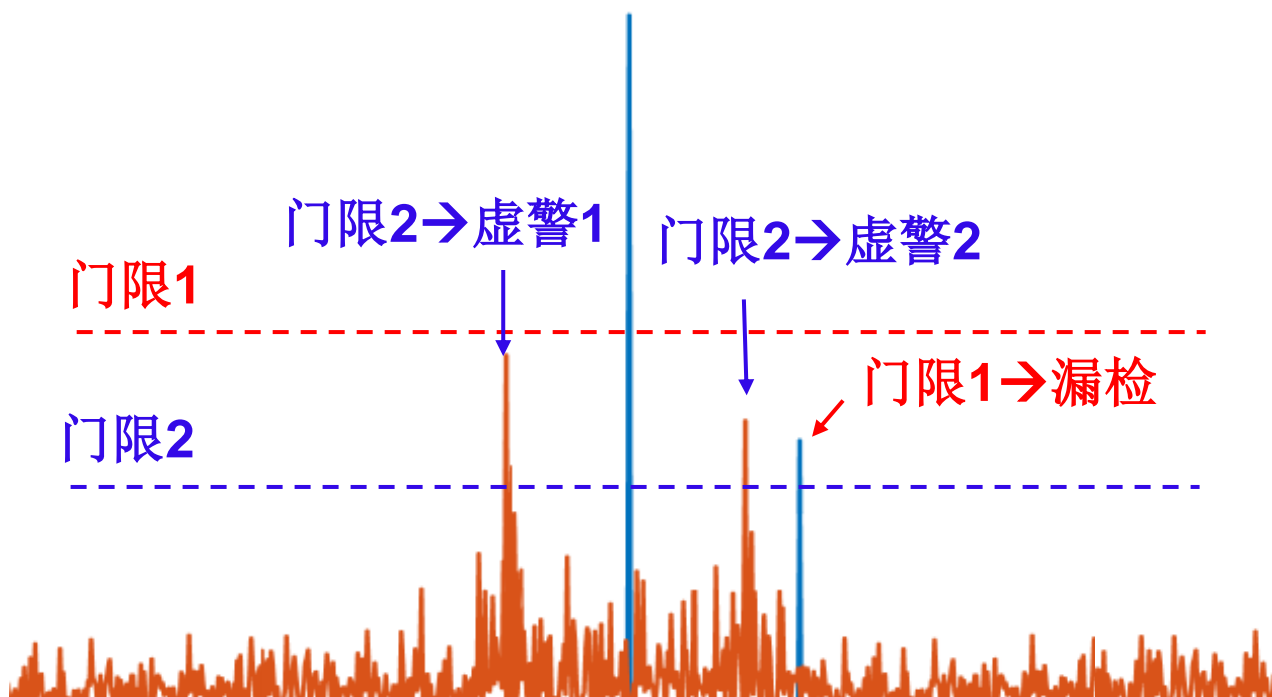


# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### □ 4.2 雷达信号检测

- ◆ 噪声的影响：
  - (1) **虚警**：把没有目标误判为有目标
  - (2) **漏检**：把有目标的单元认为是没有目标



# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### □ 4.2 雷达信号检测

#### ◆ 理论基础：二元假设检验

➤ 假设两种情况：

$$\left\{ \begin{array}{ll} H_0 : x = n & \text{表示观测信号 } x \text{ 中只有噪声 } n \\ H_1 : x = s + n & \text{表示观测信号 } x \text{ 中存在信号 } s \end{array} \right.$$

➤ 检验：判决哪种假设是真的（判决门限为检测门限）

- (1)  $H_0$ 为真，判决为 $H_0$ ，记为  $(H_0|H_0)$
- (2)  $H_0$ 为真，判决为 $H_1$ ，记为  $(H_1|H_0)$
- (3)  $H_1$ 为真，判决为 $H_1$ ，记为  $(H_1|H_1)$
- (4)  $H_1$ 为真，判决为 $H_0$ ，记为  $(H_0|H_1)$

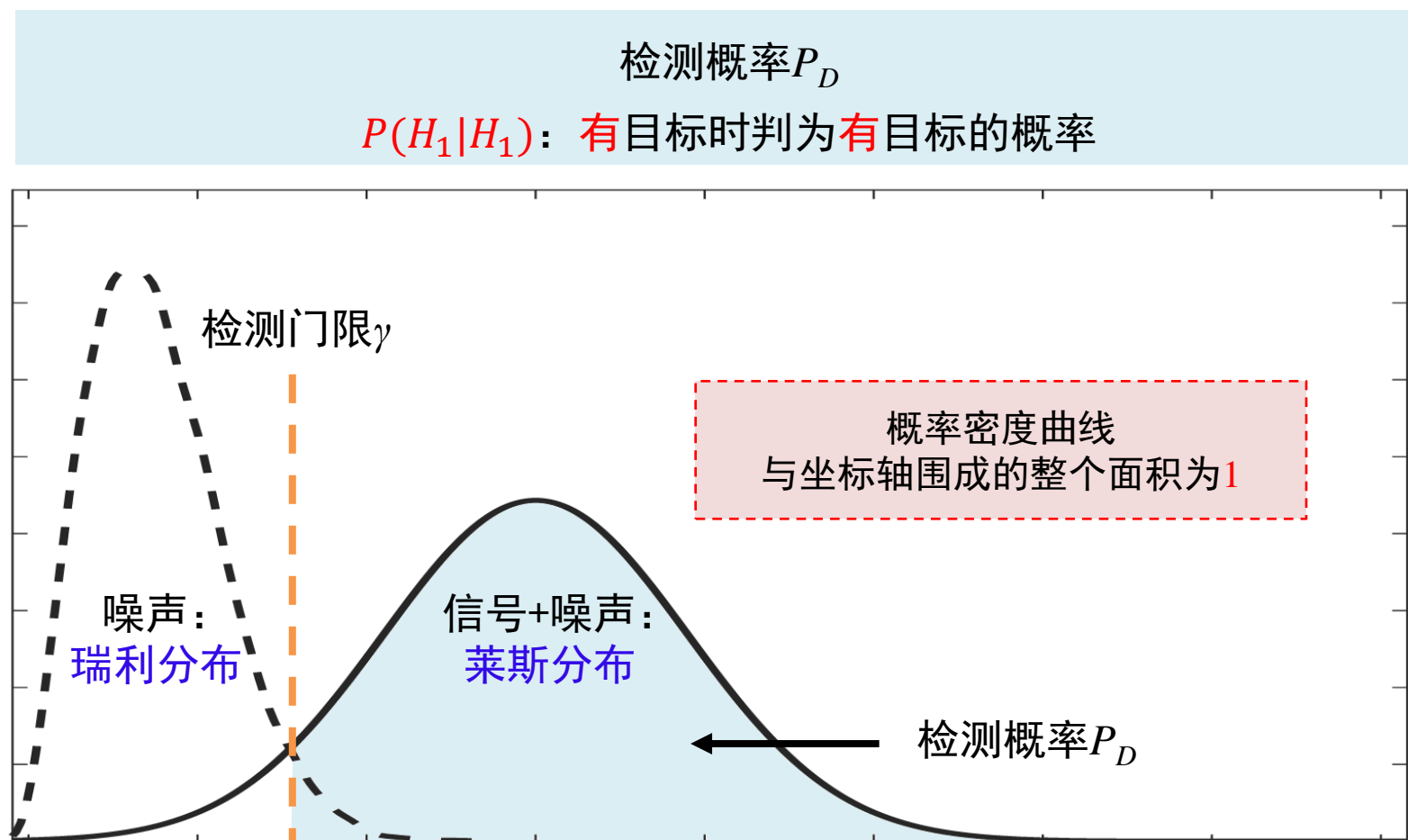
正确
错误
正确
错误

# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### 4.2 雷达信号检测

◆ 几何解释：（1）检测概率 $P_D$



# 一、噪声中的雷达方程

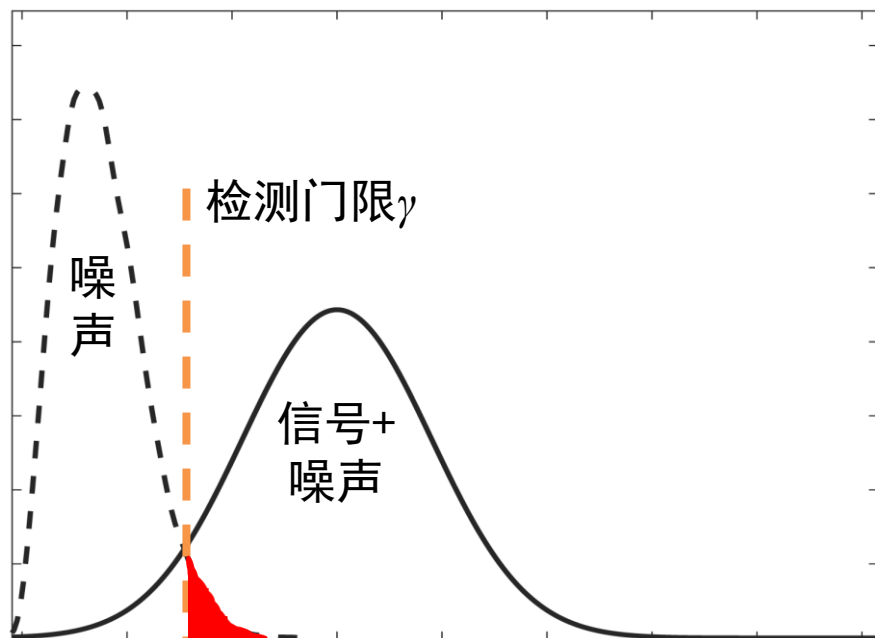
## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### 4.2 雷达信号检测

◆ 几何解释：（2）虚警概率 $P_{FA}$ 与漏检概率 $P_M$

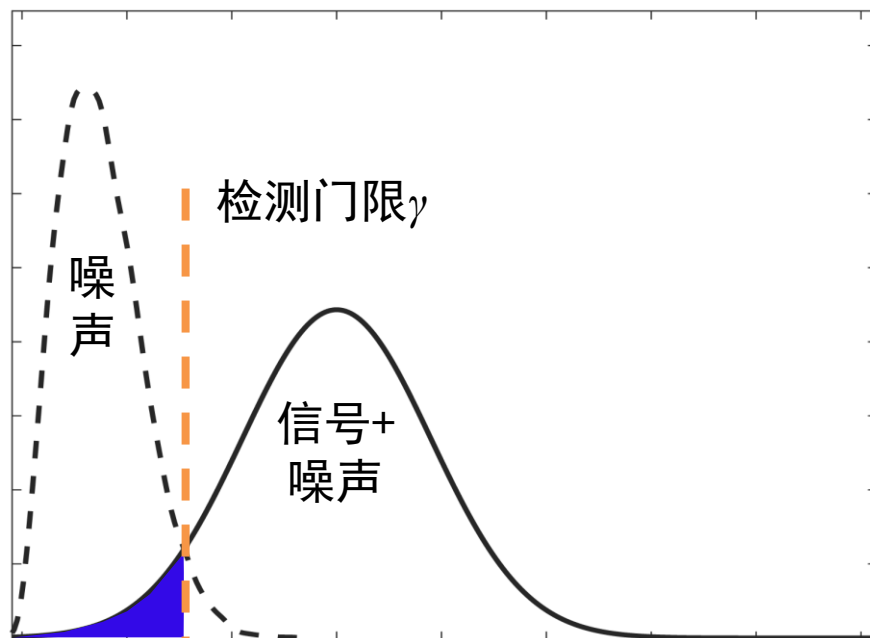
虚警概率 $P_{FA}$

$P(H_1|H_0)$ : 无目标时误判为有目标的概率



漏检概率 $P_M$

$P(H_0|H_1)$ : 有目标时误判为无目标的概率



检测概率 $P_D=1-P_M$

# 一、噪声中的雷达方程

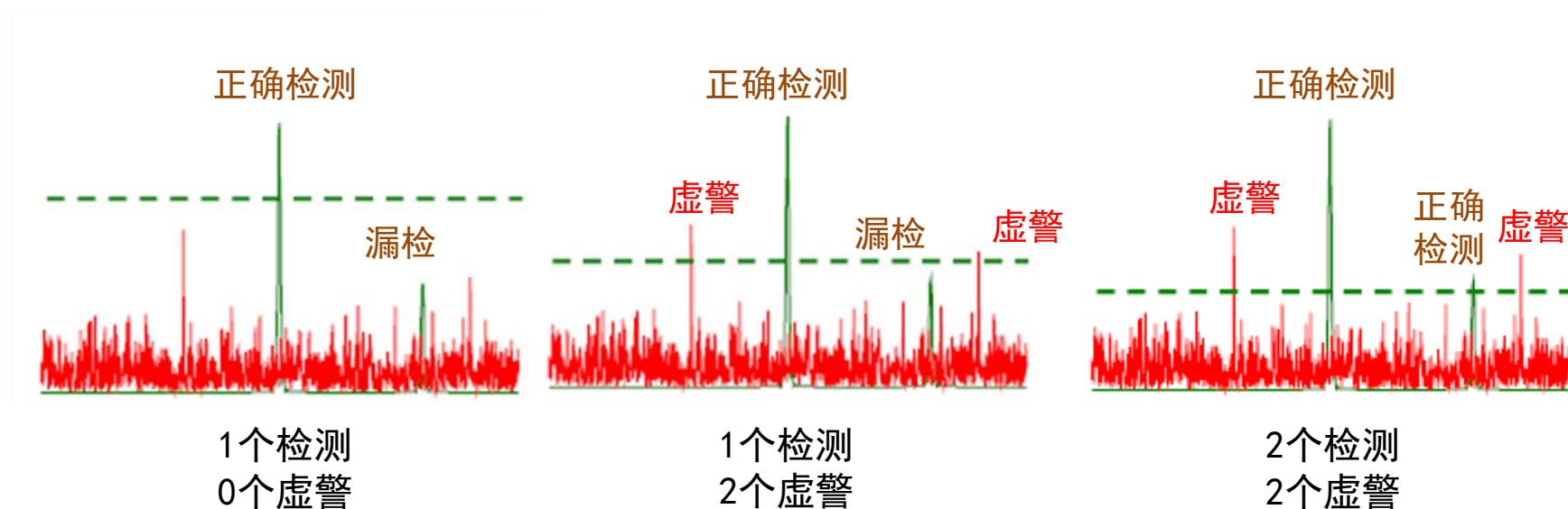
## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### □ 4.2 雷达信号检测

◆ 基本矛盾：信噪比一定时，虚警和漏检概率不能同时最小

➤ 虚警概率小 → 需要高检测门限 → 需要高信噪比

➤ 漏检概率小 → 需要低检测门限 → 需要低信噪比



检测概率=100%

联动  
指标

# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### 4.2 雷达信号检测

◆ 解决思路：在虚警和漏检概率中固定一个，最小化另一个

方案1：  
固定漏检概率 $P_M$   
(即固定漏检概率 $P_D$ )、  
最小化虚警概率 $P_{FA}$

固定检测概率  
 $P_D$ 的问题

- ① 目标可能不存在：  
固定检测概率 $P_D$ 不合理
- ② 虚警概率 $P_{FA}$ 浮动：  
虚警过高导致饱和

方案1不可行



方案2：  
固定虚警概率 $P_{FA}$ 、  
最小化漏检概率 $P_M$   
(即最大化检概率 $P_D$ )

虚警率  $P_{FA} = \int_{\gamma}^{+\infty} p(x | H_0) dx$   
检测门限 $\gamma$



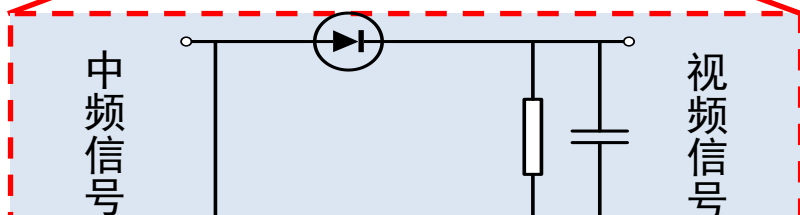
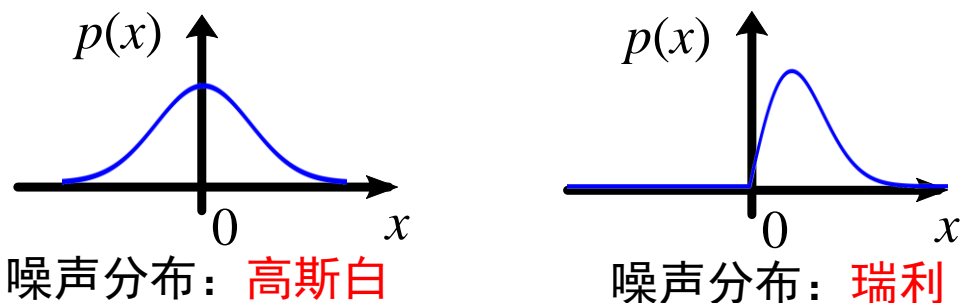
尼曼-皮尔逊准则

# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### 4.2 雷达信号检测

◆ 例：包络检波后恒虚警概率目标检测



瑞利分布的虚警概率

$$P_{FA} = \int_{\gamma}^{+\infty} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) dx = \exp\left(-\frac{\gamma^2}{\sigma^2}\right)$$



$$\gamma = \sqrt{-\sigma^2 \cdot \ln P_{FA}}$$

检测门限:  
可根据虚警概率解析求解

检测门限: 完全由虚警概率决定, 与检测概率无关

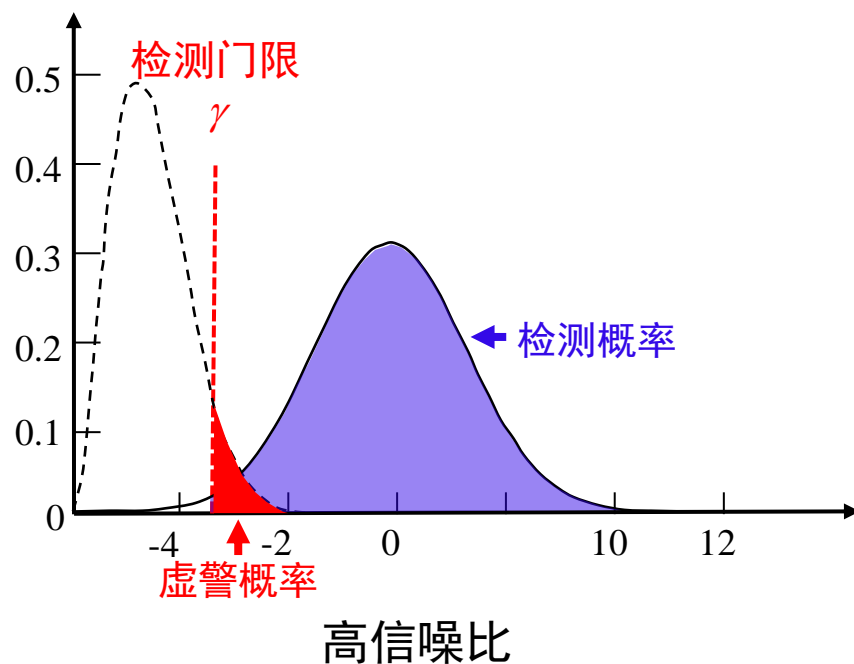
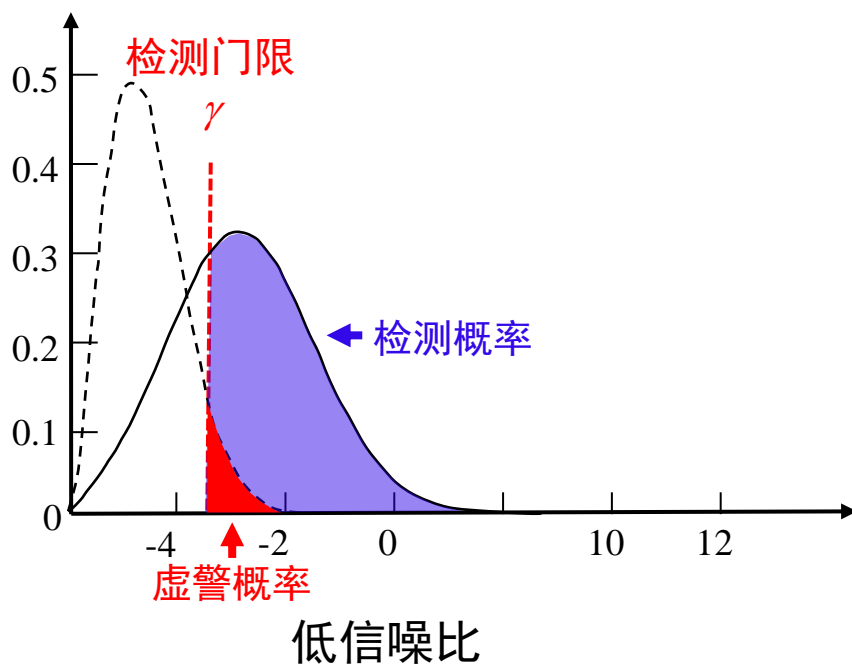


# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### 4.2 雷达信号检测

- ◆ 虚警概率相同：低信噪比  $\rightarrow$  检测概率低  
高信噪比  $\rightarrow$  检测概率高



**检测概率：由检测门限、检测信号信噪比决定**

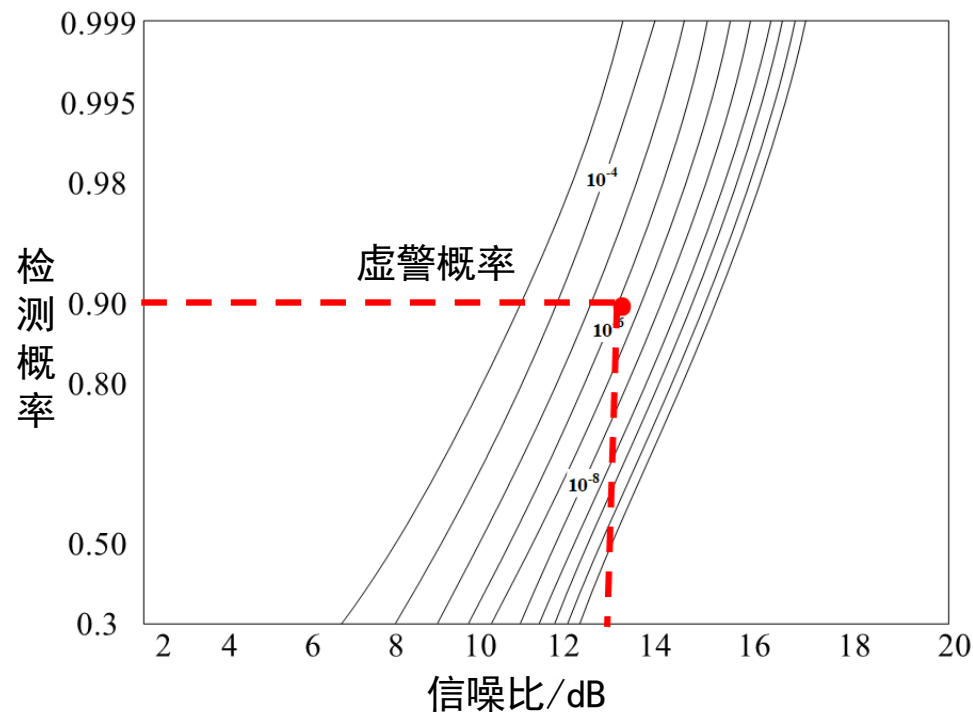
# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### 4.2 雷达信号检测

#### ◆ 检测概率、虚警概率和信噪比关系

$P_{FA}=10^{-6}$ ,  $P_D=0.9$ 时,  $SNR=13.2\text{dB}$



虚警概率  $P_{FA}$  + 噪声功率  $P_n$   
→ 检测门限  $\gamma$



检测门限  $\gamma$  + 检测概率  $P_D$   
→ 最小可检测信噪比  $SNR_{min}$



最小可检测信噪比  $SNR_{min}$   
→ 雷达最大作用距离  $R_{max}$

# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### 4.3 最小可检测信号功率

噪声功率

$$P_n = kT_0FB_n$$

( $T_0$ : 标准室温,  $F$ : 接收机噪声系数)

虚警概率

$$P_{FA} = \int_{\gamma}^{+\infty} \frac{x}{\Delta^2} \exp\left(-\frac{x^2}{\Delta^2}\right) dx$$

方差 $\Delta^2$ =功率 $P_n$

检测门限

$$\gamma$$

检测门限

$$\gamma$$

+

检测概率

$$P_D = \int_{\gamma}^{+\infty} \frac{x}{\Delta^2} \exp\left(-\frac{x^2 + A^2}{2\Delta^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{Ax}{\Delta^2}\right) dx$$

最小可检测信噪比

$$SNR_{\min} = \frac{A^2}{\sigma^2} = \frac{P_r}{P_n}$$

接收信号功率

$$P_r = \frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi\lambda^2 LR^4}$$

最小可检测信噪比

$$SNR_{\min} = \frac{P_r}{P_n}$$

雷达最大作用距离

$$R_{\max} = \left( \frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi\lambda^2 kT_0 FB_n L \cdot SNR_{\min}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

# 一、噪声中的雷达方程

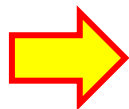
## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### □ 4.4 雷达最大作用距离

雷达最大作用距离

$$R_{\max} = \left( \frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi\lambda^2 k T_0 F B_n L \cdot \textcolor{red}{SNR}_{\min}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$R_{\max}$  如何提升?



增大  
发射功率  $P_t$

增大  
天线面积  $A$

减小  
噪声系数  $F$

减小系统带宽  $B_n$   
(又不能太小、应该折衷)

# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### 4.4 雷达最大作用距离

#### ◆ 目标起伏时的雷达最大作用距离

- 起伏损失：对起伏目标与不起伏目标检测，达到相同概率时，起伏目标相对于不起伏目标检测所需信噪比的增加量

$$\begin{array}{ccccc} SNR_q & = & SNR_{min} & + & LOSS_q \\ \text{起伏目标} & & \text{不起伏目标} & & \text{起伏损失} \\ \text{最小可检测信噪比} & & \text{最小可检测信噪比} & & \end{array}$$



$$\begin{array}{cc} \text{起伏目标} & \\ \text{雷达最大作用距离} & R_{\max} = \left( \frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi\lambda^2 L k T_0 F B_n \cdot SNR_q} \right)^{\frac{1}{4}} \end{array}$$

# 一、噪声中的雷达方程

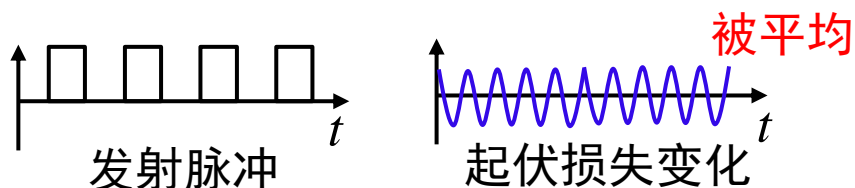
## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### □ 4.4 雷达最大作用距离

◆ 目标起伏特征：快起伏、慢起伏

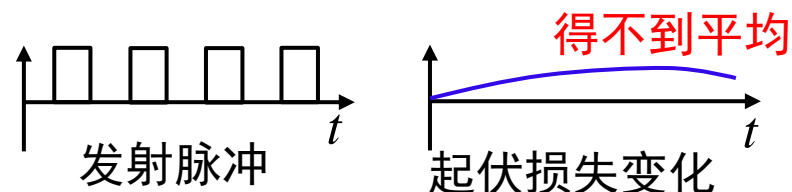
快起伏

起伏损失：被平均→小



慢起伏

起伏损失：未被平均→大



高速机动的飞机：  
快起伏

平稳飞行的飞机：  
慢起伏

目标起伏损失：慢起伏 > 快起伏

实际情况：目标起伏介于快、慢起伏之间

# 一、噪声中的雷达方程

## 4、最小可检测信号与雷达最大作用距离

### 4.4 雷达最大作用距离

◆ 例：某X波段雷达最大作用距离计算

雷达参数表

参数	值
峰值功率 $P_t$	4 kW
天线孔径 $D$	2.5 m
工作频率 $f_c$	9.5 GHz
典型目标RCS ( $\sigma$ )	20 m <sup>2</sup>
损耗 $L$	5 dB
噪声系数 $F$	4 dB
接收机带宽 $B$	2 MHz
最小可检测信噪比 $SNR_q$	13 dB

天线面积：  $A = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \approx 4.9 \text{ m}^2$

工作波长：  $\lambda = \frac{c}{f_c} \approx 0.032 \text{ m}$

雷达最大作用距离：

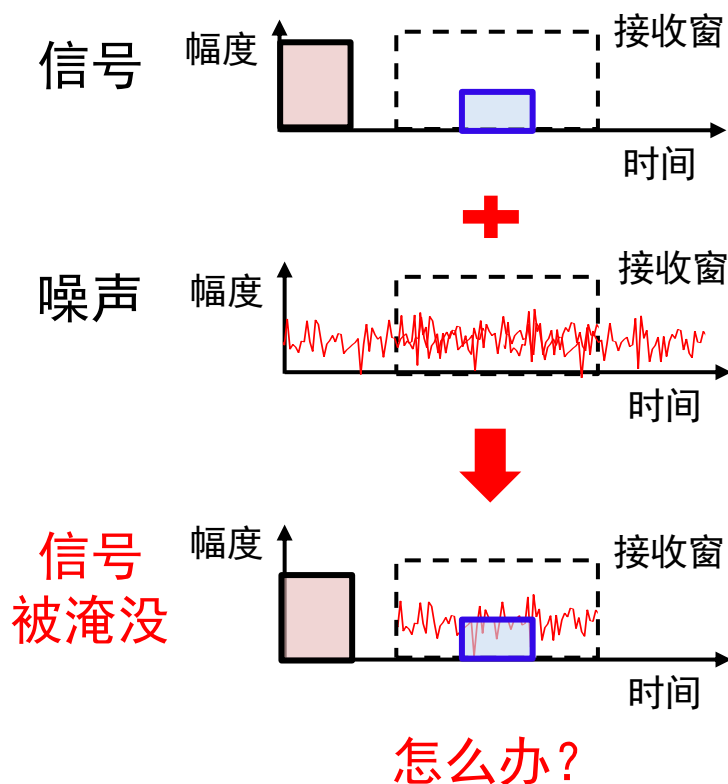
$$R_{\max} = \left( \frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 L k T_0 F B_n \cdot SNR_q} \right)^{\frac{1}{4}} \approx 104.92 \text{ km}$$

# 一、噪声中的雷达方程

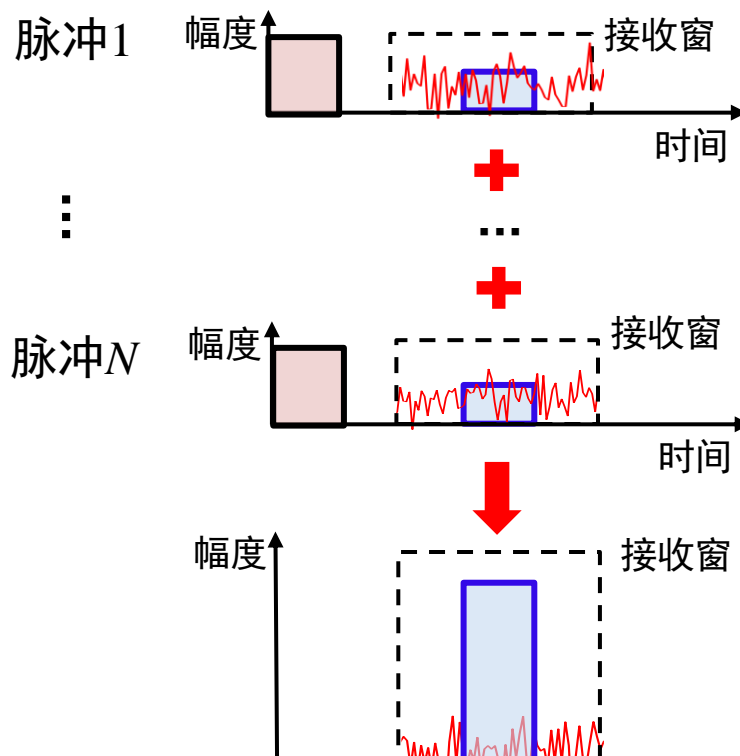
## 5、积累

### 5.1 简单脉冲积累

◆ 单个信号与噪声叠加→信号被淹没，看不清



积累：多信号相加，提升信噪比



信噪比提升多少?



# 一、噪声中的雷达方程

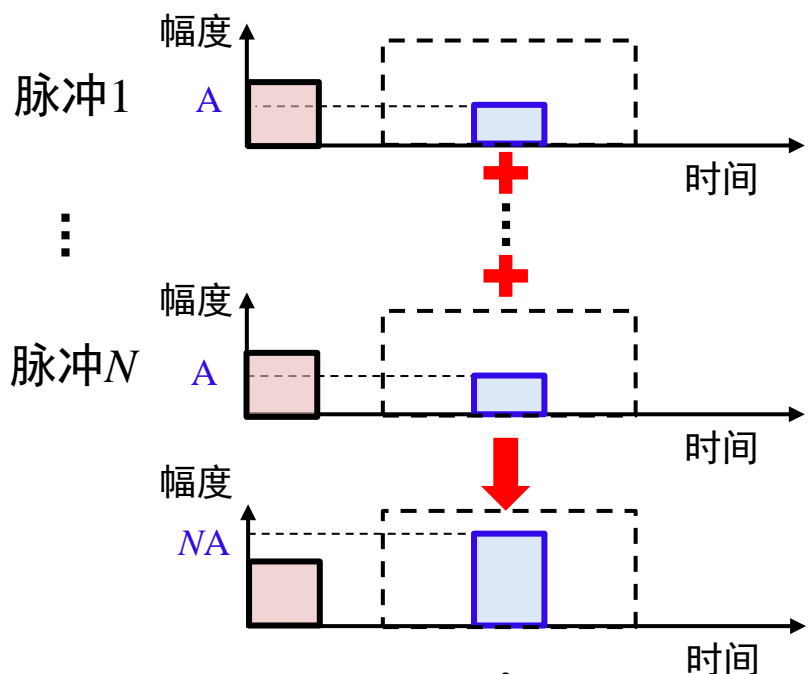
## 5、积累

### 5.1 简单脉冲积累

◆ 信号积累： $N$ 个脉冲积累 $\rightarrow$ 信号功率增大 $N^2$ 倍

◆ 噪声积累： $N$ 个脉冲积累 $\rightarrow$ 噪声功率增大？

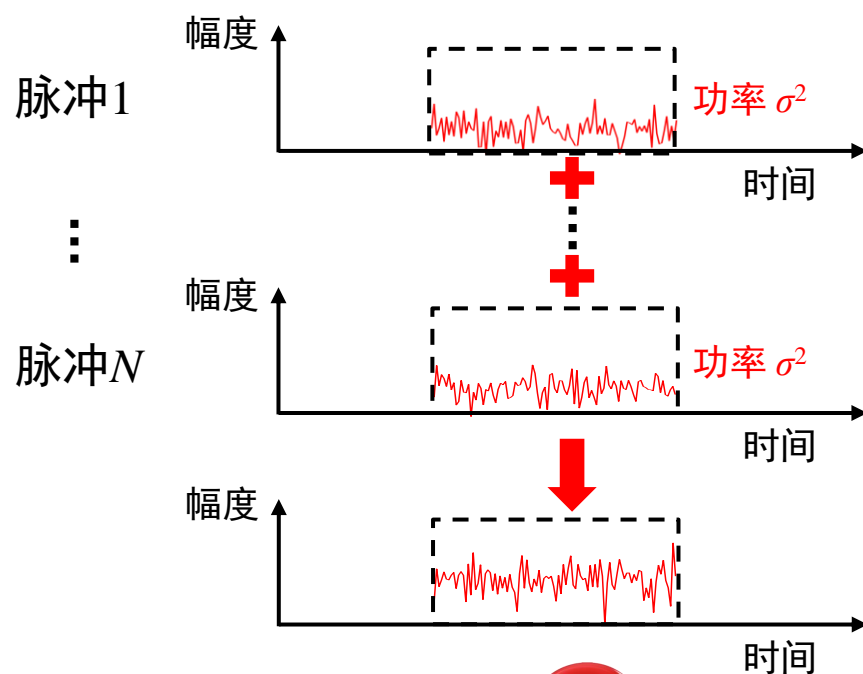
信号积累



积累后  
信号功率

$$\left( \sum_{i=1}^N A_i \right)^2 = (NA)^2 = N^2 A^2$$

噪声积累



# 一、噪声中的雷达方程

## 5、积累

### 5.1 简单脉冲积累

◆ 信号积累：  $N$  个脉冲积累  $\rightarrow$  信号功率增大  $N^2$  倍

◆ 噪声积累：  $N$  个脉冲积累  $\rightarrow$  噪声功率增大？

$$\text{Var}(n) = E(n^2) - E^2(n)$$

方差与均值的关系

以两个脉冲噪声  $n_1, n_2$  积累为例（噪声符合均值为0，方差为  $\sigma^2$  的高斯分布）：

$$\begin{aligned}\text{Var}(n_1 + n_2) &= E((n_1 + n_2)^2) - E^2(n_1 + n_2) \\ &= E(n_1^2 + 2n_1n_2 + n_2^2) - (E(n_1) + E(n_2))^2 \\ &= \underbrace{E(n_1^2) - E^2(n_1)}_{\text{Var}(n_1) = \sigma^2} + \underbrace{E(n_2^2) - E^2(n_2)}_{\text{Var}(n_2) = \sigma^2} - \underbrace{2E(n_1)E(n_2) + 2E(n_1n_2)}_{= 0}\end{aligned}$$



类比可得

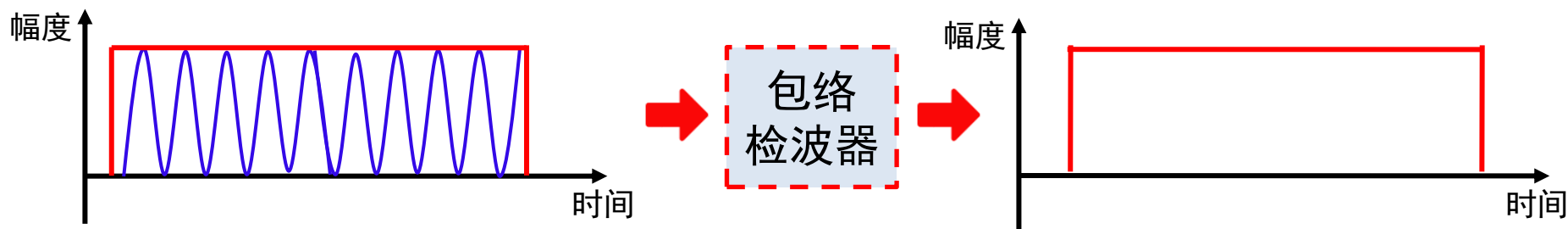
信号功率增大  $N^2$  倍，噪声功率增大  $N$  倍  $\rightarrow$  信噪比增加  $N$  倍  
 $\rightarrow$  相参积累（理想情况）

# 一、噪声中的雷达方程

## 5、积累

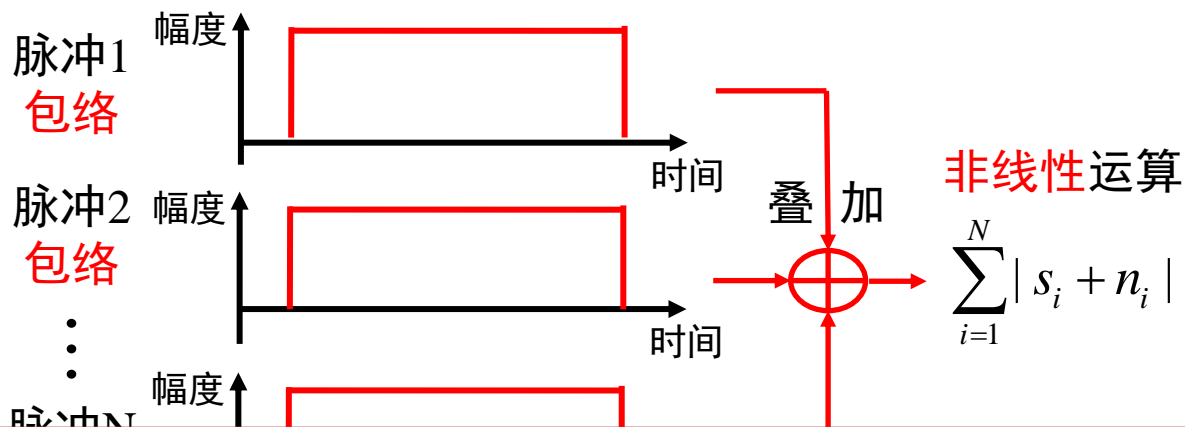
### 5.2 包络检波后信号积累

◆ 内涵：对包络进行非相参积累，改善信噪比



$$x_i = s_i + n_i$$

$$r_i = |s_i + n_i|$$



$|\cdot|$  为非线性运算，  
信号与噪声无法分离，  
难以解析求解信噪比

**$N$ 个脉冲非相参积累，信噪比增加 $N^{0.5} \sim N$ 倍**  
**与相参积累相比，非相参积累会产生积累损失**

# 一、噪声中的雷达方程

## 5、积累

### □ 小结

积累

信号相加→提升信噪比

分类

相参积累

非相参积累

积累增益

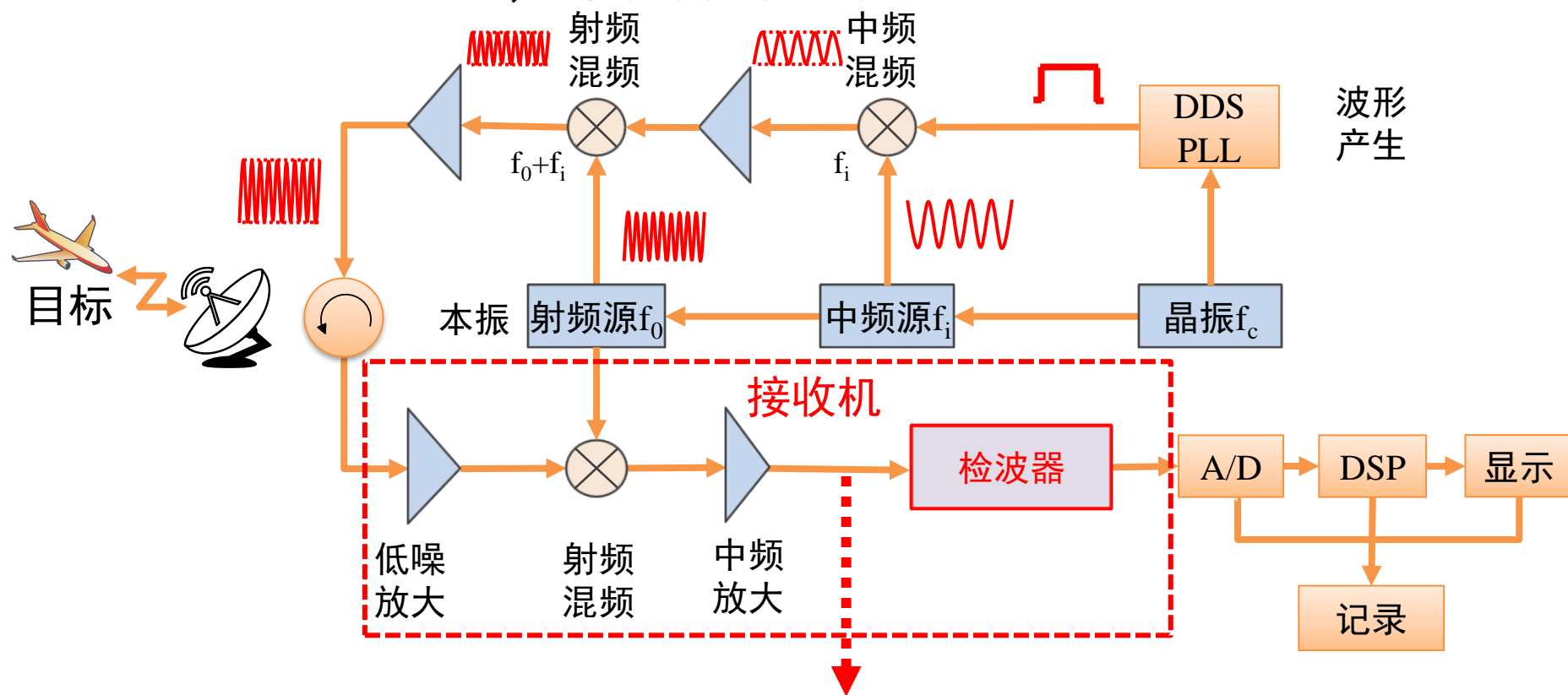
相参积累  
信噪比提高 $N$ 倍

非相参积累  
信噪比提高 $N^{0.5} \sim N$ 倍

# 一、噪声中的雷达方程

## 6、匹配滤波

- 接收机信噪比越大，信号检测性能越好  
→ 什么样的接收机，可使输出信噪比最大？

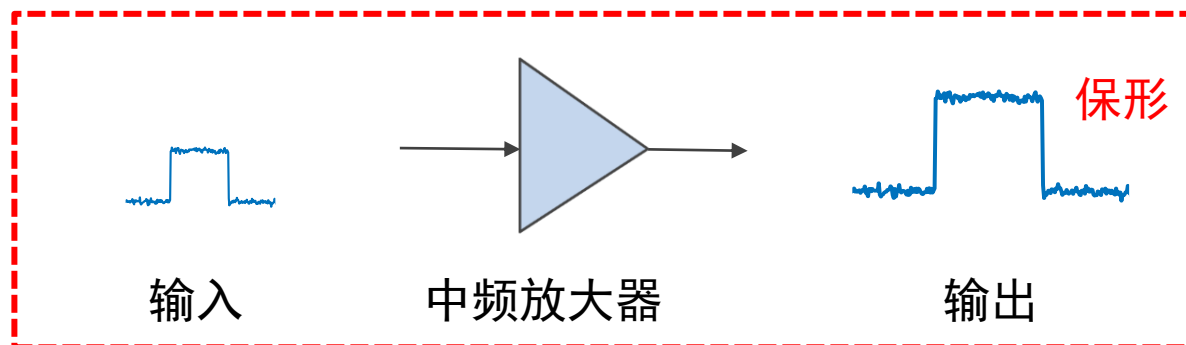


接收机设计的关键：  
中频放大器输出信噪比最大

# 一、噪声中的雷达方程

## 6、匹配滤波

□ 中频放大器（中放）：**带通/带阻特性**如何设计为**最优**？



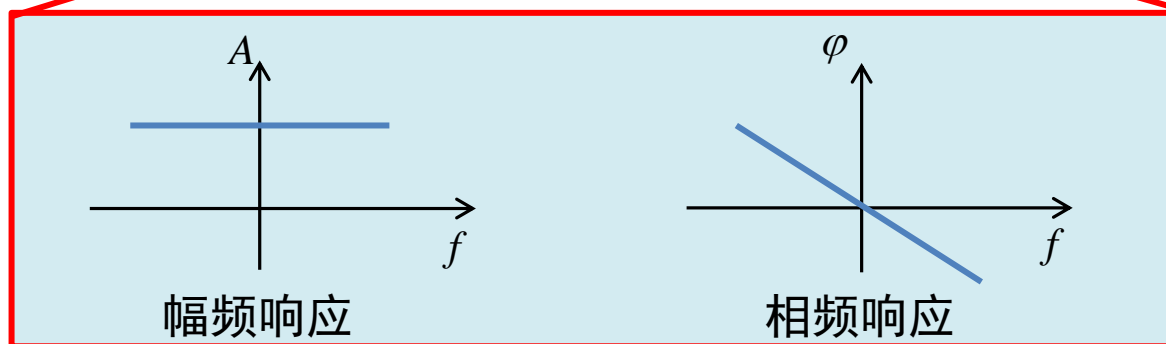
保形是最优吗？



全通带滤波



信噪比无增强



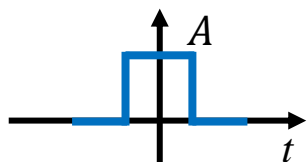
使信噪比最大的中放滤波器幅频响应、相频响应是什么？

# 一、噪声中的雷达方程

## 6、匹配滤波

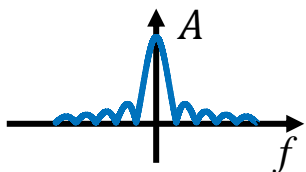
### 信噪比最大：匹配滤波器

时域信号幅度

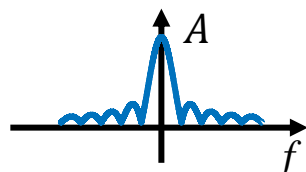


信号幅频响应

$$\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$$



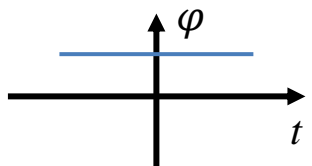
中频滤波器幅频响应：



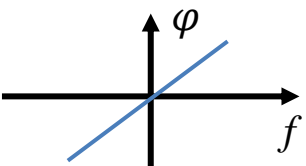
与信号带宽一致

信号全通过  
噪声尽量小

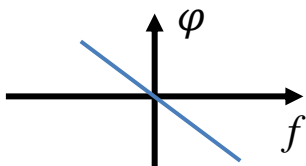
时域信号相位



信号相频响应



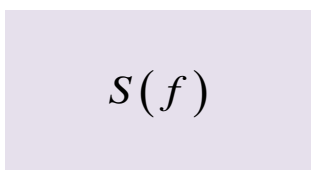
中频滤波器相频响应：



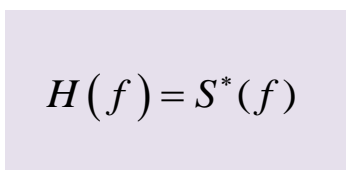
与信号相位相反

滤波后同相位  
信号功率最大

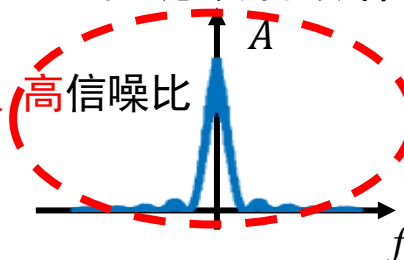
信号



中频滤波器



匹配滤波后频谱



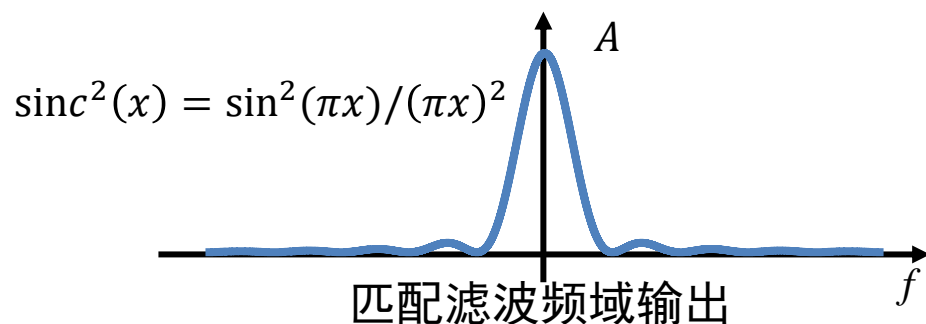
时域为何？

输出信噪比最大：匹配滤波器

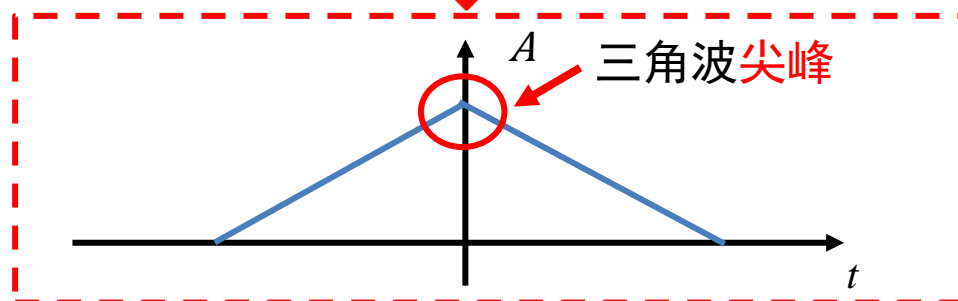
# 一、噪声中的雷达方程

## 6、匹配滤波

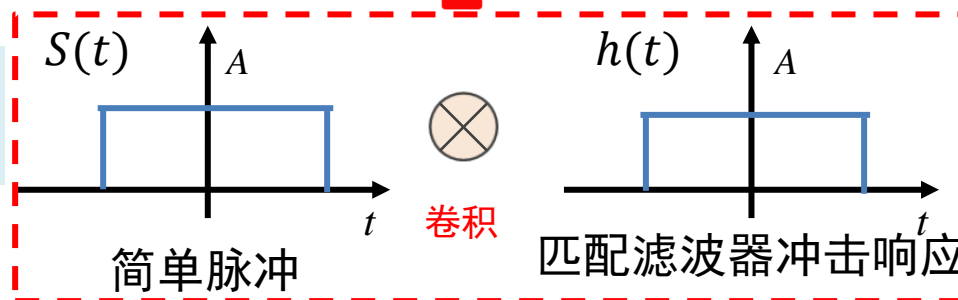
匹配滤波输出的时域信号是什么？



逆傅里叶变换



时域：  
相关接收



三角波滤波结果  
是否理想？

理想：三角波尖峰  
有助于信号检测

准则不同，结果不同：

失真最小：全通滤波，  
信噪比无优化

信噪比最大：匹配滤波  
信号不保形

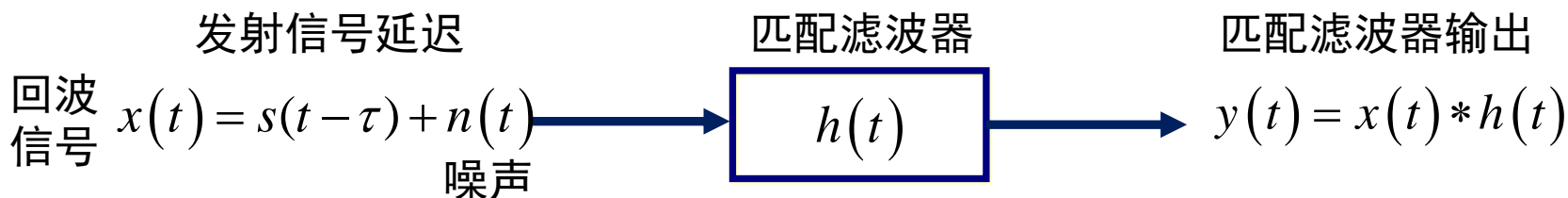


# 一、噪声中的雷达方程

## 6、匹配滤波

物理可实现的匹配滤波器：需引入群延时 $t_0$

→避免负时间，满足因果性



频域匹配滤波器

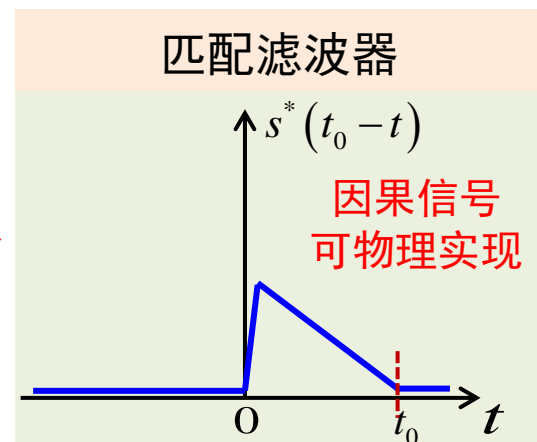
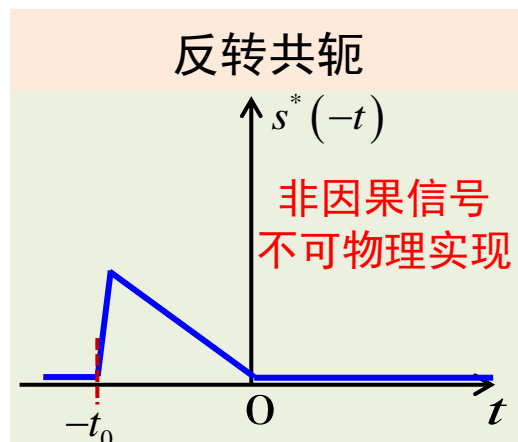
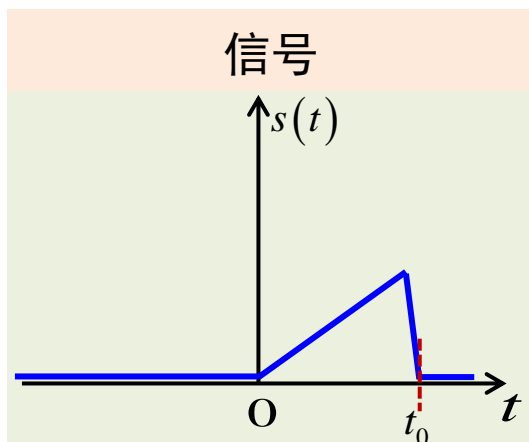
$$H(f) = S^*(f)e^{-j2\pi ft_0}$$

FT

时域匹配滤波器

$$h(t) = s^*(t_0 - t)$$

群时延  
保证系统因果



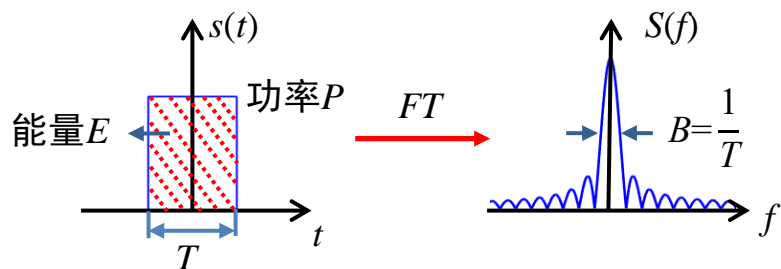
# 一、噪声中的雷达方程

## 6、匹配滤波

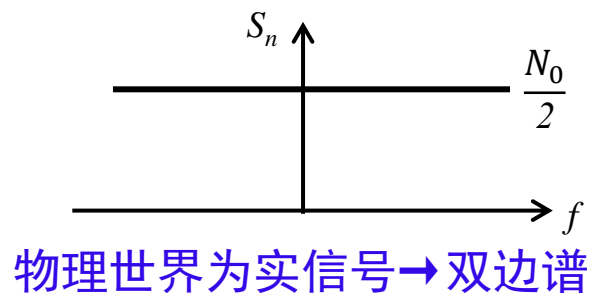
### 匹配滤波器的输出信噪比

$$x(t) = s(t - \tau) + n(t) \longrightarrow \boxed{h(t)} \longrightarrow y(t) = x(t) * h(t)$$

简单脉冲时频关系



双边高斯白噪声功率谱



物理世界为实信号→双边谱

信号  
功率

$$P_s = \frac{E}{T}$$

噪声

$$P = \frac{N_0}{2} B$$

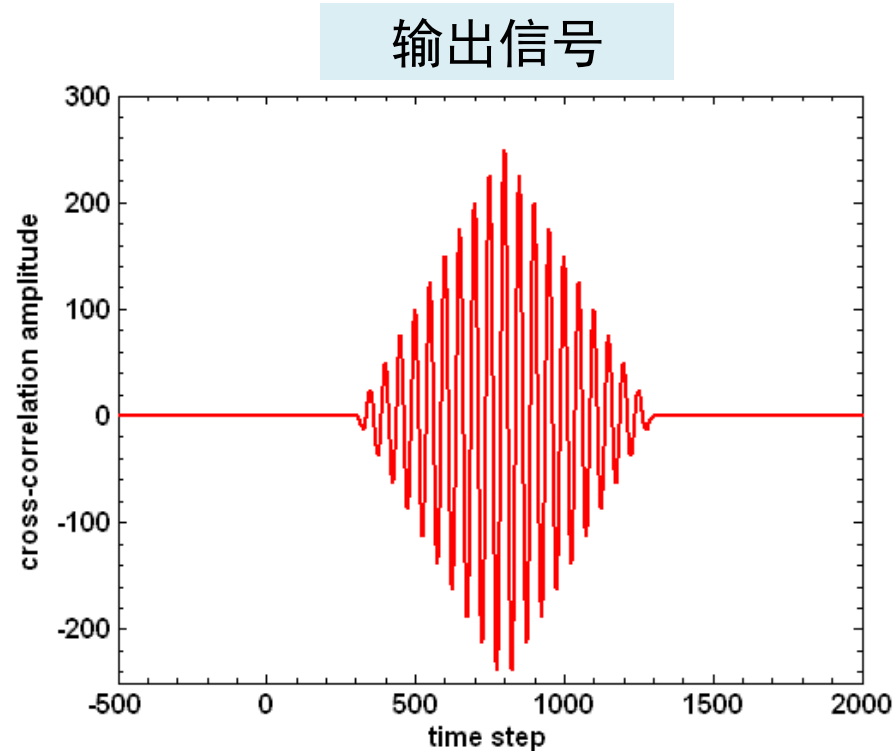
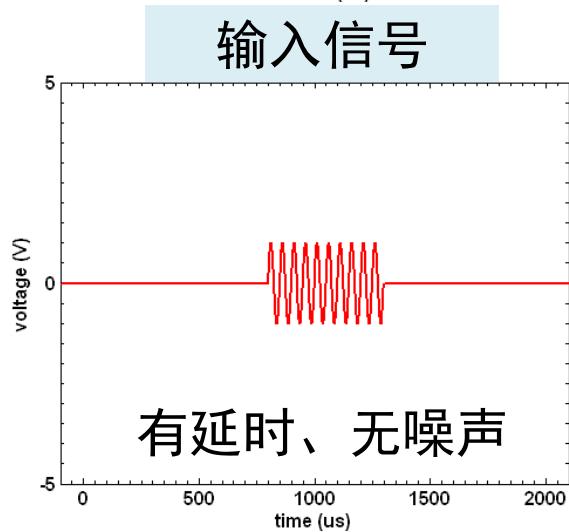
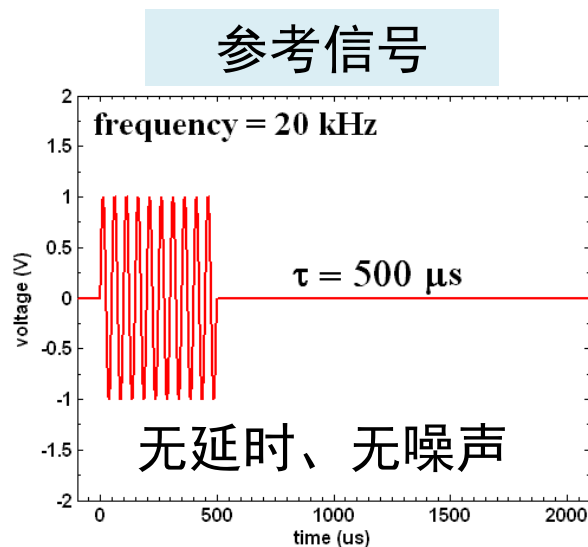
$$\text{信噪比 } SNR = \frac{P_s}{P_N} = \frac{\frac{E}{T}}{\frac{N_0}{2} B} = \frac{2E}{N_0}$$

输出最大信噪比只与信号能量有关，与信号波形无关

# 一、噪声中的雷达方程

## 6、匹配滤波

匹配滤波实现：中频放大器，脉冲调制正弦信号



# 一、噪声中的雷达方程

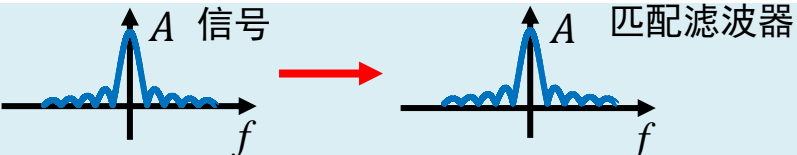
## 6、匹配滤波

### □ 小结

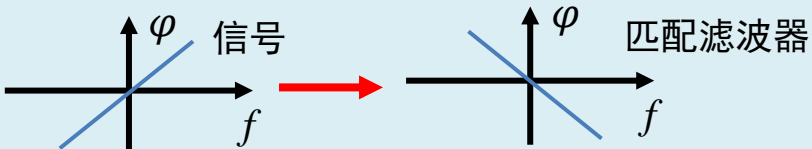
匹配滤波器

使输出信噪比最大的滤波器

幅频响应

与信号带宽一致： 

相频响应

与信号相位相反： 

输出信噪比

输出最大信噪比只与信号能量有关，与信号波形无关

# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### □ 7.1 最小贝叶斯风险接收机

◆ 内涵：设计接收机，使接收贝叶斯风险最小

贝叶斯风险  $\mathcal{R}$

$$\begin{aligned}\mathcal{R} &= \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 C_{ij} p(H_i | H_j) p(H_j) \\ &= C_{00} p(H_0 | H_0) p(H_0) \rightarrow \text{发射 } H_0, \text{ 判决为 } H_0 \text{ 的风险} \\ &\quad + C_{01} p(H_0 | H_1) p(H_1) \rightarrow \text{发射 } H_1, \text{ 判决为 } H_0 \text{ 的风险} \\ &\quad + C_{11} p(H_1 | H_1) p(H_1) \rightarrow \text{发射 } H_1, \text{ 判决为 } H_1 \text{ 的风险} \\ &\quad + C_{10} p(H_1 | H_0) p(H_0) \rightarrow \text{发射 } H_0, \text{ 判决为 } H_1 \text{ 的风险}\end{aligned}$$

先验概率

$$p(H_j)$$

发射  $H_j$  的概率

条件概率

$$p(H_i | H_j)$$

发射  $H_j$  ( $H_j$  为真)  
判决为  $H_i$  的概率

代价

$$C_{ij}$$

发射  $H_j$  ( $H_j$  为真)  
判决为  $H_i$  的代价

# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### 7.1 最小贝叶斯风险接收机

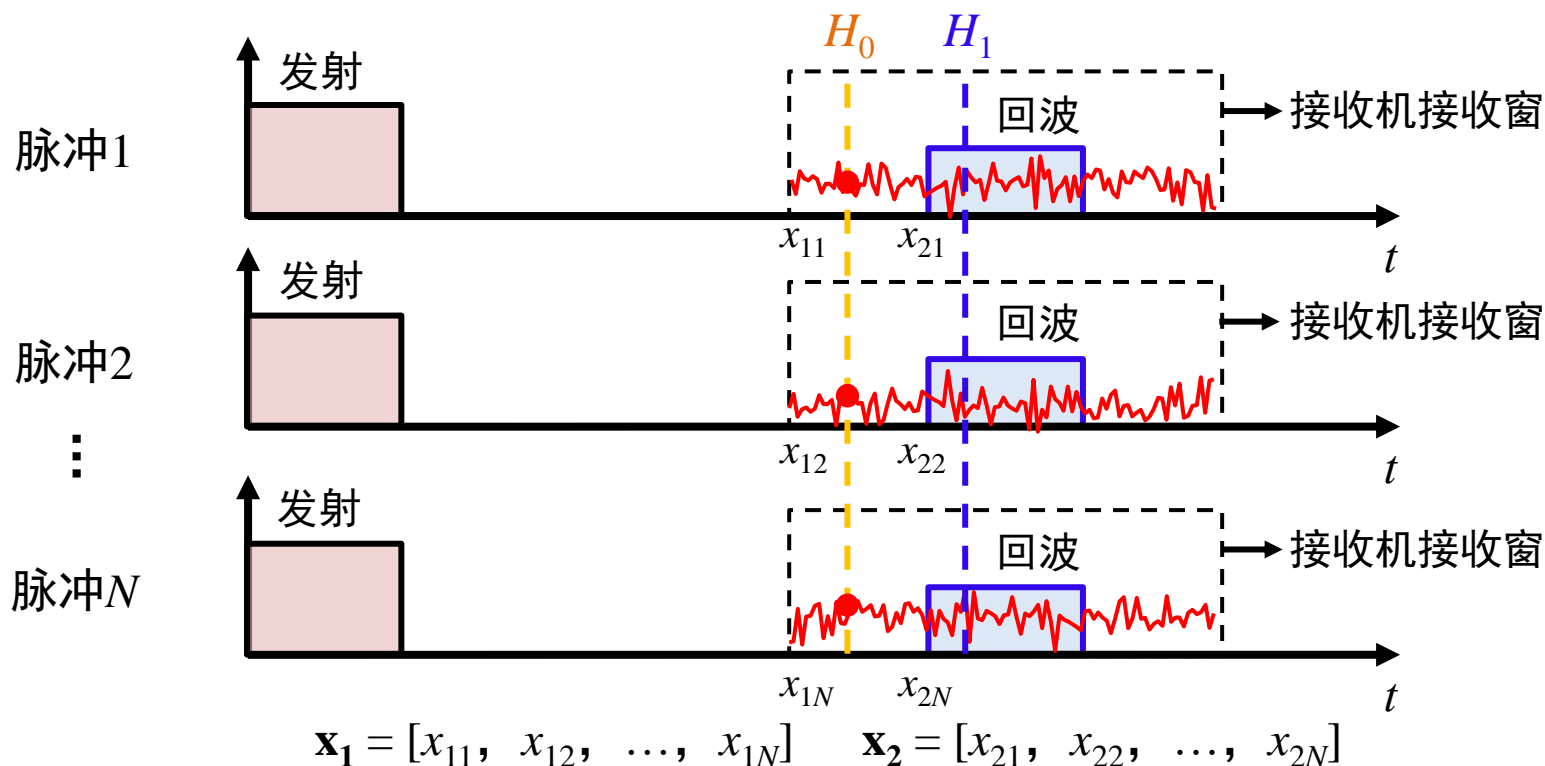
◆ 内涵：设计接收机，使接收贝叶斯风险最小

假设  
接收样本为 $\mathbf{x}$

$p(\mathbf{x} | H_0)$   
发射 $H_0$ ,  $\mathbf{x}$ 的分布

$p(\mathbf{x} | H_1)$   
发射 $H_1$ ,  $\mathbf{x}$ 的分布

似然函数  
发射 $H_j$ ,  $\mathbf{x}$ 的分布



# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### 7.1 最小贝叶斯风险接收机

◆ 内涵：设计接收机，使接收贝叶斯风险最小

假设  
接收样本为 $\mathbf{x}$

$p(\mathbf{x} | H_0)$   
发射 $H_0$ ,  $\mathbf{x}$ 的分布

$p(\mathbf{x} | H_1)$   
发射 $H_1$ ,  $\mathbf{x}$ 的分布

似然函数  
发射 $H_j$ ,  $\mathbf{x}$ 的分布



判决风险

$\int C_{00} p(\mathbf{x} | H_0) P(H_0) d\mathbf{x}$  发射 $H_0$ , 判决 $\mathbf{x}$ 为 $H_0$ 的风险

$\int C_{01} p(\mathbf{x} | H_1) P(H_1) d\mathbf{x}$  发射 $H_1$ , 判决 $\mathbf{x}$ 为 $H_0$ 的风险

$\int C_{11} p(\mathbf{x} | H_1) P(H_1) d\mathbf{x}$  发射 $H_1$ , 判决 $\mathbf{x}$ 为 $H_1$ 的风险

$\int C_{10} p(\mathbf{x} | H_0) P(H_0) d\mathbf{x}$  发射 $H_0$ , 判决 $\mathbf{x}$ 为 $H_1$ 的风险



将接收 $\mathbf{x}$ 全判  
为 $H_0$ 的风险



将接收 $\mathbf{x}$ 全判  
为 $H_1$ 的风险

# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### 7.1 最小贝叶斯风险接收机

◆ 内涵：设计接收机，使接收贝叶斯风险最小

Case 1:

对任意发射，将接收 $\mathbf{x}$   
判为 $H_0$ 的风险 $>$ 判为 $H_1$ 的风险

$$\begin{aligned} C_{00}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) \\ + C_{01}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) > C_{10}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) \\ + C_{11}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) \end{aligned}$$

判 $H_1$

$$\begin{aligned} C_{00}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) \\ + C_{01}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) > C_{10}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) \\ + C_{11}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) \end{aligned}$$

Case 2:

对任意发射，将接收 $\mathbf{x}$   
判为 $H_1$ 的风险 $>$ 判为 $H_0$ 的风险

$$\begin{aligned} C_{00}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) \\ + C_{01}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) < C_{10}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) \\ + C_{11}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) \end{aligned}$$

判 $H_0$

$$\begin{aligned} C_{00}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) \\ + C_{01}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) < C_{10}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) \\ + C_{11}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) \end{aligned}$$

合并表示

$$C_{00}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) + C_{01}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) \begin{matrix} H_1 \\ \geq \\ \leq \\ H_0 \end{matrix} C_{10}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) + C_{11}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1)$$



# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### □ 7.1 最小贝叶斯风险接收机

◆ 内涵：设计接收机，使接收贝叶斯风险最小

合理假设：误判代价>正判代价

$$\rightarrow C_{10} > C_{00}, C_{01} > C_{11}$$

发射 $H_0$ 时，判决为 $H_1$ 的  
代价大于判决为 $H_0$ 的代价

发射 $H_1$ 时，判决为 $H_0$ 的  
代价大于判决为 $H_1$ 的代价

接收判决

$$\begin{array}{ccc} C_{00}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) & \begin{array}{c} H_1 \\ \geq \\ H_0 \end{array} & C_{10}P(H_0)p(\mathbf{x}|H_0) \\ +C_{01}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) & & +C_{11}P(H_1)p(\mathbf{x}|H_1) \end{array}$$



最小贝叶斯  
风险接收

$$\frac{p(\mathbf{x}|H_1)}{p(\mathbf{x}|H_0)} \begin{array}{c} H_1 \\ \geq \\ H_0 \end{array} \frac{(C_{10} - C_{00})p(H_0)}{(C_{01} - C_{11})p(H_1)}$$

似然比

# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### 7.2 最小错误概率接收机

- ◆ **内涵**：设计接收机，使错误概率最小
- ◆ **特点**：最小贝叶斯风险接收机在“错误判断代价为1，正确判断代价为0（ $C_{01}=C_{10}=1, C_{00}=C_{11}=0$ ）”时的特例

贝叶斯风险

$$\mathcal{R} = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 C_{ij} p(H_i | H_j) p(H_j)$$

$$\xrightarrow[C_{00}=C_{11}=0]{C_{01}=C_{10}=1}$$

错误概率

$$P_e = p(H_0 | H_1) p(H_1) + p(H_1 | H_0) p(H_0)$$

最小贝叶斯风险接收

$$\frac{p(\mathbf{x} | H_1)}{p(\mathbf{x} | H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \frac{(C_{10} - C_{00}) p(H_0)}{(C_{01} - C_{11}) p(H_1)}$$

$$\xrightarrow[C_{00}=C_{11}=0]{C_{01}=C_{10}=1}$$

最小错误概率接收

$$\frac{p(\mathbf{x} | H_1)}{p(\mathbf{x} | H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \frac{p(H_0)}{p(H_1)}$$

# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### 7.3 最大后验概率接收机

- ◆ **内涵**：设计接收机，使后验概率最大
- ◆ **特点**：贝叶斯框架下最小错误概率接收机的等价表示

最小错误概率接收

$$\frac{p(\mathbf{x}|H_1)}{p(\mathbf{x}|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \frac{p(H_0)}{p(H_1)}$$

等价



最大后验概率接收

$$\boxed{p(H_1|\mathbf{x})} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \boxed{p(H_0|\mathbf{x})}$$

后验概率

接收样本为 $\mathbf{x}$ 时，判决为 $H_i$ 的概率

贝叶斯公式

$$p(\mathbf{x}|H_i) = \frac{p(H_i|\mathbf{x})p(\mathbf{x})}{P(H_i)}$$

# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### □ 7.4 最大似然接收机

- ◆ **内涵**：设计接收机，使似然函数最大
- ◆ **特点**：最小错误概率接收机（最大后验接收机）  
在等概率发射  $p(H_0)=p(H_1)$  条件下的特例

最小错误概率接收  
(最大后验概率接收)

$$\frac{p(\mathbf{x}|H_1)}{p(\mathbf{x}|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \frac{p(H_0)}{p(H_1)}$$

$$p(H_0) = p(H_1)$$



最大似然接收

$$\boxed{p(\mathbf{x}|H_1)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \boxed{p(\mathbf{x}|H_0)}$$

似然函数

# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### 7.5 匹配滤波接收机

◆ **内涵**：设计接收机，使输出信噪比最大

◆ **特点**：最大似然接收机在高斯白噪声条件下的特例

最大似然接收

$$p(\mathbf{x}|H_1) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} p(\mathbf{x}|H_0) \longrightarrow \hat{i} = \arg \max p(\mathbf{x}|H_i)$$

高斯白噪声背景  $p(\mathbf{x}|H_i) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \right)^N e^{-\frac{(\mathbf{x}-\mathbf{s}_i)^2}{2\sigma^2}}$ ,  $H_i: x(t) = s_i(t) + n(t)$

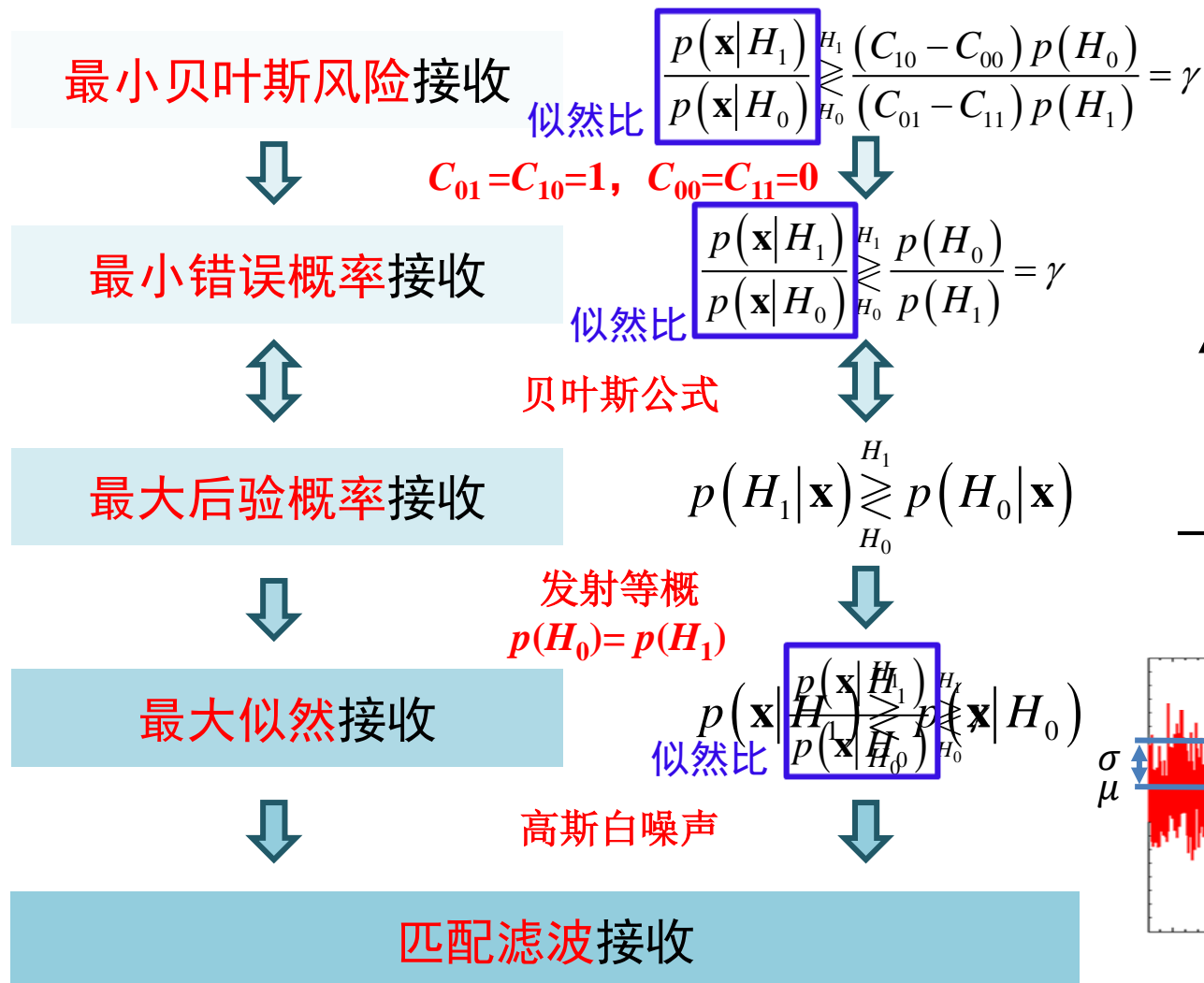
$$\hat{i} = \arg \max \left[ \underbrace{\ln \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \right)^N}_{\text{常数}} - \frac{1}{2\sigma^2} \underbrace{(\mathbf{x}\mathbf{x}^T)}_{\substack{\text{接收已知} \\ \downarrow}} + \underbrace{\mathbf{s}_i\mathbf{s}_i^T}_{\substack{\text{功率相等} \\ \text{发射等概} \\ \downarrow}} - 2 \underbrace{\mathbf{x}^T \mathbf{s}_i}_{\substack{\text{关键} \\ \downarrow}} \right]$$
$$\hat{i} = \arg \max \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{s}_i \rightarrow \text{匹配滤波接收机}$$

匹配滤波接收机：高斯白噪声背景下的最优接收机 69

# 一、噪声中的雷达方程

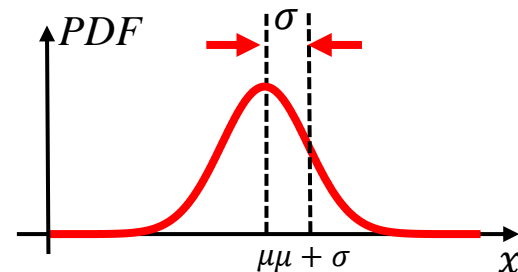
## 7、雷达最优接收

### 7.6 雷达接收机本质：似然比接收机

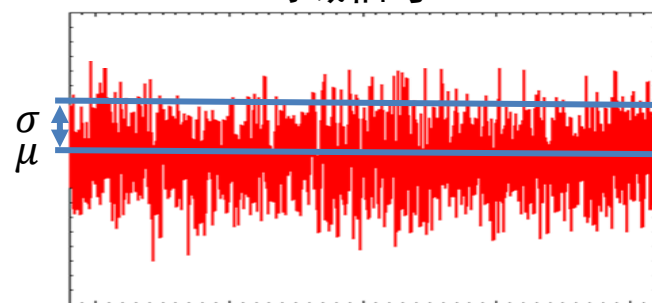


$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

概率密度



时域信号



# 一、噪声中的雷达方程

## 7、雷达最优接收

### 7.6 雷达接收机本质：似然比接收机

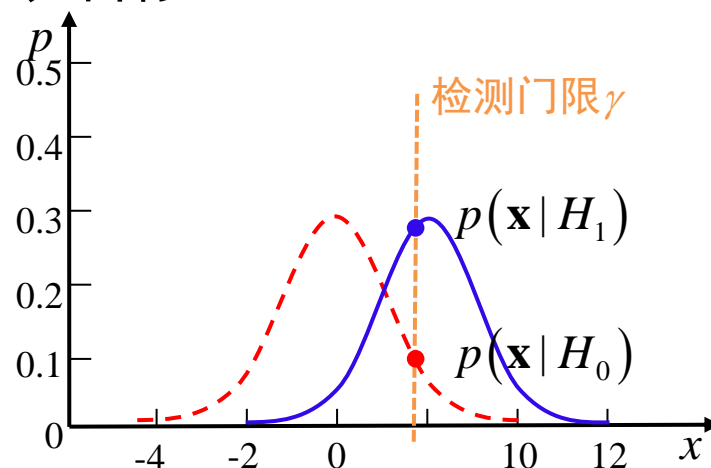
◆ 似然比接收机：“尼曼—皮尔逊准则”下的雷达最优接收机

$$L(x) = \frac{p(\mathbf{x} | H_1)}{p(\mathbf{x} | H_0)} = \begin{cases} \geq \gamma & \rightarrow \text{有目标} \\ < \gamma & \rightarrow \text{无目标} \end{cases}$$

高斯白噪声下：两种假设的概率密度函数

$$p(\mathbf{x} | H_0) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{n}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \mathbf{x}^T \mathbf{x}\right)$$

$$p(\mathbf{x} | H_1) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{n}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} (\mathbf{x} - \mathbf{s})^T (\mathbf{x} - \mathbf{s})\right)$$

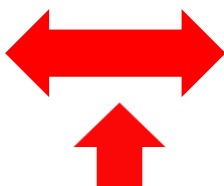


似然比

利用噪声的多维联合概率分布

最大信噪比

利用信号和噪声的二阶矩



从理论证明了最大信噪比准则的正确性

# 一、噪声中的雷达方程

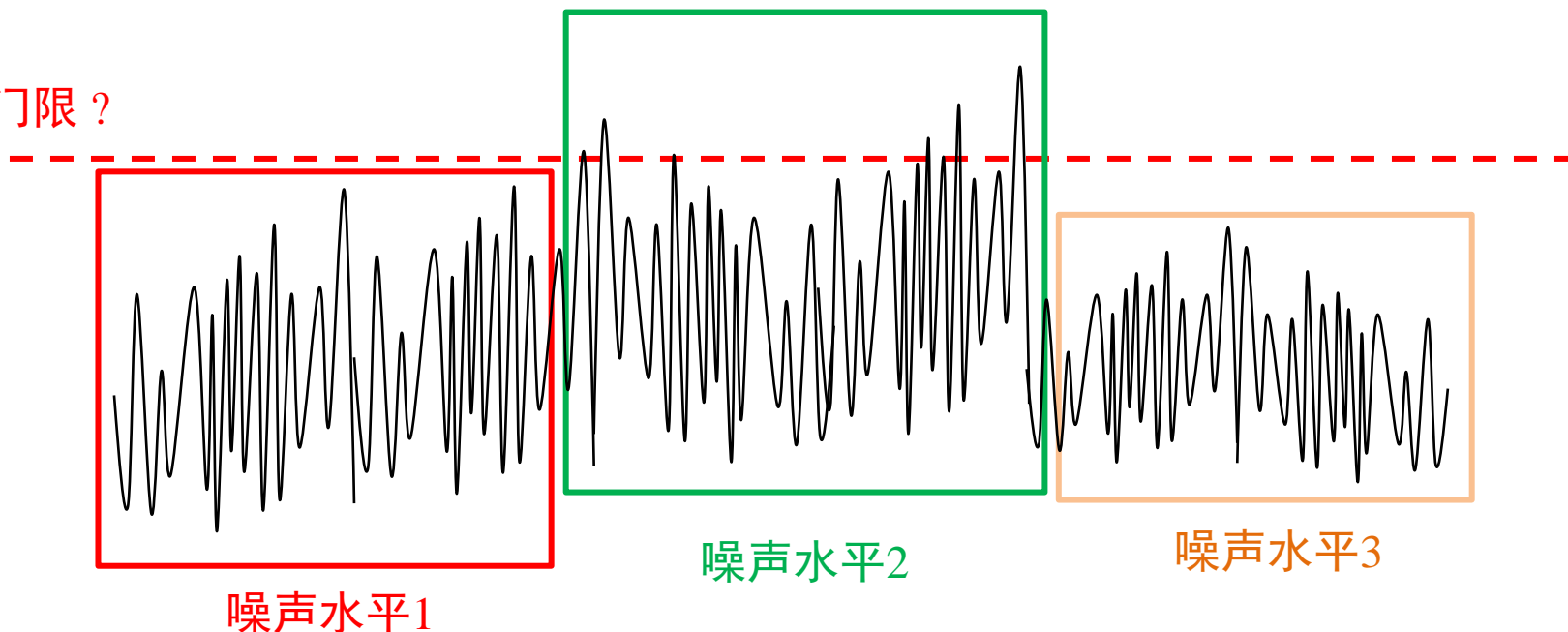
## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

### 8.1 噪声未知雷达信号检测的问题

- ◆ “尼曼-皮尔逊” 准则：需噪声已知
- ◆ 噪声未知时，雷达信号检测如何进行？

例如：不同时序的接收信号噪声水平存在差异

检测门限？



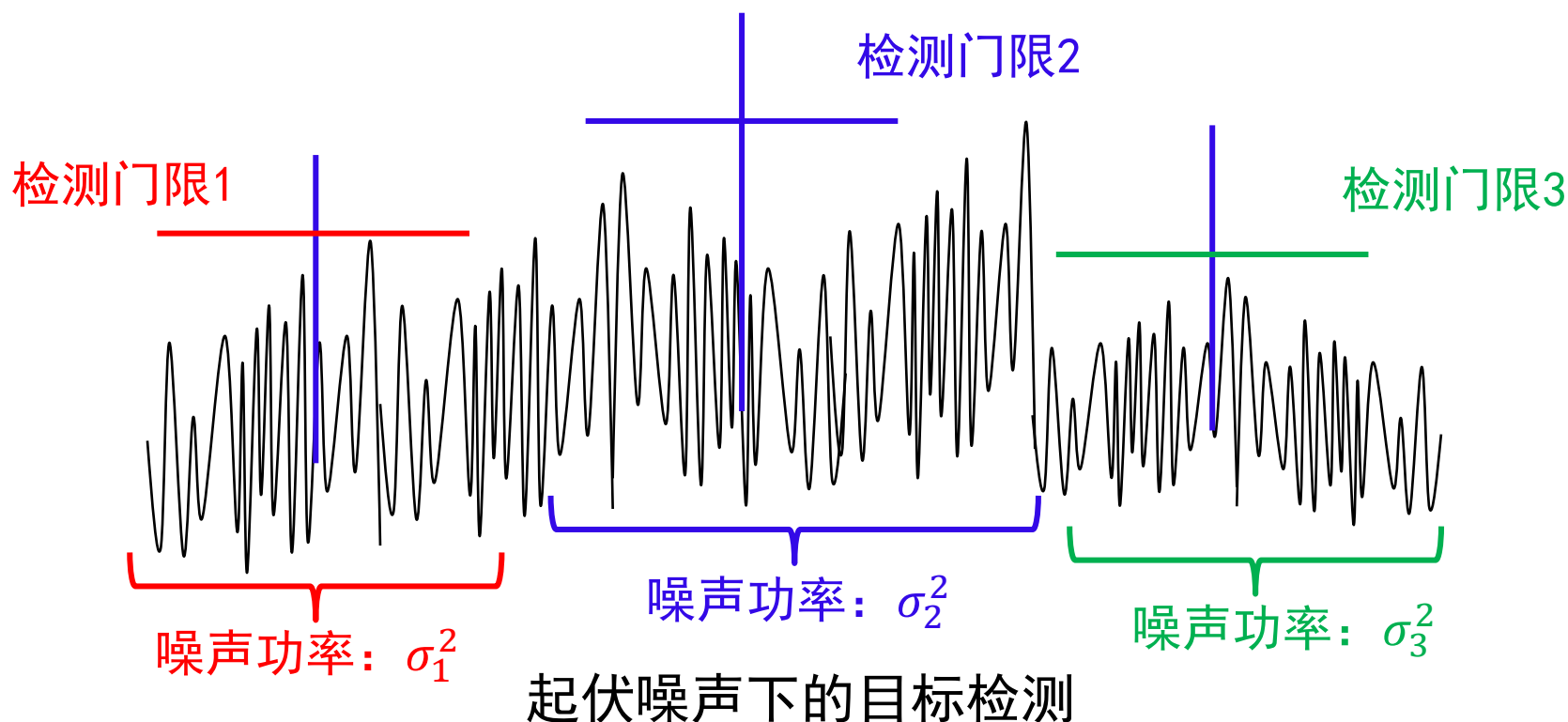


# 一、噪声中的雷达方程

## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

### □ 9.2 解决思路：恒虚警率处理

- ◆ 机理：利用局部统计特征估计起伏噪声的功率，  
在保持虚警率一定的条件下，自适应求解局部检测门限



# 一、噪声中的雷达方程

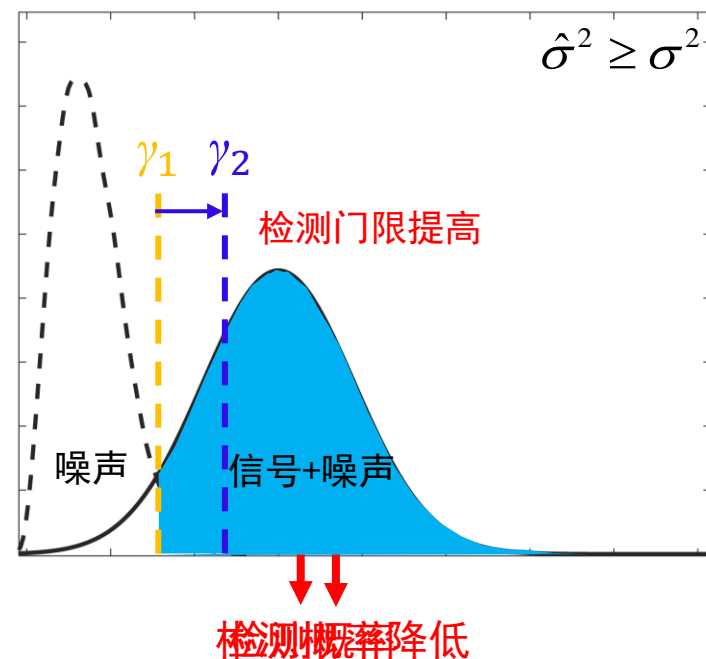
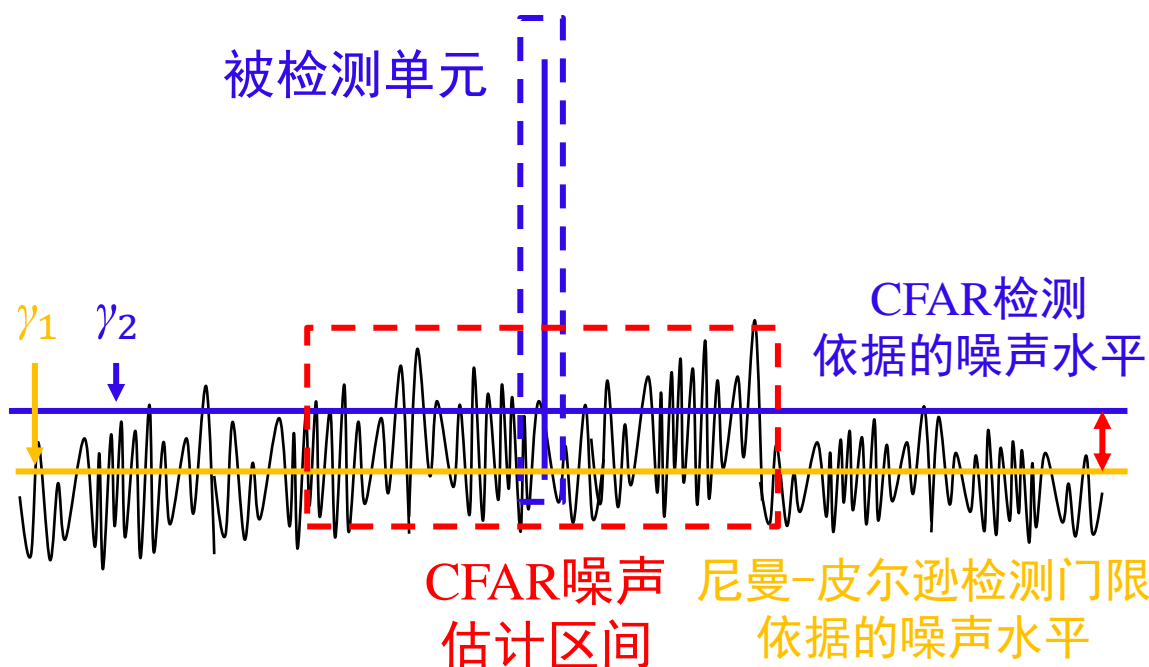
## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

### 8.2 解决思路：恒虚警率处理

◆ 噪声功率估计不可避免有偏差→检测性能损失→需更高信噪比

检测门限  $\gamma = \text{噪声功率 } \sigma^2 \times \text{门限因子 } \beta$

Case 1: 噪声功率估计偏大→检测门限升高→检测概率降低



# 一、噪声中的雷达方程

## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

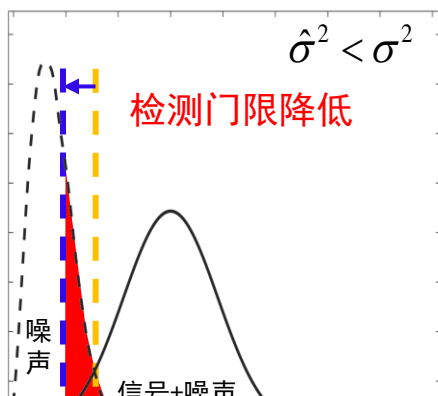
### 8.2 解决思路：恒虚警率处理

◆ 噪声功率估计不可避免有偏差→检测性能损失→需更高信噪比

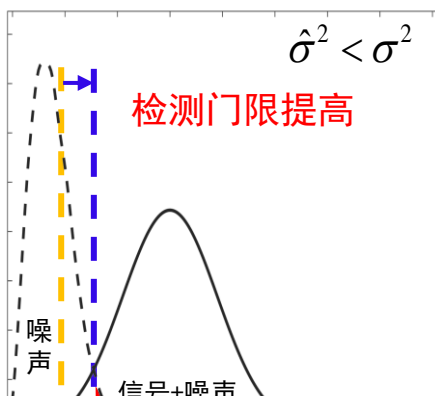
$$\text{检测门限 } \gamma = \text{噪声功率 } \sigma^2 \times \text{门限因子 } \beta$$

Case 2: 噪声功率估计偏小→检测门限降低→虚警概率升高

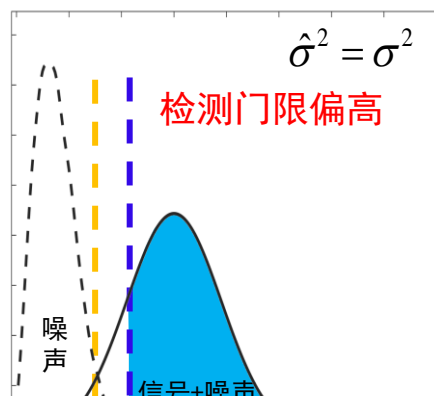
噪声 $\sigma^2$ 估计偏小  
→门限 $\gamma$ 降低



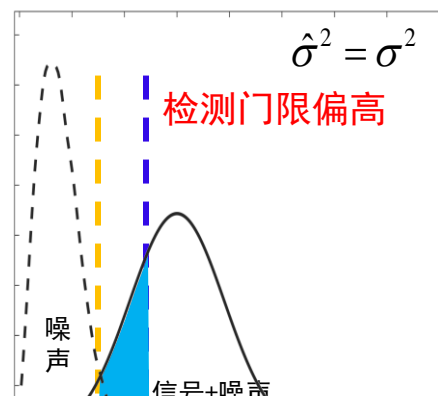
使虚警率恒定  
→提高门限因子 $\beta$



正确噪声估计+  
门限因子 $\beta$ 偏高  
→检测概率降低



CFAR检测会导致  
检测概率损失



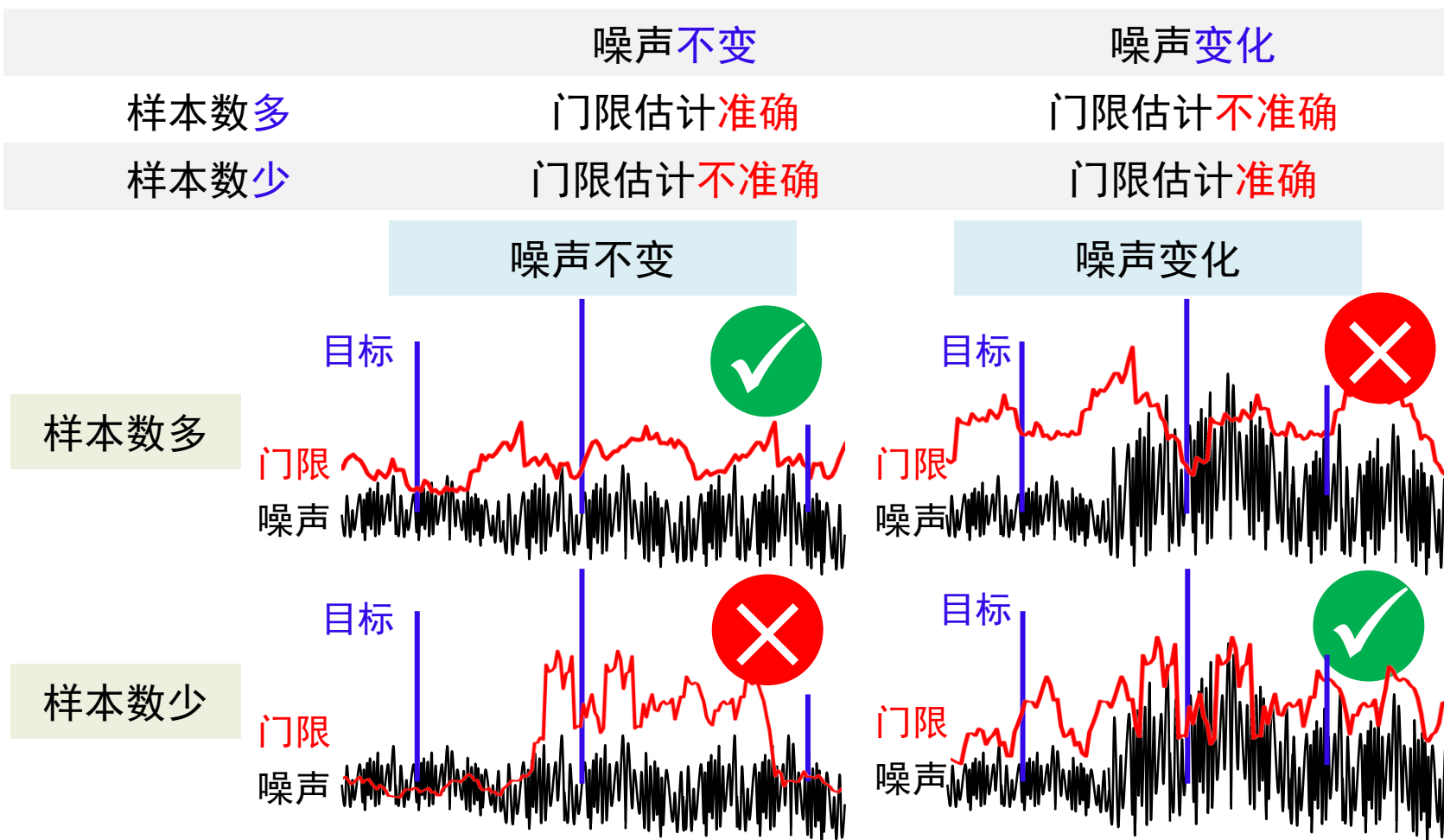
核心：精准估计门限值需要无限样本值  
任何估计都是有限样本，必然存在概率损失

# 一、噪声中的雷达方程

## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

### 8.2 解决思路：恒虚警率处理

◆ CA-CFAR检测效果受单元数多少与噪声变化规律影响

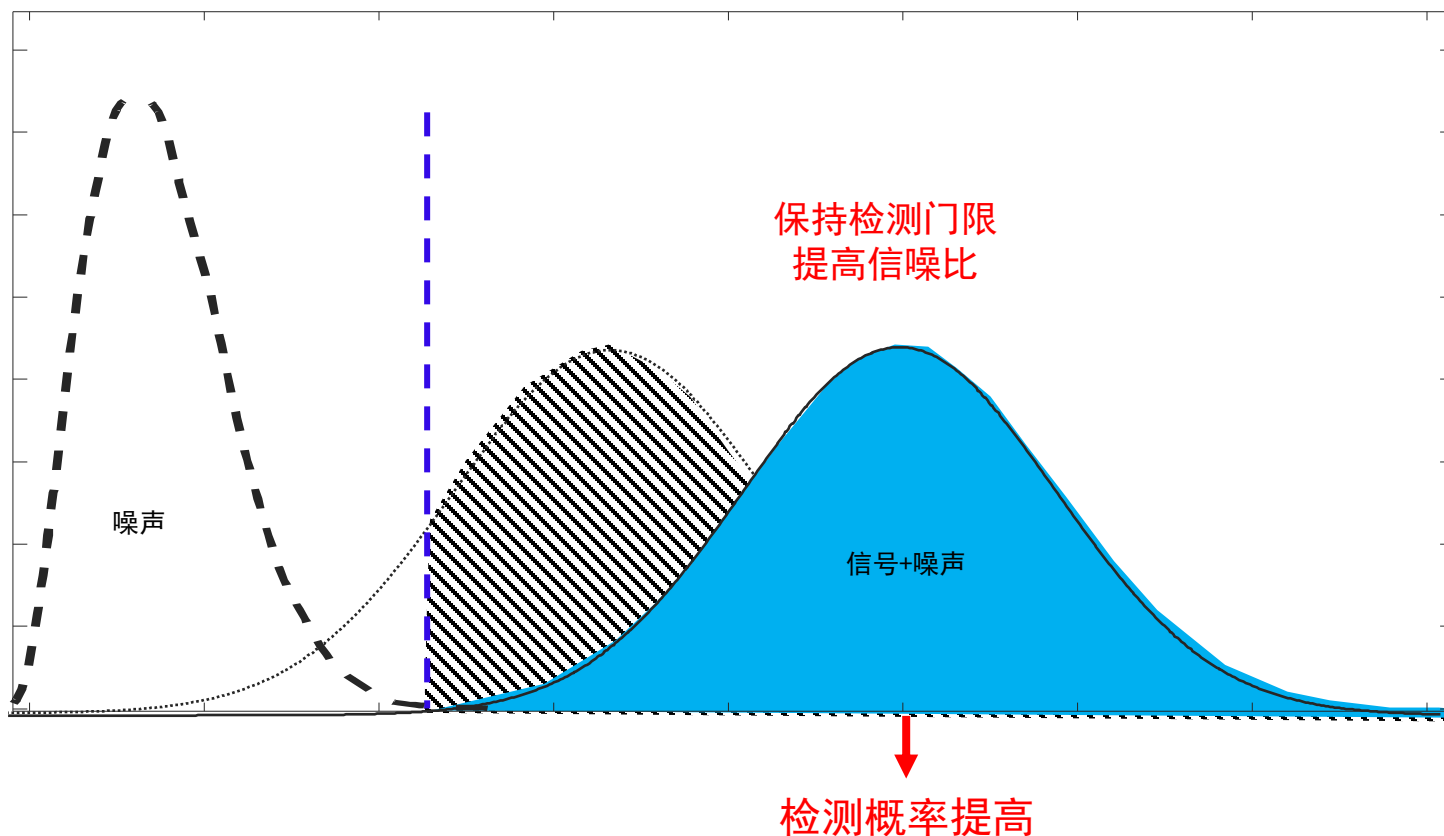


# 一、噪声中的雷达方程

## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

### □ 8.2 解决思路：恒虚警率处理

◆ 提高信噪比→提高检测概率

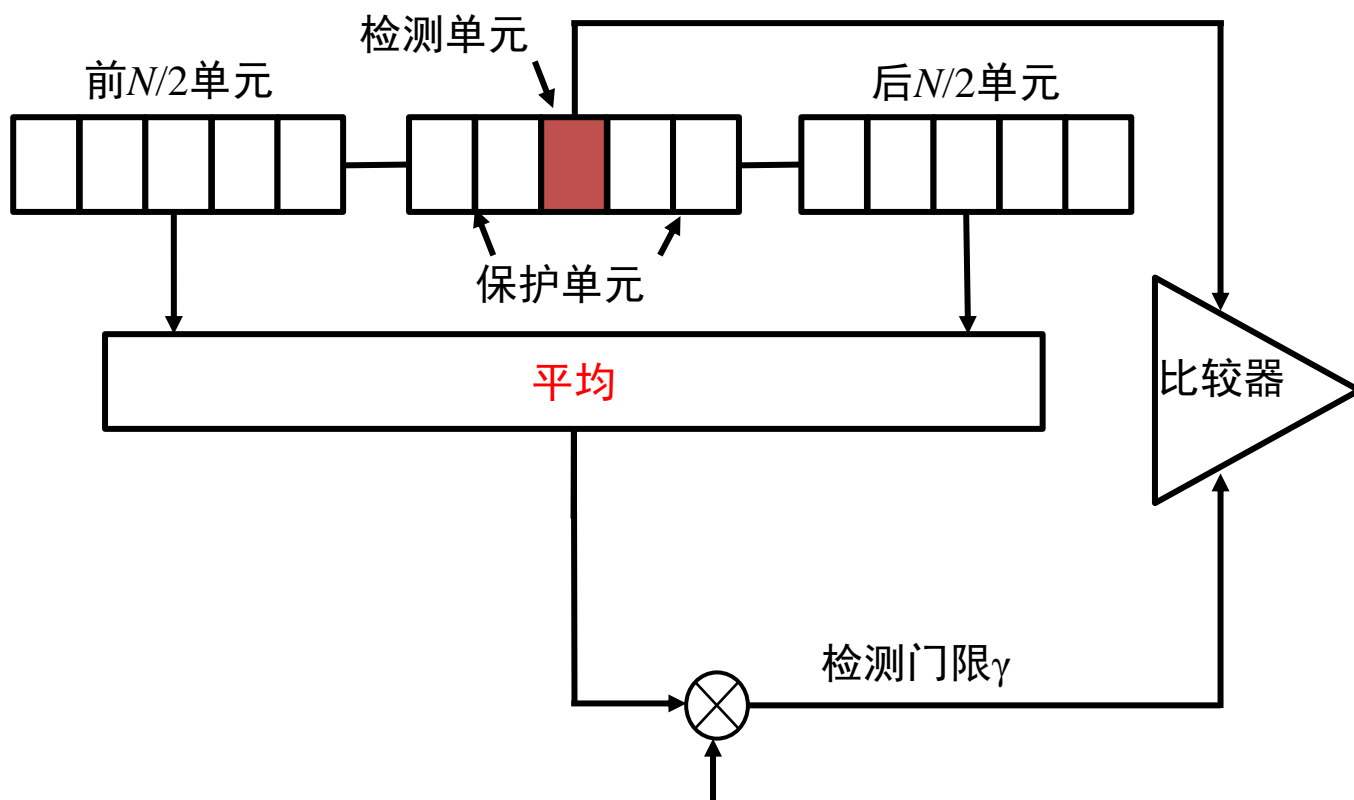


# 一、噪声中的雷达方程

## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

□ 8.3 噪声水平估计方法：（1）单元平均恒虚警（CA-CFAR）

◆ 思路：被检测单元除保护单元外前后 $N/2$ 单元能量平均值为噪声水平

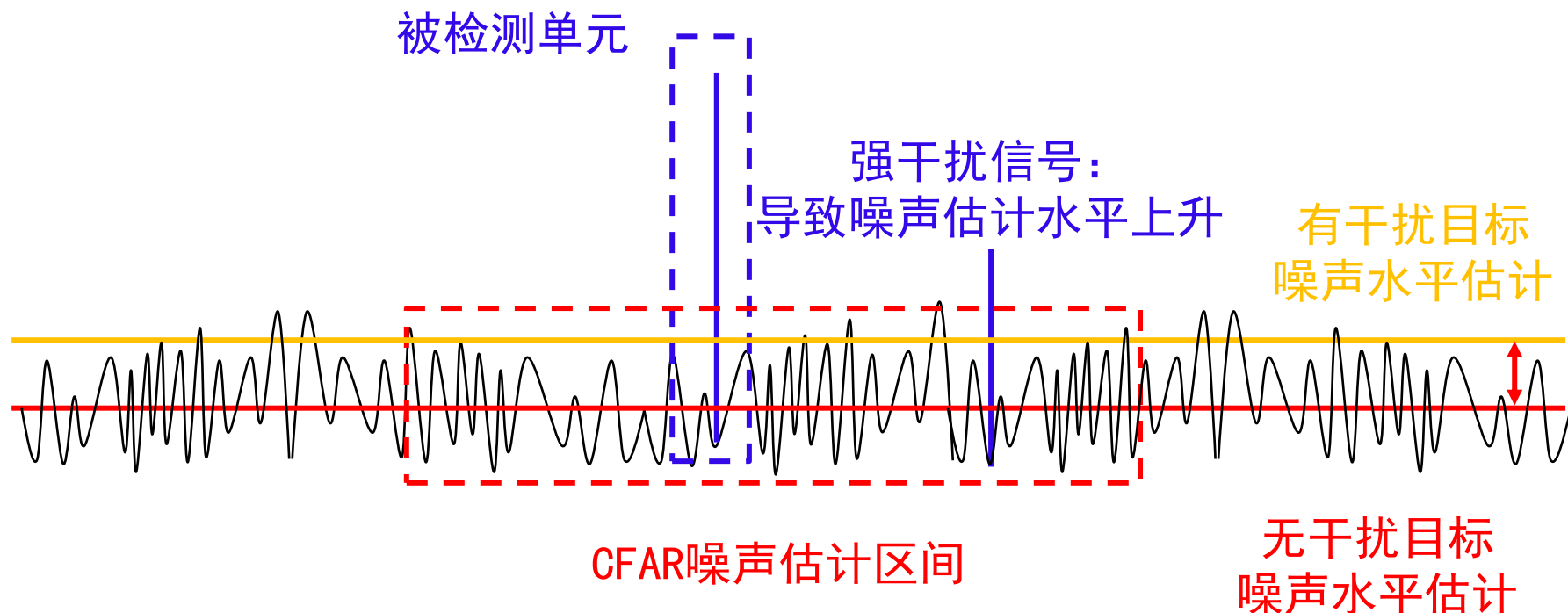


# 一、噪声中的雷达方程

## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

### 8.3 噪声水平估计方法：（2）有序统计恒虚警（OS-CFAR）

◆ 问题：干扰目标位于背景单元中时，检测性能下降



CA-CFAR不可行



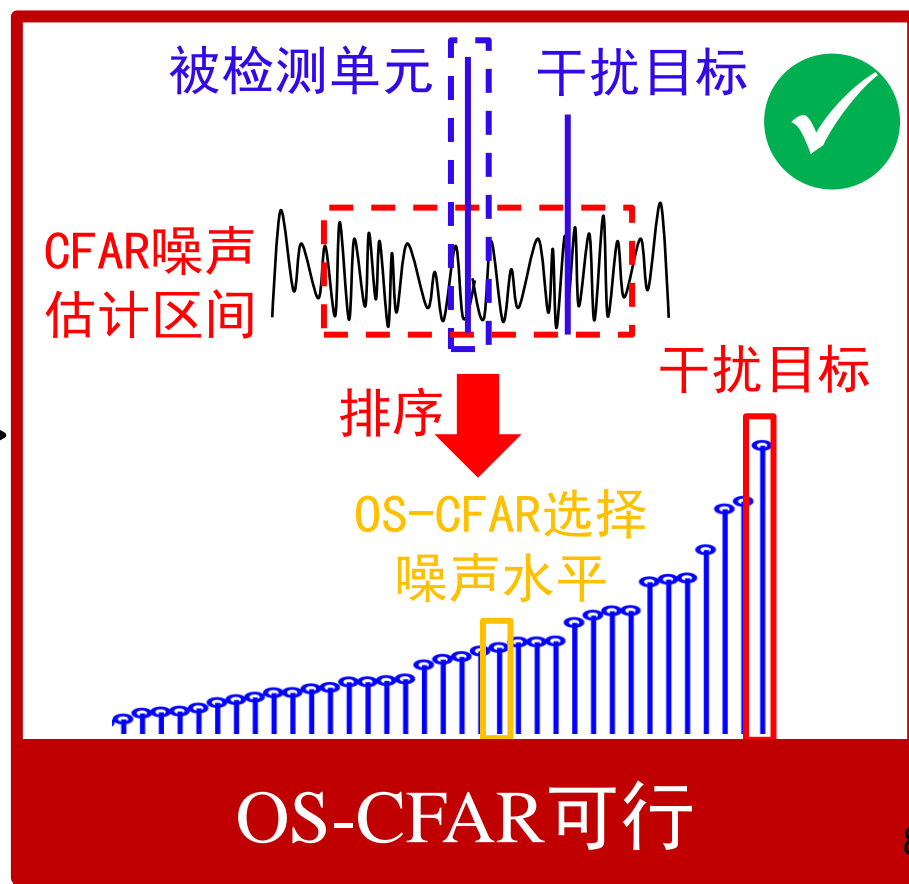
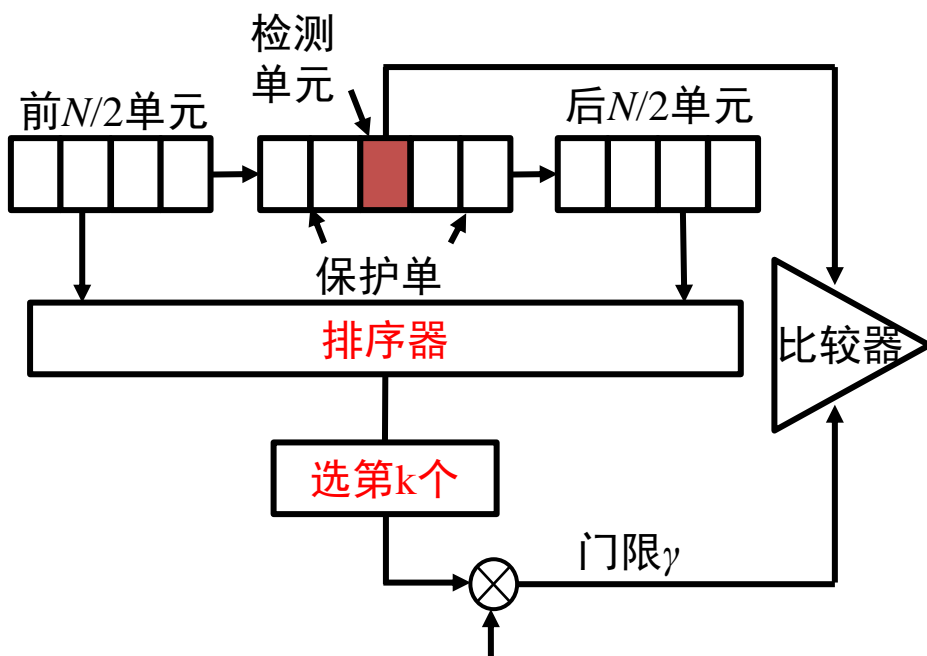
# 一、噪声中的雷达方程

## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

### 8.3 噪声水平估计方法：（2）有序统计恒虚警（OS-CFAR）

◆ 问题：干扰目标位于背景单元中时，检测性能下降

◆ 思路：将参考单元内样本值排序，选第 $k$ 个作为杂波功率估计值



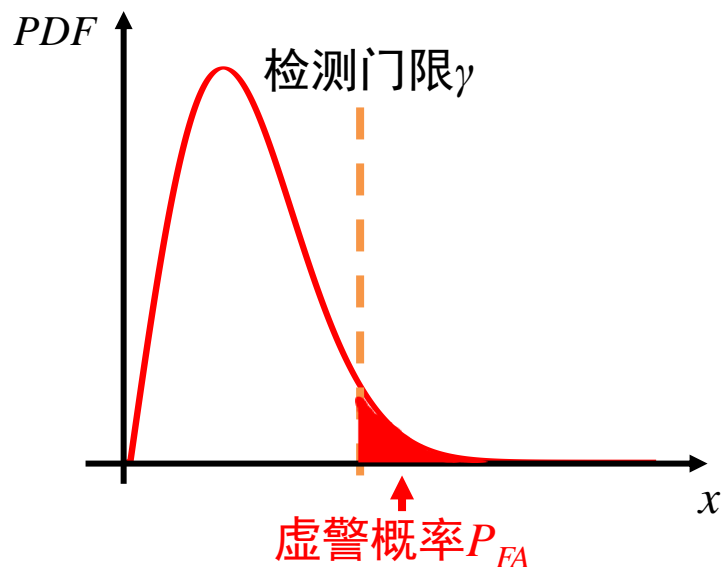


# 一、噪声中的雷达方程

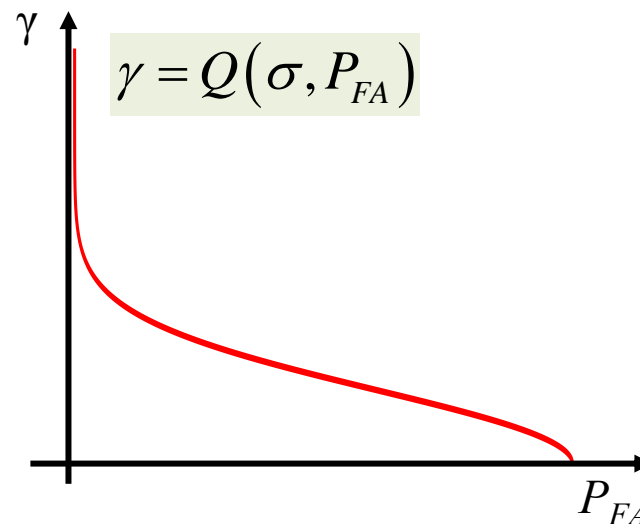
## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

□ 8.4 检测门限：利用噪声估计值与虚警概率联合确定

噪声概率密度



检测门限 vs 虚警率



检测门限

$$\gamma = Q(\sigma, P_{FA})$$

# 一、噪声中的雷达方程

## 8、雷达恒虚警率（CFAR）处理

### □ 小结

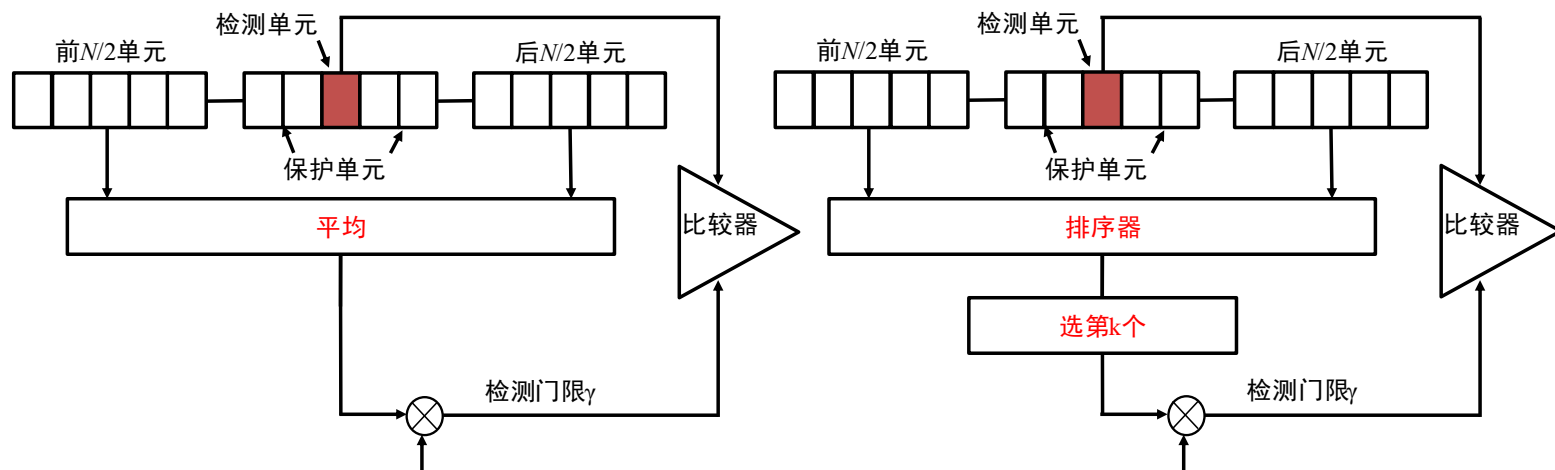
恒虚警检测

噪声未知检测：恒虚警率处理

噪声水平  
估计方法

单元平均恒虚警

有序统计恒虚警



# 习题

- 1、哪些影响因素决定了雷达作用距离？
- 2、影响雷达截面积的关键要素有哪些？
- 3、什么是噪声系数？
- 4、高斯白噪声有什么特点？
- 5、简述尼曼-皮尔逊准则？如何提高雷达检测性能？
- 6、 $N$ 个脉冲相参积累对信噪比的提升是多少？

谢谢