

雷达前沿技术

第四课、杂波中目标检测-MTI

民用雷达研究所 陈志扬



目 录



一、杂波中目标检测问题



二、脉冲雷达多普勒效应



三、MTI雷达的信号处理

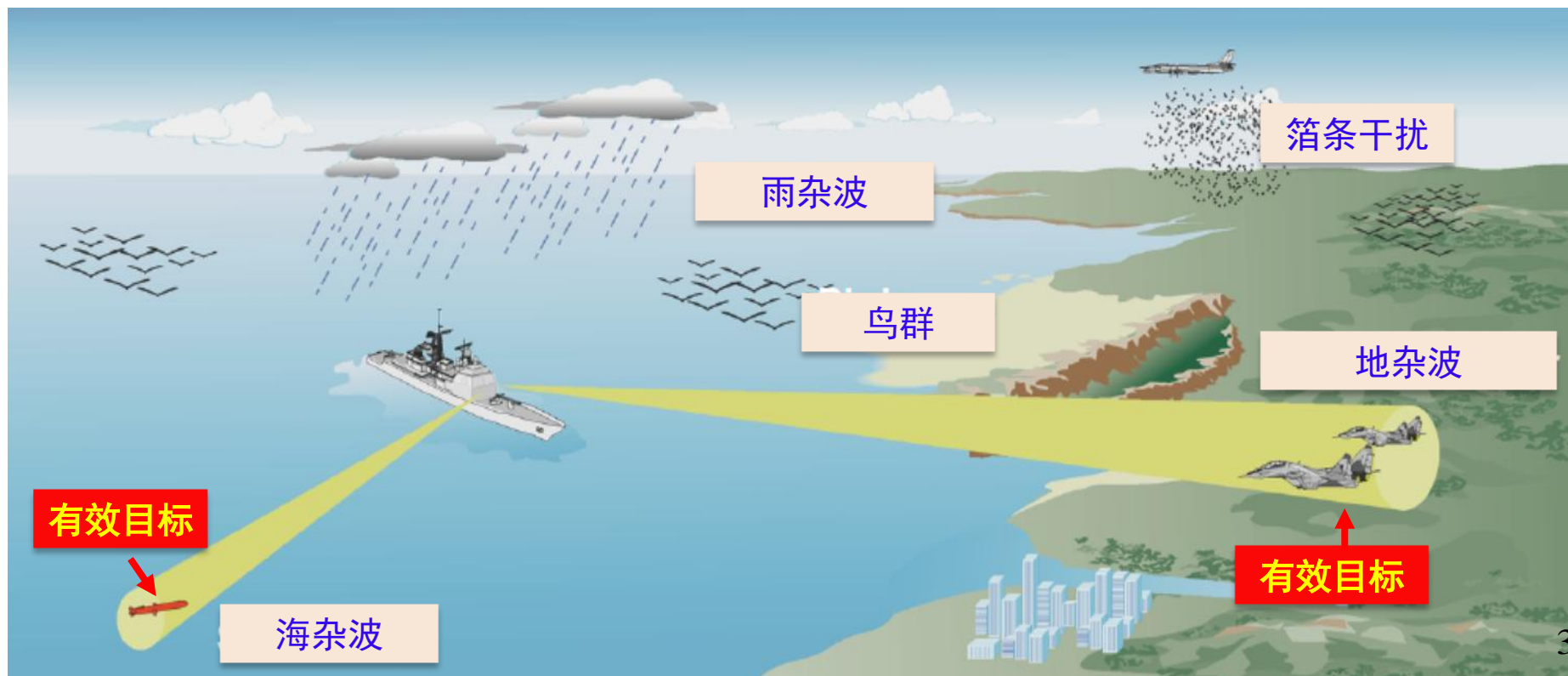


四、早期MTI雷达的实现

一、杂波中目标检测问题

1、基本概念

- ❑ 杂波（Clutter）：非检测目标的雷达回波——“不需要”的回波
- ❑ 与噪声的差别
 - ◆ 噪声主要由雷达接收机自己产生
 - ◆ 杂波由外部环境的物体反射产生



一、杂波中目标检测问题

1、基本概念

□ 杂波：相对概念

- ◆ 天气雷达：杂波为建筑物、车辆、飞行器、鸟
- ◆ 对空警戒雷达：杂波为云雨、鸟、地面建筑物、车辆等



气象雷达

目标



杂波



对空警戒雷达

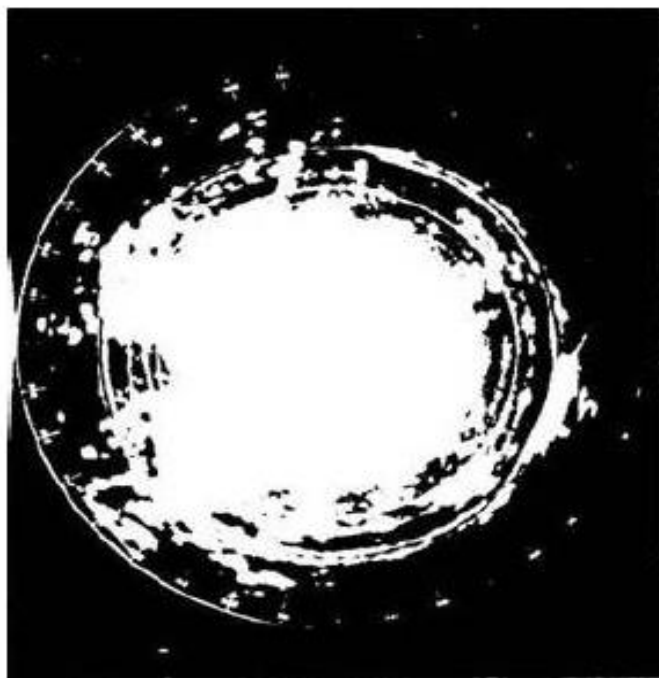
一、杂波中目标检测问题

1、基本概念

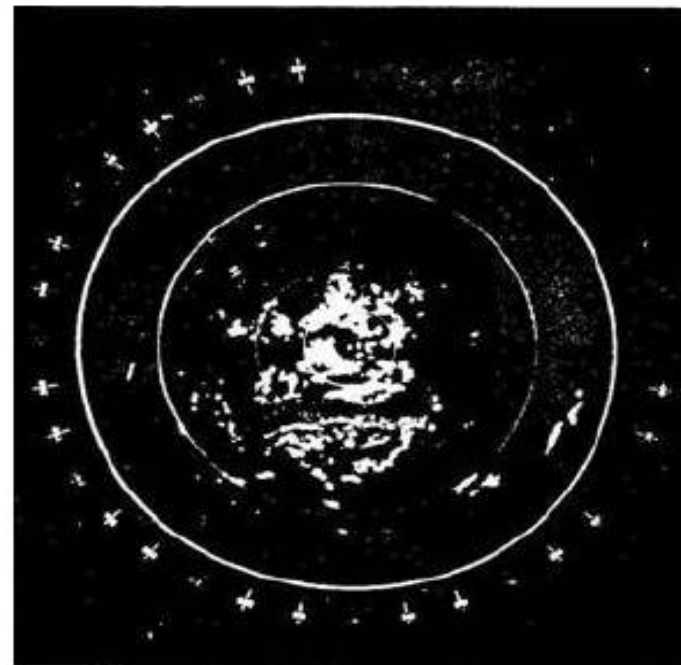
□ 杂波类型：地物杂波

◆ 植被、建筑物、车辆、山反射形成的雷达回波信号

Mountainous Region of Lakehead, Ontario, Canada
PPI Set for 30 nmi.



0 dB



60 dB

Courtesy of IEEE. Used with permission.

Source: Shrader, W. "Radar Technology Applied to Air Traffic Control," IEEE Transactions on Communications, Vol COM-21, No. 5, May 1973. © IEEE.

一、杂波中目标检测问题

1、基本概念

□ 杂波类型：海杂波

- ◆ 海面并非平静的水面
- ◆ 在高海况下，海杂波非常显著

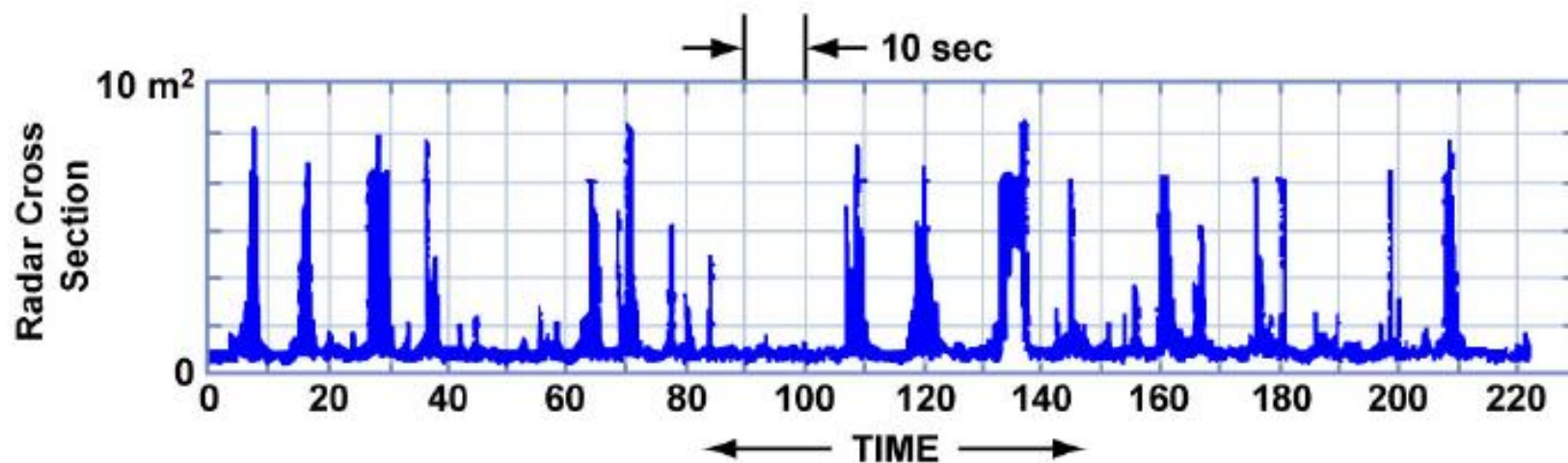


Figure by MIT OCW.

- Grazing angle 1.5 deg.
- Horizontal polarization

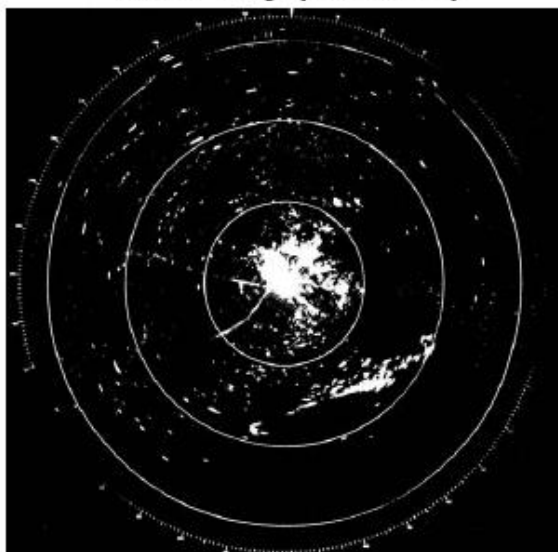
一、杂波中目标检测问题

1、基本概念

□ 杂波类型：云雨杂波

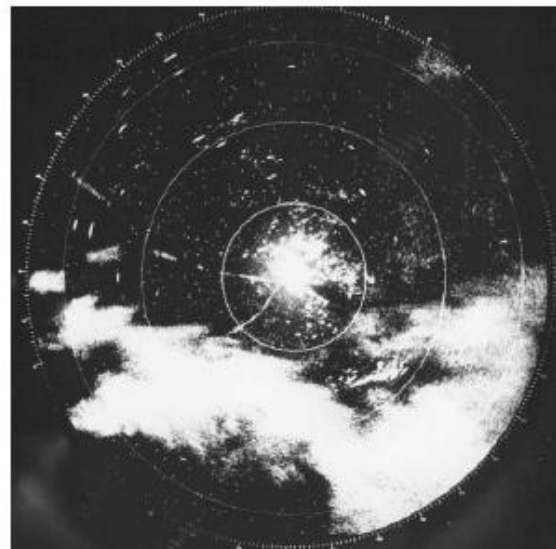
- ◆ 云雨运动形成运动杂波信号
- ◆ 杂波频谱宽度主要由扰动分量和风速切变分量引起

Clear Day (No Rain)



Airport Surveillance Radar
S Band
Detection Range - 60 nmi on
a 1 m² target

Day of Heavy Rain

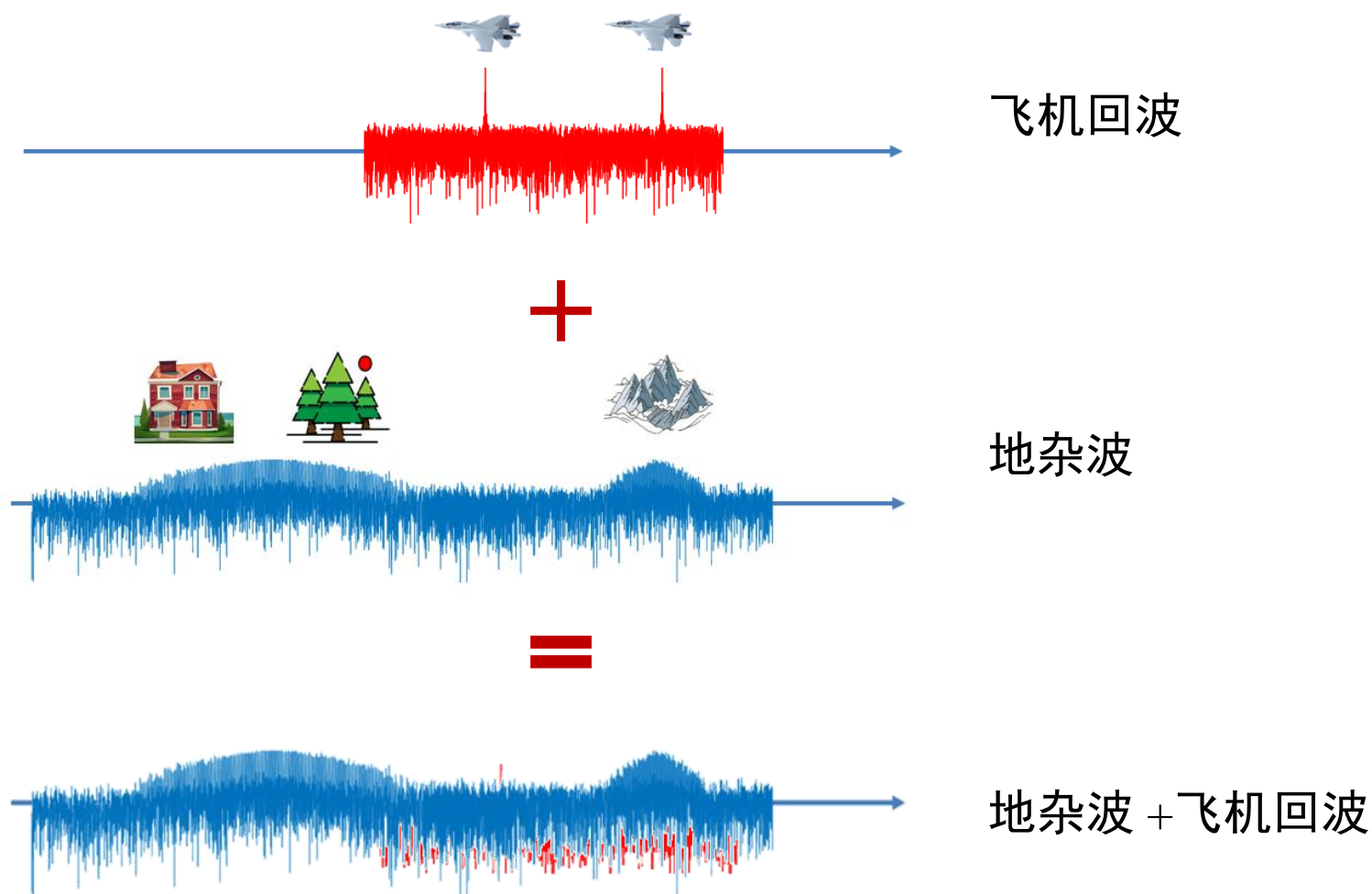


10 nmi Range Rings on PPI
Display
August 1975, FAA Test
Center
Atlantic City, New Jersey

一、杂波中目标检测问题

2、杂波对目标检测的影响

□ 杂波强度一般远远大于目标回波，导致杂波虚警、目标漏检



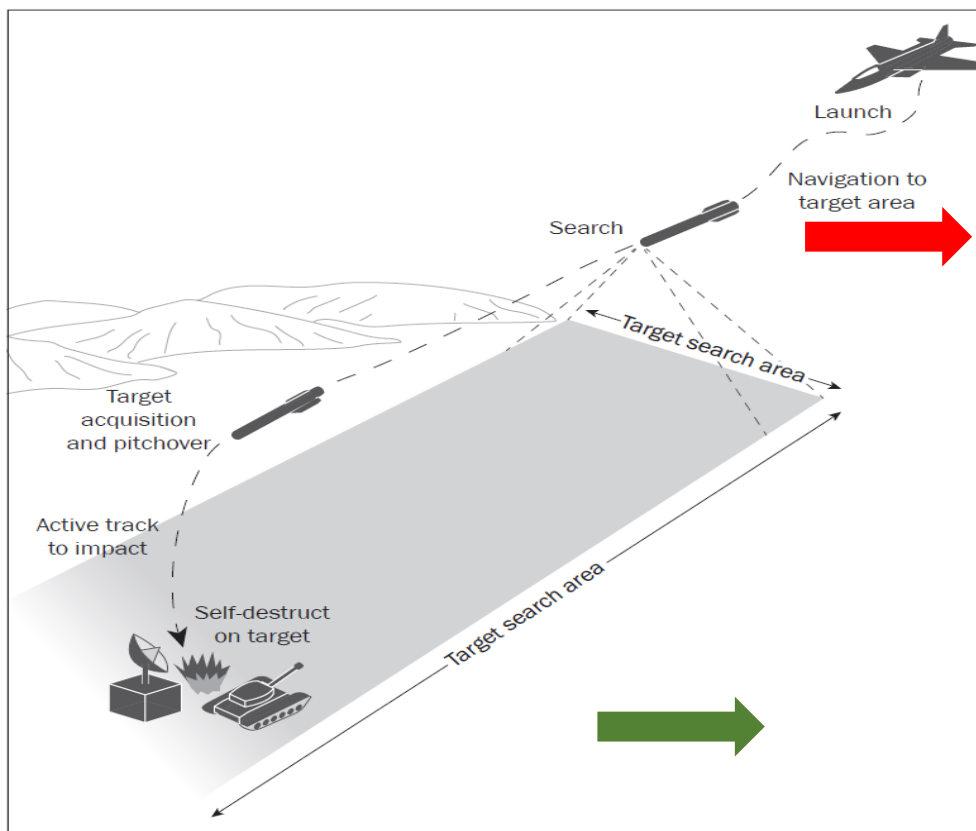
一、杂波中目标检测问题

2、杂波对目标检测的影响

□ 雷达对抗中杂波的利用：低空/超低空突防

◆ 雷达系统生存的四大威胁之一

（隐身技术、雷达对抗、反辐射导弹、低空/超低空突防）



一、杂波中目标检测问题

3、杂波中的雷达方程

3.1 杂波中信号检测：信杂比是核心

接收回波功率

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



接收杂波时，RCS变为

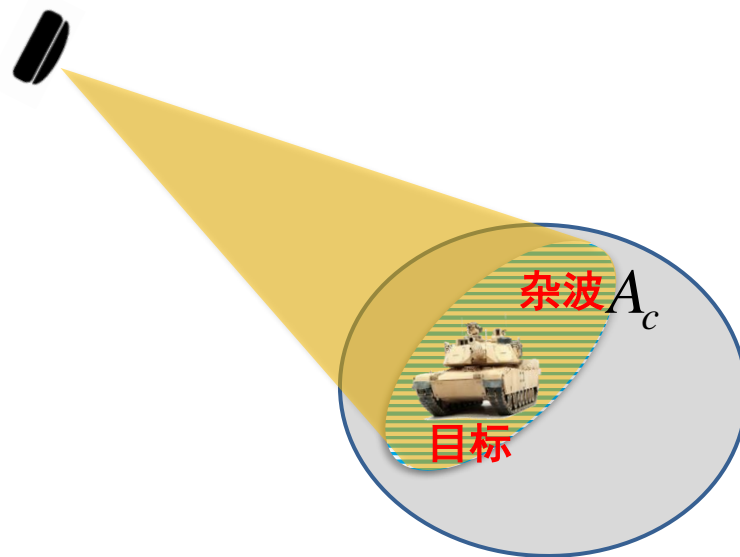
$$\sigma = \sigma_0 A_c$$

σ_0 : 杂波单位面积RCS
 A_c : 有效照射面积



杂波功率

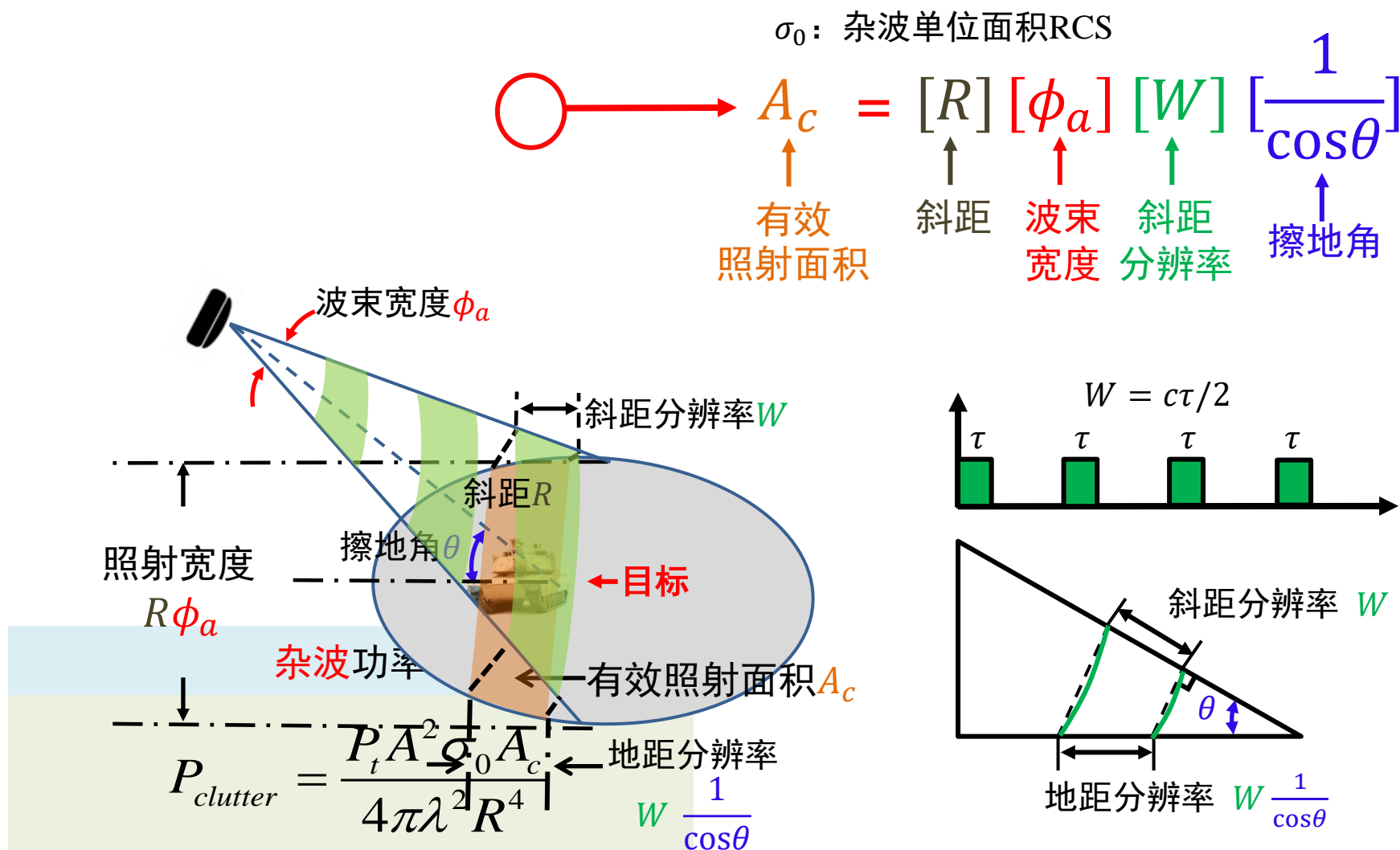
$$P_{clutter} = \frac{P_t A^2 \sigma_0 A_c}{4\pi\lambda^2 R^4}$$



一、杂波中目标检测问题

3、杂波中的雷达方程

3.1 杂波中信号检测：信杂比是核心



一、杂波中目标检测问题

3、杂波中的雷达方程

3.1 杂波中信号检测：信杂比是核心

杂波功率

$$P_{clutter} = \frac{P_t A^2 \sigma_0 A_c}{4\pi \lambda^2 R^4}$$

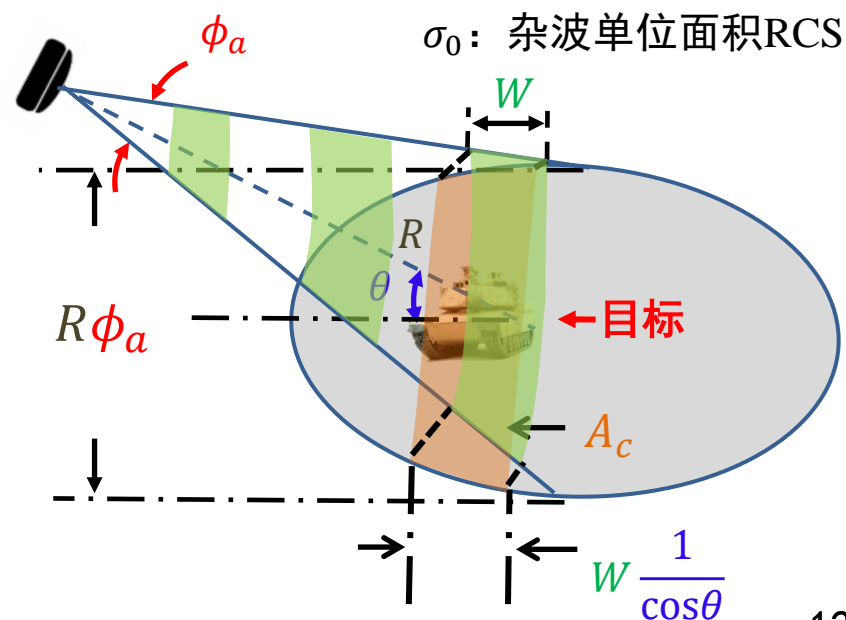
目标回波功率

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



接收信杂比

$$SCR = \frac{P_r}{P_{clutter}} = \frac{\sigma \cos \theta}{\sigma_0 R \phi_a W}$$



一、杂波中目标检测问题

3、杂波中的雷达方程

3.2 杂波中雷达最大作用距离

接收信杂比

$$SCR = \frac{P_r}{P_{\text{clutter}}} = \frac{\sigma \cos \theta}{\sigma_0 R \phi W}$$



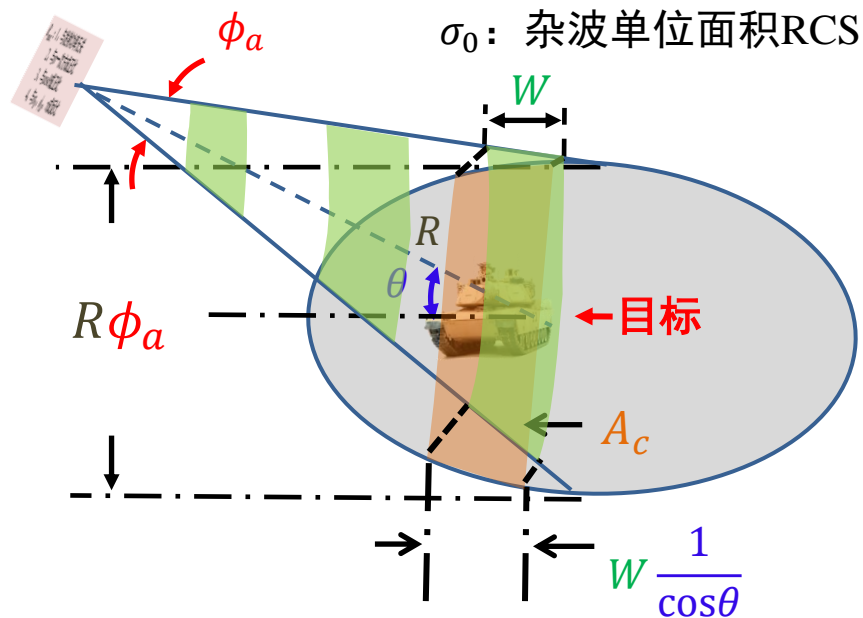
雷达作用距离

$$R_{\max} = \frac{\sigma}{\sigma_0} \cdot \frac{\cos \theta}{\phi_a W \cdot SCR_q}$$

SCR_q : 一定 P_{FA} 、 P_D 下的
最小可检测信杂比

$$R_{\max}:$$

- 1、与发射功率无关
- 2、与 σ 一次方成正比
- 3、与 $\cos\theta$ 成正比
- 4、与 σ_0 、 ϕ_a 、 W 成反比



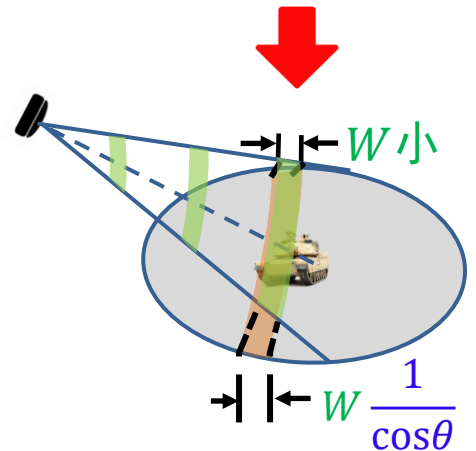
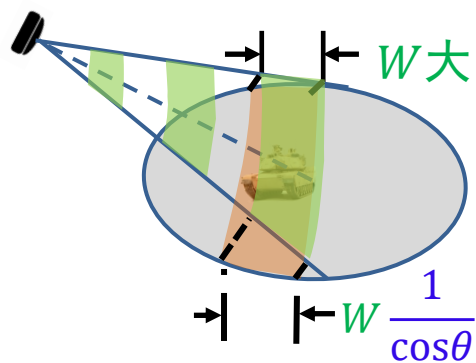
一、杂波中目标检测问题

3、杂波中的雷达方程

3.3 增加杂波中雷达作用距离方法（假定 σ_0 不变）

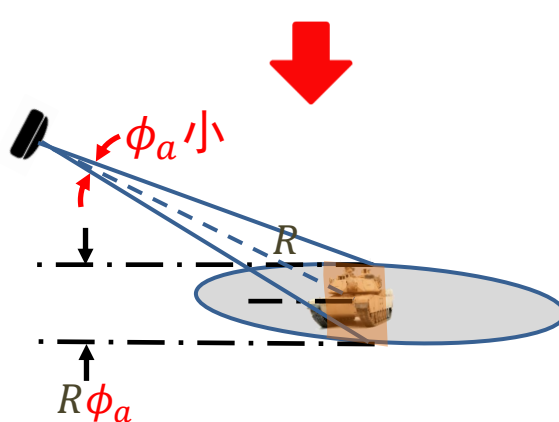
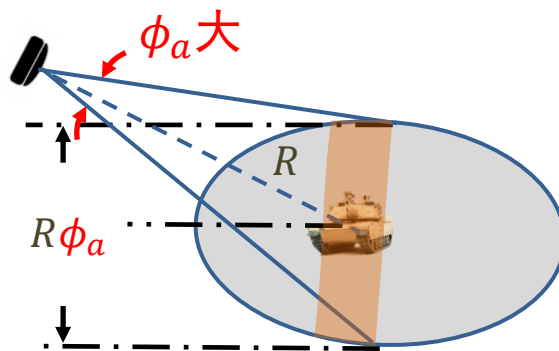
提高距离分辨

$W \downarrow \rightarrow R \uparrow$



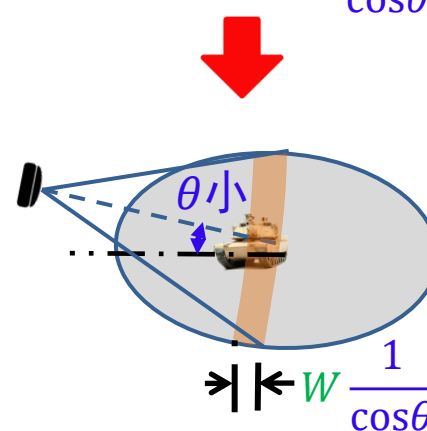
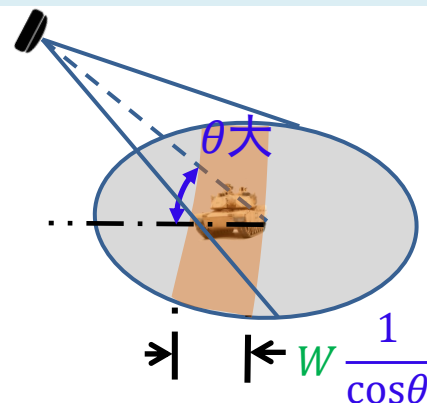
减小波束宽度

$\phi_a \downarrow \rightarrow R \uparrow$



减少擦地角

$\theta \downarrow \rightarrow R \uparrow$



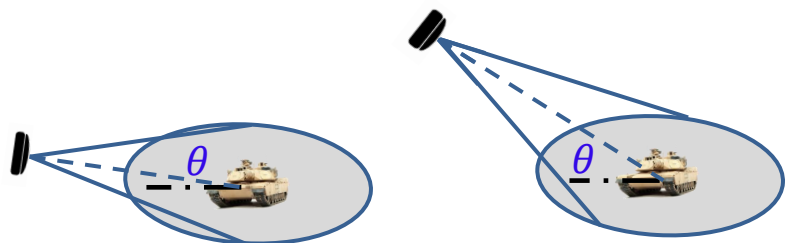
一、杂波中目标检测问题

3、杂波中的雷达方程

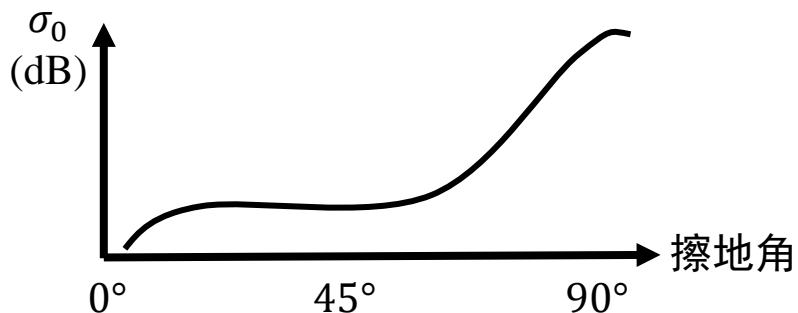
3.4 σ_0 对杂波中雷达最大作用距离的影响

◆ σ_0 的影响要素：擦地角、粗糙度

擦地角 $\theta \propto$ 杂波单位面积 σ_0



粗糙度 \propto 杂波单位面积 σ_0



来源：《雷达系统导论》

地形类型	σ_0 (L波段)
城市	-12.6 dB
山区	-17.5 dB
农田（低起伏）	-26.9 dB
森林（低起伏）	-41.4 dB

来源：《雷达系统导论》

一、杂波中目标检测问题

3、杂波中的雷达方程

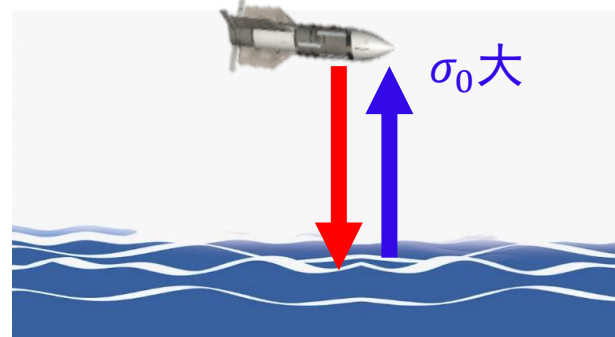
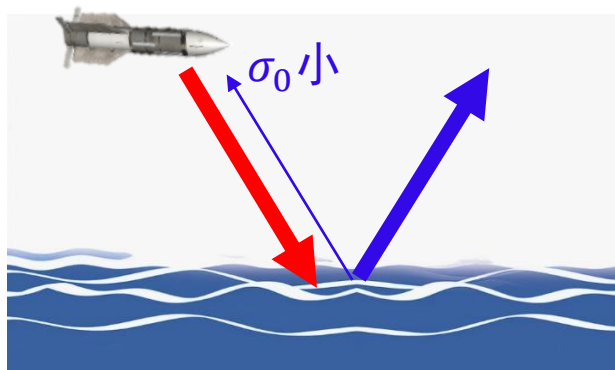
3.4 σ_0 对杂波中雷达最大作用距离的影响

◆ 例：弹载雷达对海观测

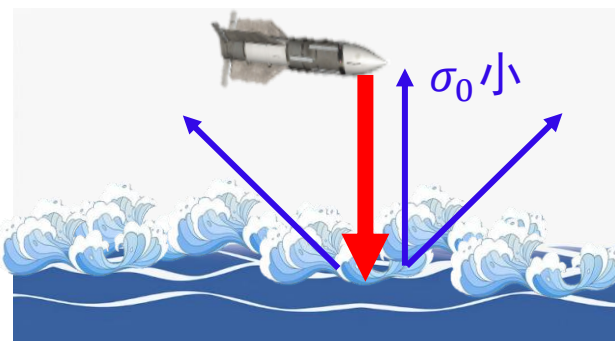
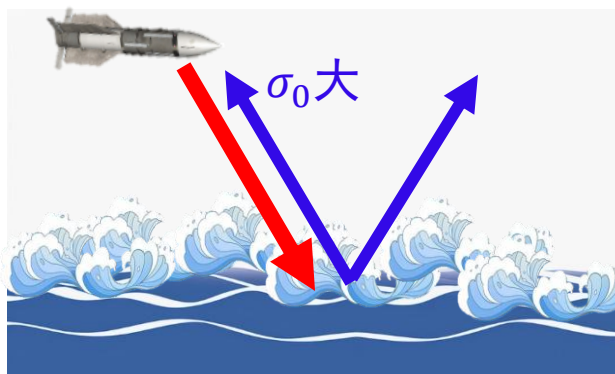
侧视

下视

海浪低
(平滑)



海浪高
(粗糙)

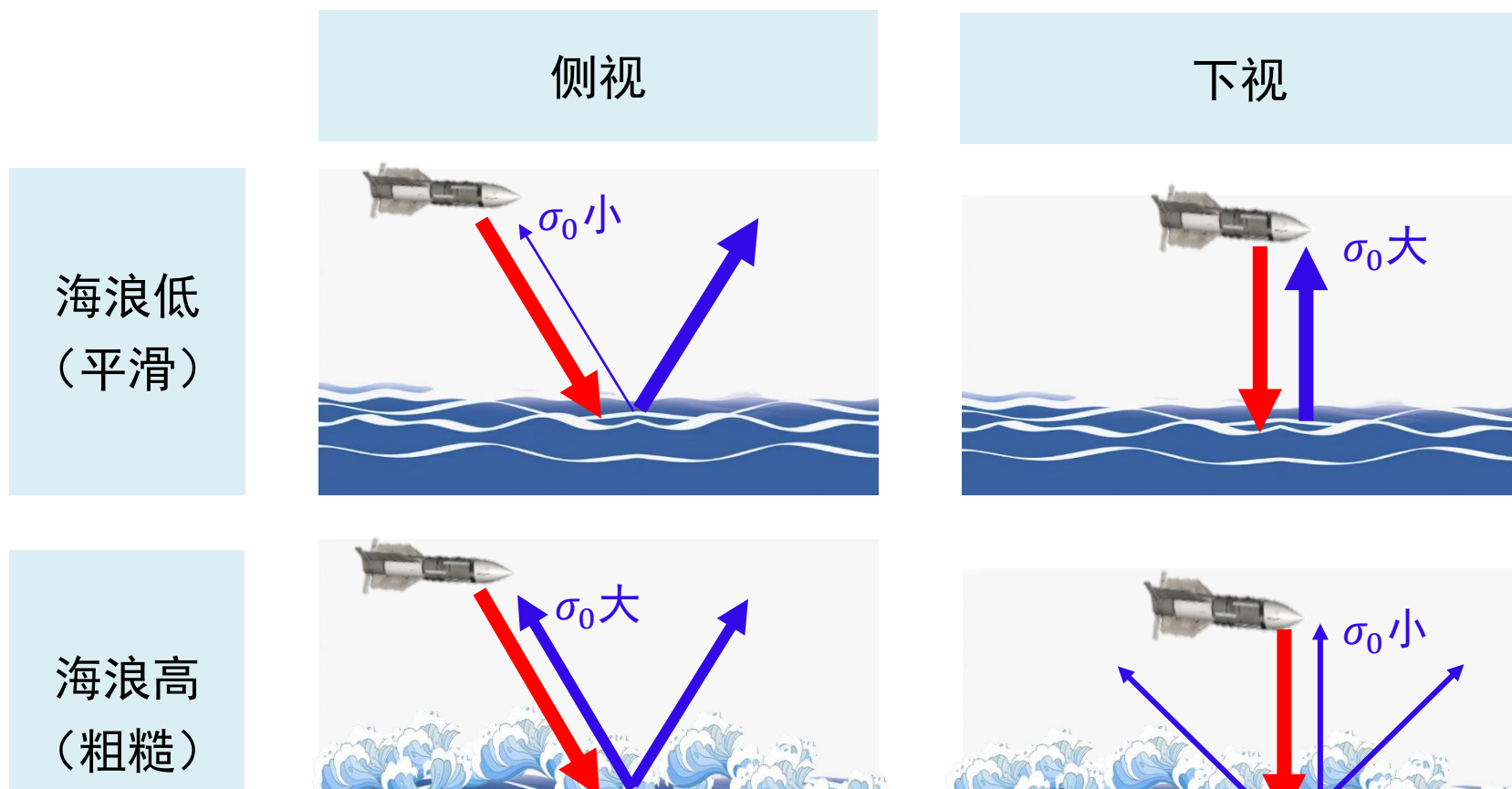


一、杂波中目标检测问题

3、杂波中的雷达方程

3.4 σ_0 对杂波中雷达最大作用距离的影响

◆ 例：弹载雷达对海观测



斜视攻击：高海情难度大；垂直攻击：低海情难度大

一、杂波中目标检测问题

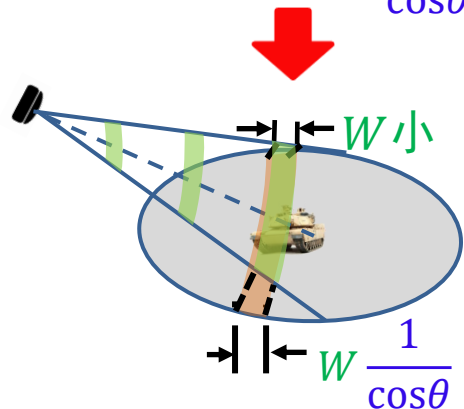
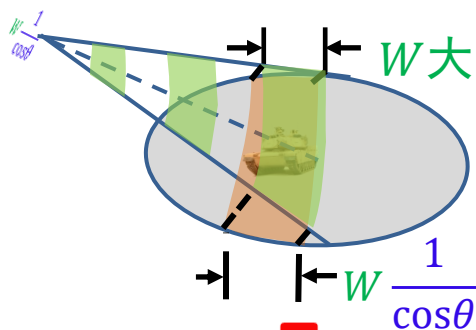
4、杂波抑制的解决思路

□ 静止目标：提高信杂比

$$SCR = \frac{\sigma}{\sigma_0} \cdot \frac{\cos \theta}{\phi_a W \cdot R}$$

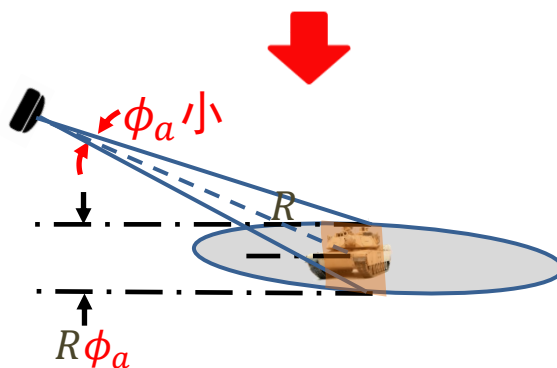
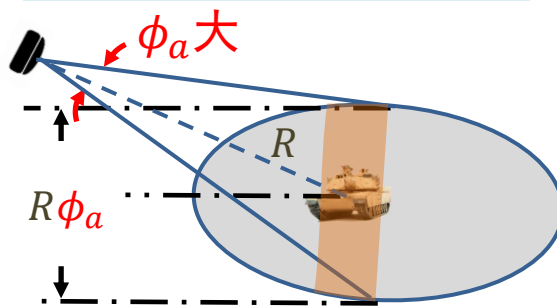
提高距离分辨

$W \downarrow \rightarrow R \uparrow$



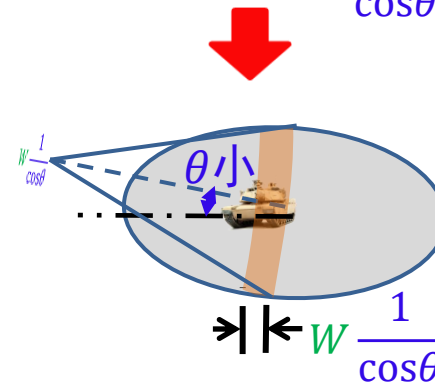
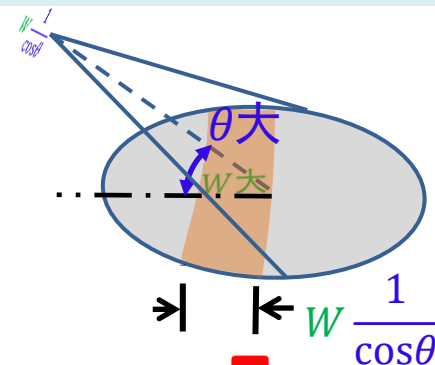
减小波束宽度

$\phi_a \downarrow \rightarrow R \uparrow$



减少擦地角

$\theta \downarrow \rightarrow R \uparrow$

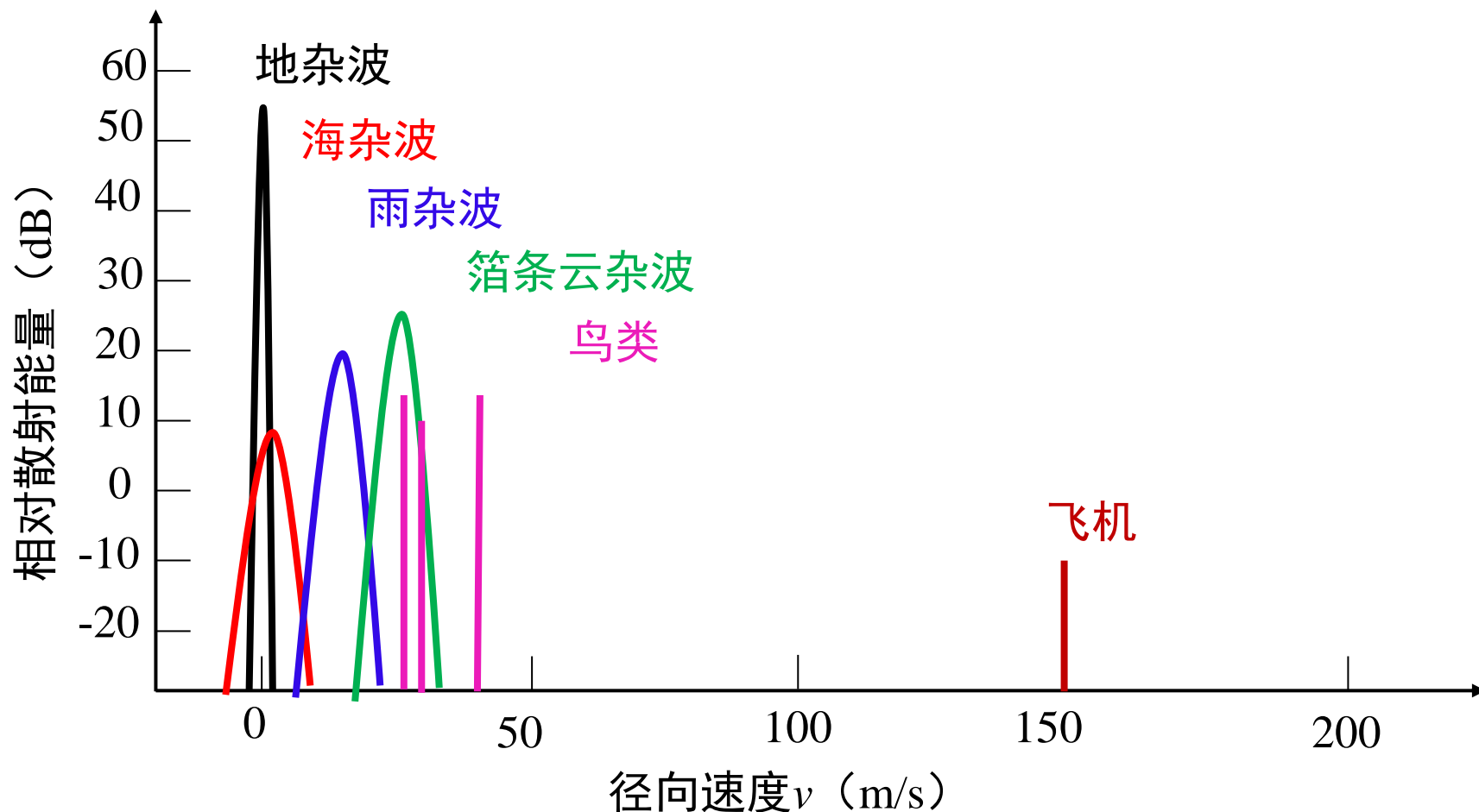


一、杂波中目标检测问题

4、杂波抑制的解决思路

运动目标：

◆ 基于杂波与目标运动差异，利用多普勒效应，滤除杂波



目 录

一、杂波中目标检测问题

二、脉冲雷达多普勒效应

三、MTI雷达的信号处理

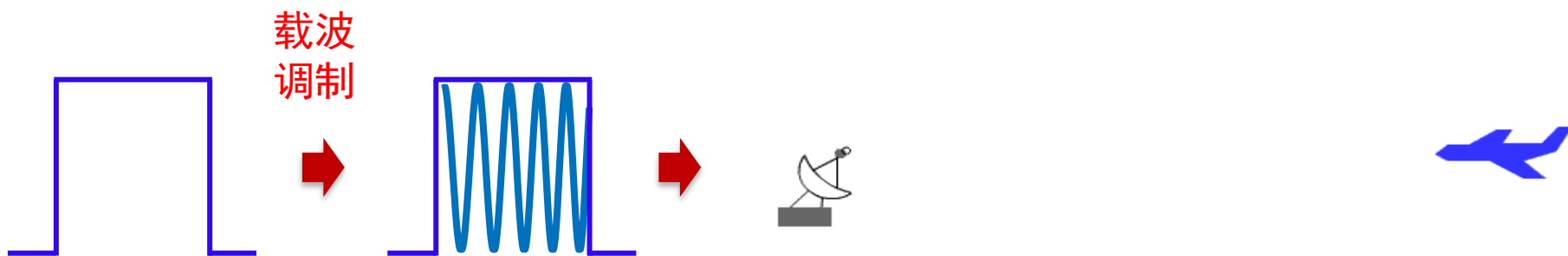
四、早期MTI雷达的实现

二、脉冲雷达多普勒效应

1、多普勒效应

□ 目标运动导致载波频率发生的变化，称为多普勒

$$\text{多普勒} \leftarrow \textcircled{f_d} = \frac{2\textcircled{V_r}}{\lambda} \rightarrow \text{目标径向速度}$$



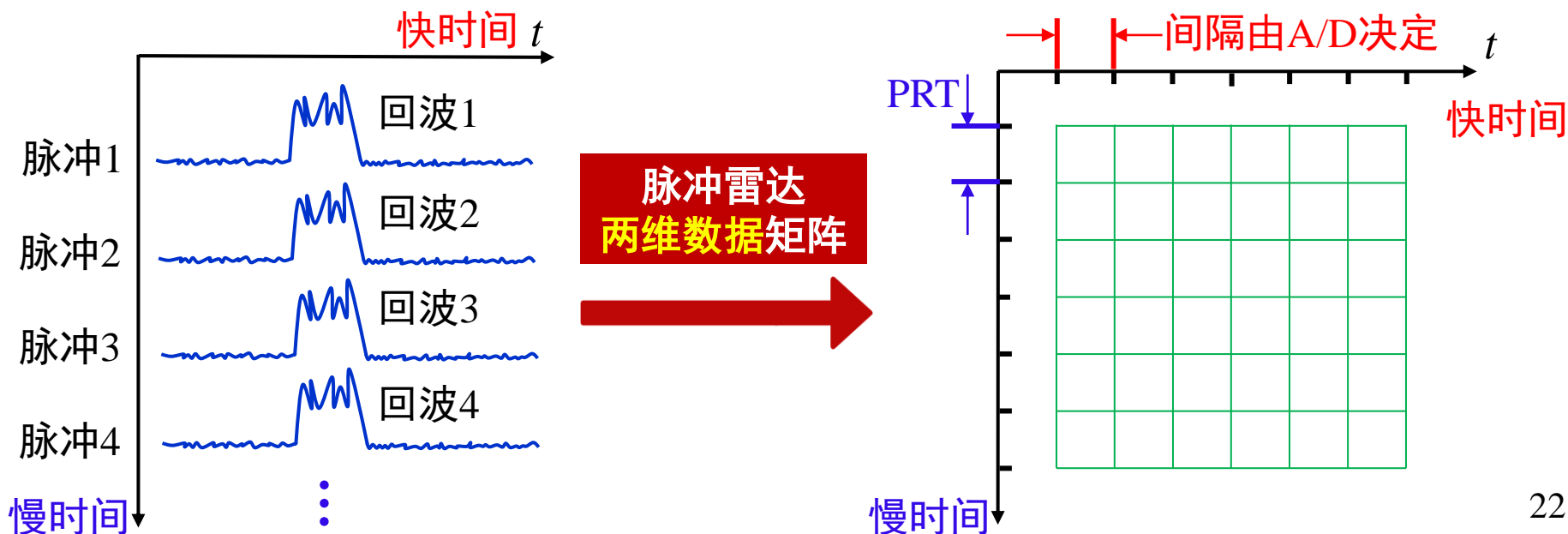
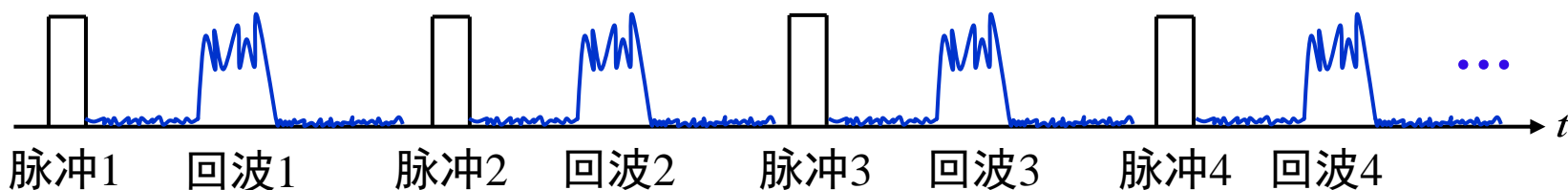
二、脉冲雷达多普勒效应

1、多普勒效应

□ 脉冲雷达：发射和接收周期性脉冲

◆ **快时间**：一个脉冲重复时间（PRT）内的时间轴

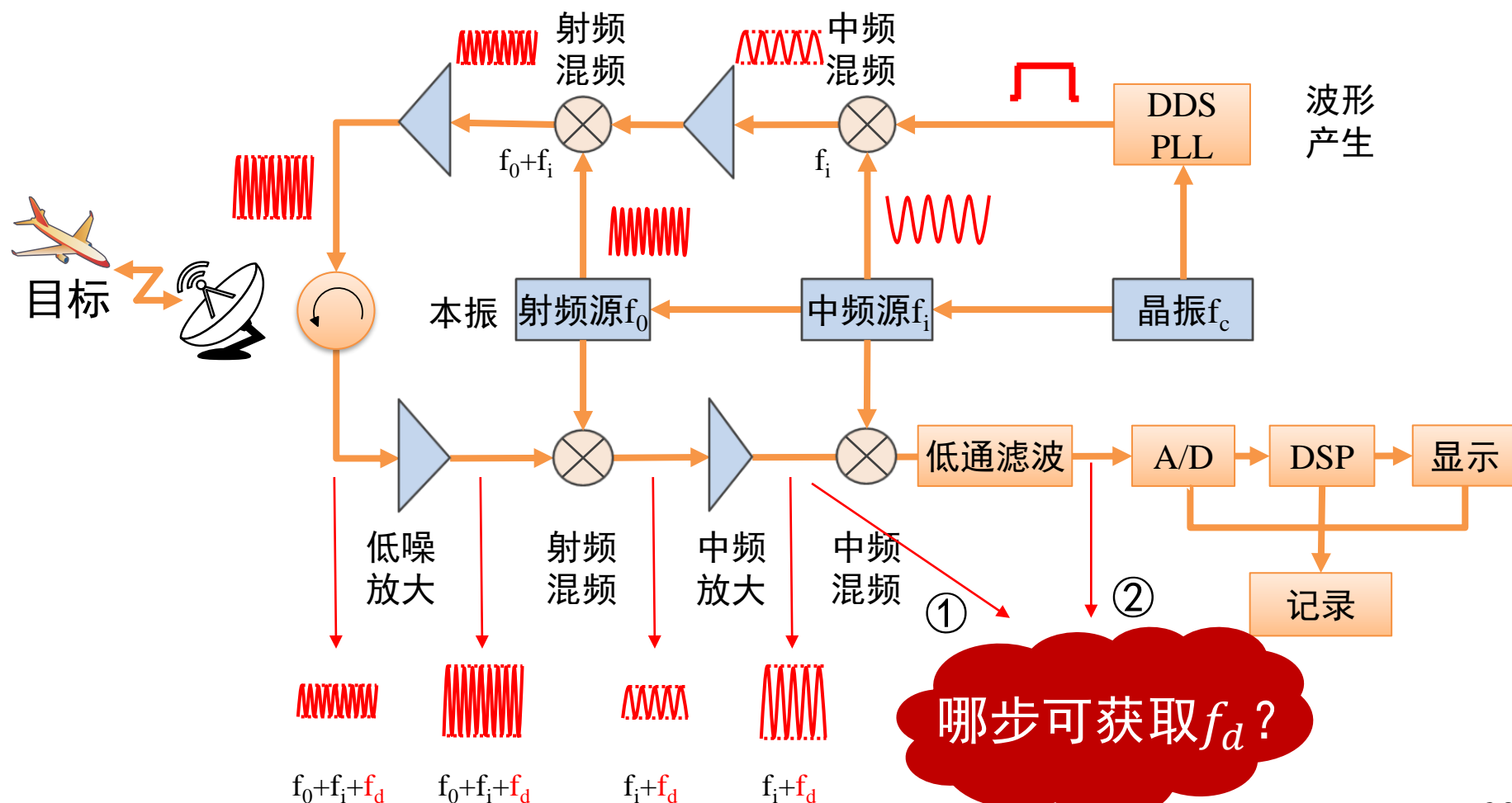
◆ **慢时间**：多个PRT间的时间轴，按照**PRT采样**离散化



二、脉冲雷达多普勒效应

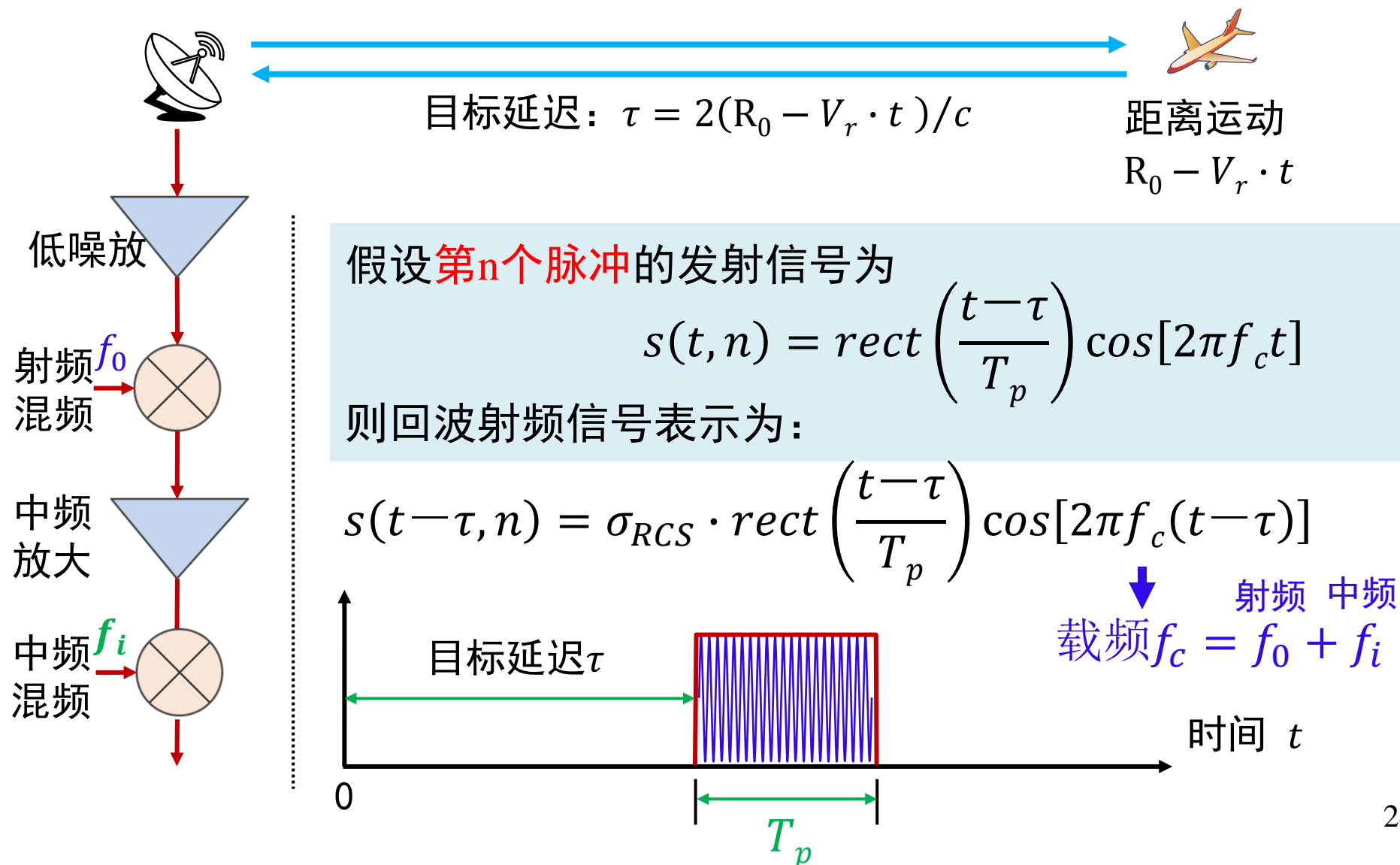
1、多普勒效应

□ 回顾：雷达发射与接收信号链路



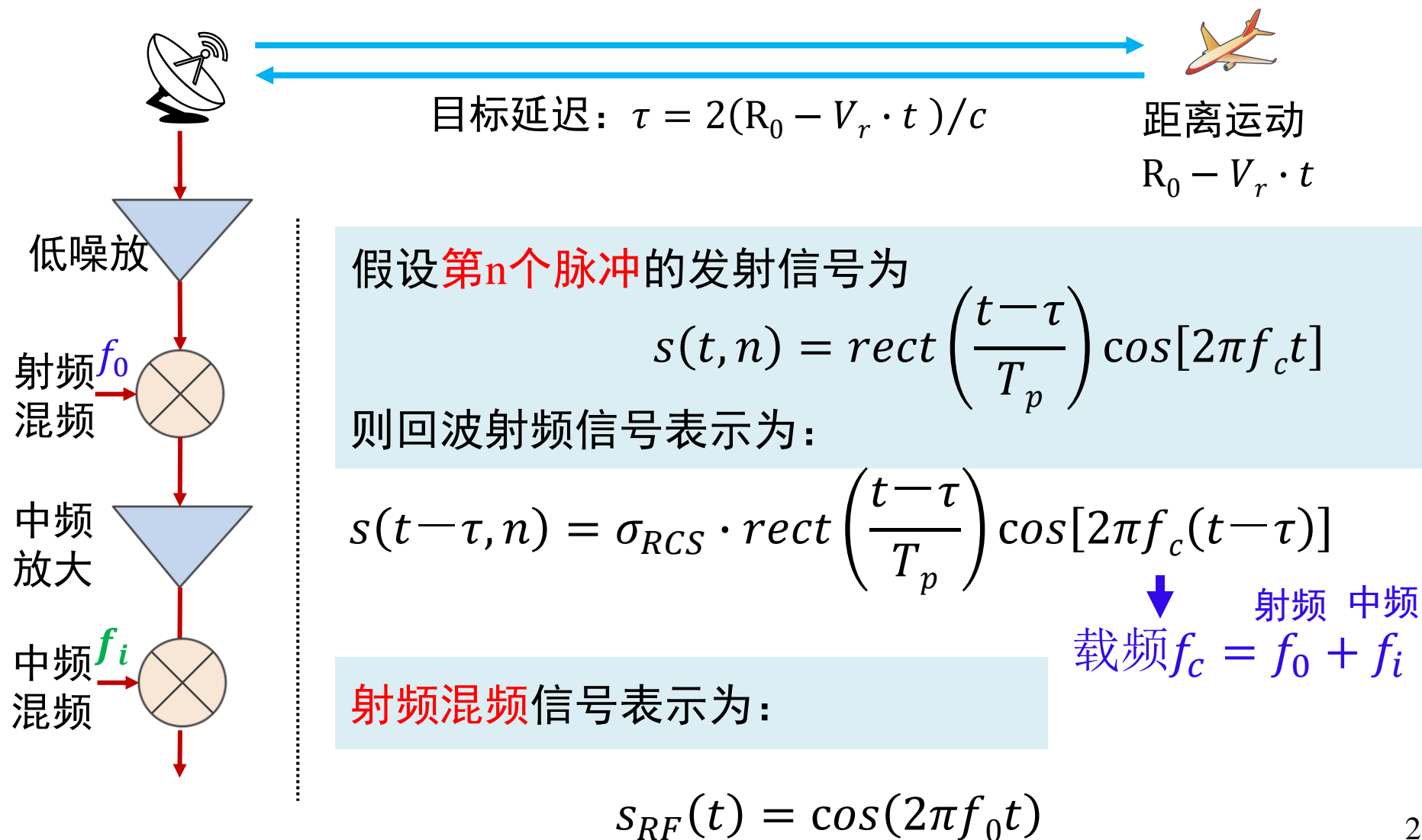
二、脉冲雷达多普勒效应

1、多普勒效应



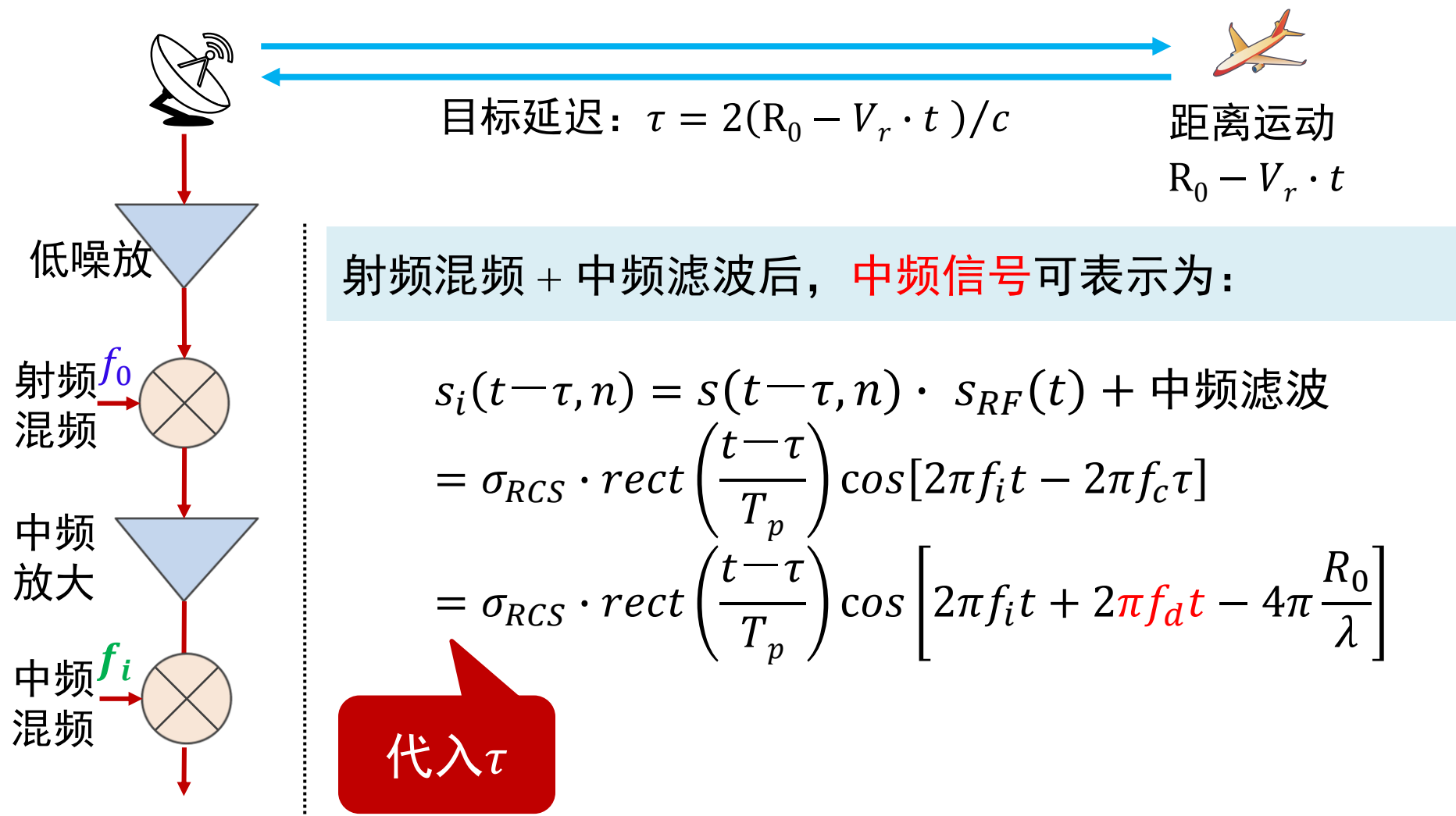
二、脉冲雷达多普勒效应

1、多普勒效应



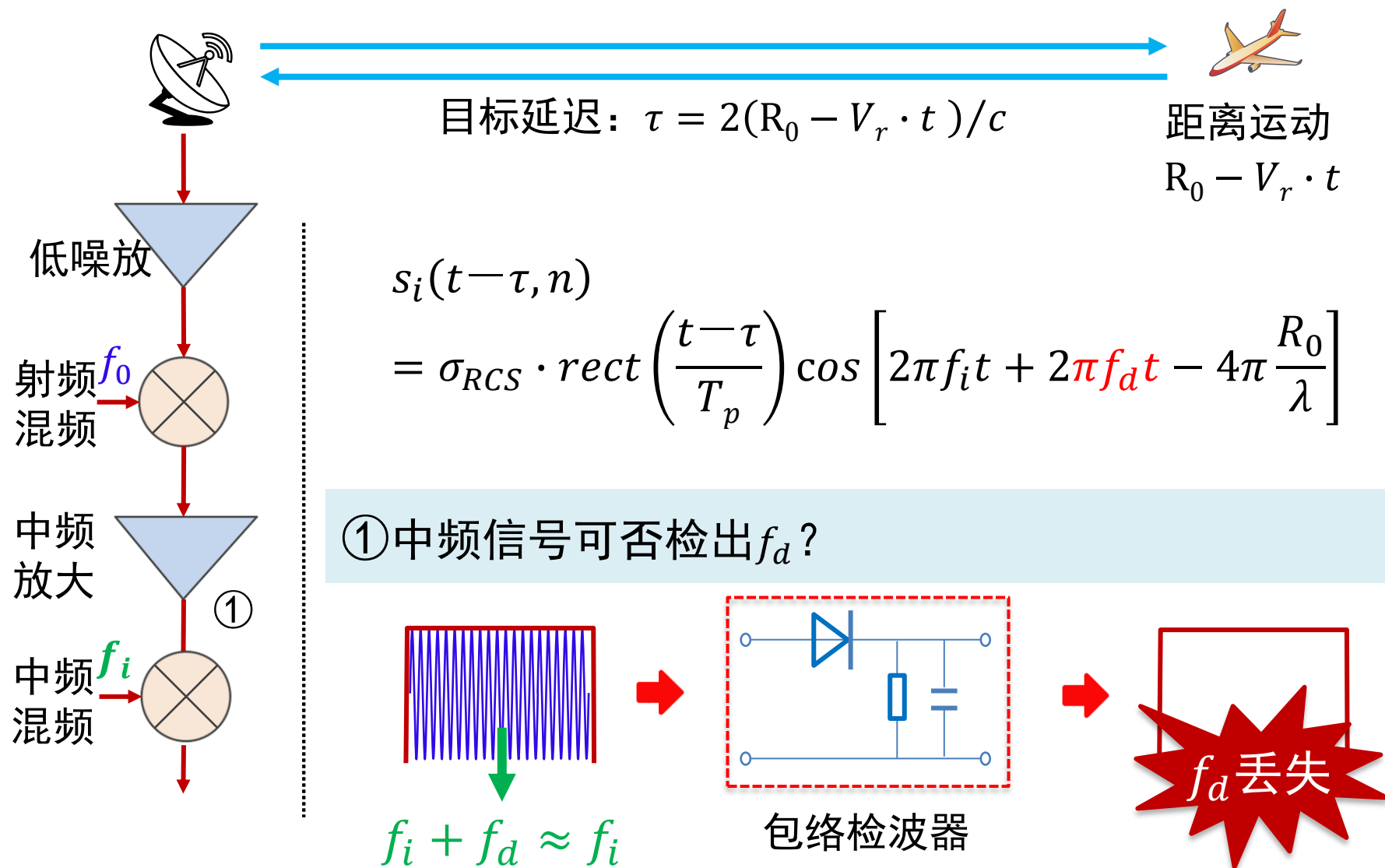
二、脉冲雷达多普勒效应

1、多普勒效应



二、脉冲雷达多普勒效应

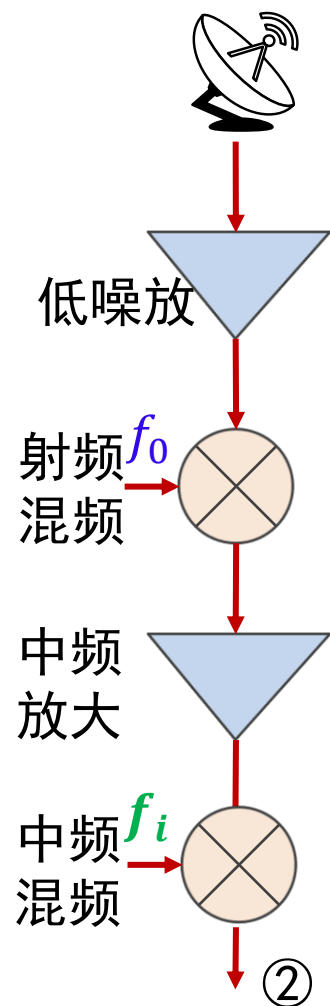
2、多普勒提取对雷达要求



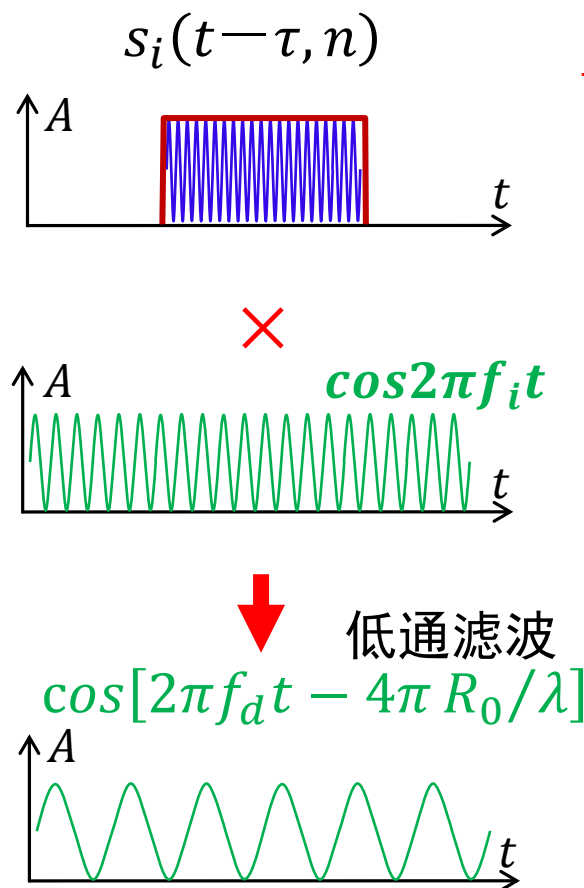
二、脉冲雷达多普勒效应

2、多普勒提取对雷达要求

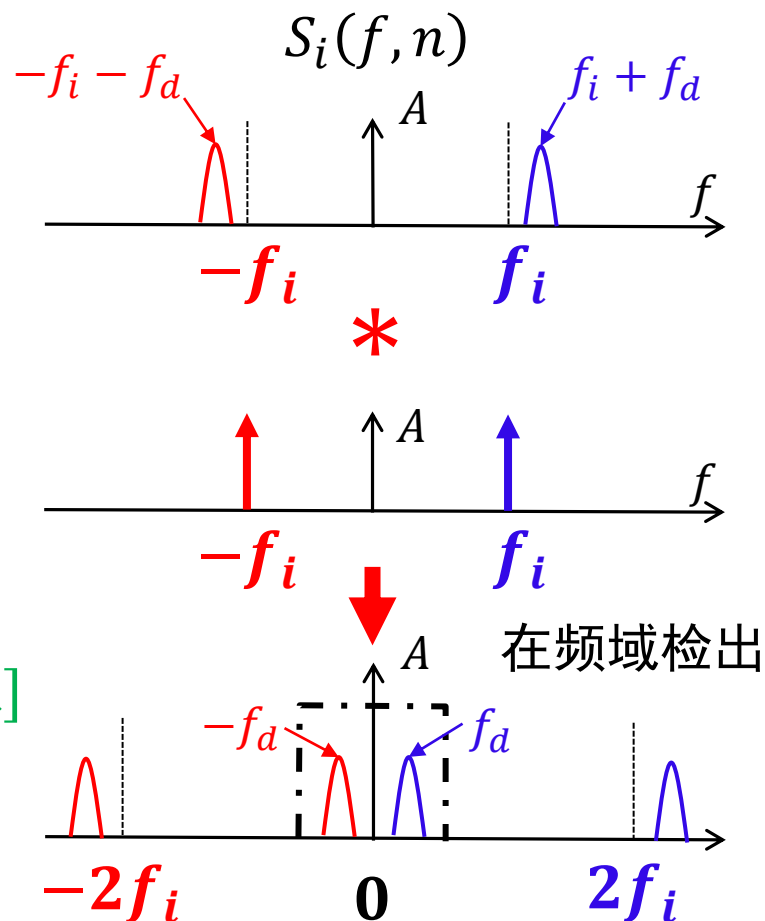
②中频混频后，可否检出 f_d ？



时域



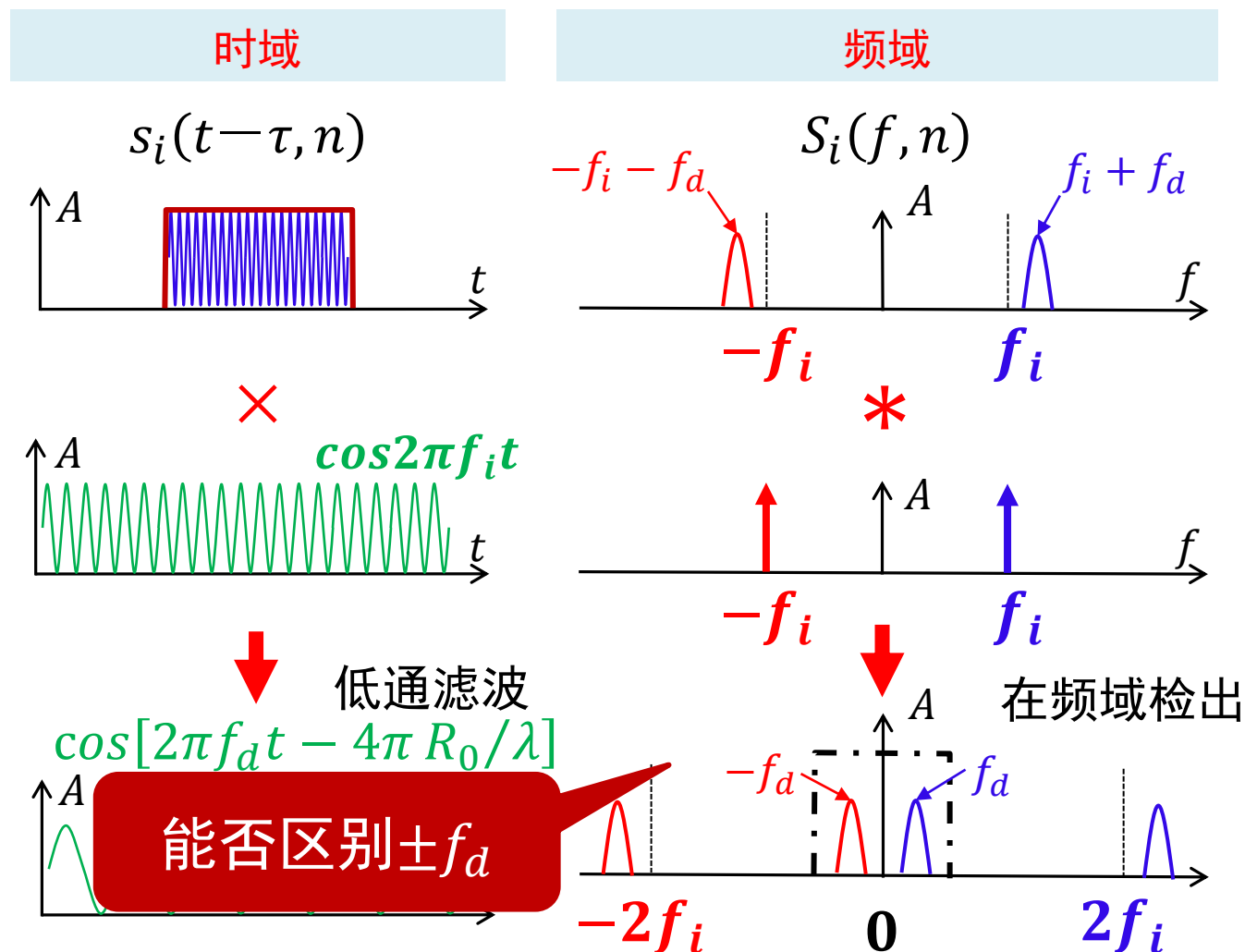
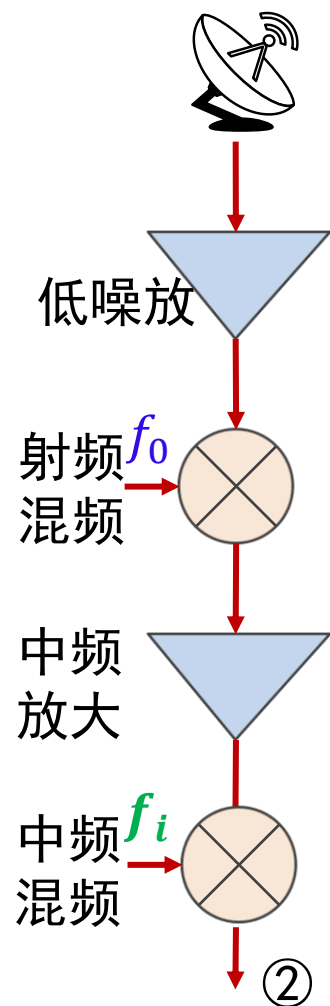
频域



二、脉冲雷达多普勒效应

2、多普勒提取对雷达要求

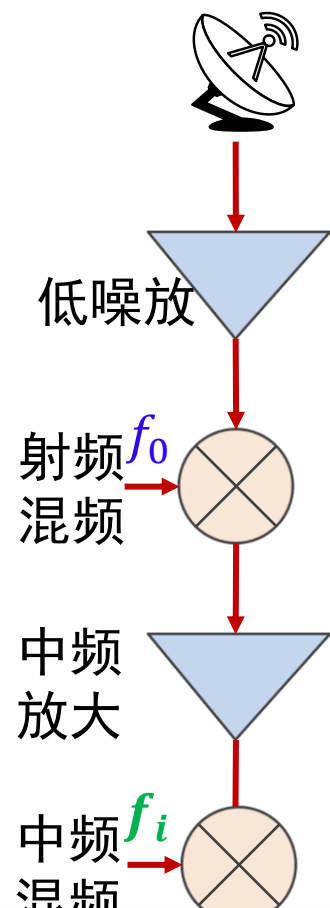
②中频混频后，可否检出 f_d ？



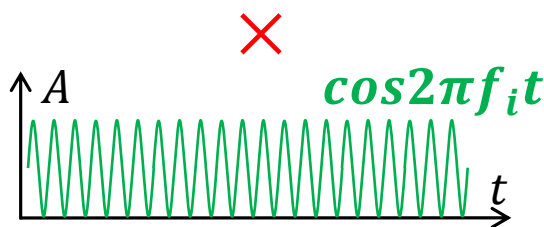
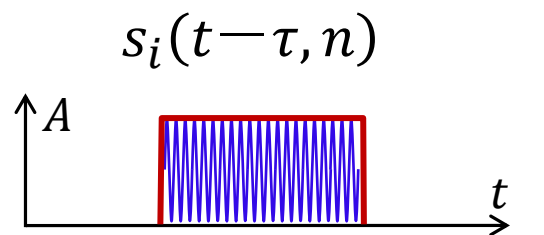
二、脉冲雷达多普勒效应

2、多普勒提取对雷达要求

②中频混频后，可否检出 f_d ？

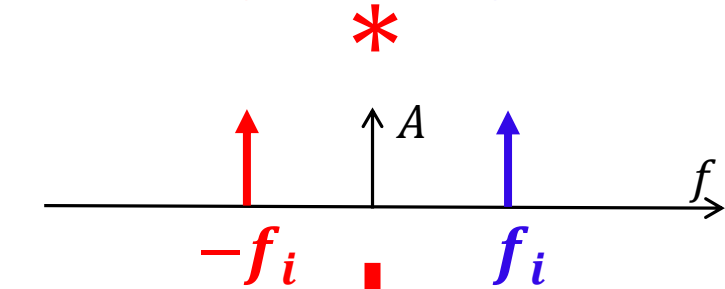
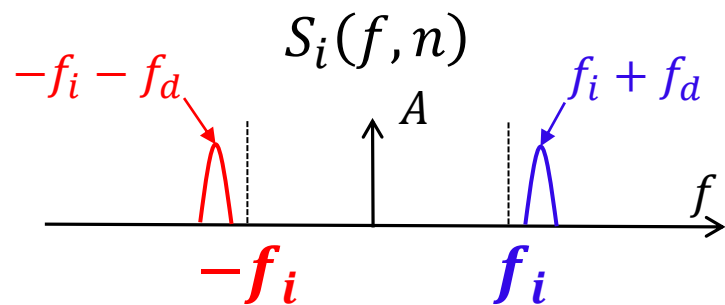


时域



低通滤波
 $\cos[2\pi f_d t - 4\pi R_0/\lambda]$

频域



在频域检出

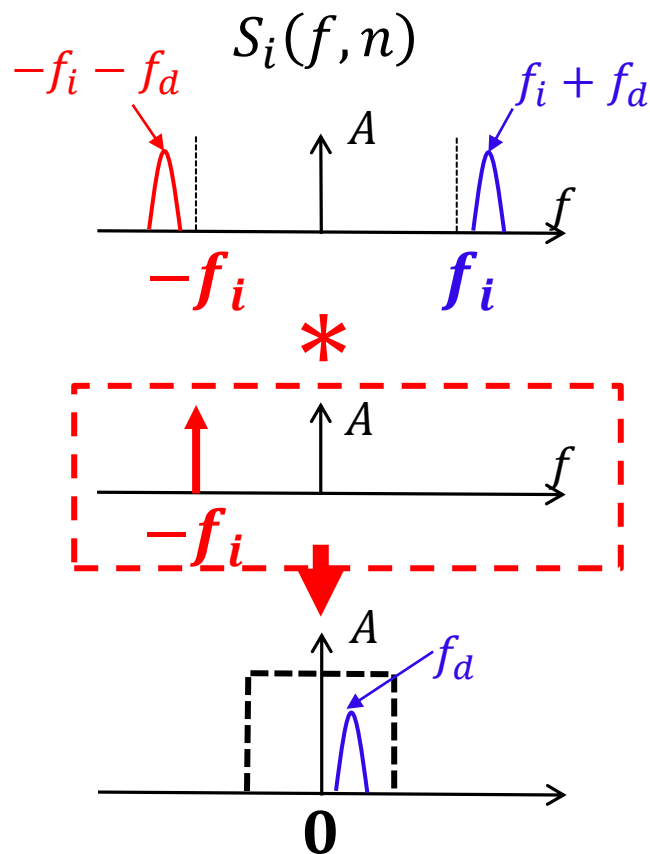
问题：一路实信号不能单独表征正或负频率（单边谱）
目标多普勒频率：有正有负

二、脉冲雷达多普勒效应

2、多普勒提取对雷达要求

□ 理想混频信号：单边谱

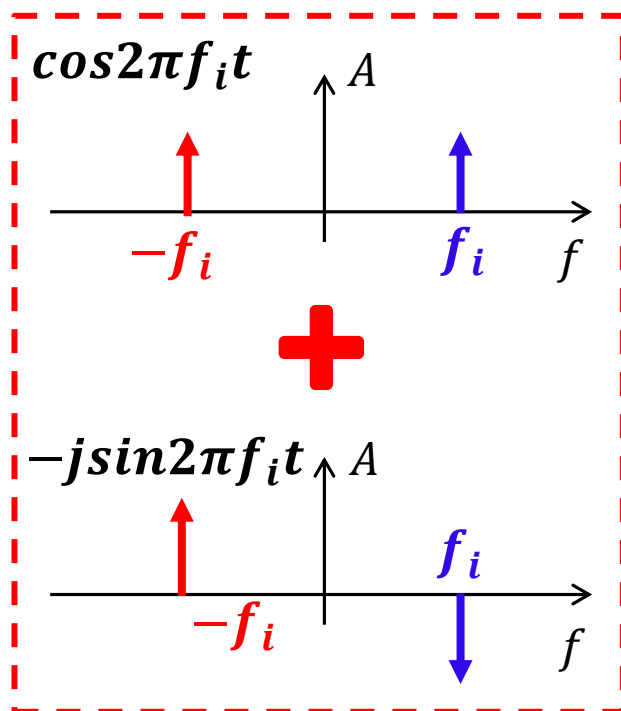
频域



单边谱

复信号：
如何实现？

两路正交
信号相加

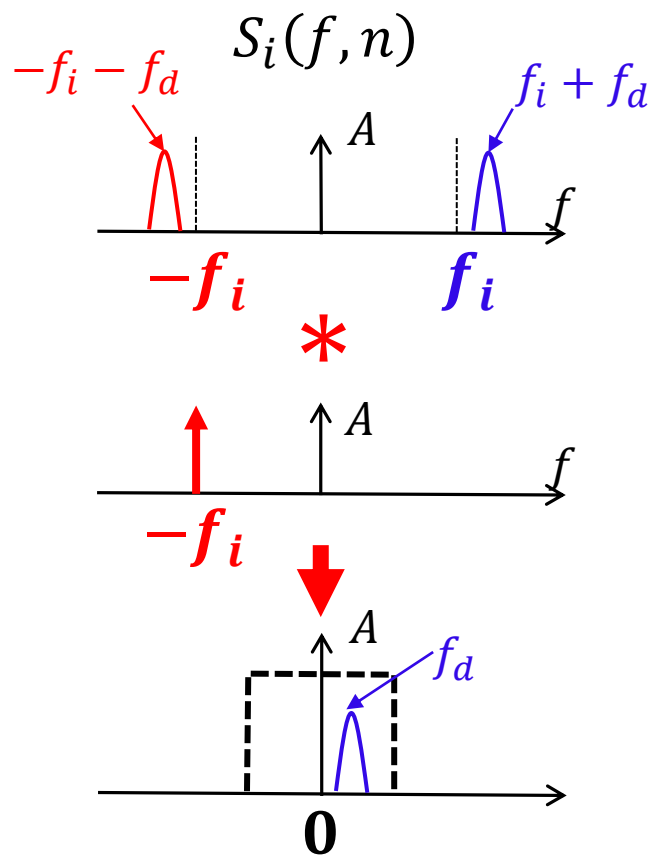


二、脉冲雷达多普勒效应

2、多普勒提取对雷达要求

□ 单边谱信号混频实现：正交检波（本质为两路混频）

频域

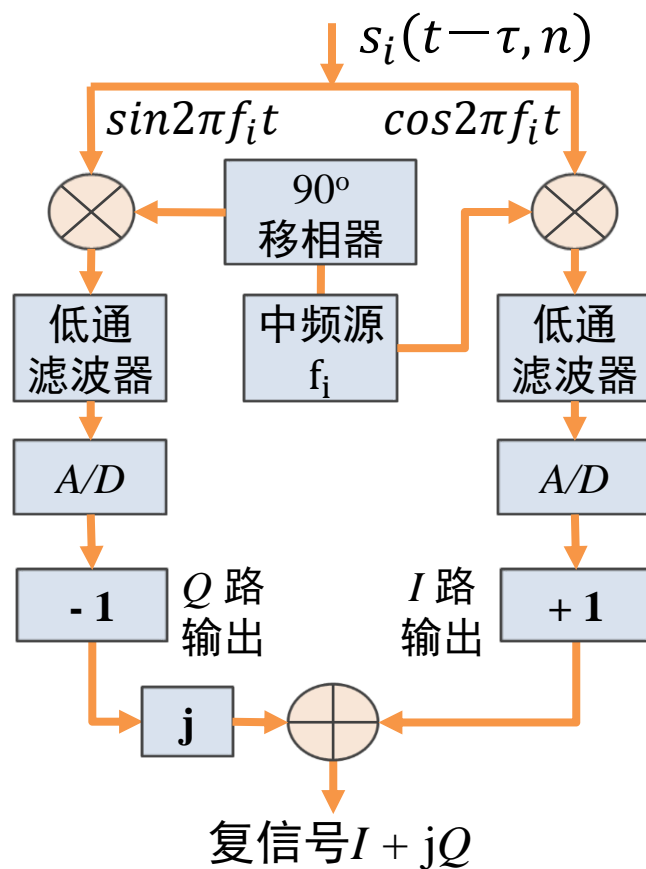


单边谱

复信号：
如何实现？

两路正交
信号相加

正交检波流程

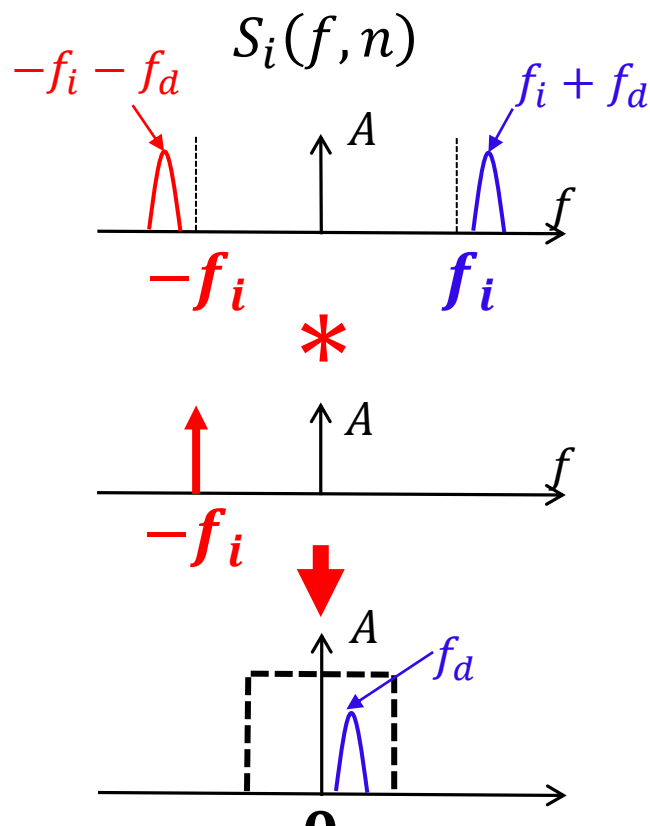


二、脉冲雷达多普勒效应

2、多普勒提取对雷达要求

□ 单边谱信号混频实现：正交检波（本质为两路混频）

频域

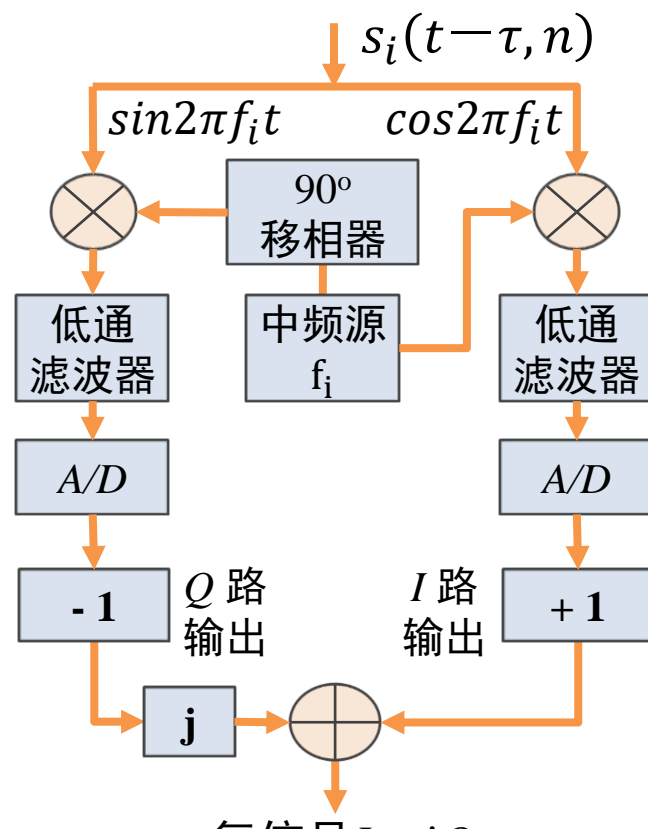


单边谱

复信号：
如何实现？

两路正交
信号相加

正交检波流程

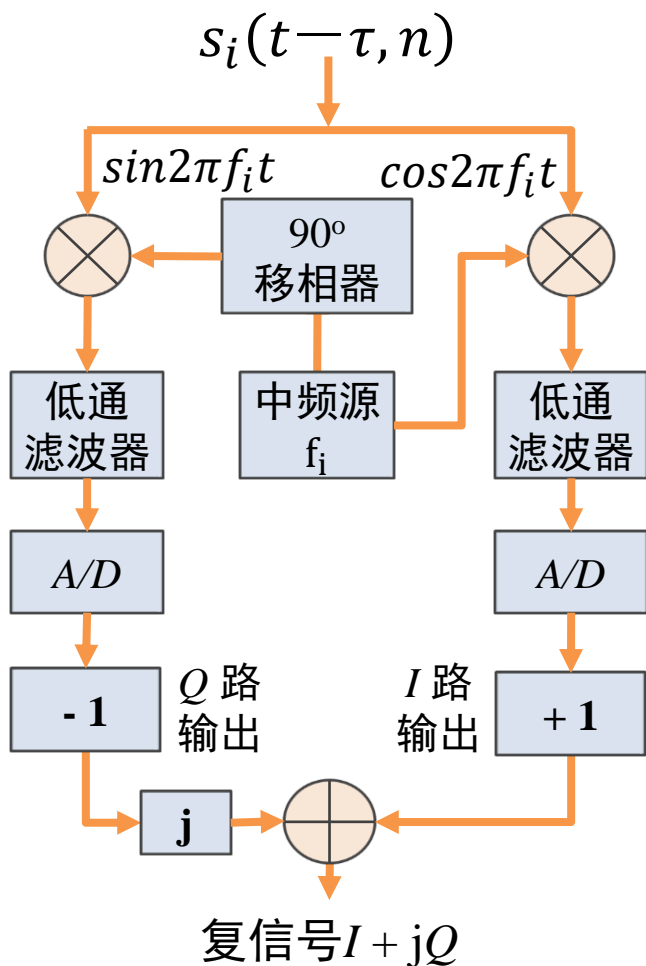


实质：两路实信号等效于复信号，能表征单边谱

二、脉冲雷达多普勒效应

3、正交检波的信号表征

□ 多普勒的正交检波表达



$$s_i(t-\tau, n) = \sigma_{RCS} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) \cos\left[2\pi f_i t + 2\pi f_d t - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right]$$



I路

$$\frac{1}{2} \sigma_{RCS} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) \cos\left[2\pi f_d t - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right]$$

Q路

$$\frac{1}{2} \sigma_{RCS} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) \sin\left[2\pi f_d t - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right]$$



欧拉公式

$$s_o(t-\tau, n) = \frac{\sigma_{RCS}}{2} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) e^{j\left(2\pi f_d t - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right)}$$

二、脉冲雷达多普勒效应

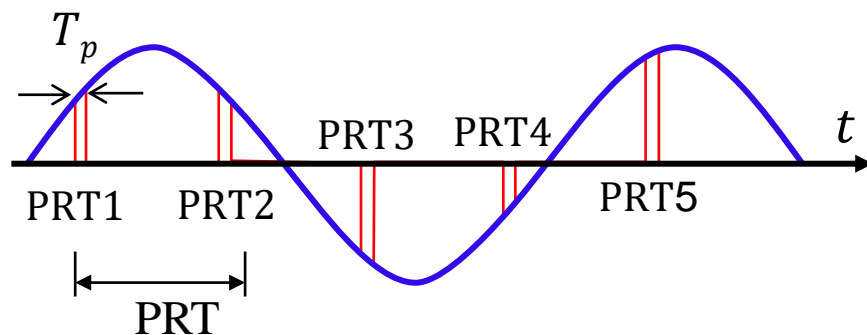
3、正交检波的信号表征

□ 多普勒的正交检波表达

$$s_o(t-\tau, n) = \frac{\sigma_{RCS}}{2} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) e^{j(2\pi f_d t - 4\pi \frac{R_0}{\lambda})}$$

◆ 通常 $T_p \ll 1/f_d$

◆ I路信号波形如下



$$\text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) \cos\left[2\pi f_d t - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right]$$

典型参数	
雷达波长	0.03m
脉冲宽度	1us
目标速度	300m/s



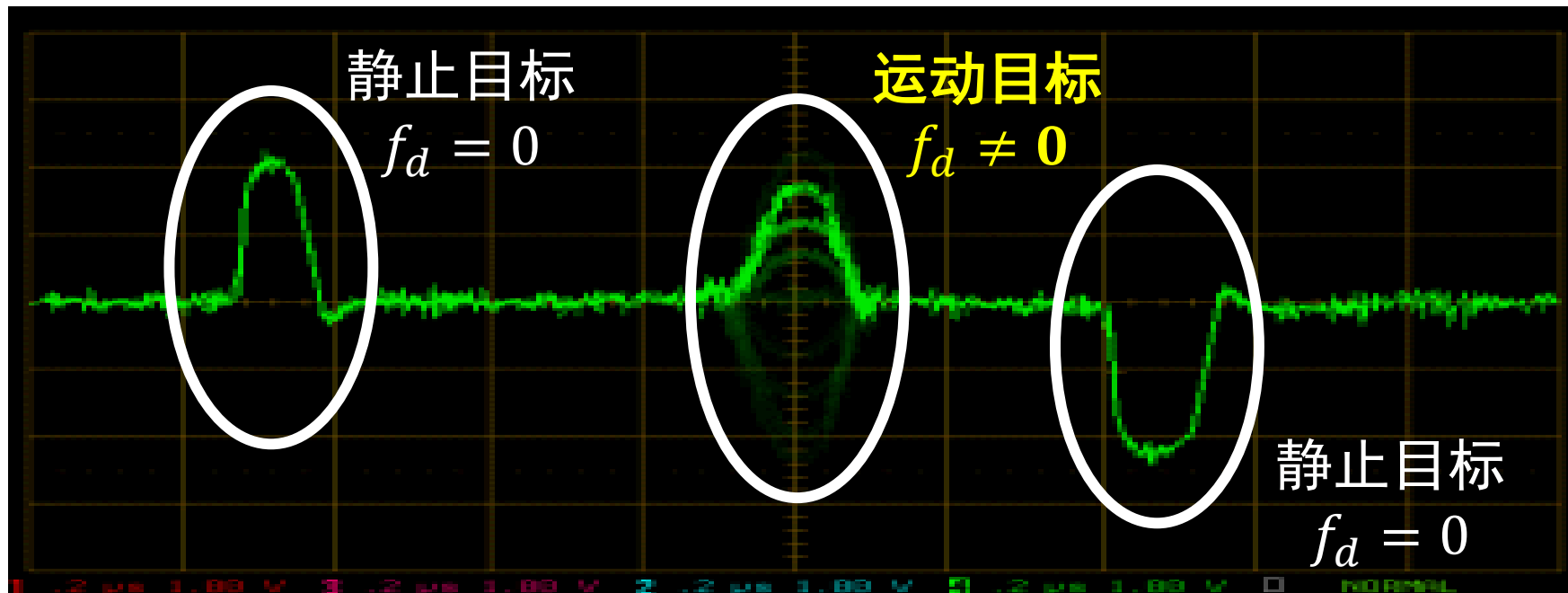
$$f_d = 20 \text{ kHz}$$
$$T_p = 1\mu\text{s} \ll 1/f_d = 50\mu\text{s}$$

二、脉冲雷达多普勒效应

3、正交检波的信号表征

□ 正交检波显示

- ◆ 将I或Q路信号，按脉冲发射先后顺序（慢时间）依次显示
- ◆ 动目标出现“蝴蝶波”现象



I路

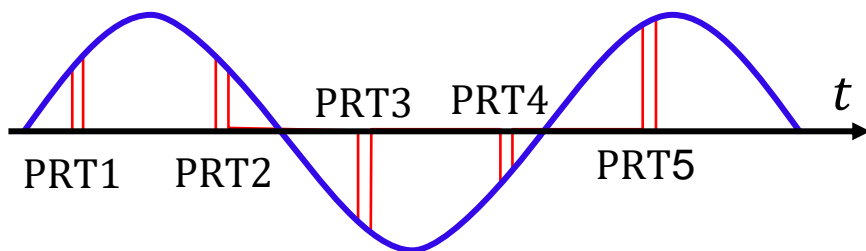
$$\frac{1}{2} \sigma_{RCS} \cdot \text{rect} \left(\frac{t - \tau}{T_p} \right) \cos \left[2\pi f_d t - 4\pi \frac{R_0}{\lambda} \right]$$

二、脉冲雷达多普勒效应

4、信号快慢时间特点

□ 正交检波后信号近似表达

$$s_o(t-\tau, n) = \frac{\sigma_{RCS}}{2} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) e^{j\left(2\pi f_d t - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right)}$$



可近似为只在脉冲间变化

$$s_o(t-\tau, n) = \frac{\sigma_{RCS}}{2} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) e^{j\left(2\pi f_d \cdot n \cdot \text{PRT} - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right)}$$

每次脉冲发射到目标反射期间，目标可近似静止



目标延迟: $\tau = 2(R_0 - V_r \cdot t)/c$



目标距离	300km
目标速度	300m/s
脉宽 T_p	1us

$\tau = 2\text{ms}$

↓ 单程

目标仅移动0.3m

二、脉冲雷达多普勒效应

4、信号快慢时间特点

□ 正交检波后信号近似表达

$$s_o(t-\tau, n) = \frac{\sigma_{RCS}}{2} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) e^{j\left(2\pi f_d \cdot n \cdot PRT - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right)}$$

每次脉冲发射到目标反射期间，目标可近似静止



停走模型：stop and go

目标延迟：

$$\tau = 2(R_0 - V_r \cdot t) / c$$



目标延迟：

$$\tau = 2(R_0 - V_r \cdot n \cdot PRT) / c$$

$$s_o(t-\tau, n)$$

$$= \frac{\sigma_{RCS}}{2} \cdot \text{rect}\left(\frac{t - 2(R_0 - V_r \cdot n \cdot PRT) / c}{T_p}\right) e^{j\left(2\pi f_d \cdot n \cdot PRT - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right)}$$

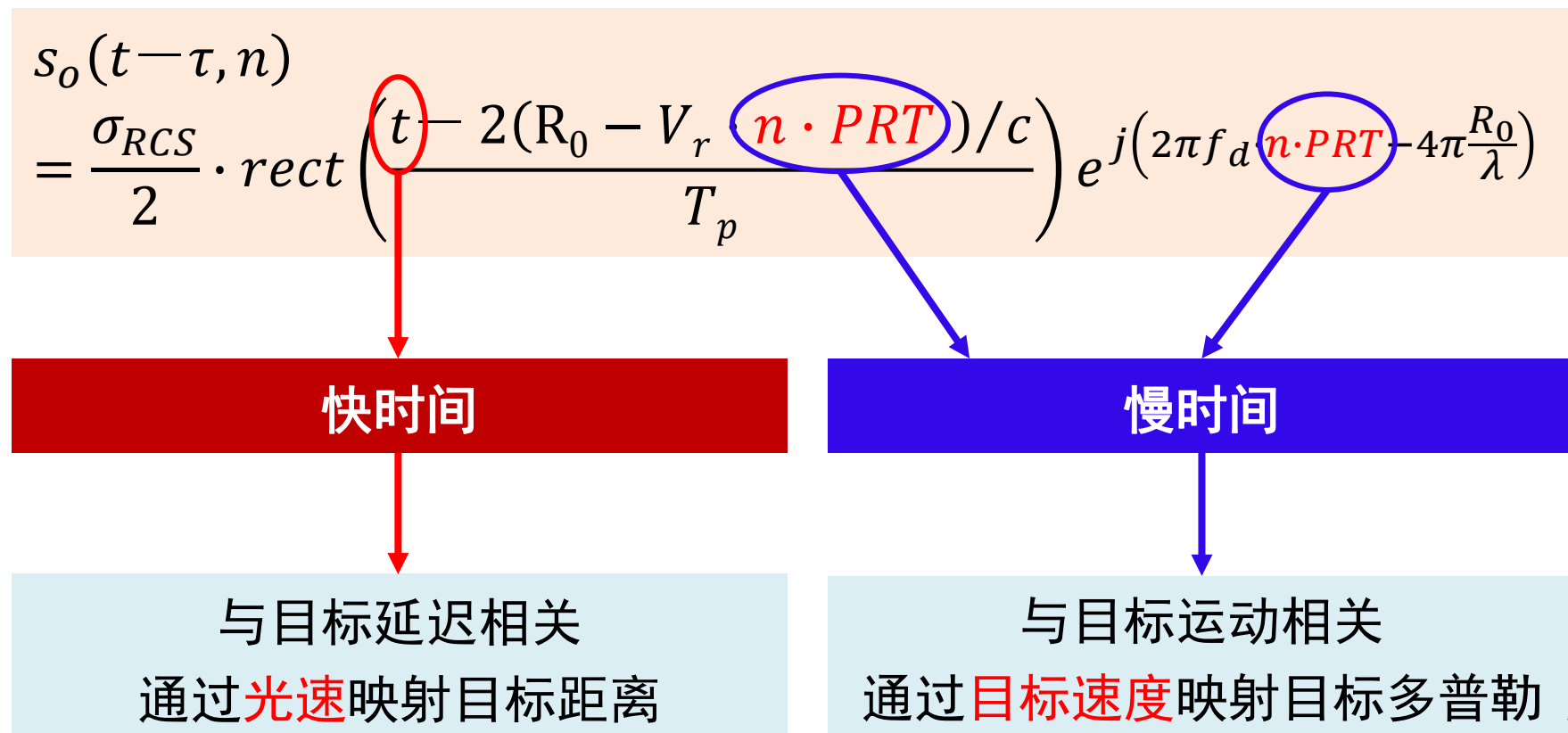
二、脉冲雷达多普勒效应

4、信号快慢时间特点

□ 回顾：快慢时间定义

◆ **快时间**：一个PRT内的时间轴

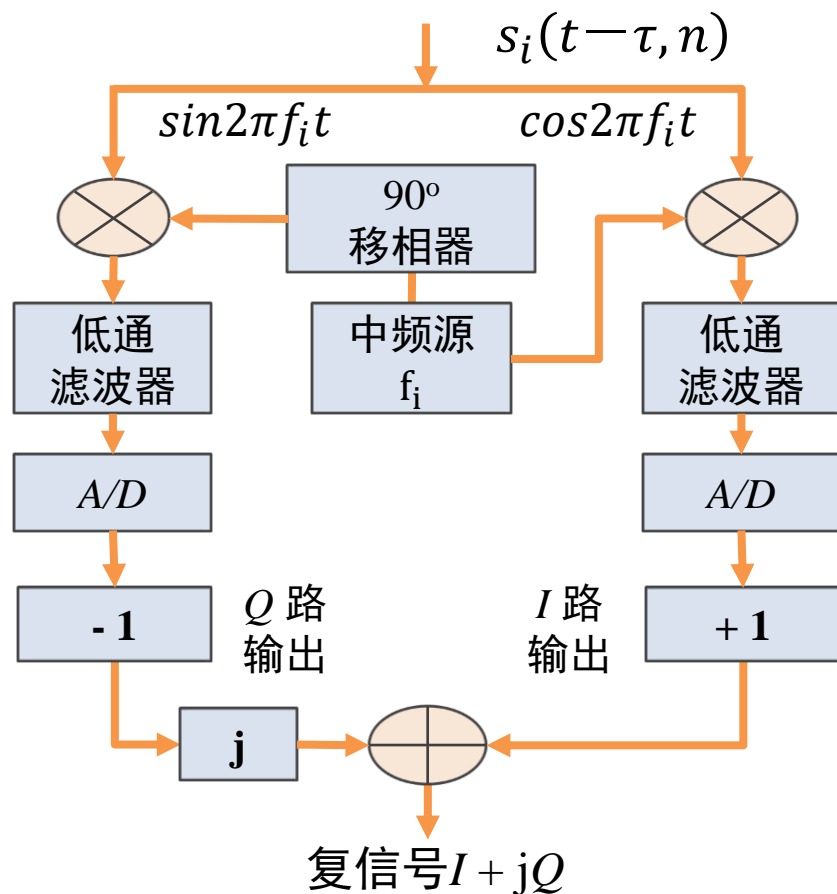
◆ **慢时间**：多个PRT间的时间轴，按照**PRT采样**离散化



二、脉冲雷达多普勒效应

5、小结

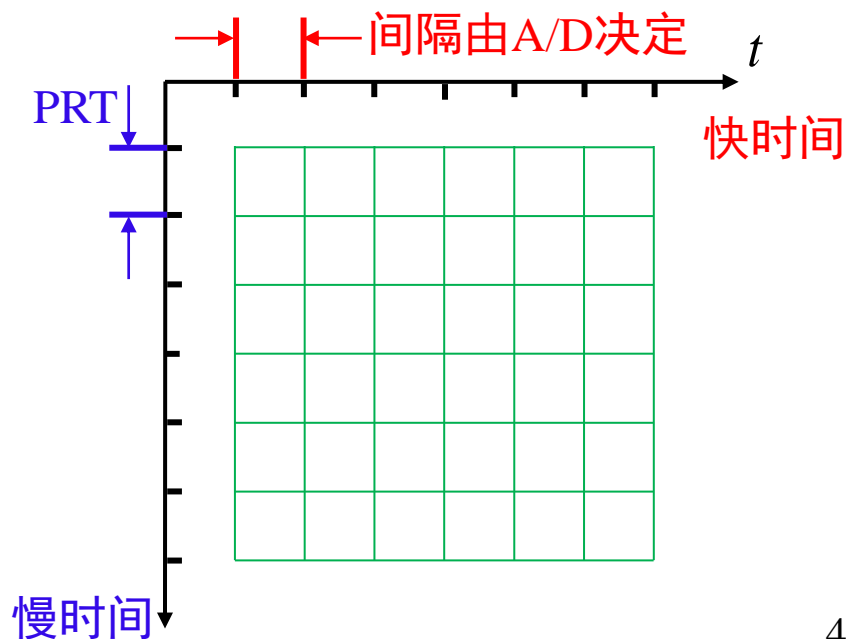
目标多普勒提取
需要正交检波接收



目标多普勒、距离延时
可近似为仅在脉间变化

快时间

慢时间



目 录

一、杂波中目标检测问题

二、脉冲雷达多普勒效应

三、MTI雷达的信号处理

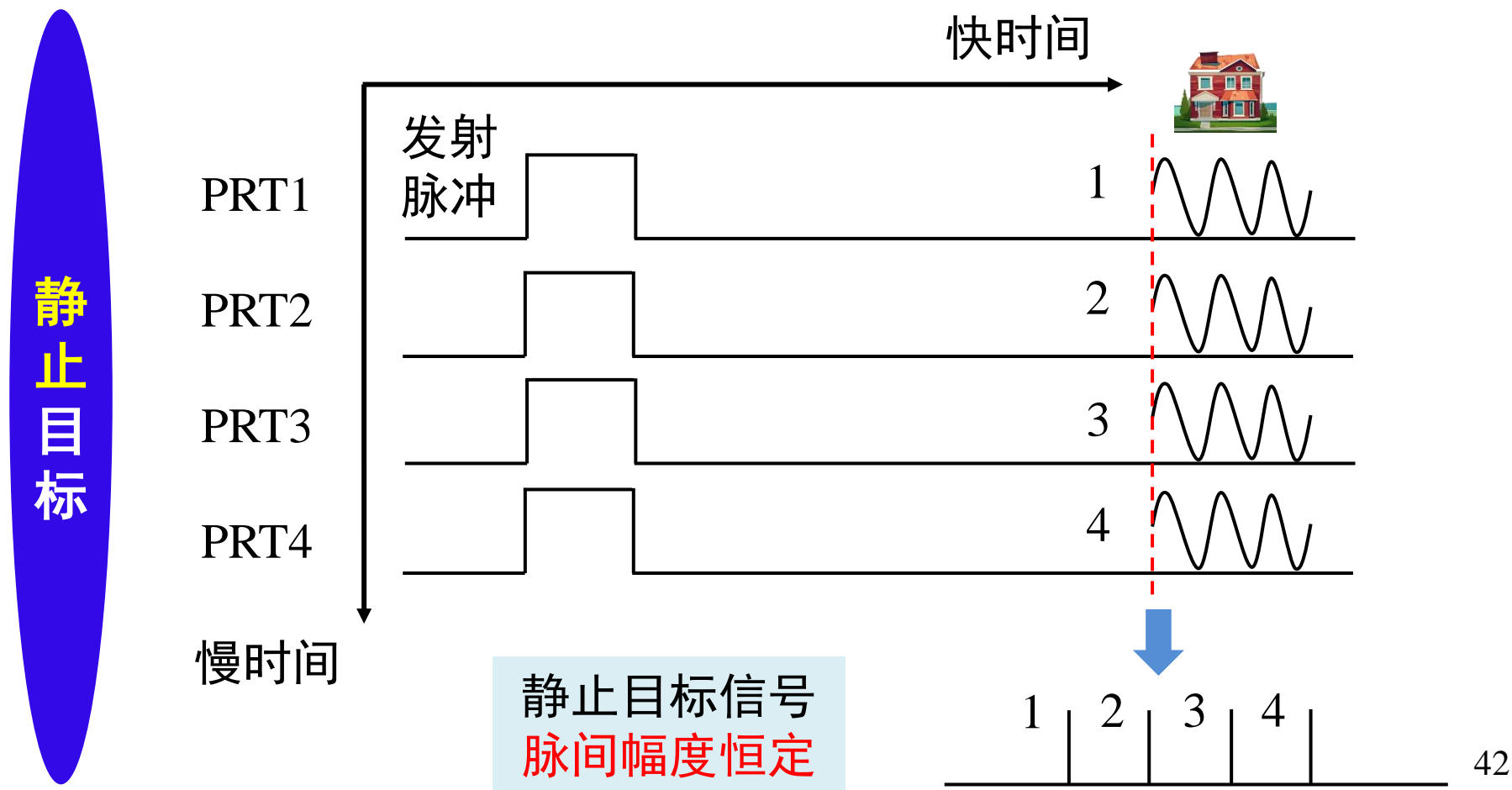
四、早期MTI雷达的实现

三、MTI雷达的信号处理

1、基本原理

□ MTI (Moving Target Indicator) : 动目标显示

◆ 原理: 利用多普勒效应, 滤除固定静止杂波, 保留运动目标

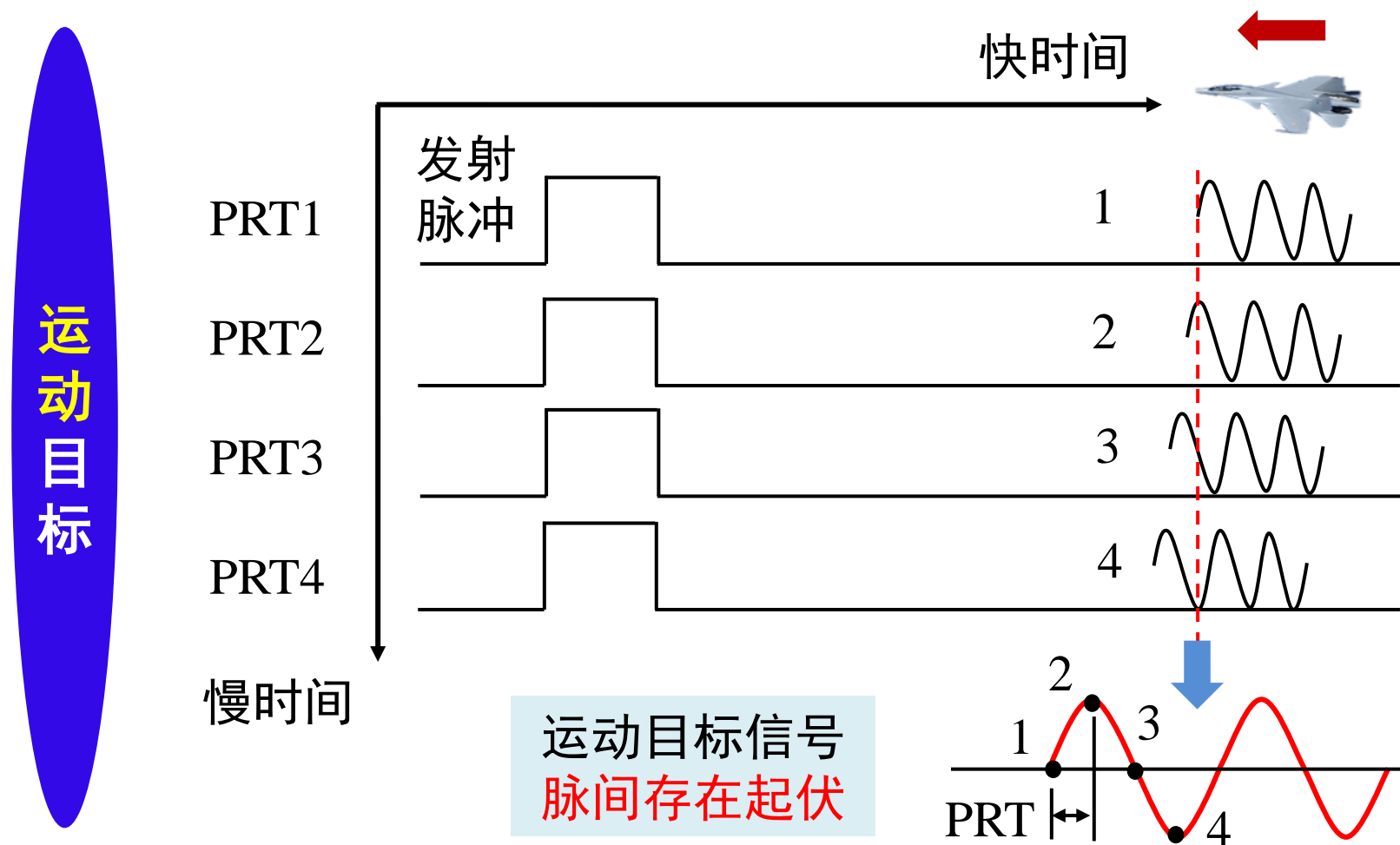


三、MTI雷达的信号处理

1、基本原理

□ MTI (Moving Target Indicator) : 动目标显示

◆ 原理: 利用多普勒效应, 滤除固定静止杂波, 保留运动目标

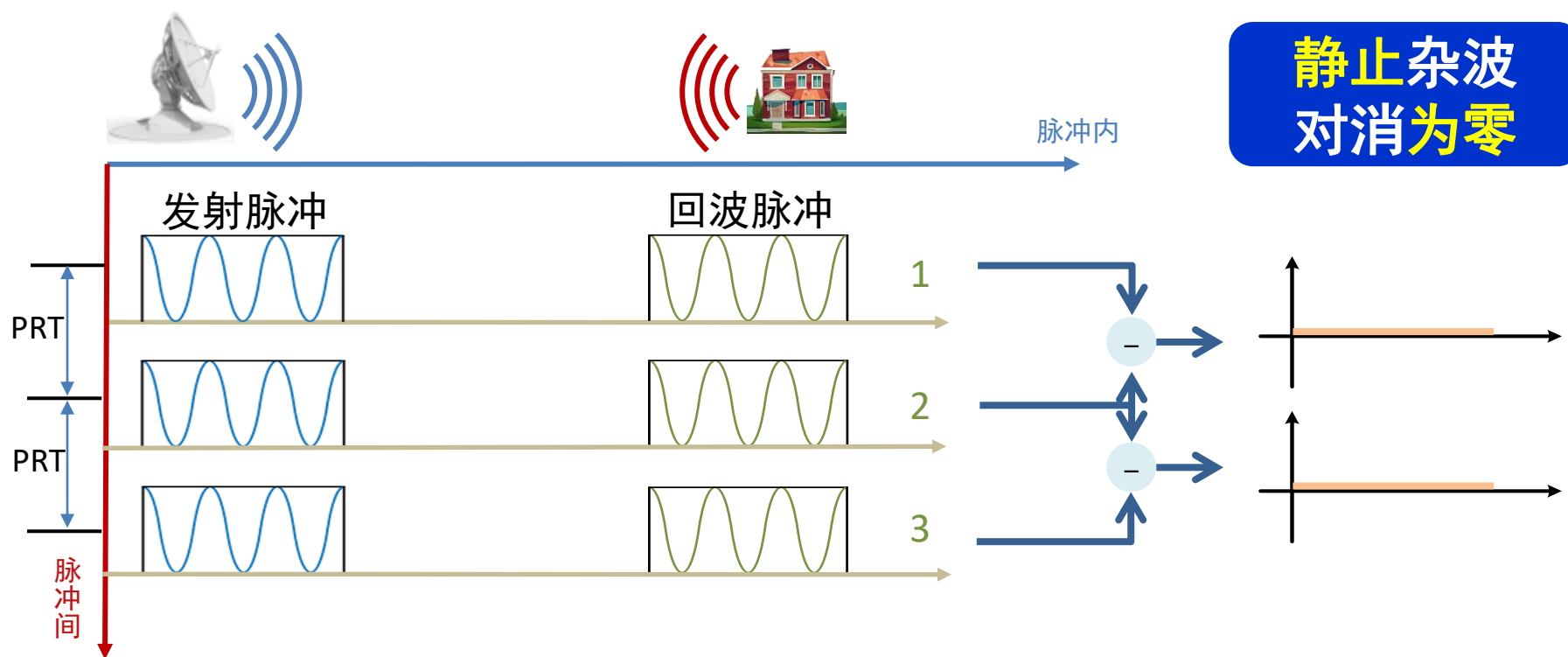


三、MTI雷达的信号处理

1、基本原理

❑ MTI (Moving Target Indicator) : 动目标显示

◆ 方法：脉冲回波间相减对消

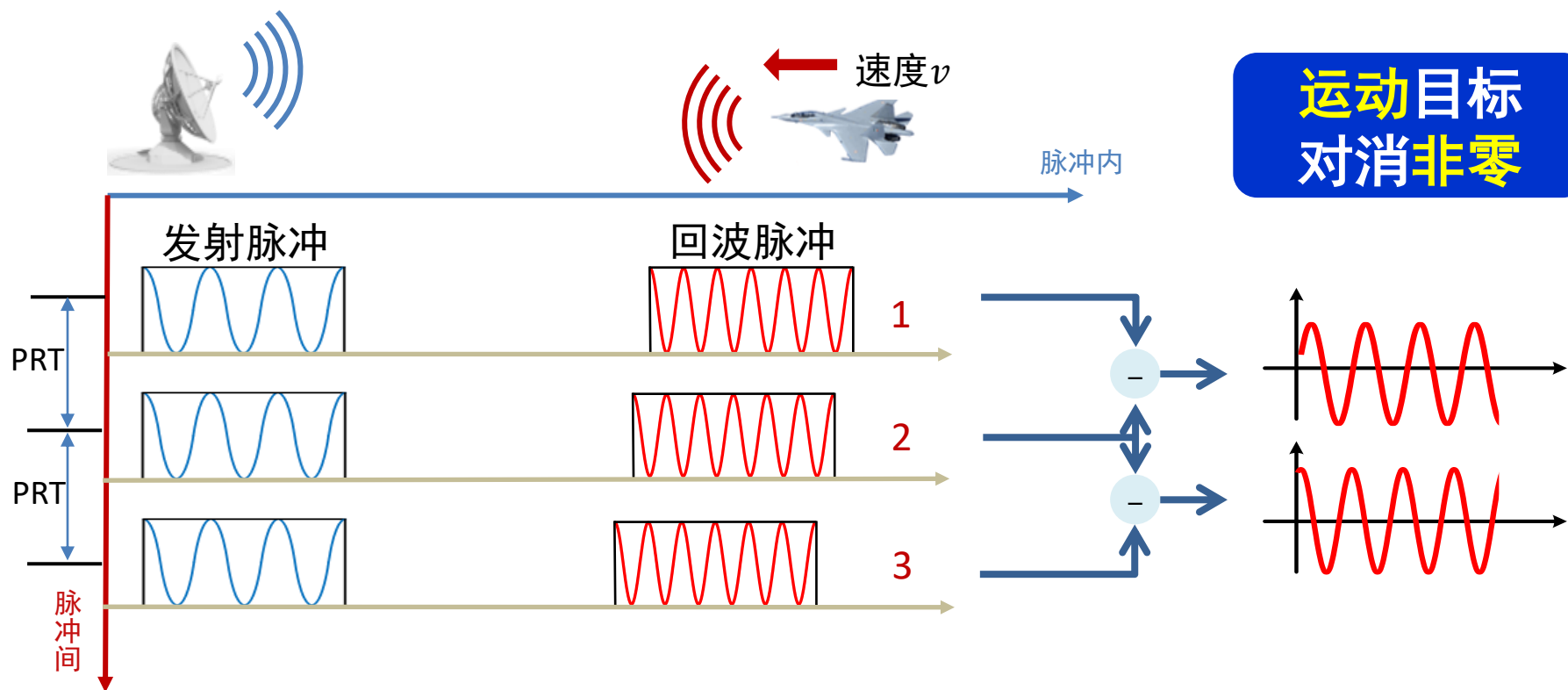


三、MTI雷达的信号处理

1、基本原理

❑ MTI (Moving Target Indicator) : 动目标显示

◆ 方法: 脉冲回波间相减对消

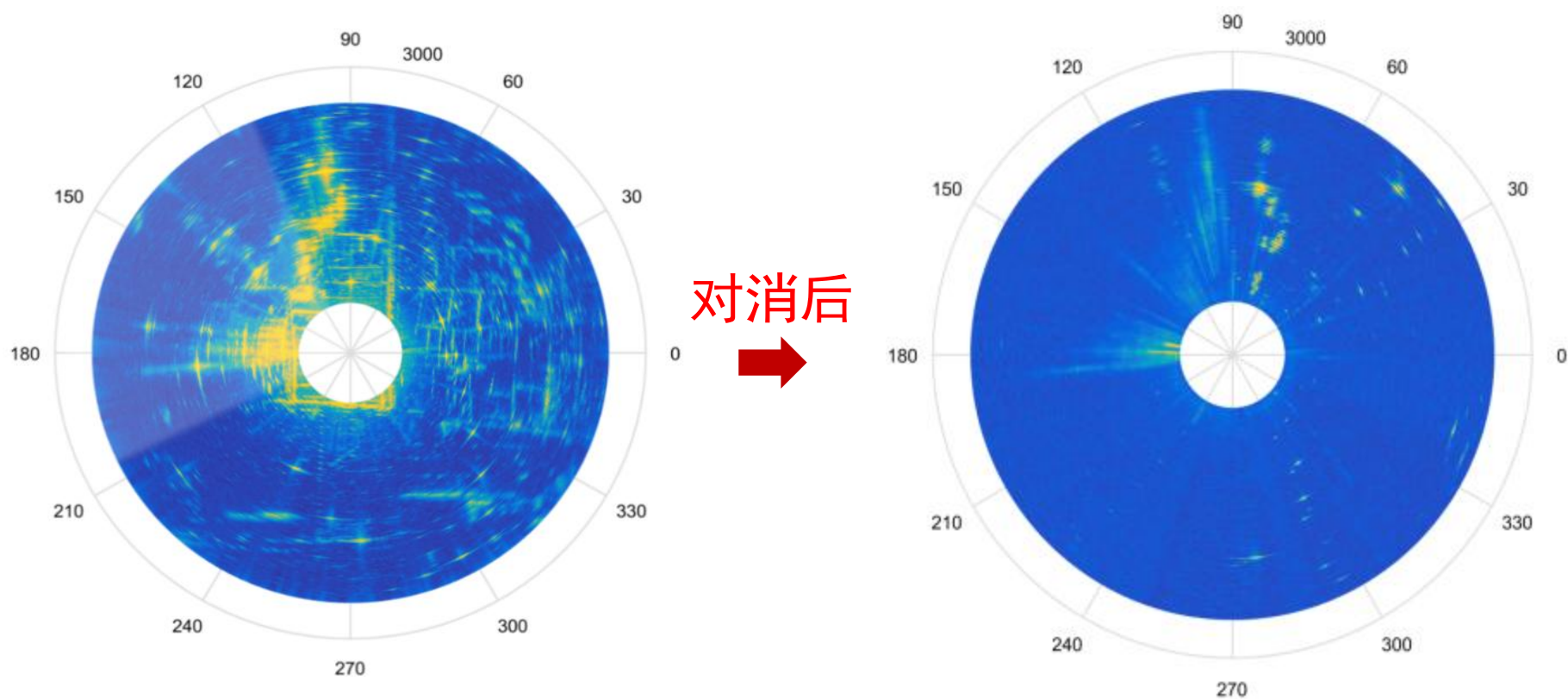


三、MTI雷达的信号处理

1、基本原理

□ MTI (Moving Target Indicator) : 动目标显示

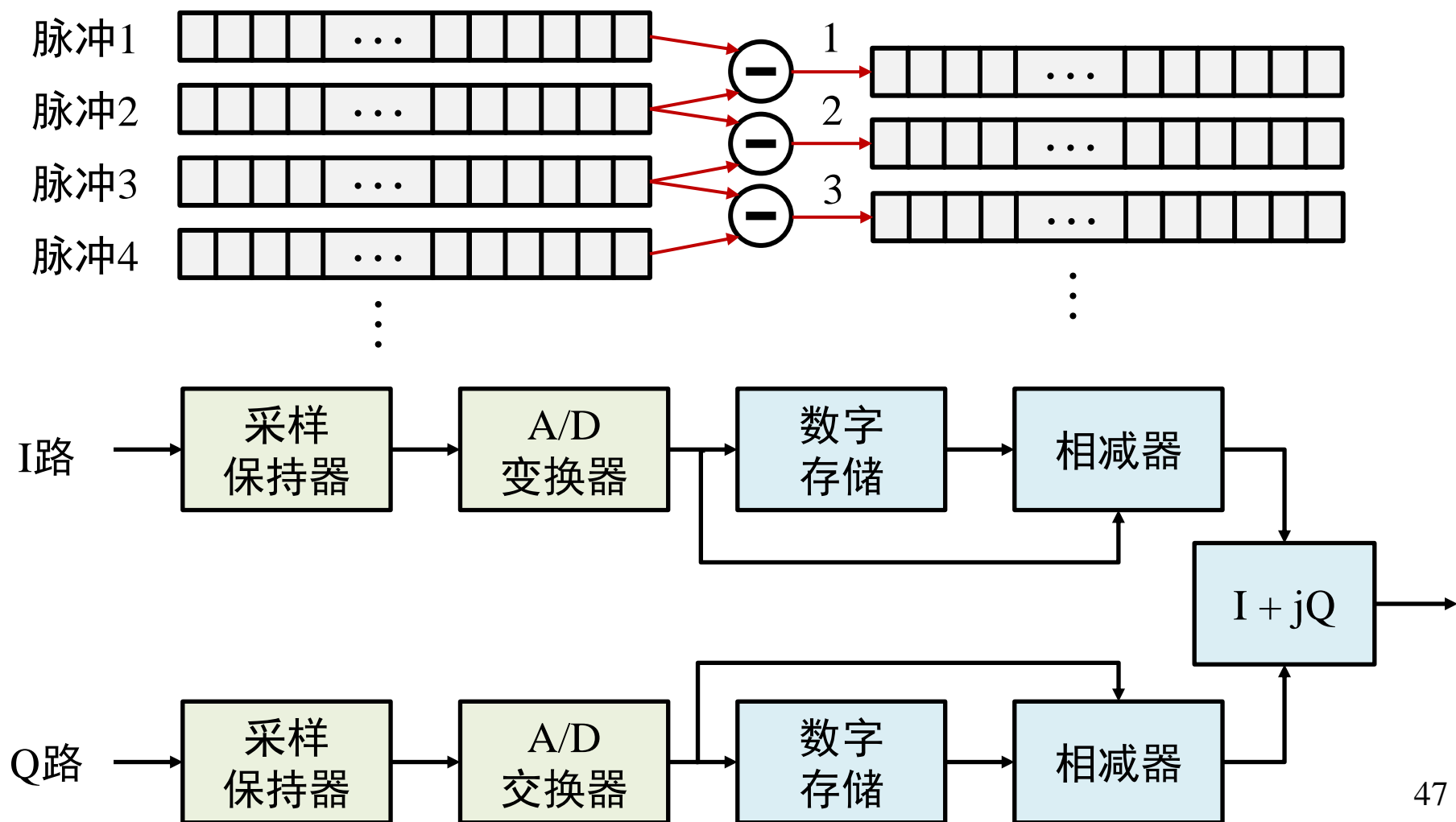
◆ 实例：某Ku频段雷达地杂波对消结果



三、MTI雷达的信号处理

2、数字实现

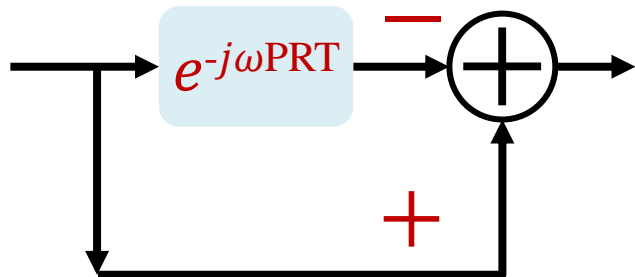
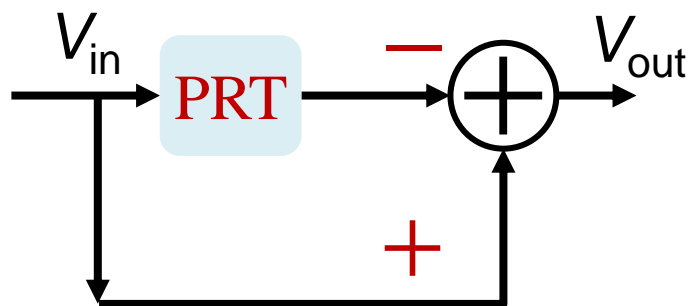
□ 数字采样 + 脉冲对消



三、MTI雷达的信号处理

2、数字实现

□ 两脉冲对消的信号表征



$$V_{out} = V_{in}(t) - V_{in}(t - PRT)$$



$$\begin{aligned} H(\omega) &= 1 - e^{-j\omega PRT} \\ &= 2j \cdot e^{-\frac{j\omega PRT}{2}} \sin\left(\frac{1}{2}\omega PRT\right) \end{aligned}$$



$$|H(\omega)| = 2 \left| \sin\left(\frac{1}{2}\omega PRT\right) \right|$$

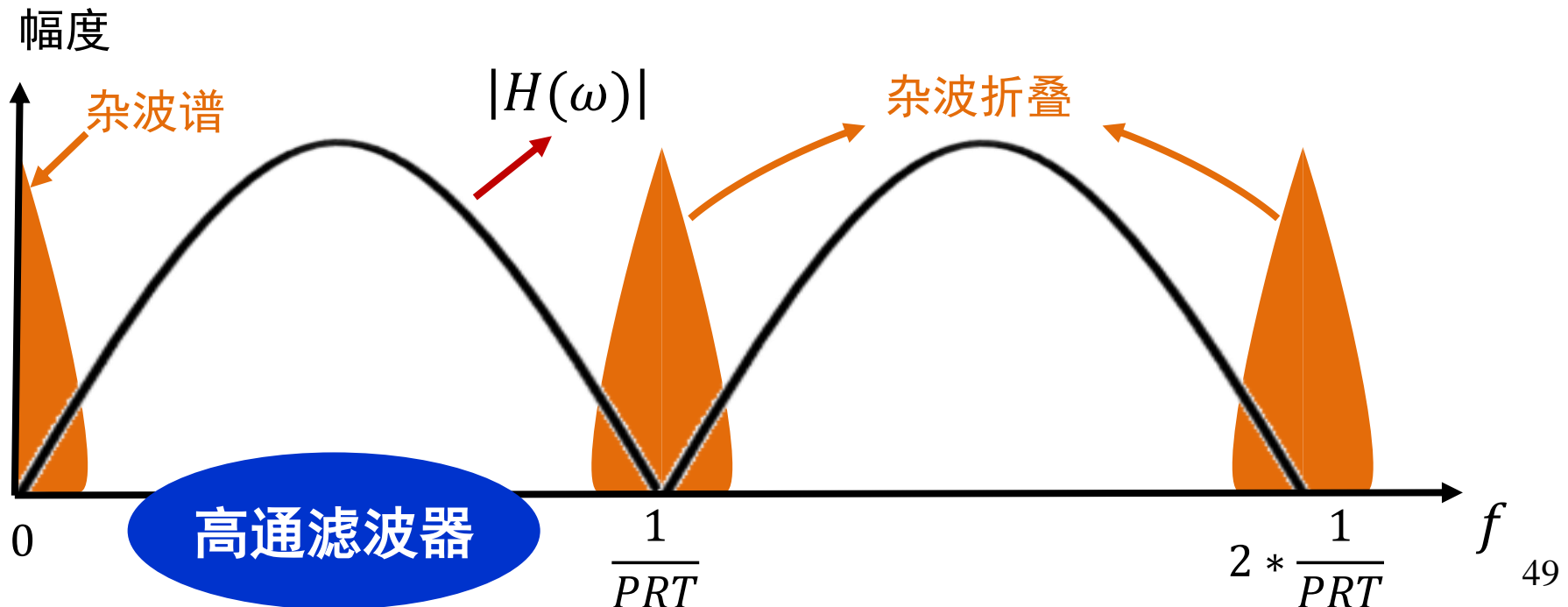
三、MTI雷达的信号处理

2、数字实现

□ 两脉冲对消的信号表征

对消信号系统
频率响应函数

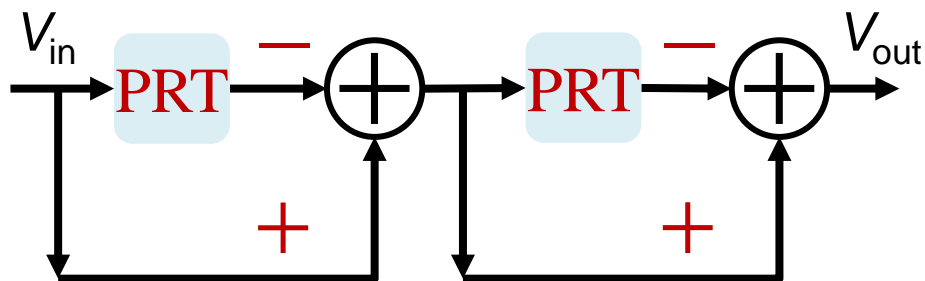
$$|H(\omega)| = 2 \left| \sin \left(\frac{1}{2} \omega PRT \right) \right| = 2 |\sin(\pi f PRT)|$$



三、MTI雷达的信号处理

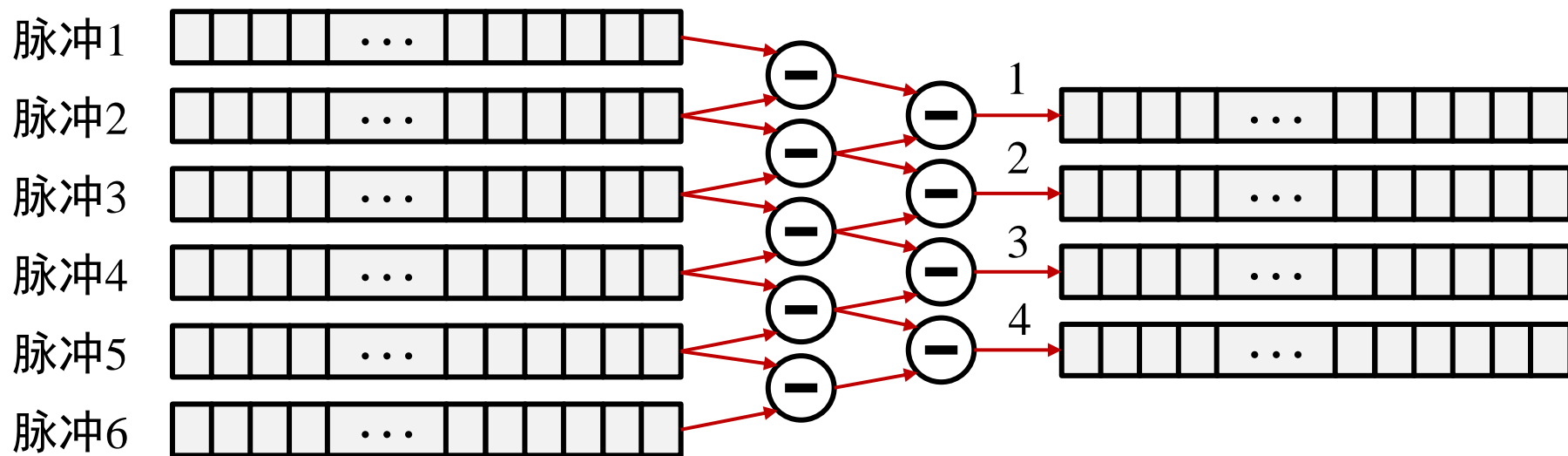
2、数字实现

三脉冲对消的信号表征



$$V_{out} = V_{in}(t) - 2V_{in}(t - PRT) + V_{in}(t - 2PRT)$$

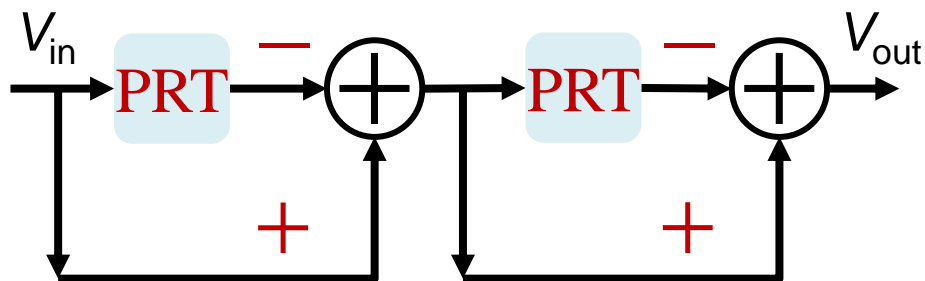
$$H(\omega) = 1 - 2e^{-j\omega PRT} + e^{-2j\omega PRT}$$
$$= 4|\sin(\pi f PRT)|^2$$



三、MTI雷达的信号处理

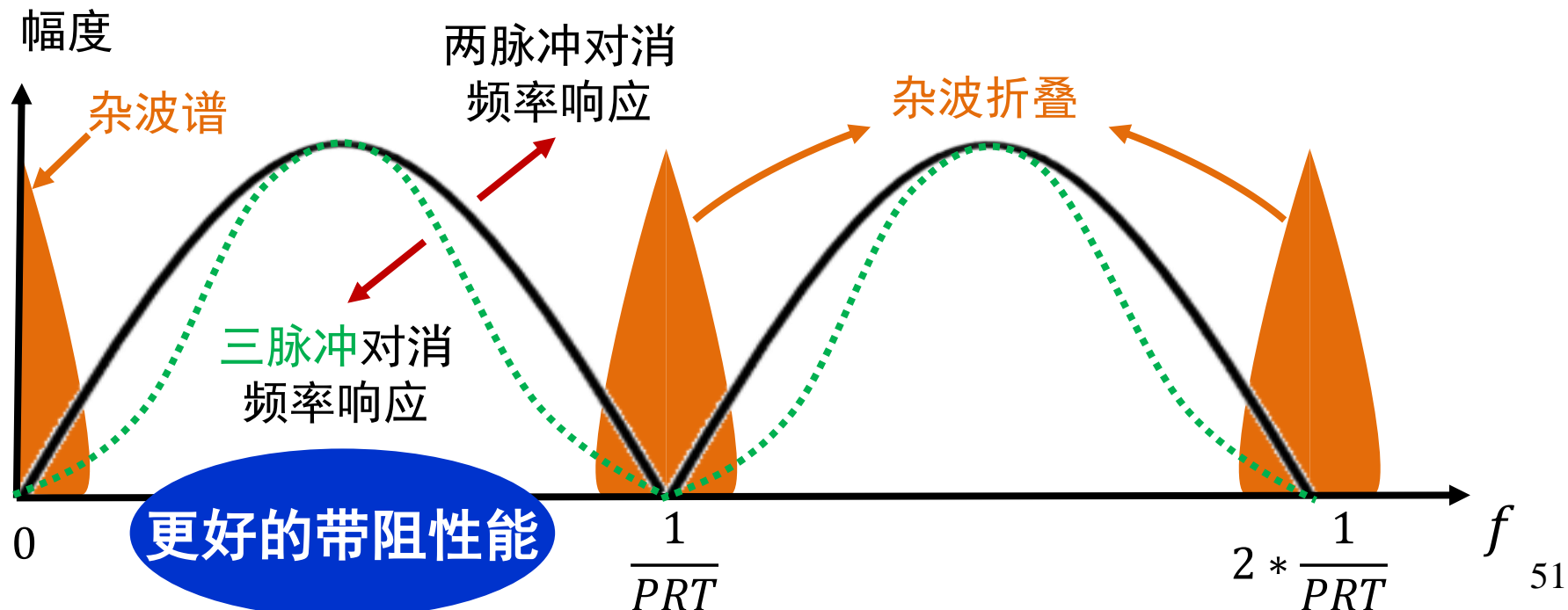
2、数字实现

三脉冲对消的信号表征



$$V_{out} = V_{in}(t) - 2V_{in}(t-PRT) + V_{in}(t-2PRT)$$

$$H(\omega) = 1 - 2e^{-j\omega PRT} + e^{-2j\omega PRT}$$
$$= 4|\sin(\pi f PRT)|^2$$



三、MTI雷达的信号处理

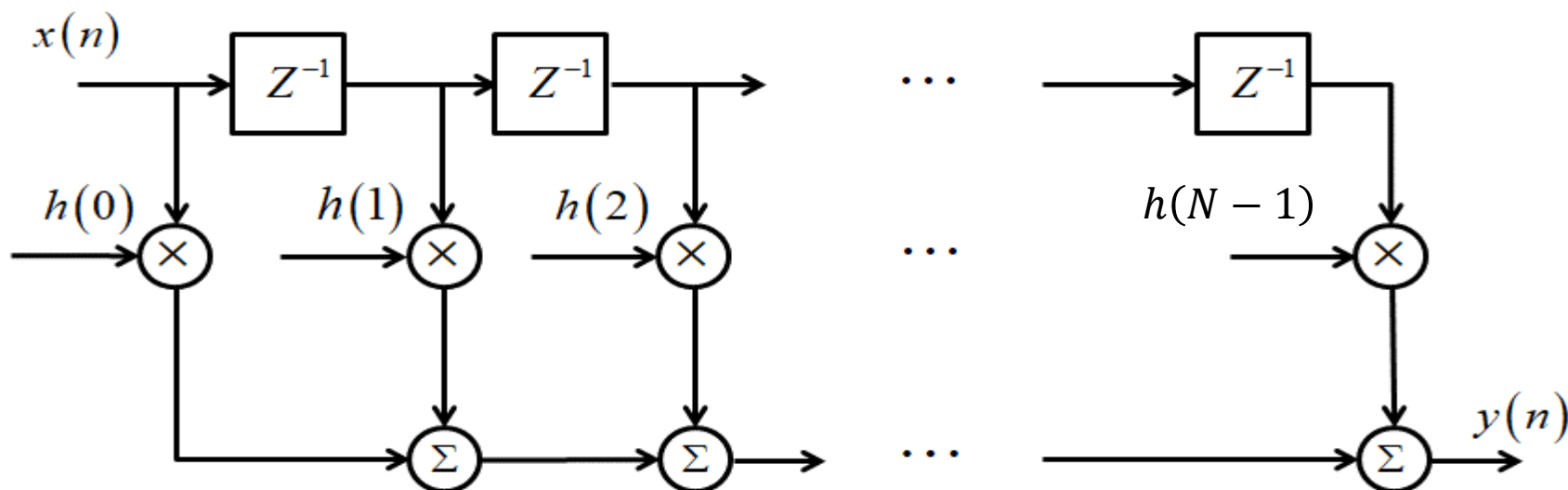
2、数字实现

□ 对消的等价实现：FIR滤波器

◆ 线性时不变数字滤波器

有限长单位冲激响应滤波器，需大量延迟线路与加权求和
加权系数的傅里叶变换，即为该 FIR 滤波的频率响应函数

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)x(n-i) \quad \longleftrightarrow \quad Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$$



三、MTI雷达的信号处理

2、数字实现

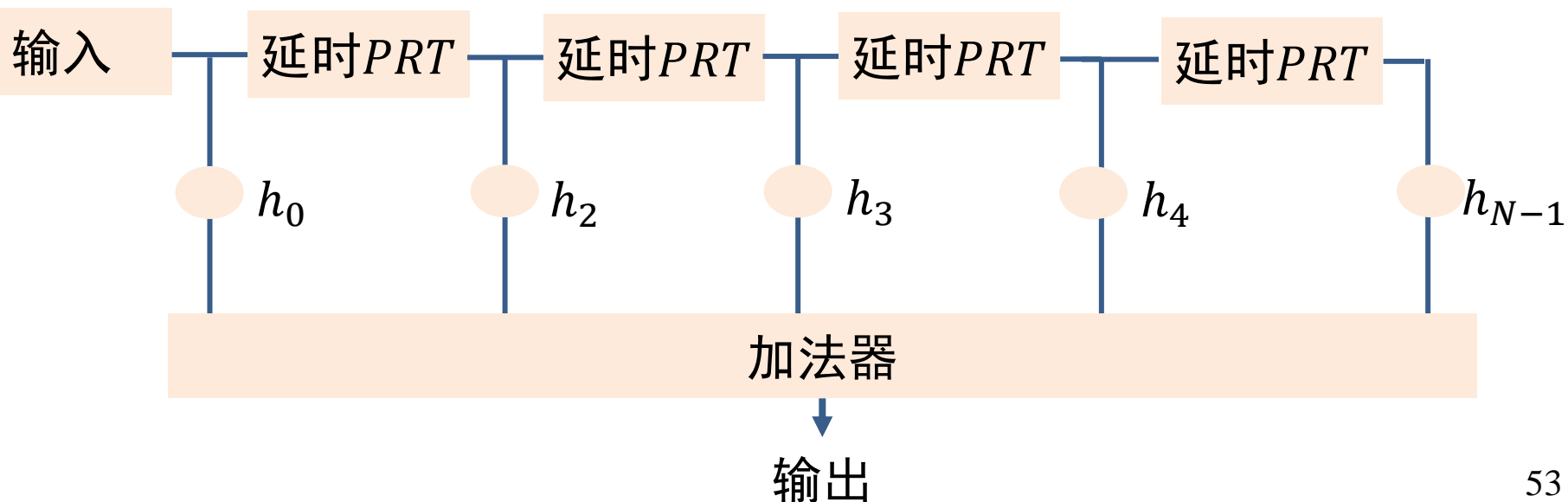
□ 对消的等价实现：FIR滤波器

◆ 线性时不变数字滤波器

两、三脉冲对消等效于特定系数的二阶、三阶 FIR 滤波器

两脉冲对消： $h_1 = 1$ 、 $h_2 = -1$

三脉冲对消： $h_1 = 1$ 、 $h_2 = -2$ 、 $h_3 = 1$



三、MTI雷达的信号处理

3、存在的问题

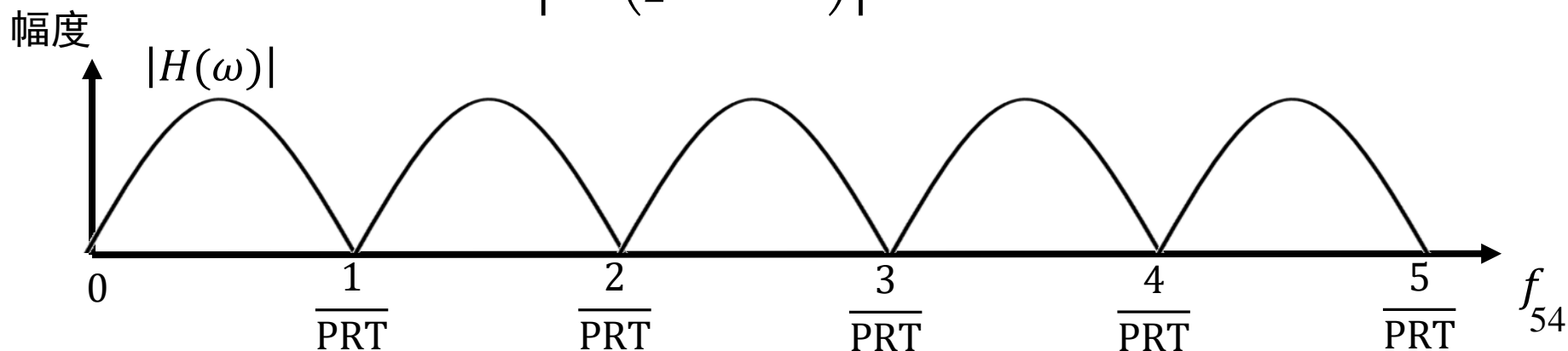
□ 盲速：

◆ 当目标多普勒频率是PRF的整数倍时，目标会被滤除

$$f_d = m \cdot PRF, \quad V_r = m \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot PRF$$

从频域信号理解，运动目标落入滤波器凹口，输出为零

$$|H(\omega)| = 2 \left| \sin \left(\frac{1}{2} \omega \cdot PRT \right) \right| = 2 |\sin(\pi f \cdot PRT)|$$



三、MTI雷达的信号处理

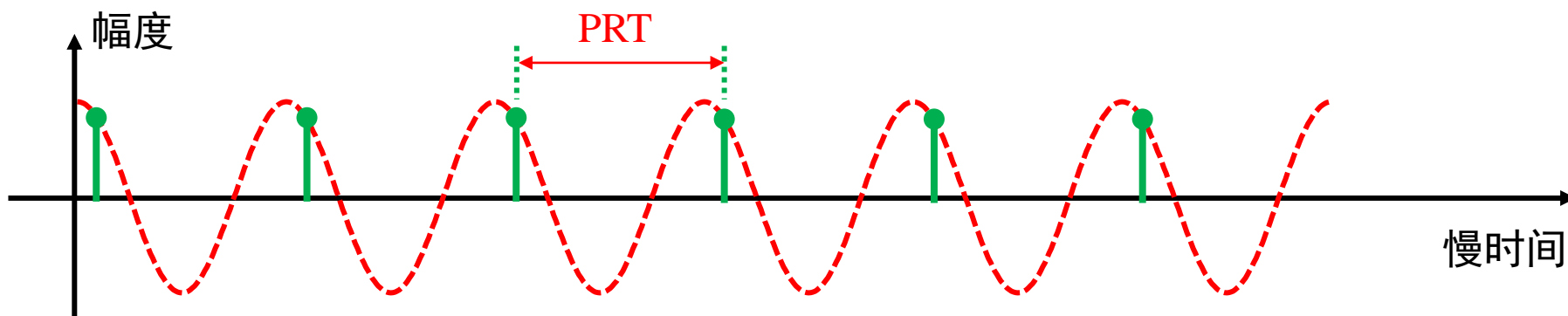
3、存在的问题

盲速：

◆ 当目标多普勒频率是PRF的整数倍时，目标会被滤除

$$f_d = m \cdot PRF, \quad V_r = m \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot PRF$$

从时域信号理解，运动目标的检波幅度相等，对消为零



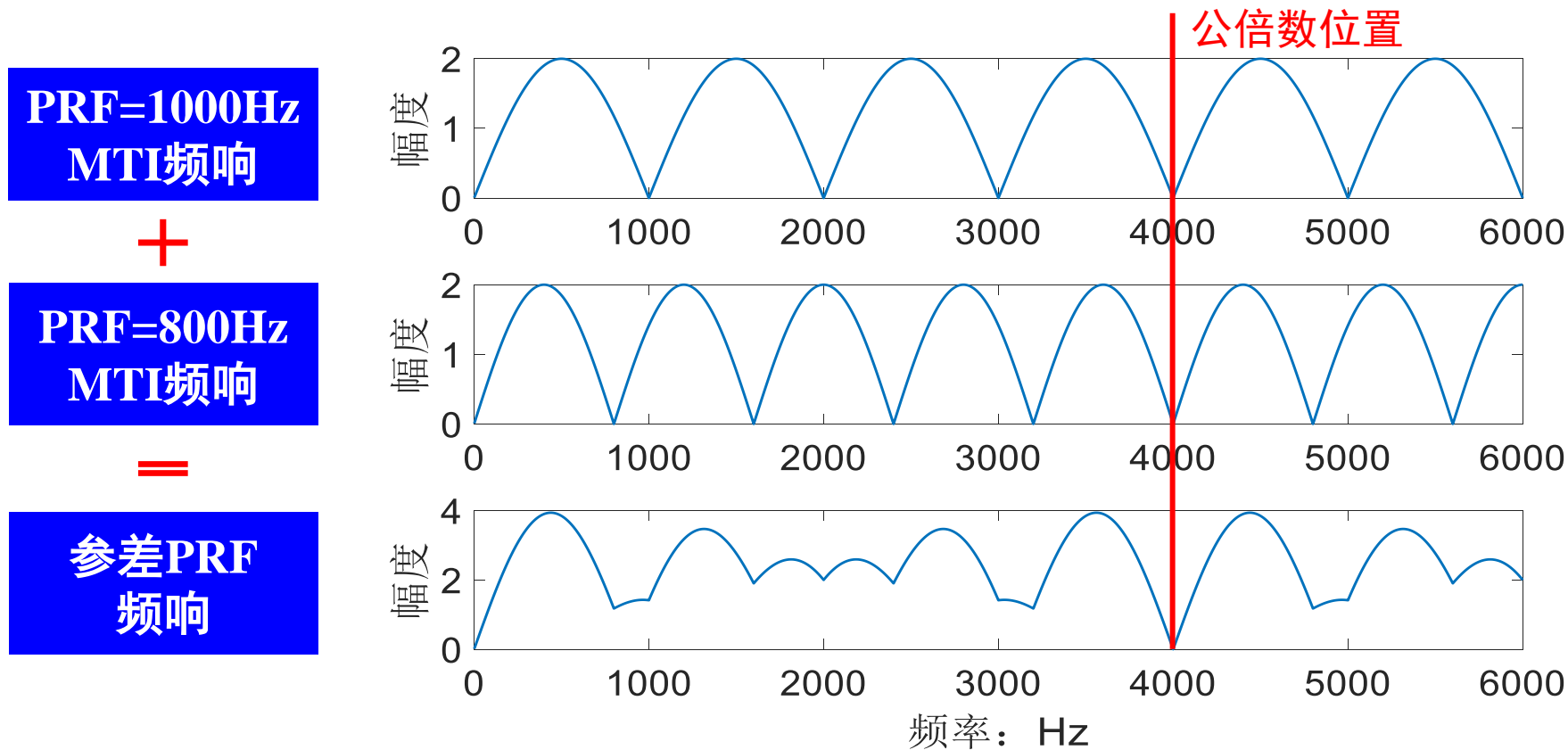
$$\text{I路: } s_o(t-\tau, n) = \frac{\sigma_{RCS}}{2} \cdot \cos\left(2\pi f_d \cdot n \cdot PRT - 4\pi \frac{R_0}{\lambda}\right)$$

三、MTI雷达的信号处理

4、解决方法

□ 参差MTI技术

- ◆ 改变 PRF，使用多个不同重复频率的脉冲交替发射
- ◆ 仅有目标多普勒等于多个不同重复频率的公倍数时，才会出现盲速



三、MTI雷达的信号处理

5、性能指标

□ 改善因子：

◆ MTI系统输出信杂比除以输入信杂比



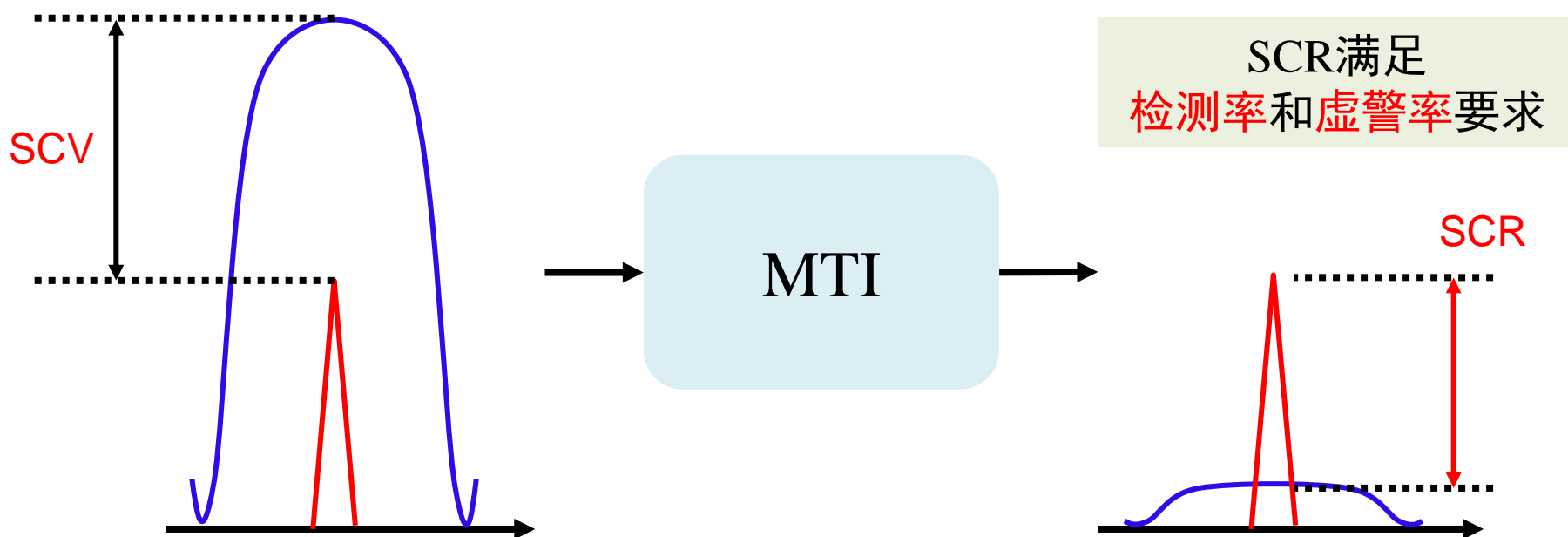
$$I = \frac{S_{out}/C_{out}}{S_{in}/C_{in}} = \frac{S_{out}}{S_{in}} \cdot \frac{C_{in}}{C_{out}}$$

三、MTI雷达的信号处理

5、性能指标

▣ 杂波可见度：SCV, Sub-Clutter Visibility

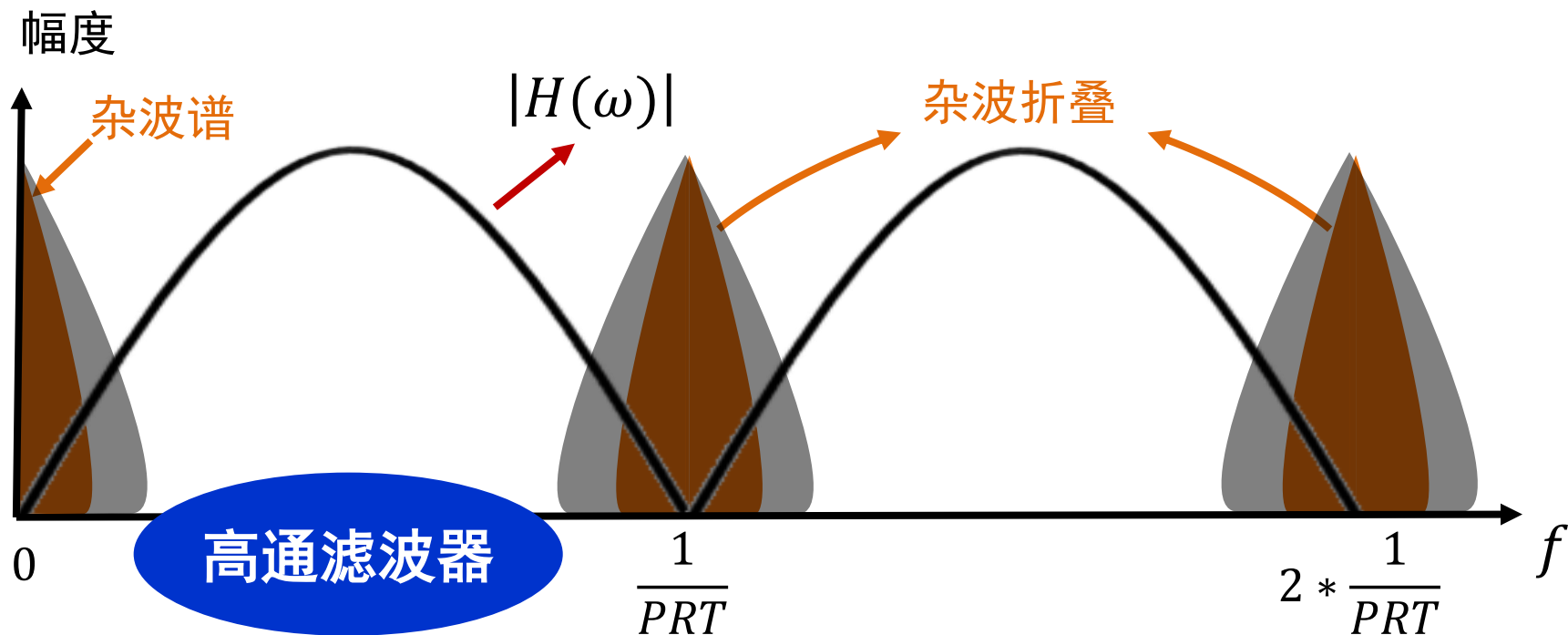
- ◆ 给定检测率和虚警率下，**杂波功率与最小可检测**目标回波功率比
- ◆ 例：SCV = 20dB，可从比目标回波强**100 倍**的杂波中检测出目标



三、MTI雷达的信号处理

6、限制MTI性能的主要因素

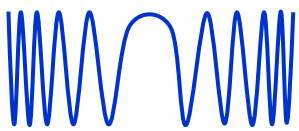
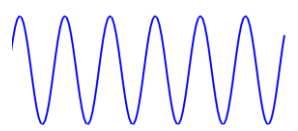
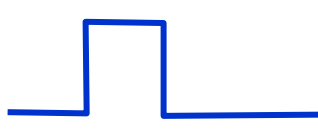
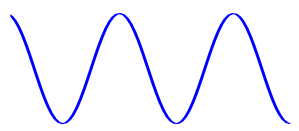
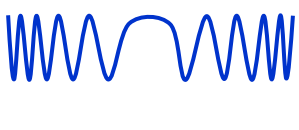
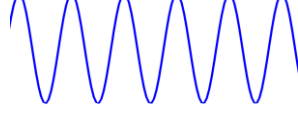

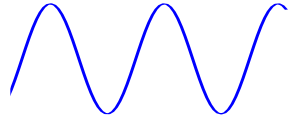
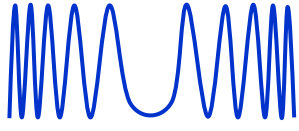
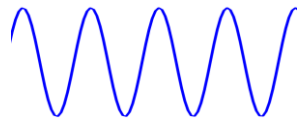
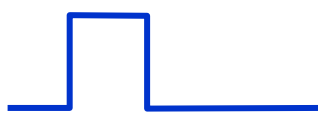
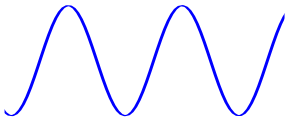
□ 原因：杂波频谱展宽，使MTI技术不能完全滤除



三、MTI雷达的信号处理

6、限制MTI性能的主要因素

□ 造成频谱展宽的主要因素：① 设备内部不稳定

发射脉冲不稳定	本振频率不稳定	定时脉冲不稳定	延迟处理不稳定
幅度、频率、相位 存在脉冲间变化	高稳定本振或相参 振荡存在变化	定时脉冲传输 存在抖动	延迟线延迟 存在变化
脉冲1 	脉冲1 	脉冲1 	脉冲1 
脉冲2 	脉冲2 	脉冲2 	脉冲2 
...
脉冲N 	脉冲N 	脉冲N 	脉冲N 

三、MTI雷达的信号处理

6、限制MTI性能的主要因素

□ 造成频谱展宽的主要因素：② 外部杂波起伏

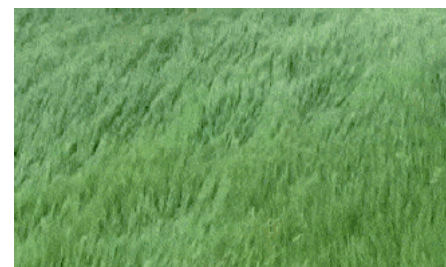
不起伏：不随时间而变

建筑物、水塔、大山、光秃的山丘等



起伏：随时间而变

树、植被、海洋、雨、箔条

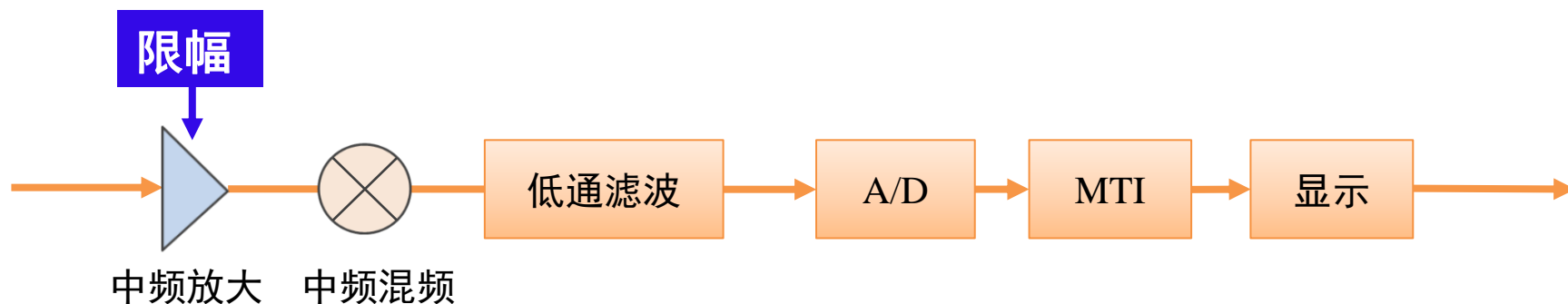




三、MTI雷达的信号处理

6、限制MTI性能的主要因素

□ 造成频谱展宽的主要因素：③ 限幅器的非线性特性

◆ 引入限幅器原因：杂波强，导致MTI后剩余杂波过大，使显示饱和，因此电路引入中放限幅，减小杂波过强导致的杂波剩余



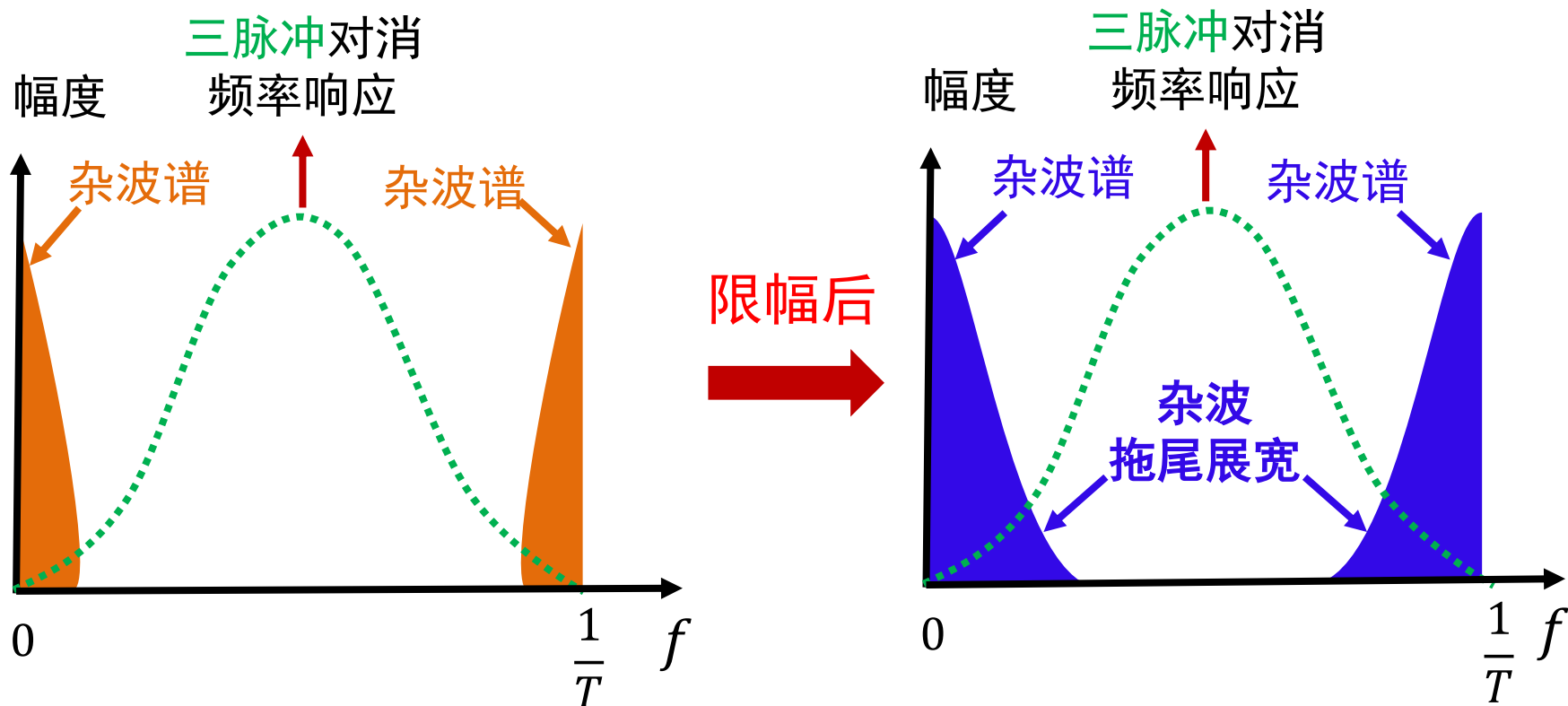
未限幅：有杂波剩余	限幅后：目标一定程度可见
	

三、MTI雷达的信号处理

6、限制MTI性能的主要因素

□ 造成频谱展宽的主要因素：③ 限幅器的非线性特性

◆ 限幅器带来的问题：非线性处理，杂波谱展宽，恶化MTI改善因子
对于三脉冲对消，性能可降低 15~25 dB

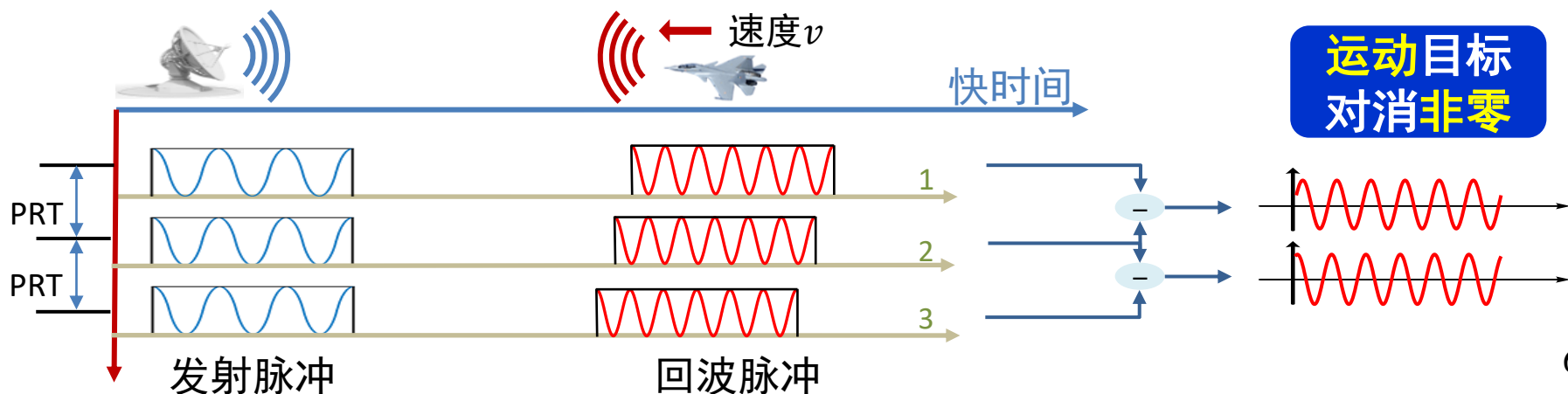
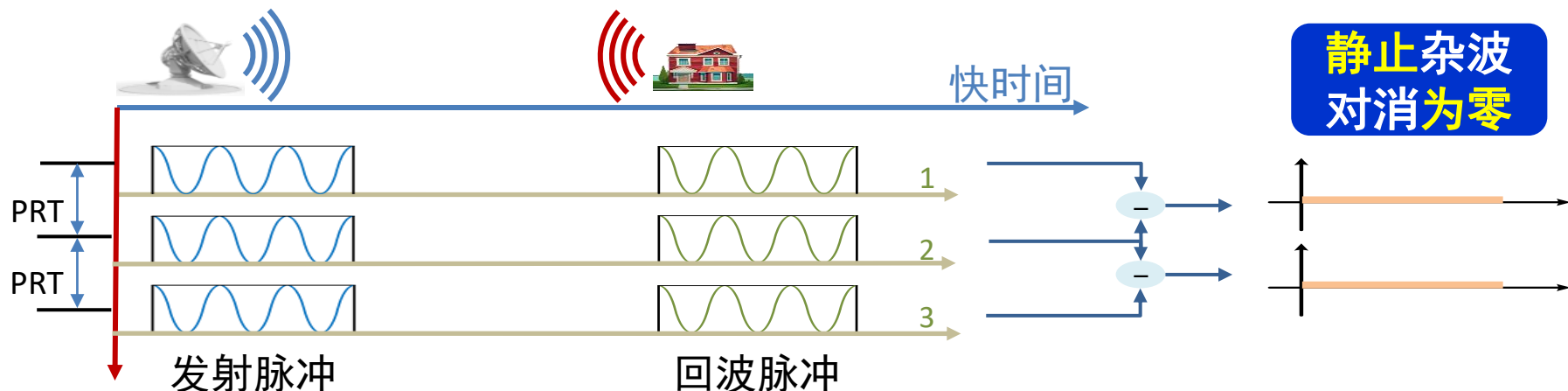


三、MTI雷达的信号处理

7、小结

□ MTI基本原理：

◆ 通过**脉间对消**滤波静止目标，保留运动目标

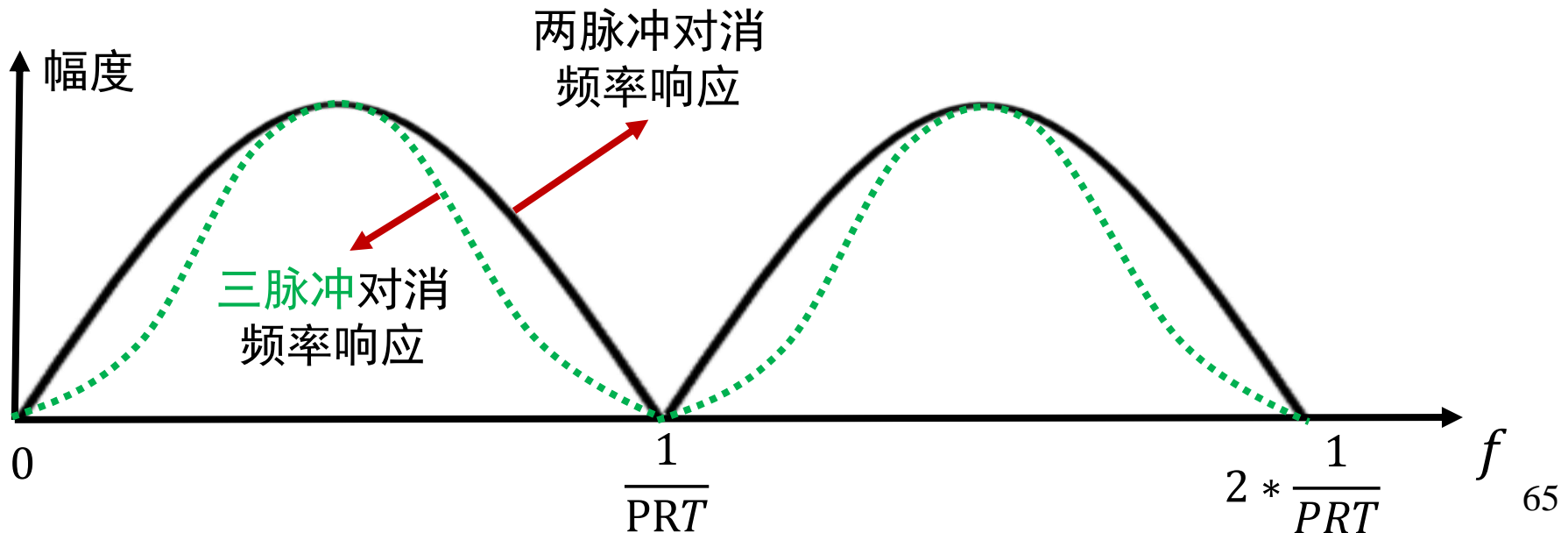
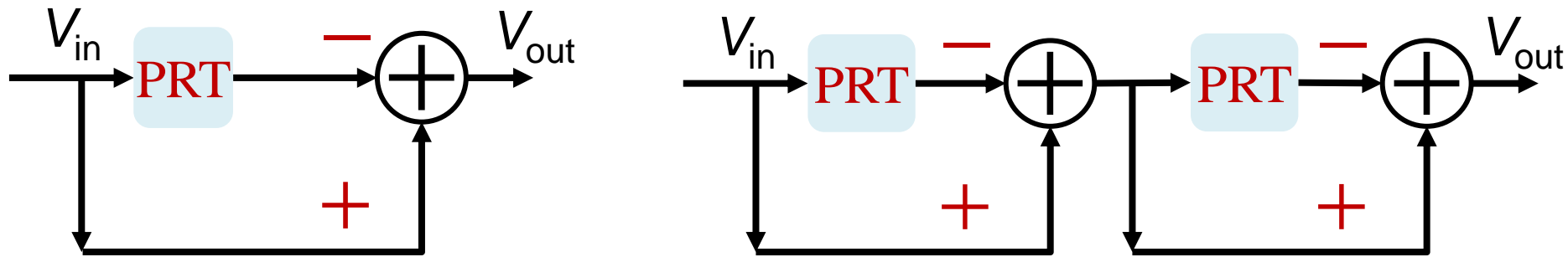


三、MTI雷达的信号处理

7、小结

□ MTI实现方法：

◆ 两脉冲对消、三脉冲对消



三、MTI雷达的信号处理

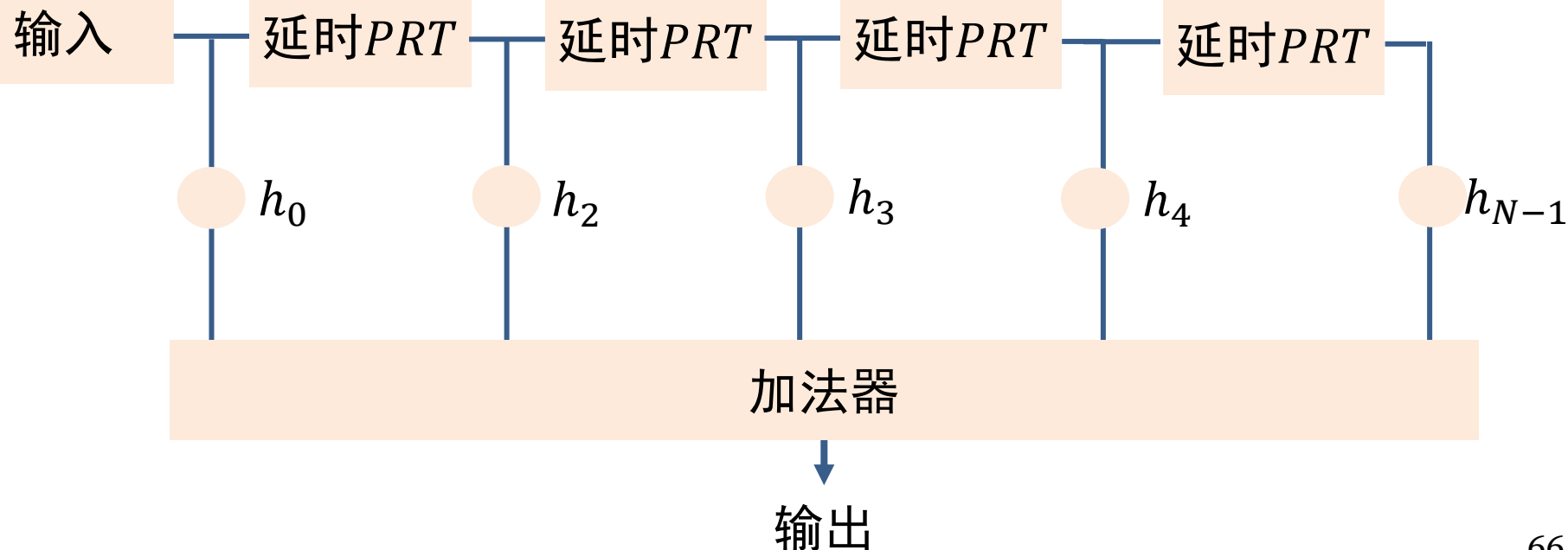
7、小结

□ MTI实现方法：

◆ 等效实现：FIR滤波器

两脉冲对消： $h_1 = 1$ 、 $h_2 = -1$

三脉冲对消： $h_1 = 1$ 、 $h_2 = -2$ 、 $h_3 = 1$



三、MTI雷达的信号处理

7、小结

□ 盲速：

- ◆ 当目标多普勒频率是PRF的整数倍时，目标会被滤除

$$f_d = m \cdot PRF, \quad V_r = m \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot PRF$$

□ 解决方法：参差MTI

- ◆ 使用多个不同重复频率的脉冲，第一盲速为不同重复频率的公倍数

三、MTI雷达的信号处理

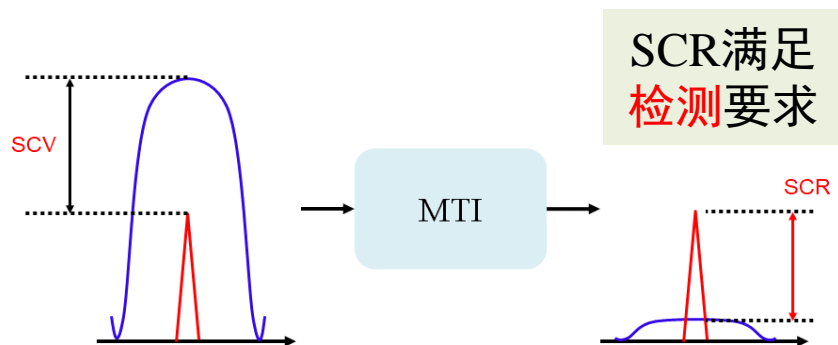
7、小结

MTI主要性能指标

改善因子

$$I = \frac{S_{out}/C_{out}}{S_{in}/C_{in}} = \frac{S_{out}}{S_{in}} \cdot \frac{C_{in}}{C_{out}}$$

杂波可见度



影响MTI性能的因素

设备内部 不稳定	发射脉冲、本振频率、 定时脉冲、延迟处理
杂波起伏 非静止	
限幅器的 使用	

目 录

一、杂波中目标检测问题

二、脉冲雷达多普勒效应

三、MTI雷达的信号处理

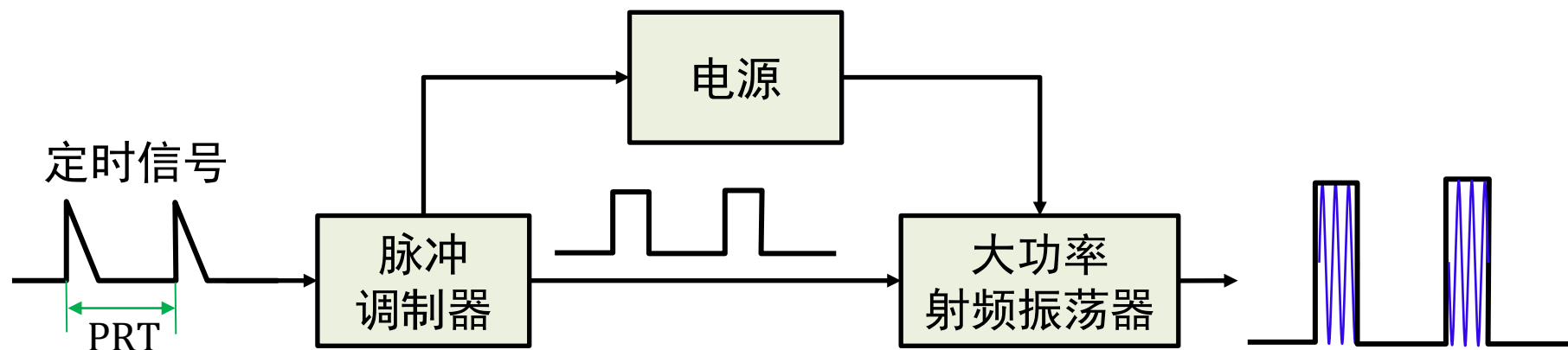
四、早期MTI雷达的实现

四、早期MTI雷达的实现

1、早期的雷达系统

□ 早期的雷达系统：功率振荡型发射机

◆ 磁控管：同时实现信号频率振荡与功率放大

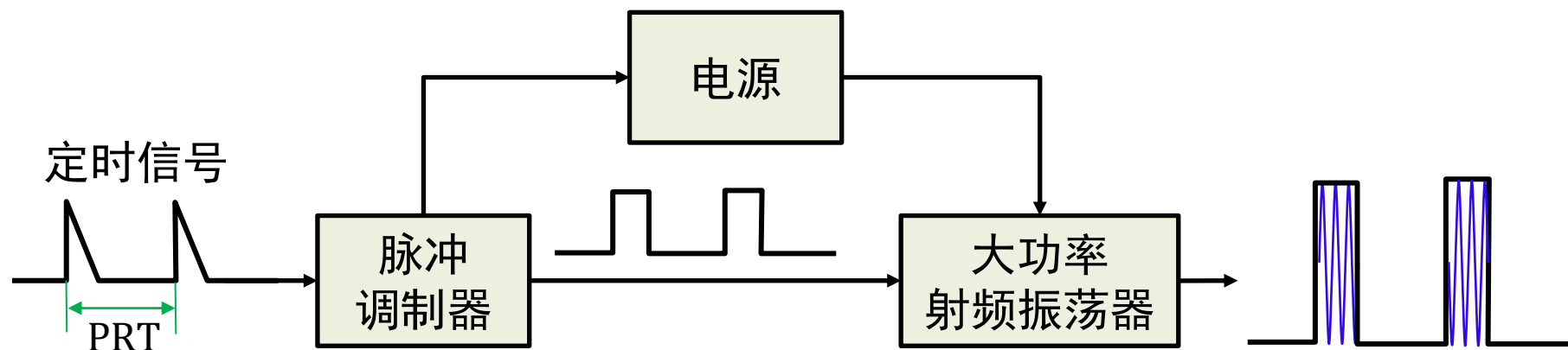


四、早期MTI雷达的实现

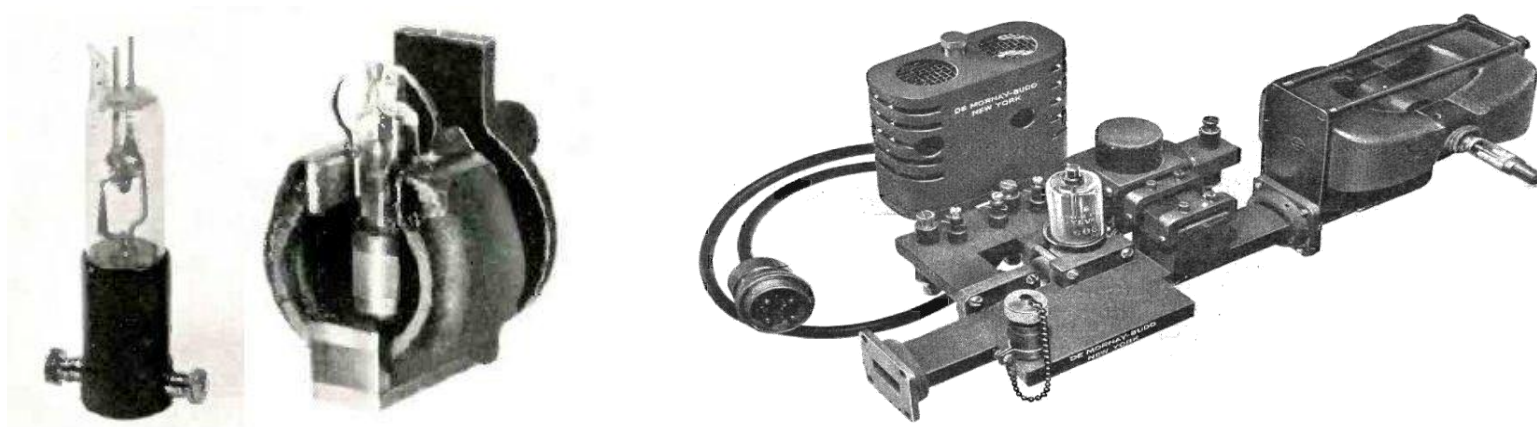
1、早期的雷达系统

□ 早期的雷达系统：功率振荡型发射机

◆ 磁控管：同时实现信号频率振荡与功率放大



磁控管

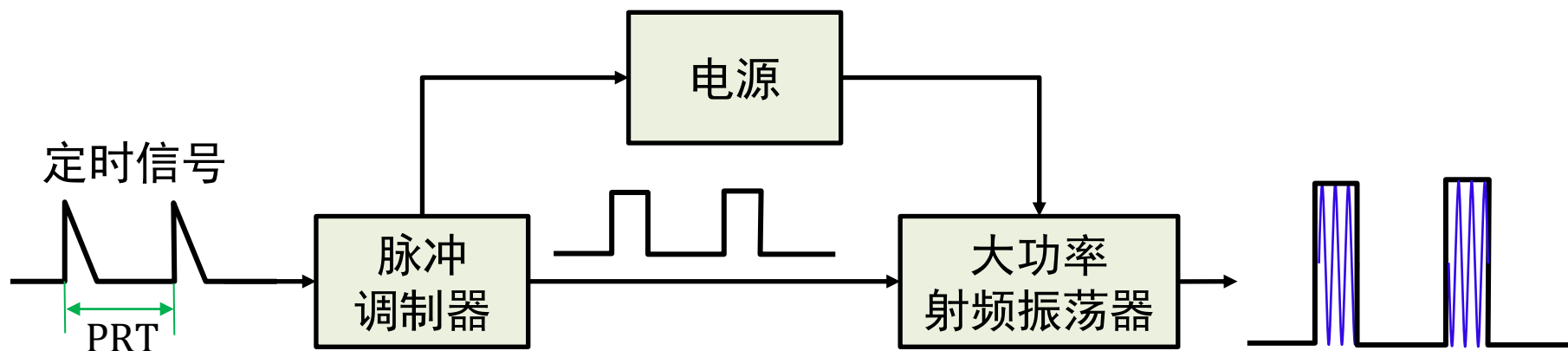


四、早期MTI雷达的实现

1、早期的雷达系统

□ 早期的雷达系统：功率振荡型发射机

◆ 磁控管：同时实现信号频率振荡与功率放大



缺点：

- 1、每个脉冲起始相位随机
- 2、无法精确控制振荡频率
- 3、频率稳定度不高

微波炉
仍然使用

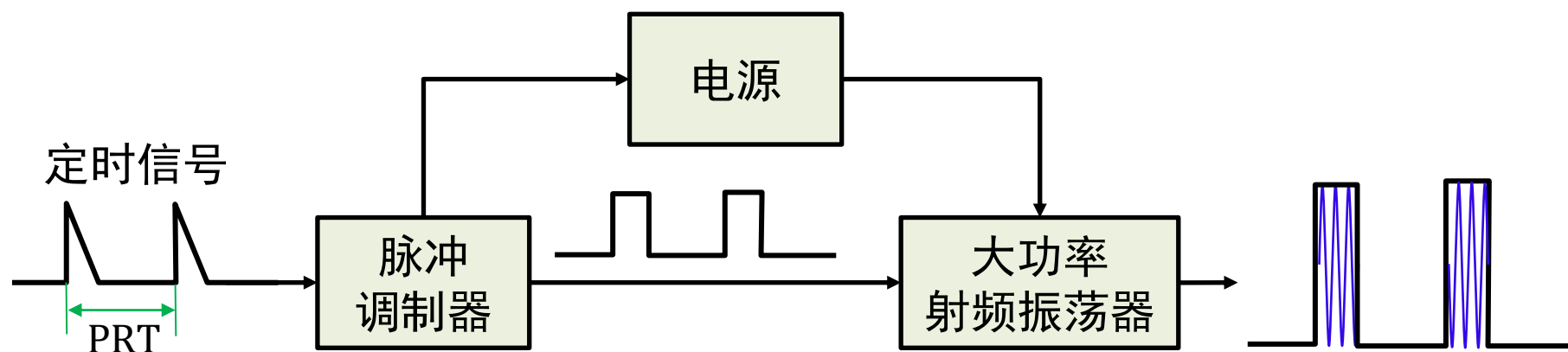


四、早期MTI雷达的实现

1、早期的雷达系统

❑ 早期的雷达系统：功率振荡型发射机

◆ 磁控管：同时实现信号频率振荡与功率放大



缺点：

- 1、每个脉冲起始相位随机
- 2、无法精确控制振荡频率

微波炉
仍然使用

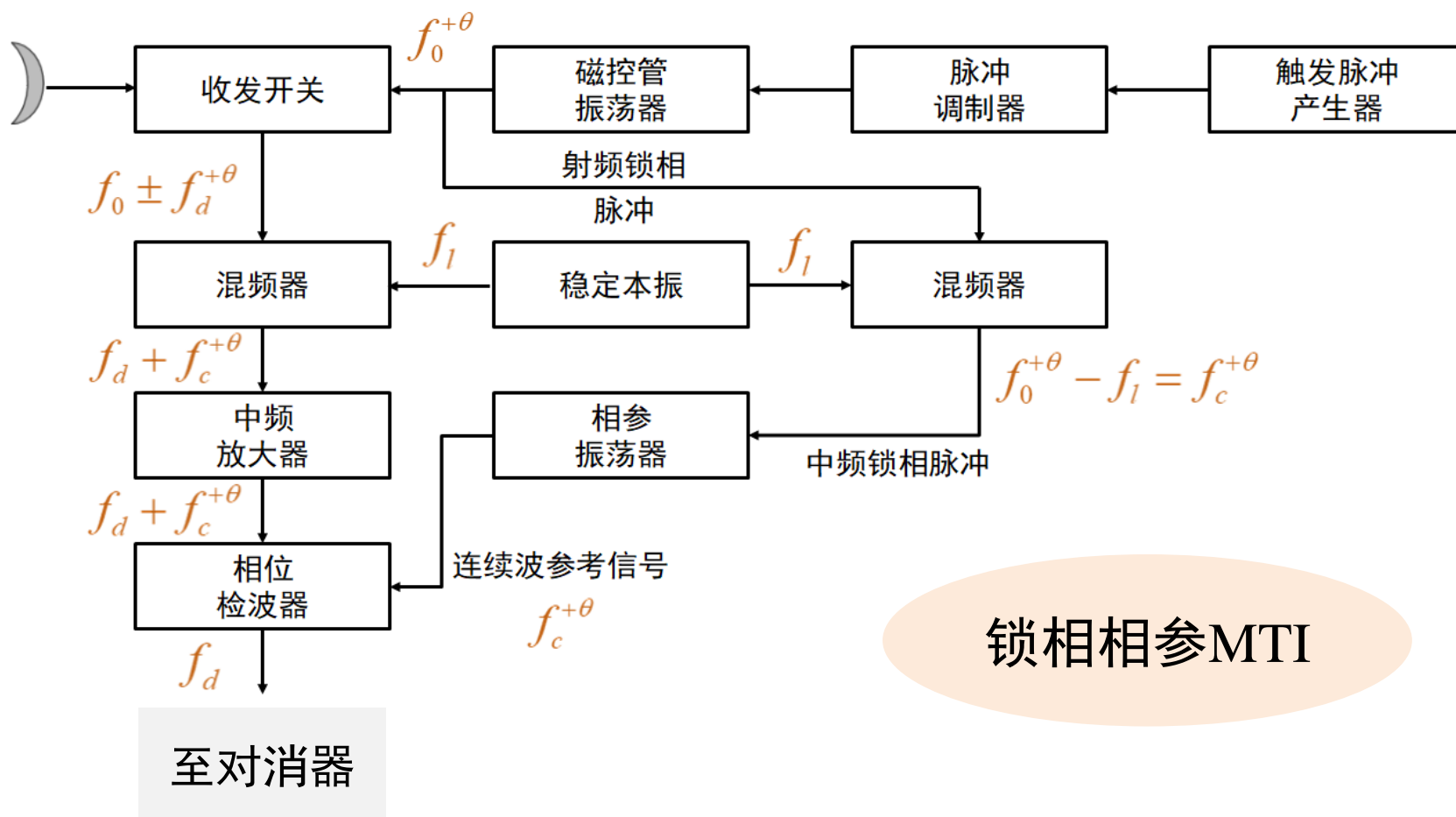


如何实现MTI动目标检测？

四、早期MTI雷达的实现

1、早期的雷达系统

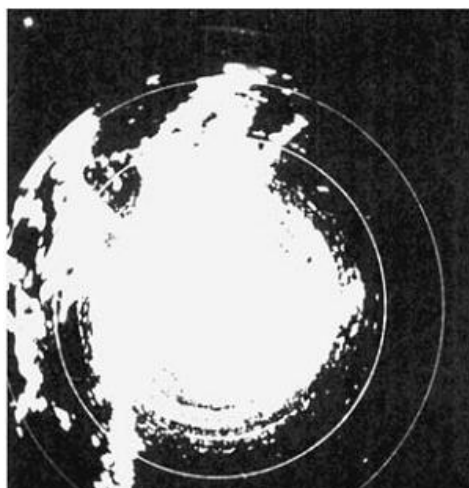
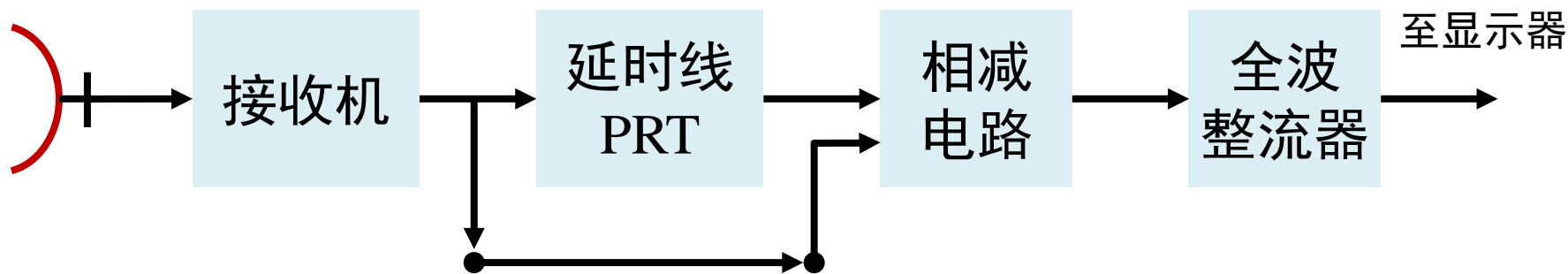
□ 为保证脉冲对消相参，
需要利用发射的耦合信号，在接收中进行校准起始随机相位



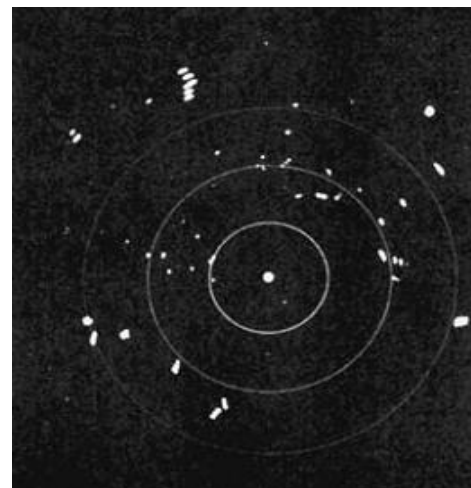
四、早期MTI雷达的实现

2、MTI的模拟实现

□ 核心：延迟线 + 回波相减



对消后



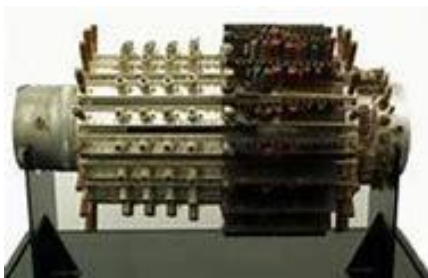
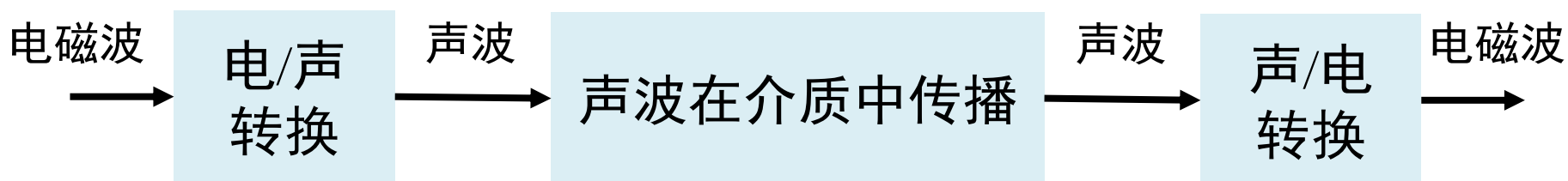
模拟电路如何实现MTI?

四、早期MTI雷达的实现

2、MTI的模拟实现

□ 模拟处理的关键：延迟线

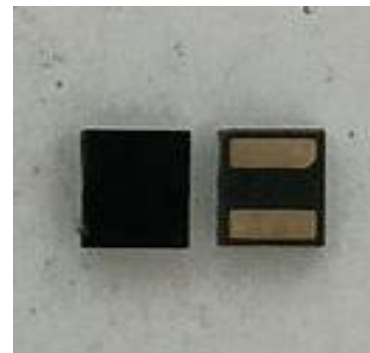
- ◆ 实现方式：声延迟线，信号转换成超声波，延迟后再转换成电信号
- ◆ 主要类型：水银延迟线、融石英延迟线、声表面波延迟线



水银延迟线



融石英延迟线



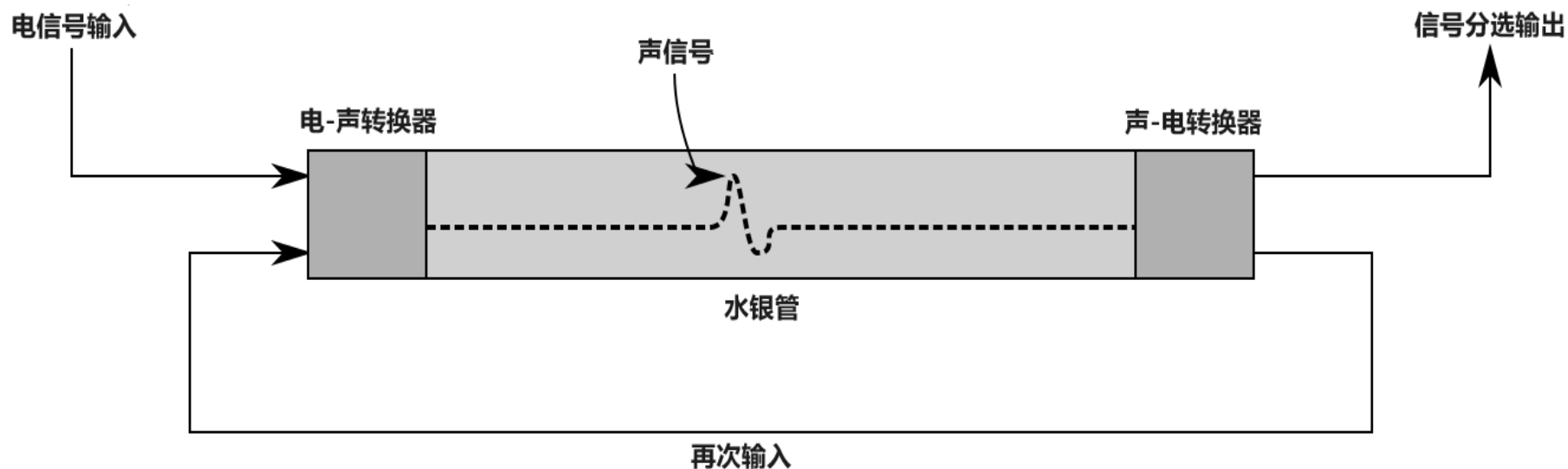
声表面波延迟线

四、早期MTI雷达的实现

2、MTI的模拟实现

□ 水银延迟线

◆ **基本原理**：超声波进入水银介质，在介质中多次慢速传播实现延迟



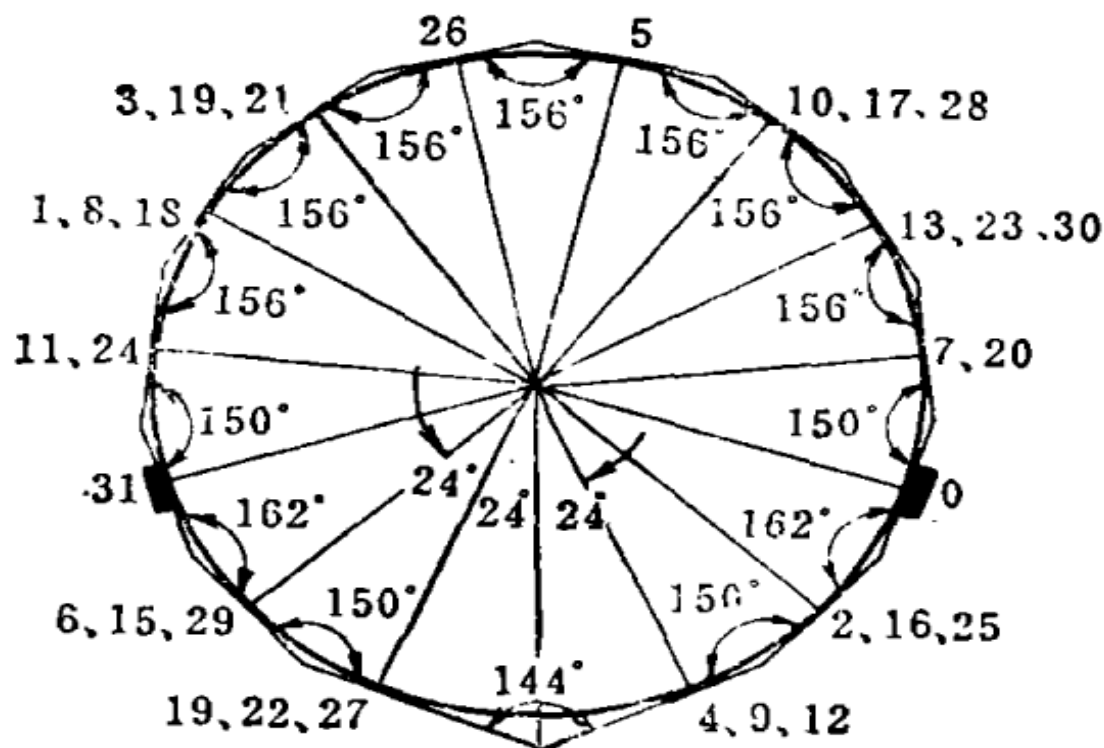
水银延迟线结构原理

四、早期MTI雷达的实现

2、MTI的模拟实现

□ 熔石英延迟线：

◆ 基本原理：超声波进入石英玻璃，经多次反射实现延迟



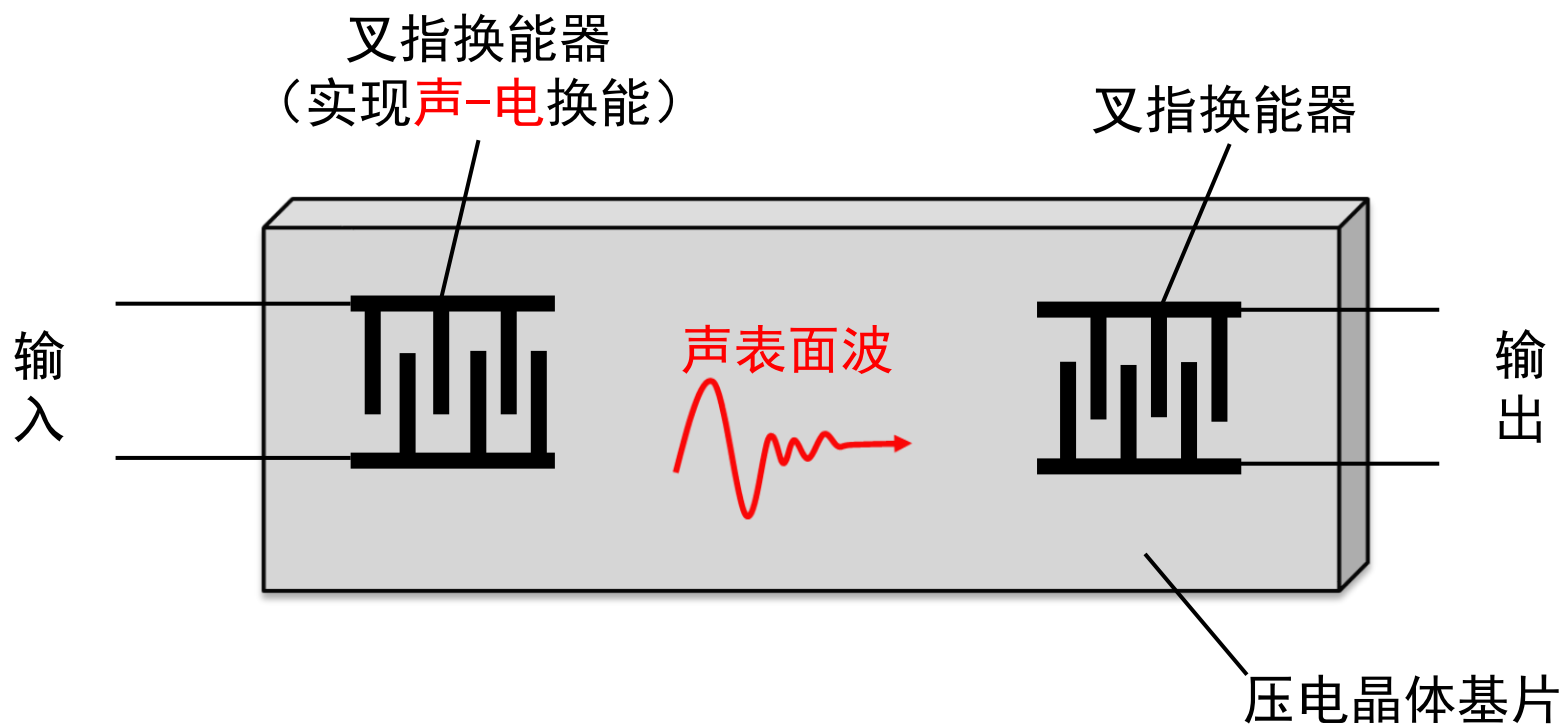
多面体熔石英延迟线结构原理

四、早期MTI雷达的实现

2、MTI的模拟实现

□ 声表面波延迟线：

◆ 基本原理：超声波进入敏感层，改变声表面波的速度实现延迟



声表面波延迟线结构原理

四、早期MTI雷达的实现

2、MTI的模拟实现

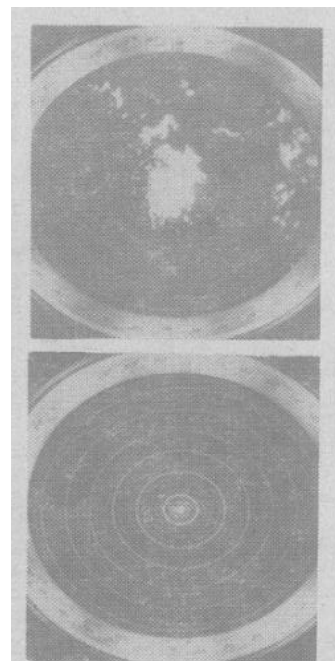
- ❑ 动目标显示系统：首次在小860炮瞄雷达上加装成功
是我国首次研制成功的十公分波段动显系统
- ❑ 1977年参加某电子对抗演习，成功发现箔条云中的飞机



毛二可院士接受采访
讲述动目标显示系统研究工作



小860雷达



对消结果

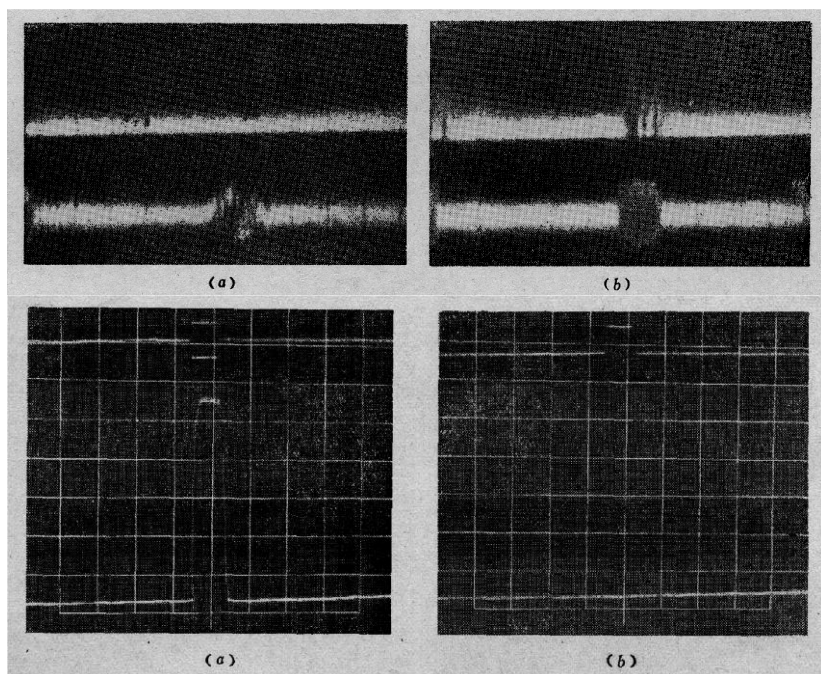
四、早期MTI雷达的实现

2、MTI的模拟实现

□ 70年代末，电荷耦合器件（CCD）进入毛二可院士的视野

◆ CCD：模数混合电路，时间离散、幅度连续

利用改变驱动电荷转移的时钟频率，可以灵活控制延时变化



单路对消器输入、输出波形



毛二可意大利参加学术会议

四、早期MTI雷达的实现

2、MTI的模拟实现

□ 世界首创数模混合CCD动目标处理技术

◆ “模数混合动目标显示系统”：获1987年**国家发明奖二等奖**



毛二可与同事在做实验



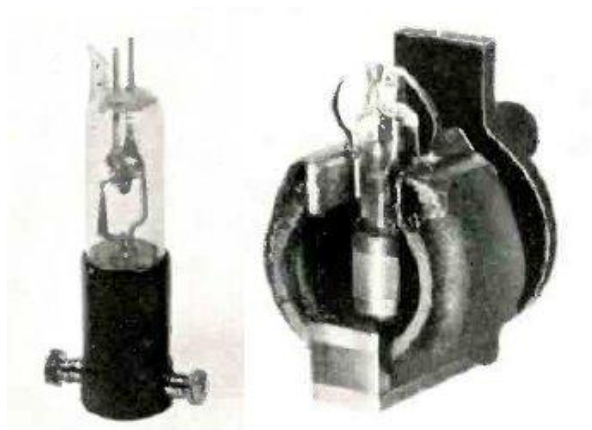
国家发明奖**二等奖**

四、早期MTI雷达的实现

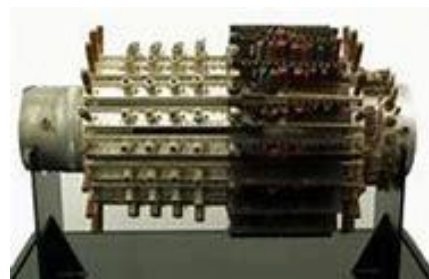
3、小结

早期MTI雷达：
磁控管**锁相相参**MTI

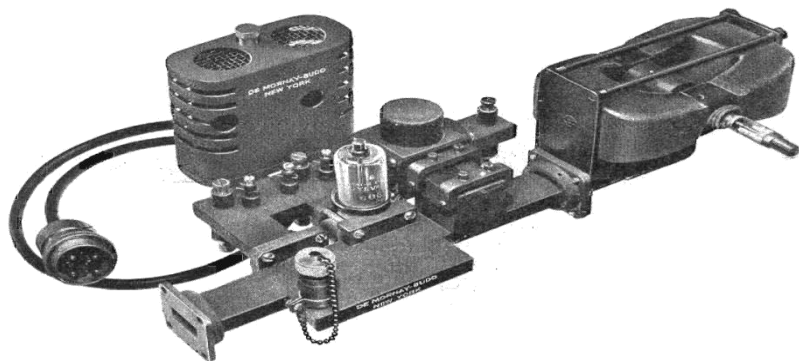
磁控管



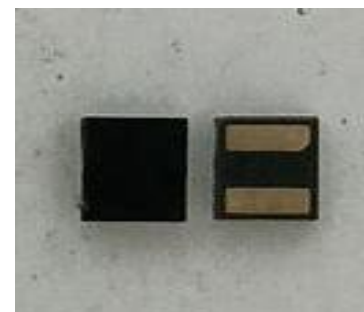
模拟脉冲对消
采用**声延迟线**



水银延迟线



融石英延迟线



声表面波延迟线₃

作业

习题

□ 提交方式：1274530947@qq.com 李湘冀

- 1、试分析杂波与噪声的主要区别，列举三种常见的杂波类型，并说明其对雷达目标检测的影响。
- 2、雷达接收机为何需要采用正交检波（I/Q 通道）来提取目标多普勒频率？试从信号频谱和单边谱的角度解释其必要性。
- 3、简述 MTI 雷达的基本原理，并对比两脉冲对消和三脉冲对消的频率响应特性。说明为何三脉冲对消的杂波抑制性能更优。
- 4、某 X 波段雷达波长为 3 cm，脉冲重复时间（PRT）为 50 μ s。
 - （1）计算该雷达的第一盲速；
 - （2）若目标以径向速度 300 m/s 向雷达靠近，判断其是否会被 MTI 滤除，并解释原因；



谢谢
