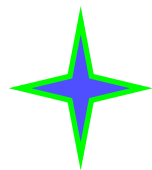


# 第6章 目标距离的测量

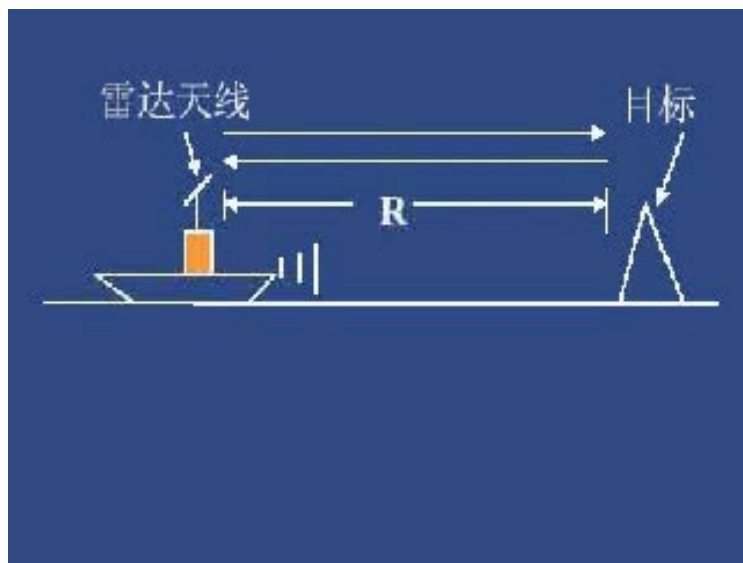


## 主要内容及基本要求

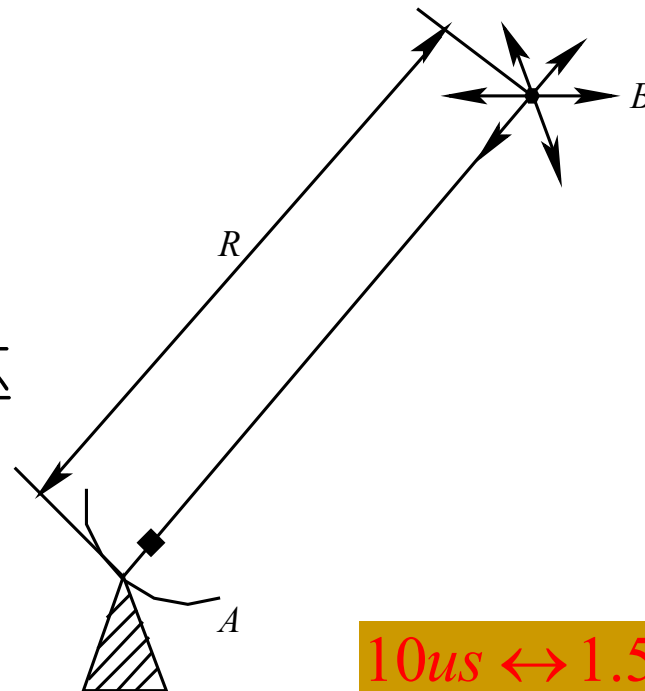
理解脉冲测距的基本原理；  
理解调频法测距的基本原理；  
理解脉冲压缩；  
了解距离跟踪原理；

# 雷达如何测距？

- (1) 脉冲法—脉冲雷达
- (2) 调频法—连续波雷达



目标距离的测量



$10\mu s \leftrightarrow 1.5km$

$$\begin{cases} t_R = \frac{2R}{c} \\ R = \frac{1}{2}ct_R \end{cases}$$



# 雷达测距的实现方法

## 物理解释：

一般地说单载频的连续波雷达没有测距能力，这与其发射信号带宽太窄有关。若必须测量距离，则需要在连续波发射信号上加上某些定时标志以识别发射的时间和回波时间。标志越尖锐、鲜明，则传输时间的测量越准确。由傅立叶变换知：定时标志越尖锐，则发射信号的频谱越宽。因此为了测量传输时间或距离，则必须扩展单载频连续波的频谱。

## 实现方法：

调幅——脉冲法测距

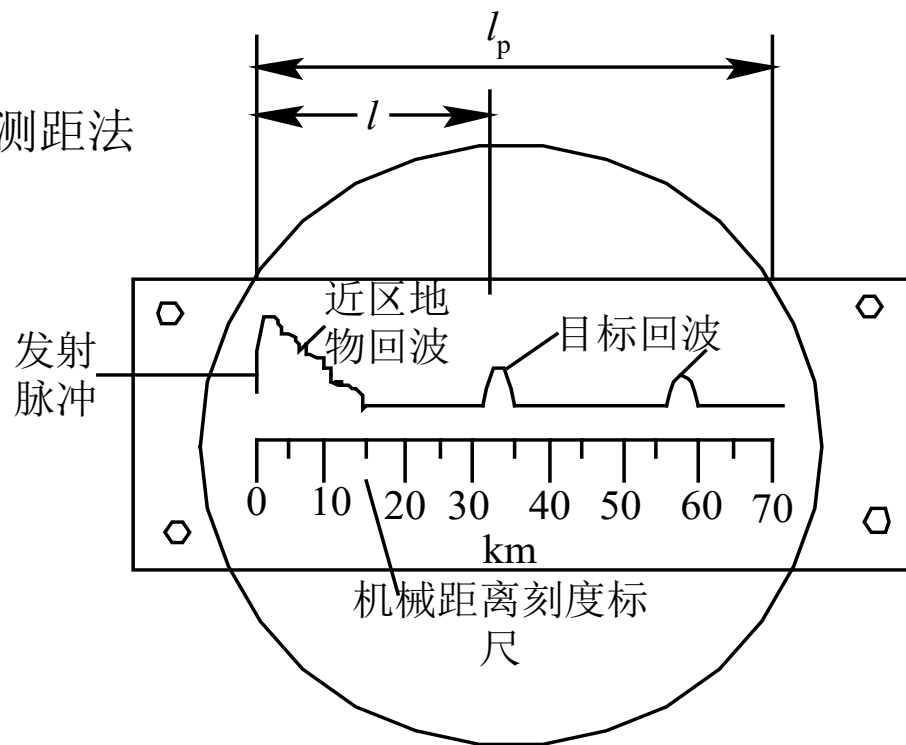
调频——频率法测距

调相——相位法测距

---

## 脉冲雷达测距

- 脉冲雷达测距
  - 脉冲延时法：最直接、应用最广的测距法
  - $R = ct_R/2$ ,  $1\mu s \Rightarrow 150m$
  - 简单雷达  
显示器直接测读
  - 现代雷达  
距离门（波门）选通



**需要思考的问题！**

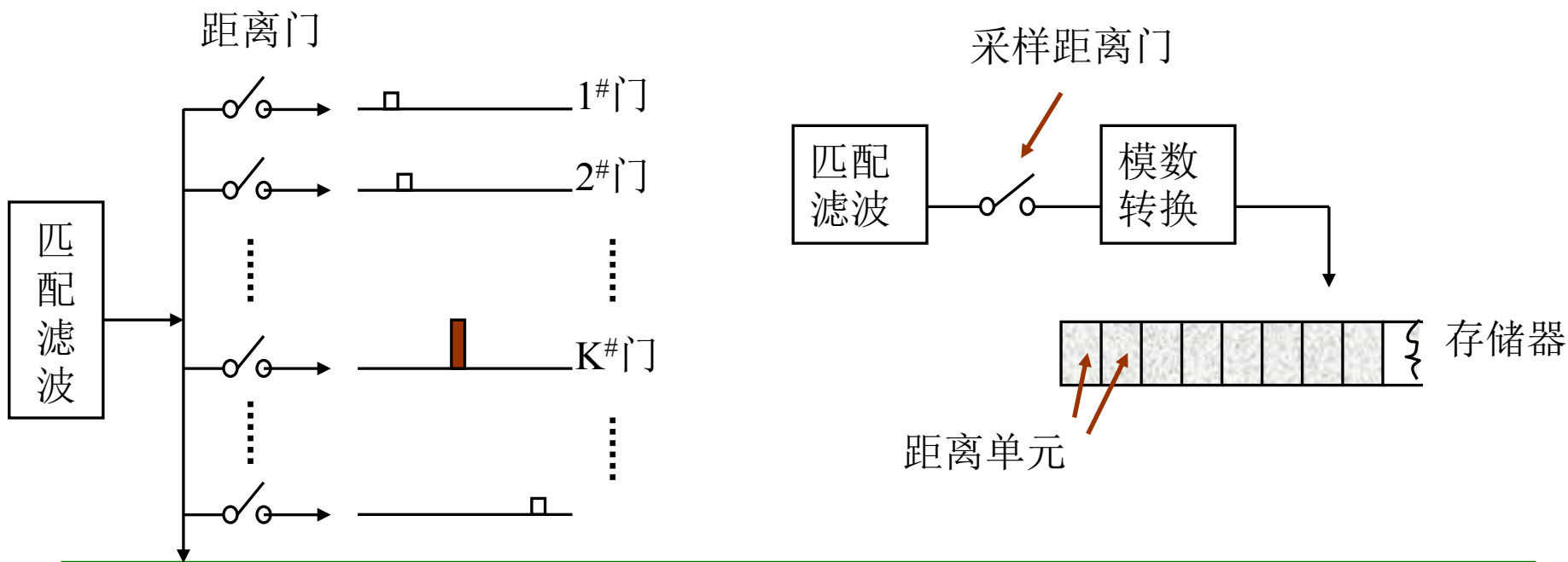
**用脉冲的哪里来作为  
回波到达时刻？  
有何区别？**

具有机械距离刻度标尺的  
显示器荧光屏画面

## 脉冲雷达测距

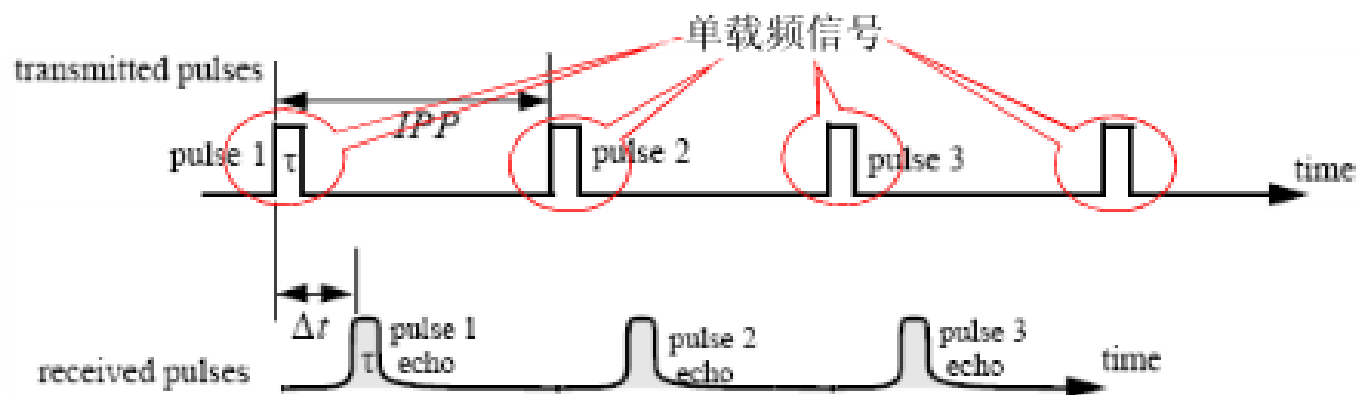
### ■ 距离门测距

- 测读回波脉冲延时的距离增量（单元）
- 模拟雷达：按时间顺序开闭的一组高速电子开关，每个开关开启时间为一距离门
- 数字雷达：采样间隔为一距离门



## 脉冲雷达

常规脉冲雷达是幅度调制的一个例子，其发射波形是单载频的矩形脉冲，按一定的(单重复周期)或交错的重复周期(参差重复周期)工作，发射一个短脉冲相当于对电磁波打上标记以测往返时间。



# 影响测距精度的因素

误差种类：

## (1) 系统误差

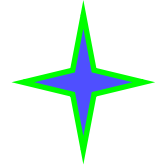
由于测量工具本身固有误差、测量原理本身理论的缺陷、实验操作及实验人员本身心理生理条件的制约而带来的测量误差。

有何特征？

## (2) 随机误差

即使在完全消除系统误差这种理想情况下，多次重复测量，仍会由于各种偶然的、无法预测的不确定因素干扰而产生测量误差。

有何特征？



## ■ 怎么考虑测距中的误差？

$$R = c/2 t_R = 0.15 t_R$$

$$dR = \frac{\partial R}{\partial c} dc + \frac{\partial R}{\partial t_R} dt_R = \frac{R}{c} dc + \frac{c}{2} dt_R$$

$$\Delta R = \frac{R}{c} \Delta c + \frac{c}{2} \Delta t_R$$

$\Delta c$ 为电波传播速度平均值的误差；  $\Delta t_R$ 为测量目标回波延迟时间的误差。



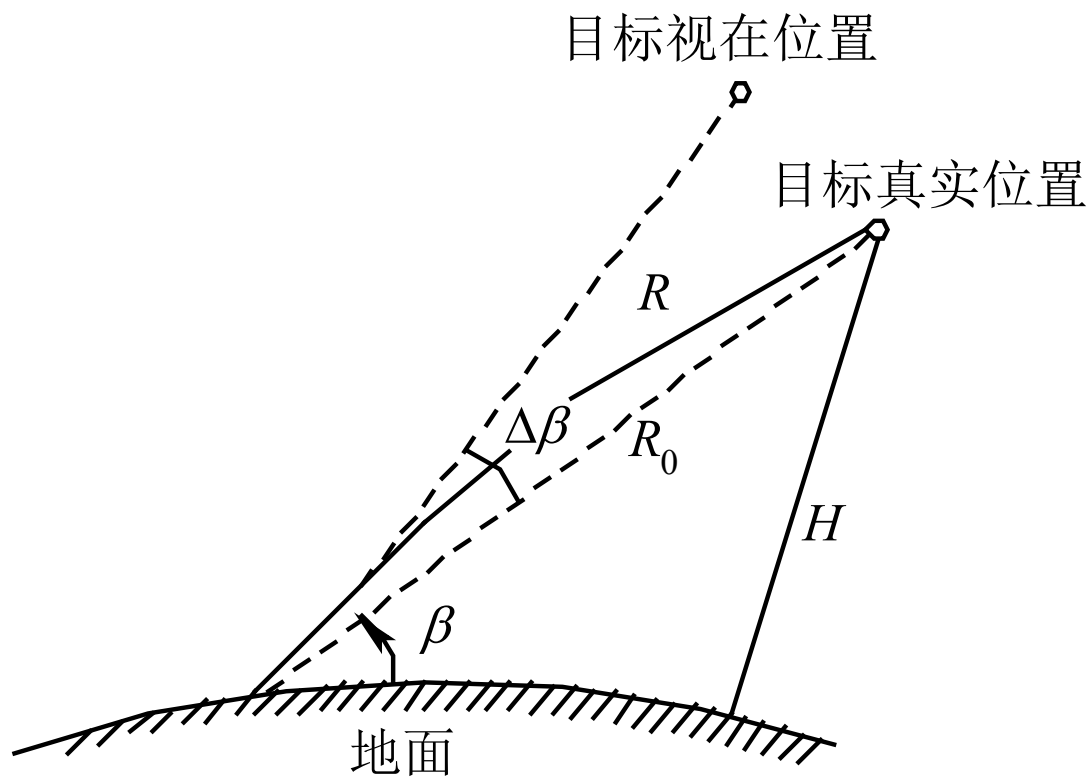
## (1) 电波传播速度变化产生的误差

估算一下传播速度变化引起的误差

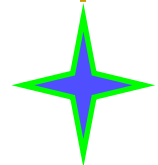
$$\Delta R = \frac{R}{c} \Delta c + \frac{c}{2} \Delta t_R \xrightarrow{\text{速度的随机误差}} \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta c}{c}$$

传 播 条 件	$c/(\text{km/s})$	备 注
真空	$299\,776 \pm 4$	根据 1941 年测得的材料
	$299\,773 \pm 10$	根据 1944 年测得的材料
利用红外波段光在大气中的传播 厘米波 ( $\lambda = 10\text{ cm}$ ) 在地面—飞机间 传播, 当飞机高度为	$299\,792.456\,2 \pm 0.001$	根据 1972 年测得的材料
$H_1 = 3.3\text{ km}$	299 713	皆为平均值, 根据脉冲导航系统测得的材料
$H_2 = 6.5\text{ km}$	299 733	
$H_3 = 9.8\text{ km}$	299 750	

## (2) 因大气折射引起的误差



大气层中电波的折射



### (3) 测读方法误差

直接从显示器上测量目标距离：显示器荧光亮点直径，刻度精度，人工测读时的惯性等。

自动测距时的测量误差：测距系统的结构，系统传递函数，噪声干扰等。

《雷达系统》

丁鹭飞, 张平  
编

## ■ 测距精度的理论极限

时间延迟估计误差下界 (时延估计  
极限精度)

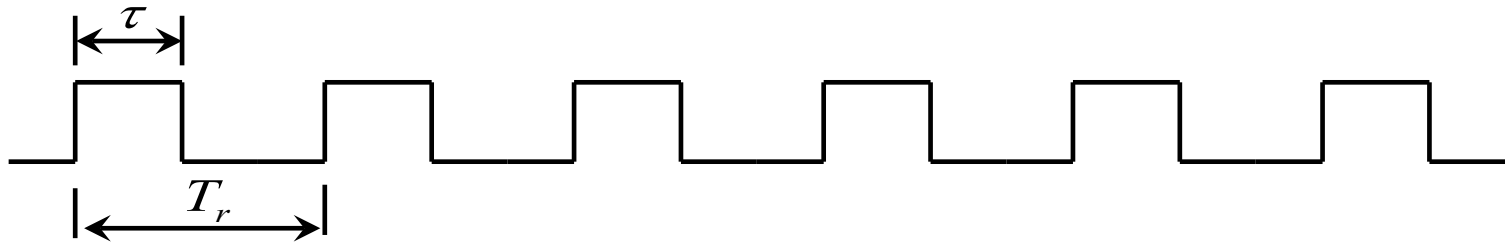
$$\sigma_{t_r}^2 = \frac{1}{8\pi^2 \frac{E}{N_0} B_e^2}$$

式中,  $E$  为信号能量;  $N_0$  为噪声功率谱密度;  $B_e$  为信号  $u(t)$  的均方根带宽,

时延估值均方根误差反比于信号噪声比及信号的均方根带宽。

# 雷达测距的几个基本概念

下面以脉冲雷达信号为例介绍几个测距的基本概念：



简单矩形脉冲波形

脉冲宽度(pulse width) ——  $\tau$

脉冲重复周期PRI (Pulse Repetition Interval) ——  $T_r$

脉冲重复频率PRF (Pulse Repetition Frequency) ——  $f_r = 1/T_r$

占空比(duty cycle) ——  $\tau/T_r$

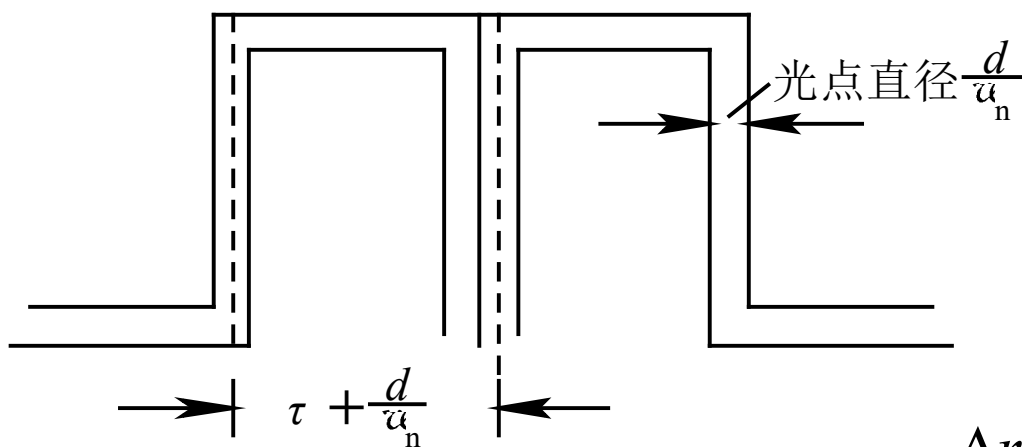
峰值功率 $P_t$ 与平均功率 $P_{av}$  ——  $P_{av} = \frac{P_t \tau}{T_r}$

典型中程防空雷达参数： $\tau = 1\mu s$ ,  $T_r = 1ms$ ,  $P_t = 1MW$ , 则占空比为1/1000,  $P_{av} = 1KW$

# 距离分辨力和测距范围

## 1、距离分辨力：

同一方向上两个大小相等点目标之间最小可区分距离。



距离分辨力

$$\Delta r_c = \frac{c}{2} \left( \tau + \frac{d}{v_n} \right) \approx \frac{c}{2} \tau$$

$d$ 为光点直径；  $v_n$ 为光点扫掠速度 (cm/  $\mu$  s)。

## 2、脉冲雷达测距范围：包括最小可测距离和最大单值测距范围。

**最小可测距离**——指雷达能测量的最近目标的距离。脉冲雷达收发共用天线，在发射脉冲宽度 $\tau$ 时间内，接收机和天线馈线系统间是断开的，不能正常接收目标回波。发射脉冲过去后天线收发开关恢复到接收状态，也需要一段时间 $t_0$ 。在上述这段时间内，由于不能正常接收回波信号，雷达是很难进行测距的。因此，雷达的最小可测距离为：

$$R_{\min} = \frac{1}{2}c(\tau + t_0) \approx \frac{1}{2}c\tau$$

**最大不模糊距离**（最大单值测距范围）由其**脉冲重复周期**决定，即假定在发射下一个脉冲前，距离最远处的目标回波已经达到接收机，则最大不模糊距离为

$$R_u = \frac{1}{2}c(T_r - \tau) \quad \xrightarrow{\tau \ll T_r} \quad R_u \approx \frac{1}{2}cT_r$$

脉冲雷达单值测距（无模糊测距）条件

$$R_{\max} \leq R_u \quad \longrightarrow \quad T_r \geq \frac{2}{c}R_{\max}$$

### 3、脉冲雷达测距模糊

如果脉冲重复周期 $T_r$ 足够长，在下一个脉冲发射前，最远处的目标回波已经回到接收机处，故可以认为当前回波就是前一个脉冲被目标反射所产生的回波信号，不存在测距模糊问题

当远处目标回波延迟超过脉冲重复周期 $T_r$ ，且雷达的最大作用距离 $R_{\max} >$  最大不模糊距离 $R_u$ 时，不能确定回波信号对应哪一个发射脉冲，会把远目标误认为近目标，产生距离模糊

目标的真实距离：

$$R_{\text{真实}} = 0.5c(mT_r + t_R)$$

目标的视在距离：

$$R_{\text{视在}} = 0.5ct_R$$

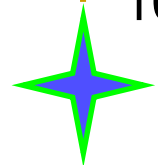
式中模糊值 $m$ 为非负整数， $t_R$ 为接收的回波信号与最邻近发射脉冲间的延迟。

$$\tau + t_0 \leq t_R \leq T_r - \tau$$

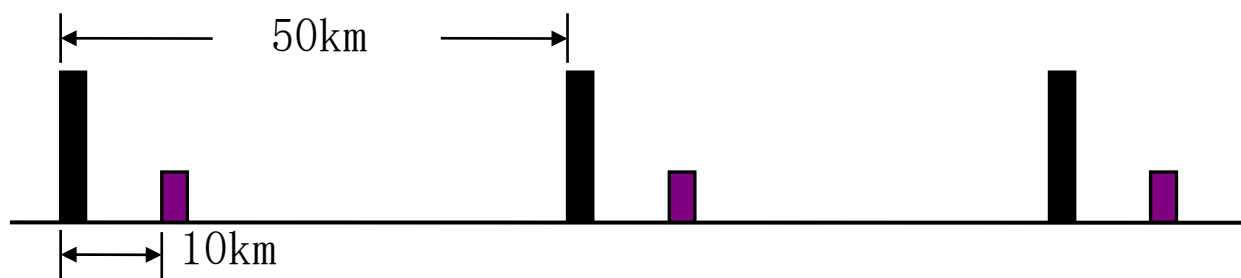
■ 雷达作用距离  $<$  最大不模糊距离：单值测距

■ 雷达作用距离  $>$  最大不模糊距离：距离模糊

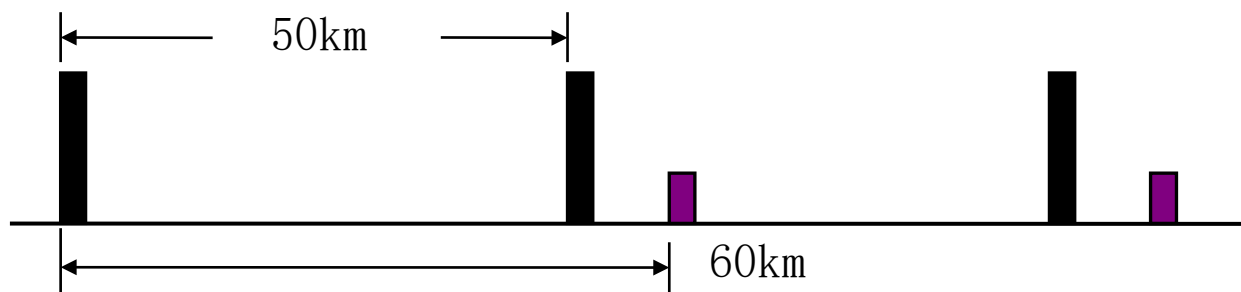




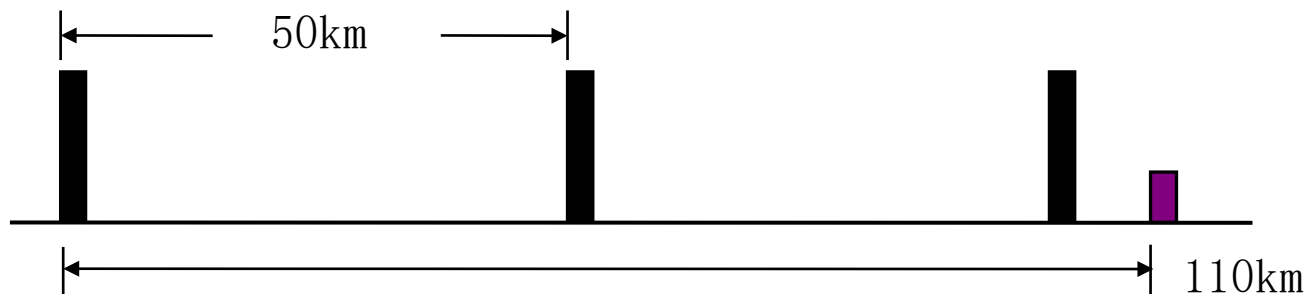
10公里目标:



60公里目标:



110公里目标:



■ 上述例中雷达测量的目标视在距离均为10km，三处目标距离上无法区分

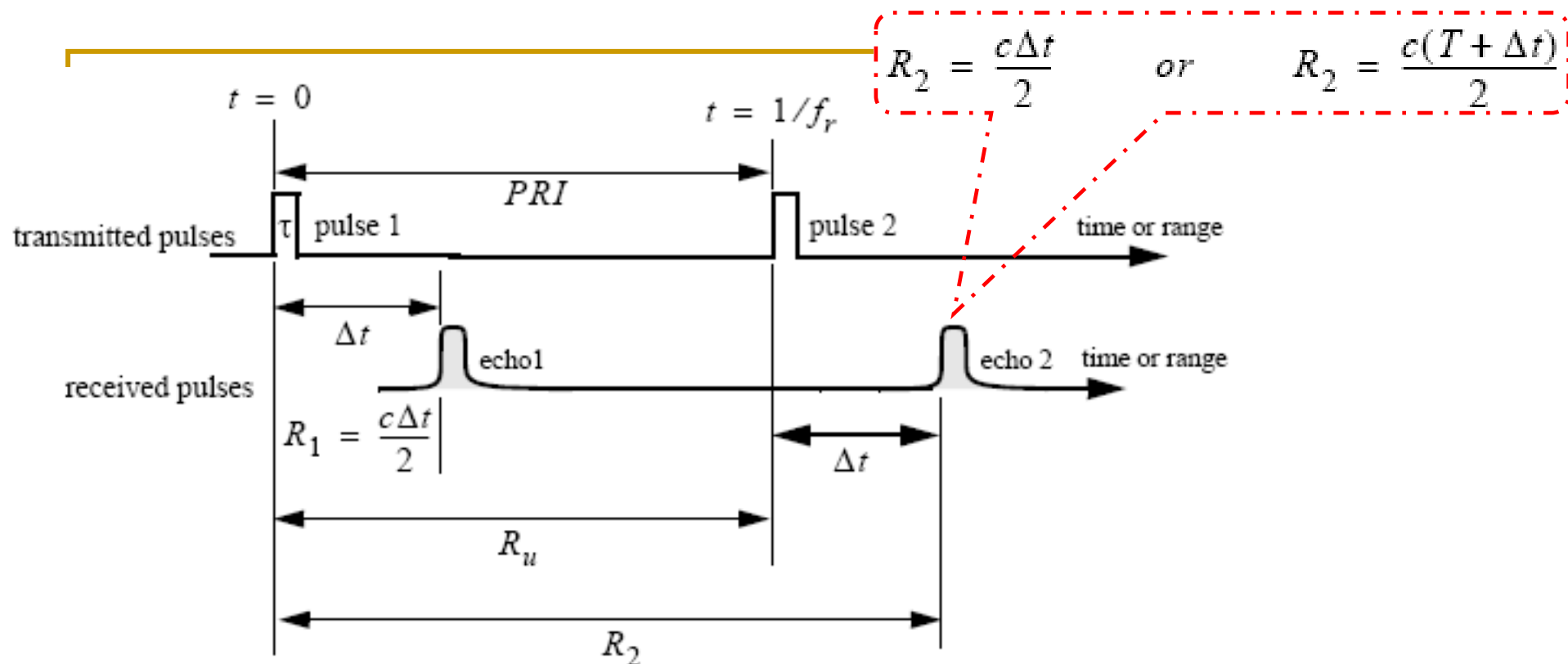


Figure 1.3. Illustrating range ambiguity.

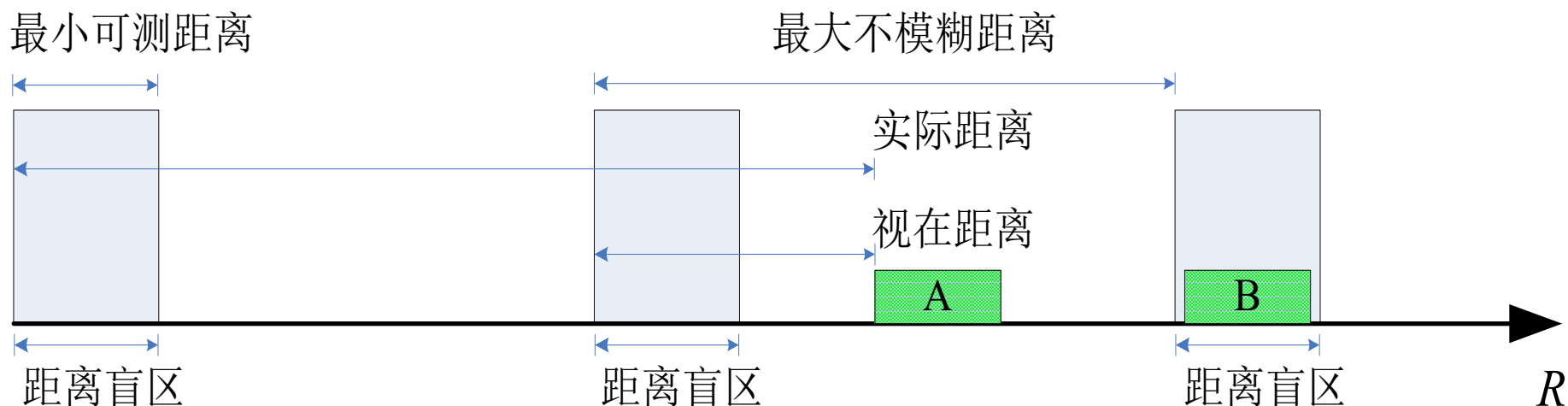
Clearly, range ambiguity is associated with echo 2. Therefore, once a pulse is transmitted the radar must wait a sufficient length of time so that returns from targets at maximum range are back before the next pulse is emitted. It follows that the maximum unambiguous range must correspond to half of the PRI,

$$R_u = c \frac{T}{2} = \frac{c}{2f_r}$$

# 脉冲雷达测距

## 距离盲区

- 收发共用天线雷达，接收机在发射脉冲和收发转换期间不接收信号： $t_B = \tau + t_0$
- 存在距离模糊时， $t_B$ 所对应的各真实距离处的目标将被屏蔽，形成**距离盲区**，宽度  $0.5 c t_B$
- 若目标回波延时正好是脉冲重复周期的整数倍，则该目标将落在距离盲区内而不被发现



# 脉冲雷达测距

$$R_{\text{真实}} = 0.5 c (mT_r + t_R)$$

- 解距离模糊方法（为了得到目标的真实距离，必须判定测距模糊值 $m$ ）
  - 示踪脉冲法（给各脉冲加标签）
  - 多重脉冲重复频率法
    - 可得到更大的不模糊距离
    - 可解决发射脉冲遮挡造成的距离盲区问题

$$f_{r1} = Nf_r, \quad f_{r2} = (N + a)f_r$$

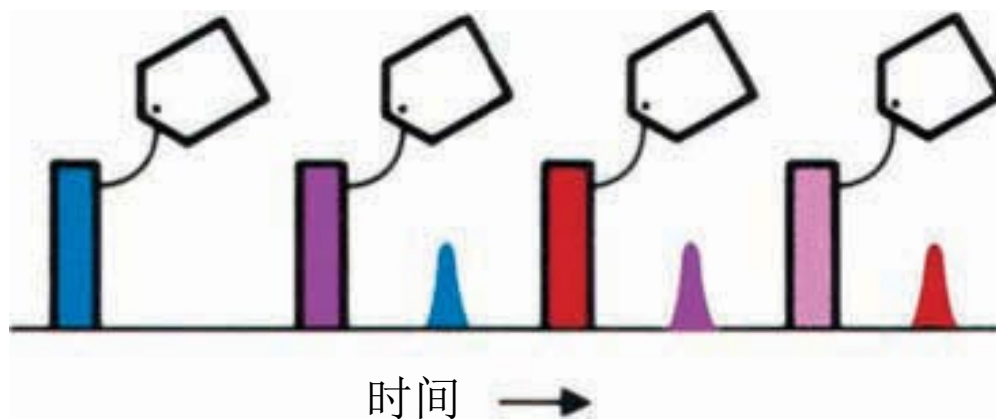
$$f_{r1} : f_{r2} = N : (N + a)$$

$$NT_{r1} = (N + a)T_{r2}$$

- 脉冲舍弃法（舍去脉冲串中的一个脉冲）

## 解距离模糊方法---示踪脉冲法

给各脉冲加标签，回波与发射脉冲一一对应



# 解距离模糊的方法

---多重脉冲重复频率法  $R_{\text{真实}} = 0.5c(mT_r + t_R)$

- 雷达以  $f_{r1}$  和  $f_{r2}$  为PRF交替发射相参脉冲串，目标回波的真实延时  $T_R$  为

$$T_R = t_{R1} + n_1 T_{r1} = t_{R2} + n_2 T_{r2} \quad NT_{r1} = (N + a)T_{r2}$$
$$\bar{f}_r = f_{r1} / N = f_{r2} / (N + a)$$

$n_1$  和  $n_2$  分别为用  $f_{r1}$  和  $f_{r2}$  时的测距模糊数。常取  $a = \pm 1$ ，使  $N$  和  $N+a$  为互质数则  $n_1 = n_2$  或  $n_2 = n_1 \pm 1$

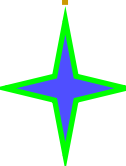
$$T_R = t_{R1} + n_1 T_{r1} = t_{R2} + n_2 T_{r2}$$

$n_1 \leq N$  和  $n_2 \leq N + a$  时  
 $n_1$  和  $n_2$  可唯一确定

$$T_R = \frac{t_1 f_{r1} - t_2 f_{r2} + \{-1, 0, 1\}}{f_{r1} - f_{r2}}$$

根据  $n_1$  和  $n_2$  关系算出  
 $n_1$  或者  $n_2$  后代入

- 最大不模糊距离提高为  $R_u = 0.5cNT_{r1} = 0.5c \frac{1}{\bar{f}_r}$



$$T_R = t_{R1} + n_1 T_{r1} = t_{R2} + n_2 T_{r2} \quad n_1 \leq N, n_2 \leq N + a$$

$$NT_{r1} = (N + a)T_{r2}$$

当 $N$ 和 $N + a$ 为互质数时,  $n_1$  和 $n_2$  可唯一确定

□ 证明:

假设存在 $\bar{n}_1$ 和 $\bar{n}_2$ 使得 $t_{R1} + \bar{n}_1 T_{r1} = t_{R2} + \bar{n}_2 T_{r2}$

$$\longrightarrow (\bar{n}_1 - n_1)T_{r1} = (\bar{n}_2 - n_2)T_{r2}$$

由于  $NT_{r1} = (N + a)T_{r2}$  , 且 $N$ 和 $N + a$ 互质, 则必然

$$\bar{n}_1 = n_1 + kN, \bar{n}_2 = n_2 + k(N + a), k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

则 $\bar{n}_1 \leq N$ 和 $\bar{n}_2 \leq N + a$  时  $\bar{n}_1 = n_1, \bar{n}_2 = n_2$ , 即  $n_1$  和 $n_2$  可唯一确定

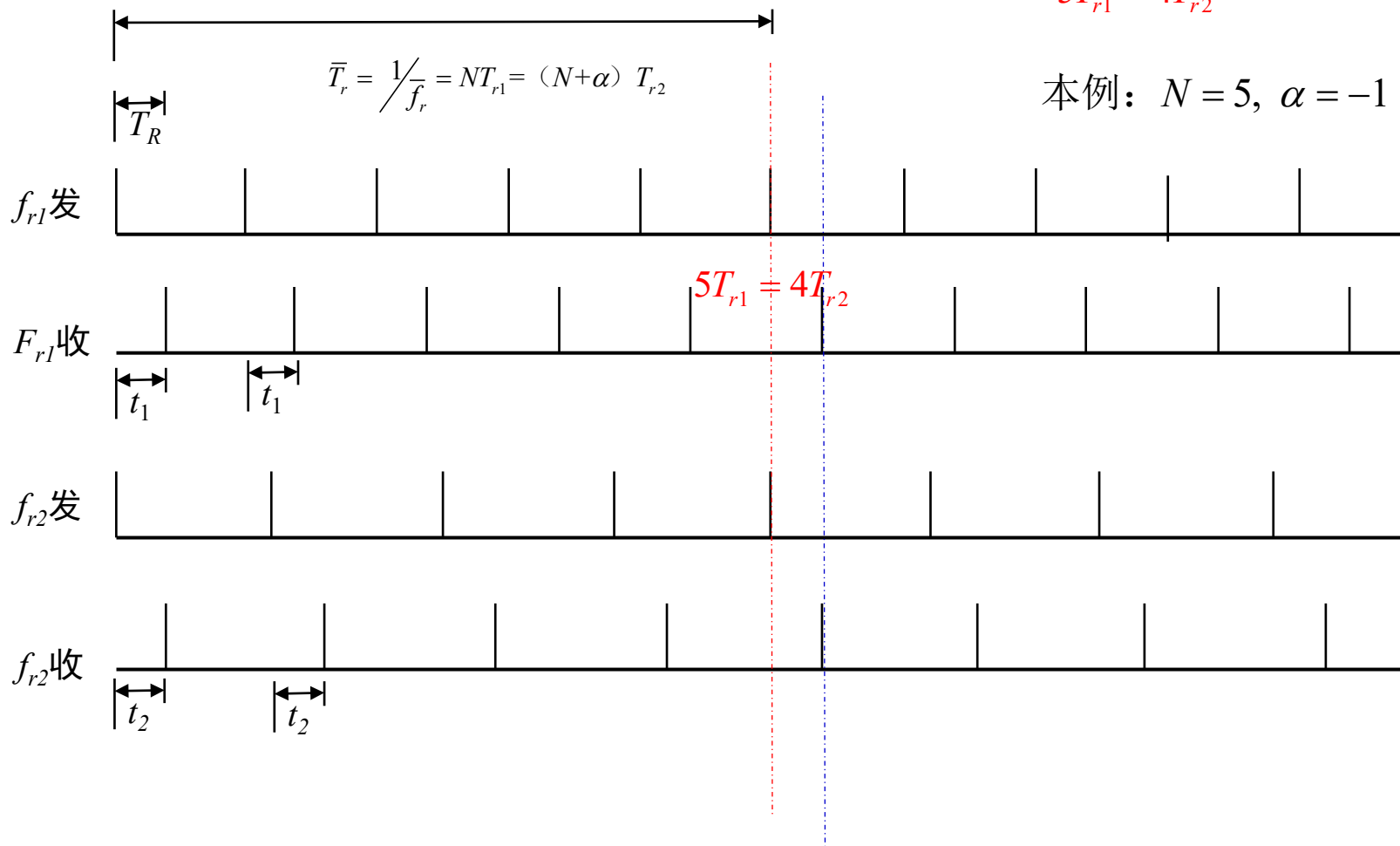
$$T_R = t_1 + \frac{n_1}{f_{r1}} = t_2 + \frac{n_2}{f_{r2}}$$

$$\bar{f}_r = f_{r1} / N = f_{r2} / (N + a)$$

$$5T_{r1} = 4T_{r2}$$

本例：  $N = 5, \alpha = -1$

$$n_1 = n_2 = 0, t_r = t_1 = t_2$$





$$t_1 > t_2$$

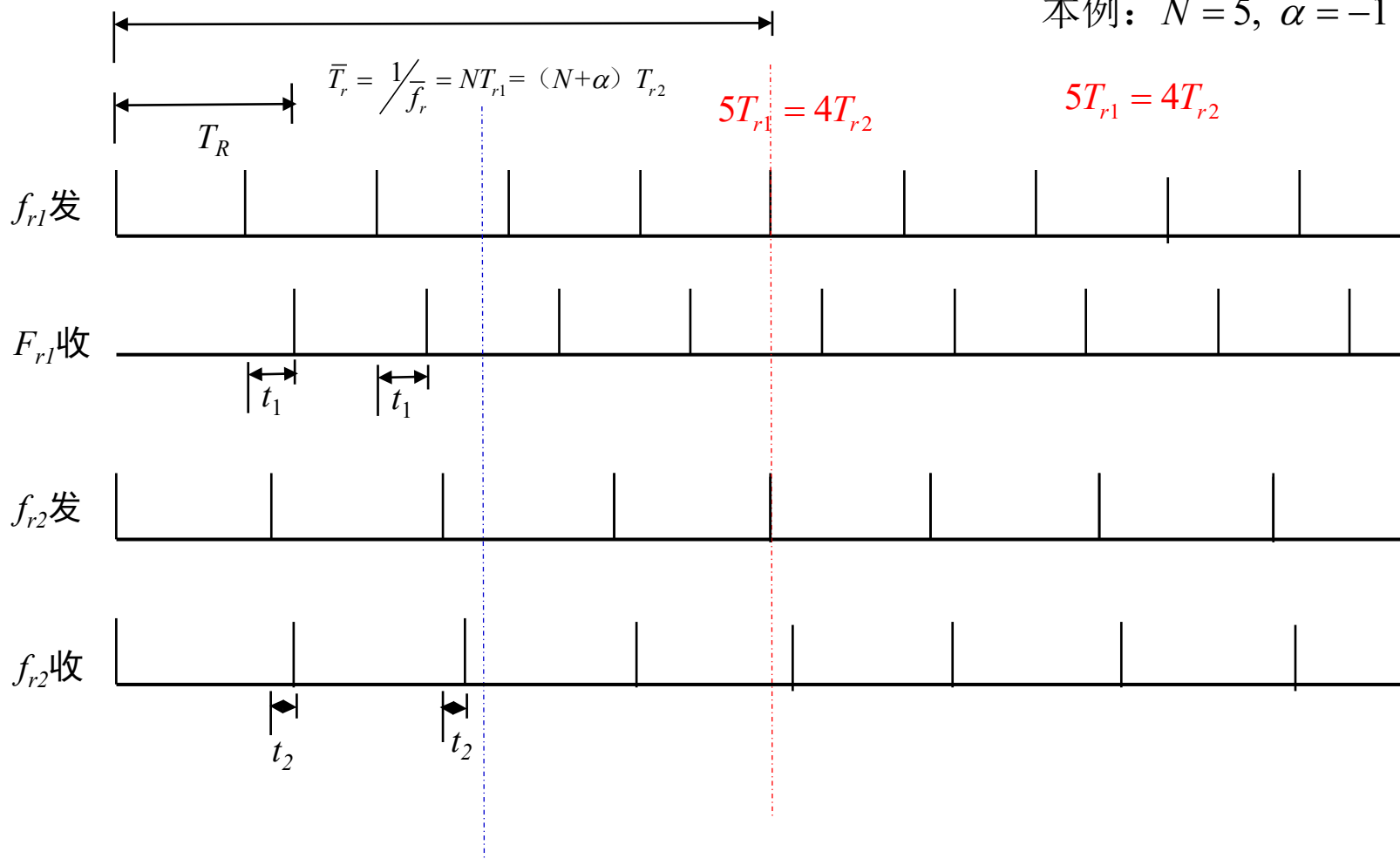
$$n_1 = n_2$$

$$(t_1 - t_2) = n_1 \left( \frac{1}{f_{r2}} - \frac{1}{f_{r1}} \right)$$

$$T_R = t_1 + \frac{n_1}{f_{r1}} = t_2 + \frac{n_2}{f_{r2}}$$

$$\bar{f}_r = f_{r1} / N = f_{r2} / (N + a)$$

本例：  $N = 5$ ,  $\alpha = -1$



$$t_1 < t_2$$

$$n_2 = n_1 - 1$$

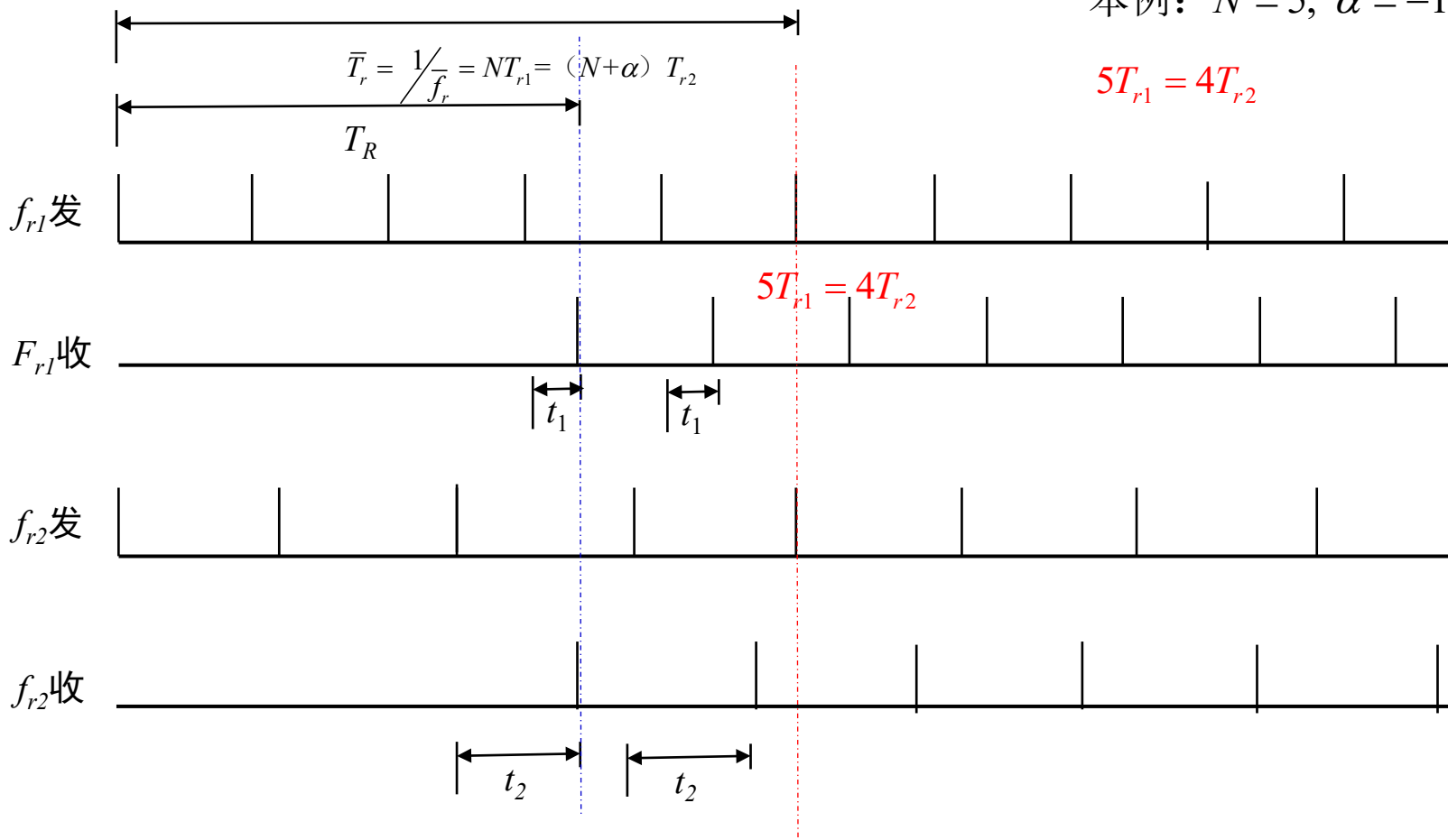
$$t_1 + n_1 \frac{1}{f_{r1}} = t_2 + (n_1 - 1) \frac{1}{f_{r2}}$$

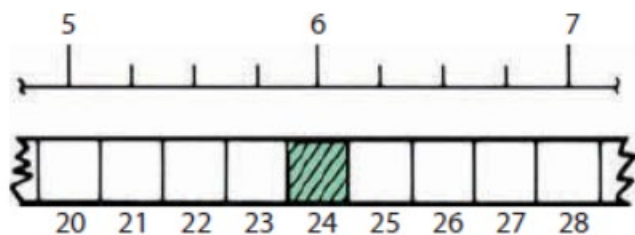
$$T_R = t_1 + \frac{n_1}{f_{r1}} = t_2 + \frac{n_2}{f_{r2}}$$

$$\bar{f}_r = f_{r1} / N = f_{r2} / (N + a)$$

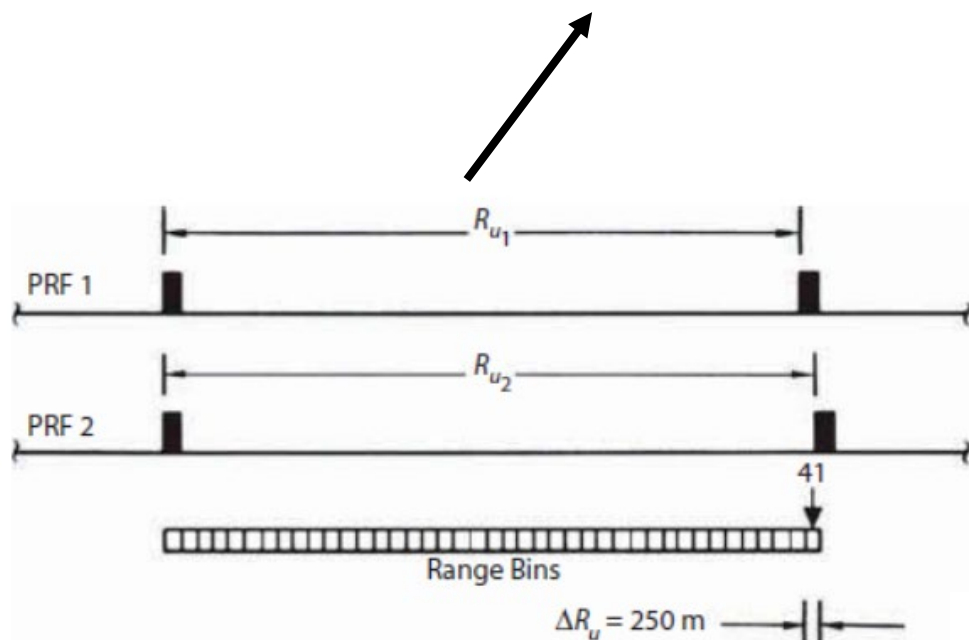
本例：  $N = 5, \alpha = -1$

$$5T_{r1} = 4T_{r2}$$





视在距离=250m\*24=6km



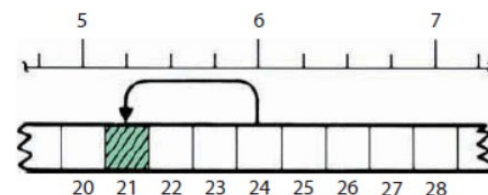
- 每个距离单元250m，第一组脉冲间隔相当于250\*40=10km
- 第二组脉冲周期比第一组增加250m，一个距离单元

$$n = \Delta R_{\text{apparent}} / \Delta R_u$$

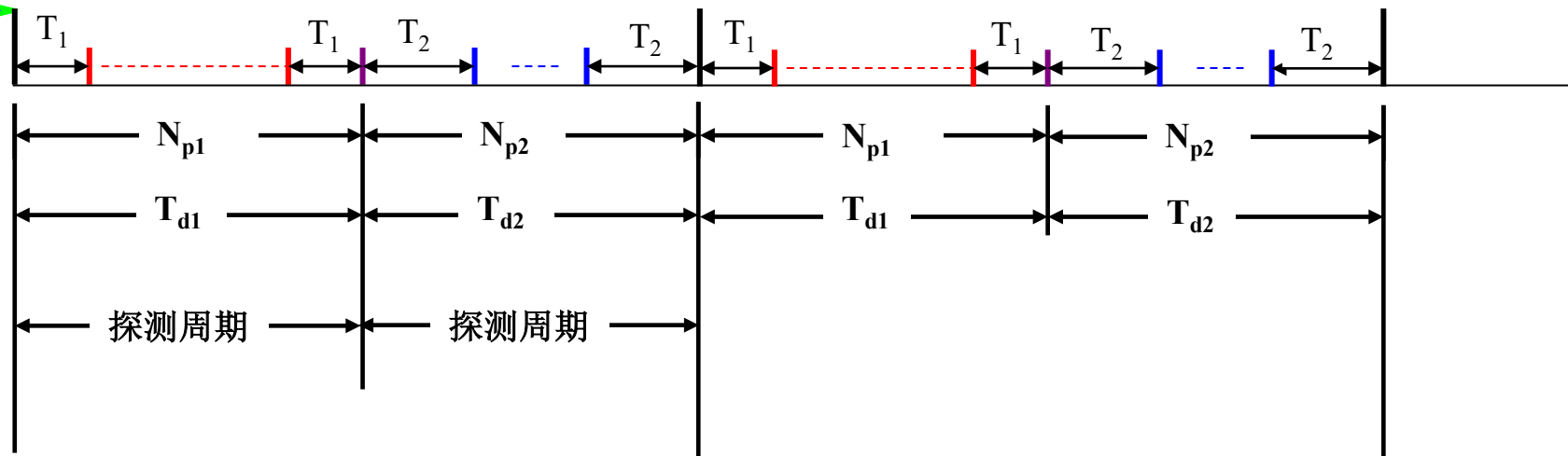
$$R_{\text{true}} = nR_u + R_{\text{apparent}}$$

n为视在距离改变量

真实距离=3\*10km+6km=36km



# 双脉冲重复频率信号工作时序图



$$T_1 \neq T_2, N_{p1} \neq N_{p2}; \text{ 但 } T_{d1} = N_{p1} T_1 = T_{d2} = N_{p2} T_2$$

$T_1$ 、 $T_2$ ：雷达系统探测脉冲的重复周期。 $N_{p1}$ 、 $N_{p2}$ 分别为周期取 $T_1$ 、 $T_2$ 时所对应的积累脉冲数。

# 脉冲雷达测距

## ■ 幻影 (Ghost)

- 若有两个同向同速的目标出现在不同的距离上，采用两重PRF解距离模糊时将出现配对模糊，即有两组配对方式，一组是真实的，另一组则为幻影。

□ 例：  $f_{r1}$ : 两个目标  $R_{\text{视在}11}$        $R_{\text{视在}12}$

$f_{r2}$ : 两个目标  $R_{\text{视在}21}$        $R_{text{在}22}$

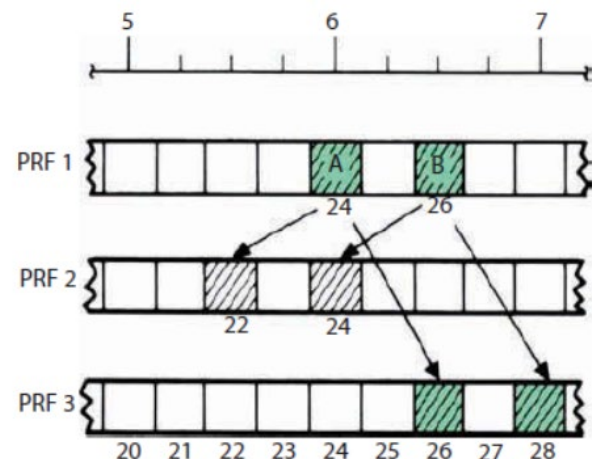
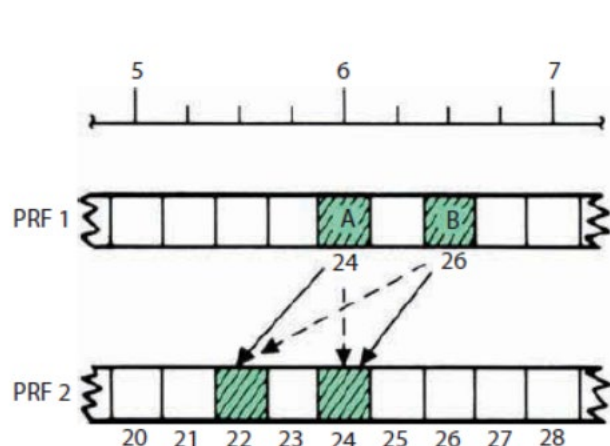
配对1:  $\{ R_{\text{视在}11} \ R_{\text{视在}21} \}$

$\{ R_{\text{视在}12} \ R_{\text{视在}22} \}$

配对2:  $\{ R_{\text{视在}11} \ R_{\text{视在}22} \}$

$\{ R_{\text{视在}12} \ R_{\text{视在}21} \}$

- 增加第三重PRF可去幻影

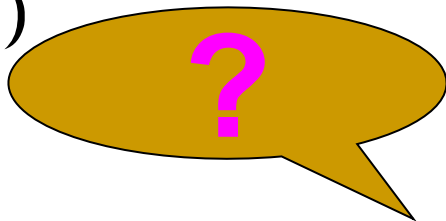




## 用多重重复频率测距

办法可以从我国的余数定理中找到

魔术师背对观众坐在一张椅子上，让某位观众心中随意想定一个不超过1000的数，然后用7去除这个数并报出余数；然后再用8去除原来想定的数，然后再用9去除，并都报出余数。这样魔术师就知道到底这个观众心里想的数是多少。（如余数分别为3，4，5，答案是多少？）



# 多脉冲重复频率解模糊

采用多个高脉冲重复频率测距能给出更大的无模糊距离，同时也能兼顾跳开发射脉冲遮蚀(**Eclipse**指采用单一脉冲重复频率工作时，目标因回波时间延迟正好是脉冲重复周期的整数倍而无法测距)的灵活性。主要的方法——中国余数定理：

设 $n \geq 2$ ， $m_1, m_2, \dots, m_n$ 是两两互素的正整数，令 $M = m_1 m_2 \dots m_n = m_1 M_1 = m_2 M_2 = \dots = m_n M_n$ ，则同余式组

$$\begin{cases} x \equiv c_1 \pmod{m_1} \\ x \equiv c_2 \pmod{m_2} \\ \dots\dots\dots \\ x \equiv c_n \pmod{m_n} \end{cases}$$

有且仅有解  $x \equiv M_1 \alpha_1 c_1 + M_2 \alpha_2 c_2 + \dots + M_n \alpha_n c_n \pmod{M}$

式中 $\alpha_k$ 是满足 $M_k \alpha_k \equiv 1 \pmod{m_k}$ ， $k = 1, 2, \dots, n$ 的最小整数

将中国余数定理应用到解测距模糊问题时， $m_1, m_2, \dots, m_n$ 相当于所选n个脉冲重复周期的比值，即

$$\frac{T_{r1}}{m_1} = \frac{T_{r2}}{m_2} = \dots = \frac{T_{rn}}{m_n} = \tau = \frac{1}{m_1 m_2 \cdots m_n f_r}$$

或者

$$f_r = \frac{f_{r1}}{M_1} = \frac{f_{r2}}{M_2} = \dots = \frac{f_{rn}}{M_n}$$

即 $f_r$ 为 $f_{r1}, f_{r2}, \dots, f_{rn}$ 的公约数

在多脉冲重复频率情况下，所能获得的最大脉宽为

$$\tau = \frac{1}{m_1 m_2 \cdots m_n f_r}$$

参见：W.A. Skillman and D.H. Mooney, **Multiple High-PRF Ranging**, IRE 5th National Convention on Military Electronics, 1961, pp37~40 (收入书中：D.K. Barton, **Radars, Volume 7: CW and Doppler Radar**, Artech House, Inc., 1978, pp205~213)

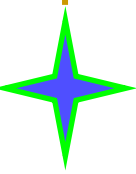


设 $n_1, n_2, \dots, n_n$ 分别为采用脉冲重复频率 $T_{r1}, T_{r2}, \dots, T_{rn}$ 测量时的模糊周期数，对应的模糊时间延迟为 $t_n$ 。这样若目标的真实时间延迟为 $t_R$ ，则有

$$\left\{ \begin{array}{l} t_R = n_1 T_{r1} + t_1 \rightarrow t_R \equiv t_1 \pmod{T_{r1}} \\ t_R = n_2 T_{r2} + t_2 \rightarrow t_R \equiv t_2 \pmod{T_{r2}} \\ \dots\dots\dots \\ t_R = n_n T_{rn} + t_n \rightarrow t_R \equiv t_n \pmod{T_{rn}} \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} x \equiv c_1 \pmod{m_1} \\ x \equiv c_2 \pmod{m_2} \\ \dots\dots\dots \\ x \equiv c_n \pmod{m_n} \end{array} \right.$$

将左式两边同时除以脉宽，并令 $x = t_R / \tau, c_i = t_i / \tau$ ，即可得到前面的同余式组，利用孙子定理得 $x$ 后，目标的真实距离应为：

$$R = \frac{ct_R}{2} = \frac{cx\tau}{2}$$



例如: 设 $m_1=7, m_2=8, m_3=9; A_1=3, A_2=5, A_3=7$

$$m_1 m_2 m_3 = 504$$

$$b_3=5 \quad 5 \times 7 \times 8 = 280 \bmod 9 \equiv 1, \quad C_3 = 280$$

$$b_2=7 \quad 7 \times 7 \times 9 = 441 \bmod 8 \equiv 1, \quad C_2 = 441$$

$$b_1=4 \quad 4 \times 8 \times 9 = 288 \bmod 7 \equiv 1, \quad C_1 = 288$$

$$C_1 A_1 + C_2 A_2 + C_3 A_3 = 5029$$

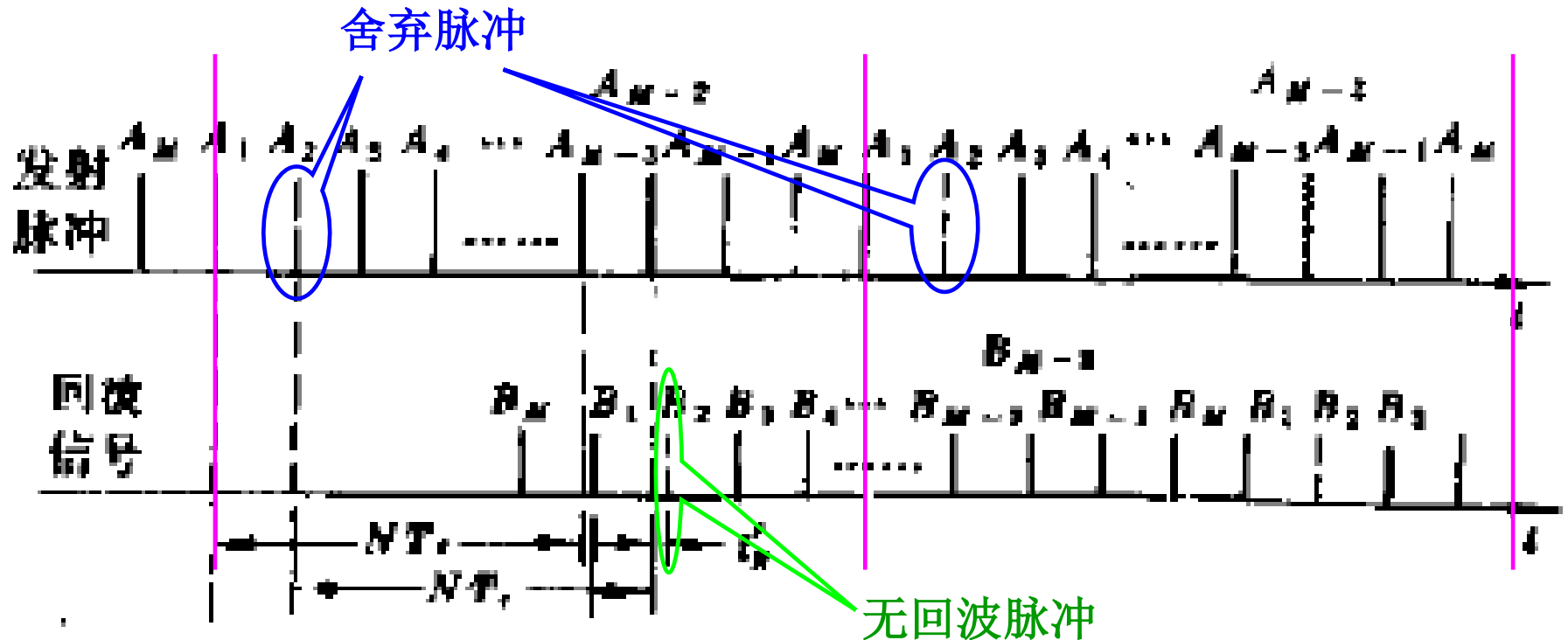
$$R_c \equiv 5\,029 \bmod 504 = 493$$

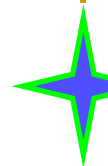
$$R = R_c \frac{c\tau}{2} = \frac{493}{2} c\tau$$

$\tau$ 为距离分辨单元所对应的时宽。

# 舍脉冲法解模糊

所谓舍脉冲法就是每发射M个发射脉冲中舍弃一个，作为发射脉冲串的附加标志(发射134...M)。与发射脉冲相对应，接收到的回波脉冲串同样是每M个回波脉冲中缺少一个。只要从舍弃的发射脉冲 $A_2$ 后逐个累计发射脉冲数，直到某一发射脉冲 $A_{M-2}$ 后没有回波脉冲(缺 $B_2$ )时停止计数，则累计的数值就是回波跨越的重复周期数。



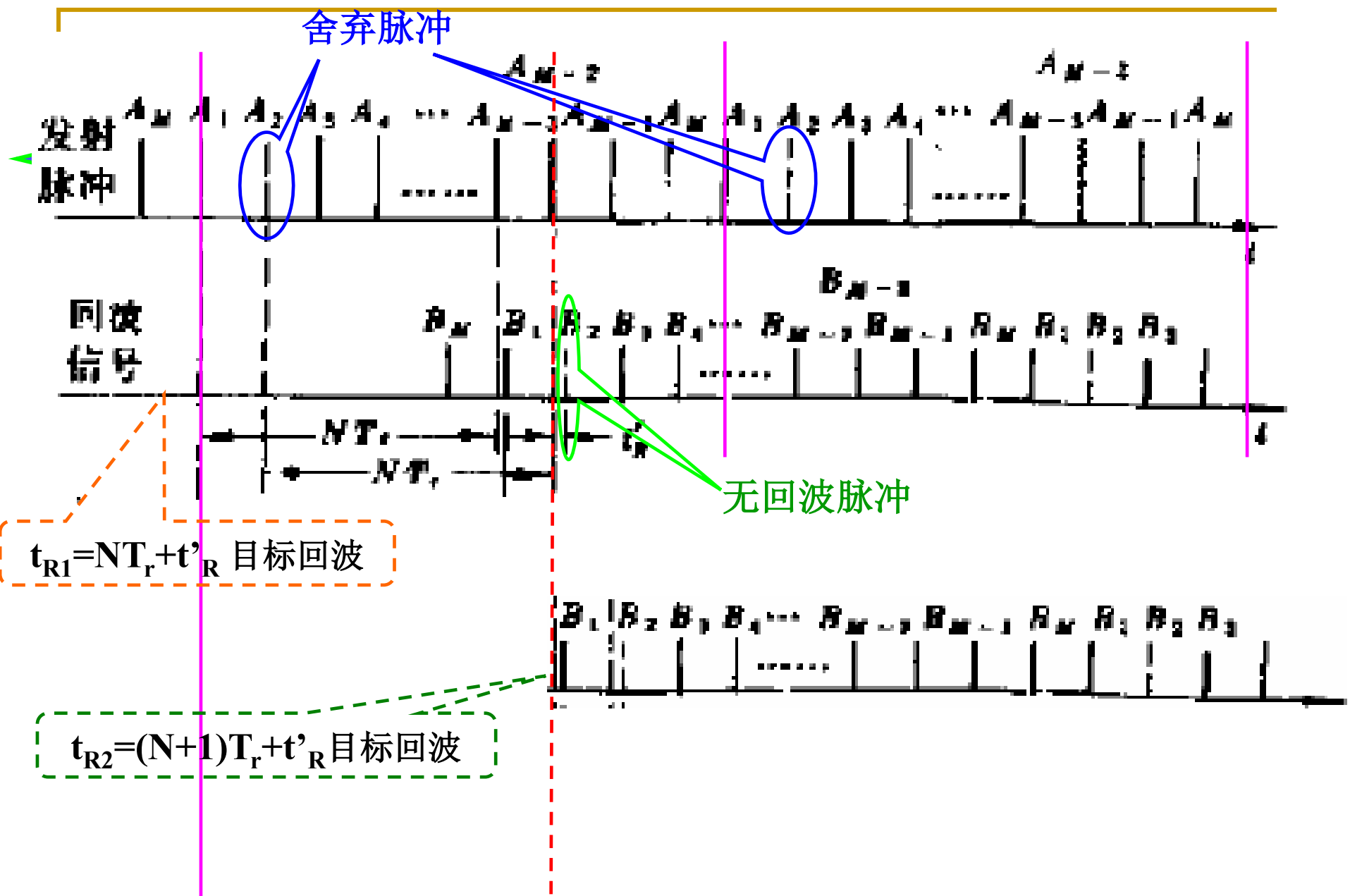


采用舍脉冲法判模糊时，每组脉冲数M应满足如下关系：

$$MT_r > m_{\max} T_r + t'_R \quad \rightarrow \quad M > m_{\max} + 1$$

式中 $m_{\max}$ 是雷达需测量的最远目标所对应的跨周期数。

**缺点：**此法对满足 $t_R = kT_r + t'_R$ 的两个目标无法区分，此时由于不存在舍脉冲的空隙，舍脉冲法无法使用。



## 目标距离的测量——习题

1.

设雷达采用双重复频率消除距离模糊。两个重复频率 $f_{r1}=2000\text{Hz}$ ,  $f_{r2}=2500\text{Hz}$ , 设用 $f_{r1}$ 测得目标距离为 $7.5\text{km}$ , 用 $f_{r2}$ 测的目标距离为 $22.5\text{km}$ , 求目标的真实距离。

$$\text{解: } T_{r1} = \frac{1}{f_{r1}} = 0.5\text{ms} \quad T_{r2} = \frac{1}{f_{r2}} = 0.4\text{ms} \quad 4T_{r1} = 5T_{r2}$$

对应的距离间隔

$$\Delta R_1 = \frac{1}{2}cT_{r1} = 75\text{km} \quad \Delta R_2 = \frac{1}{2}cT_{r2} = 60\text{km}$$

可知  $4\Delta R_1 = 5\Delta R_2 = 300\text{km}$ , 不模糊测距范围 $[0, 300\text{km}]$

$$R_{\text{real}} = r_1 + n_1 \times \Delta R_1 = r_2 + n_2 \times \Delta R_2 \quad n_1 = n_2 \text{ 或者 } n_1 = n_2 - 1$$

$$7.5 + 75n_1 = 22.5 + 60n_2$$

$$n_1 = 5, n_2 = 6$$



$$R_{\text{real}} = 382.5\text{km} \text{ 超出不模糊测距范围}$$

$$n_1 = n_2 = 1$$

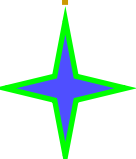


$$R_{\text{real}} = 82.5\text{km}$$

## 习题

某常规脉冲雷达采用二重复频率脉冲法测距，采用的二重复频率分别为  $f_{r1} = 5000\text{Hz}$ ， $f_{r2} = 7000\text{Hz}$ ，脉冲宽度为  $\tau = 0.2\mu\text{s}$ ，用  $f_{r1}$  测得的目标模糊距离为 5km，用  $f_{r2}$  测得的目标模糊距离为 10km，求：↵

1. 该雷达的距离分辨力；↵
2. 目标的真实距离；↵
3. 采用二重复频率后雷达的最大不模糊距离。↵



解:  $(\Delta R)_{\min} = \frac{c}{2} \tau = 30m$

$$t_1 = \frac{2R_1}{c} = \frac{2 \times 5 \times 1000}{3 \times 10^8} = \frac{1}{3} \times 10^{-4} \text{ s}, \quad t_2 = \frac{2R_2}{c} = \frac{2 \times 10 \times 1000}{3 \times 10^8} = \frac{2}{3} \times 10^{-4} \text{ s},$$

$$t_r = \frac{t_1 f_{r1} - t_2 f_{r2}}{f_{r1} - f_{r2}} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ s}, \quad R = \frac{ct_r}{2} = 22.5km$$

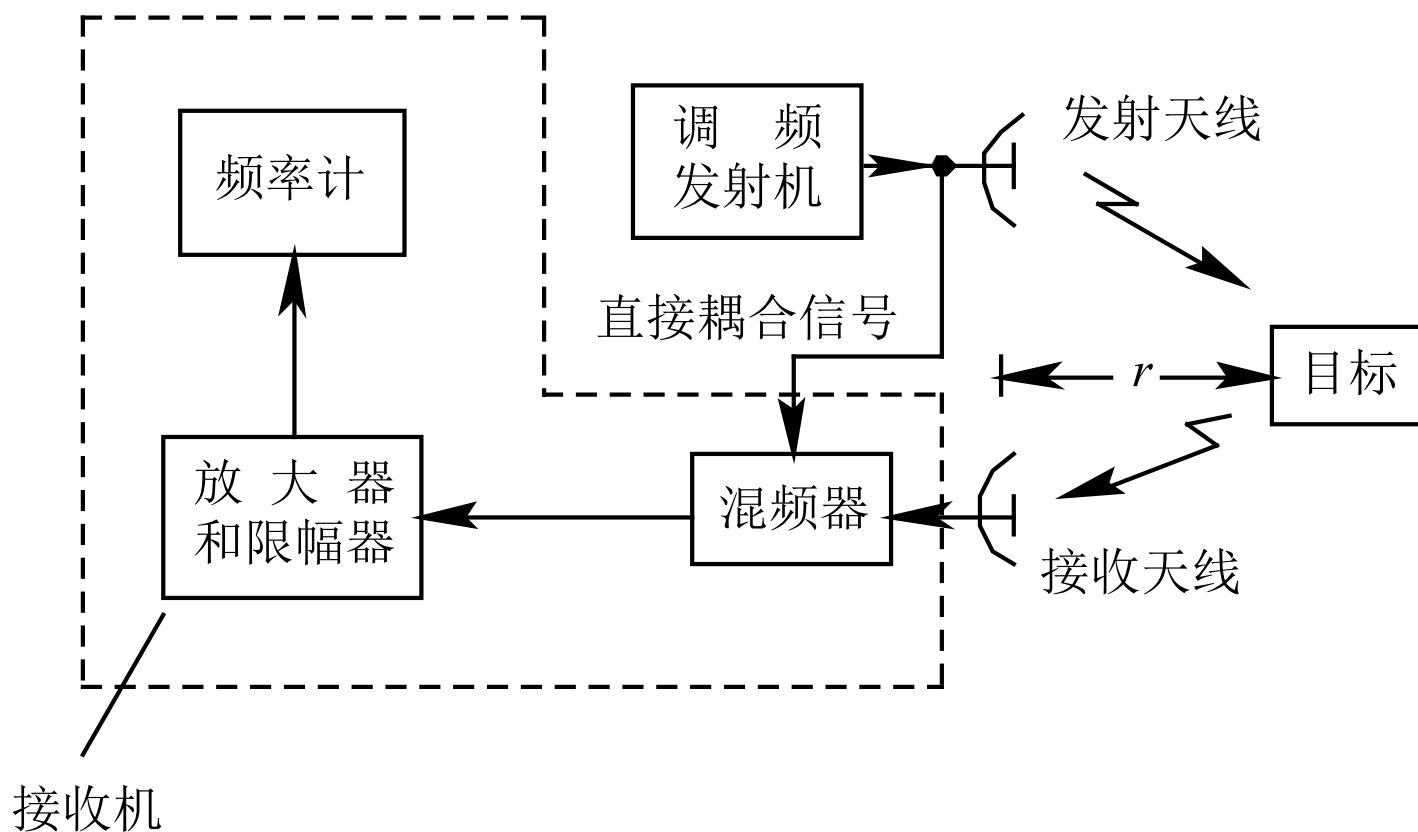
采用二重复频率后，雷达的最大不模糊距离提高为只采用  $T_{r1}$  的 5 倍:

$$R_{\max} = \frac{cT_r}{2} = \frac{5cT_{r1}}{2} = 150km$$




# 调频法测距

## 调频连续波测距



调频连续波雷达方框图



## 连续波雷达简介

### 优点

- 能测量很近的距离（数米），测量精度较高
- 简单、小巧、轻便
- 带宽大，平均发射功率低，被截获概率小

### 缺点

收发间很难完善隔离，发射功率受限，距离近

### 典型应用

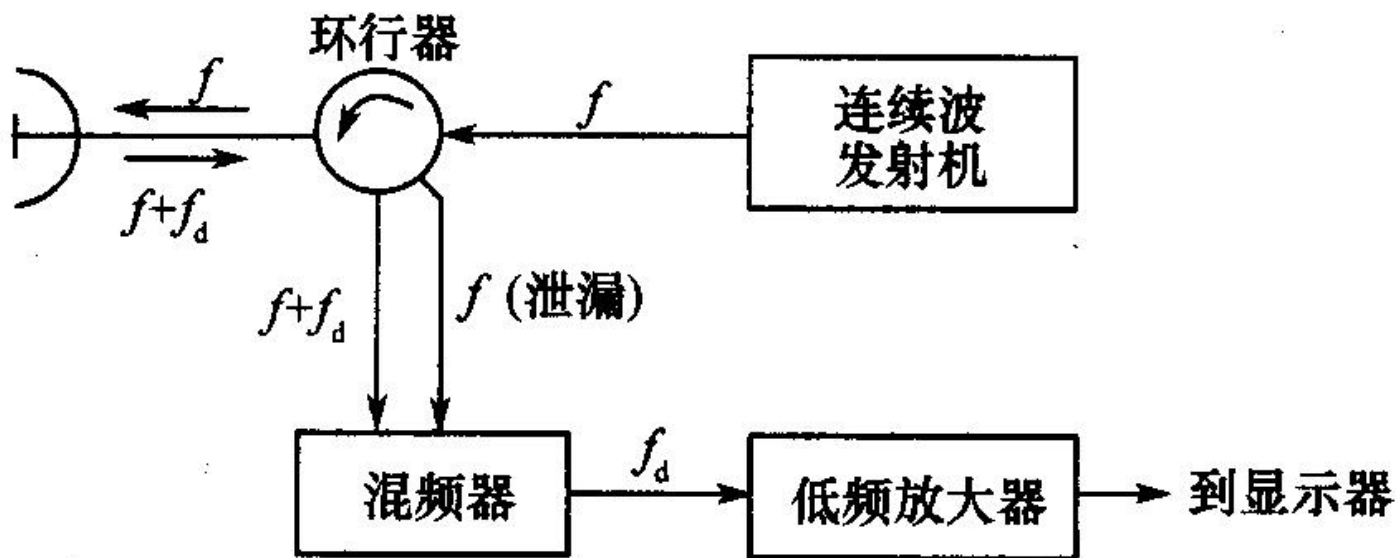
近炸引信、武器寻的、测速仪、汽车防撞等

---

## 简单连续波雷达

### 简单连续波雷达

- 发射非调制波，用于测速，不能测距（距离关于波长模糊）
- 收发信号在接收机前端混频得到拍频，即多普勒频移信号

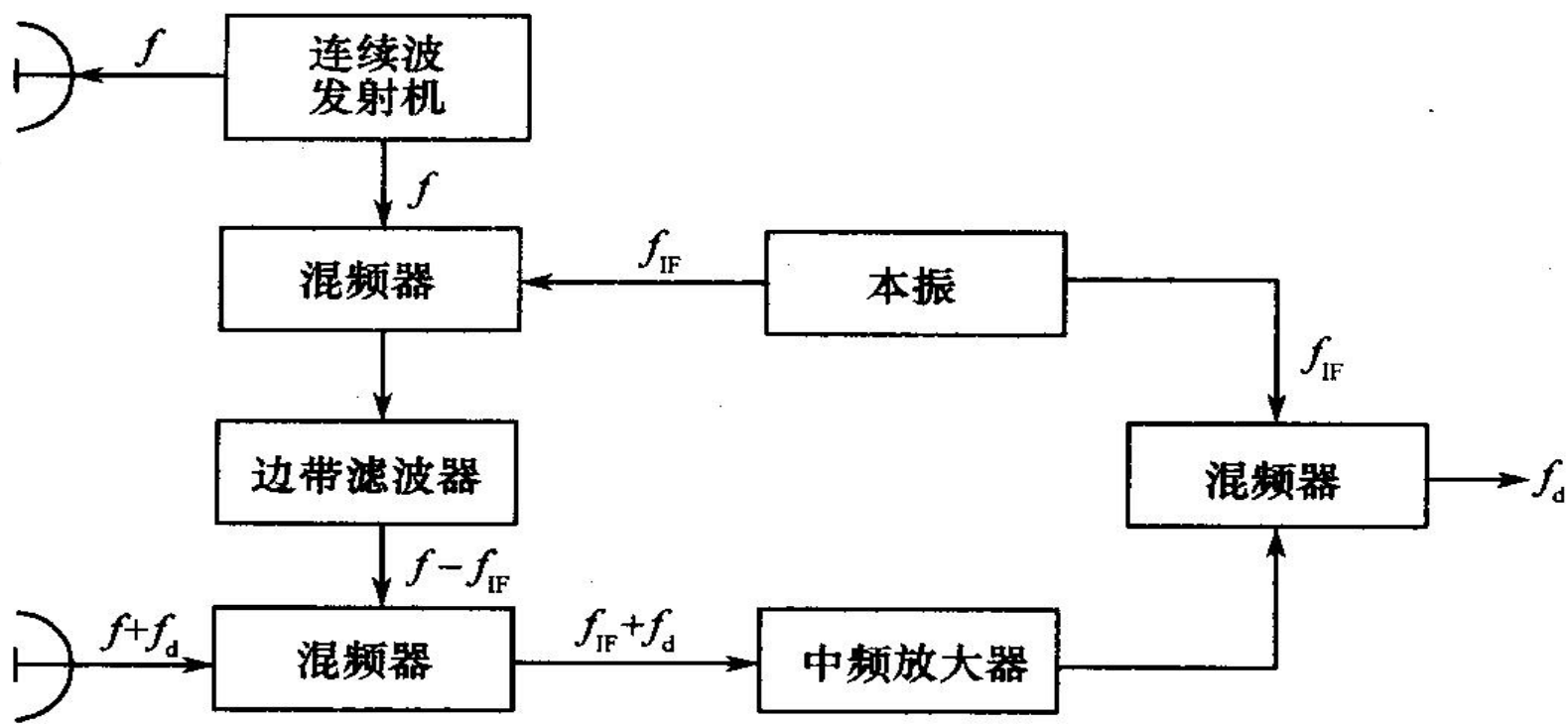


简单连续波雷达的零差拍接收机原理框图

## 简单连续波雷达

### 简单连续波雷达（续）

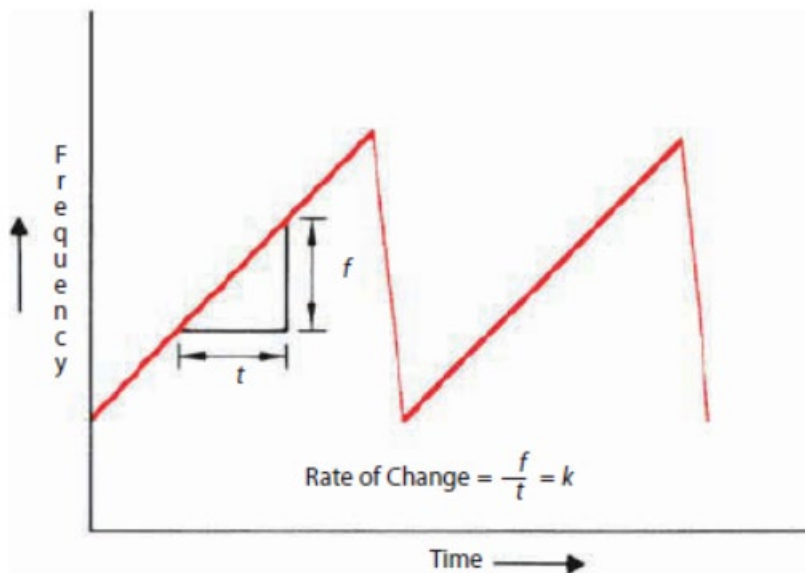
- ❑ 为提高收发隔离度，常采用双天线方式
- ❑ 为避开低频闪烁噪声，常采用中频放大



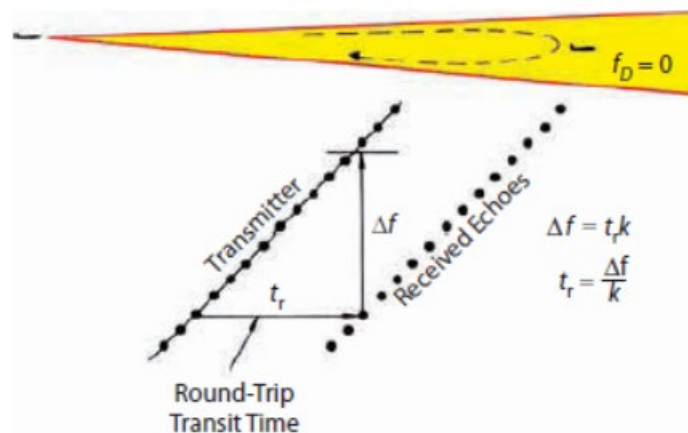
简单连续波雷达的超外差式接收机原理框图

# 调频法测距基本理论

## ■ 发射连续波频率特性



## ■ 回波频率特性



# 三角形波调制

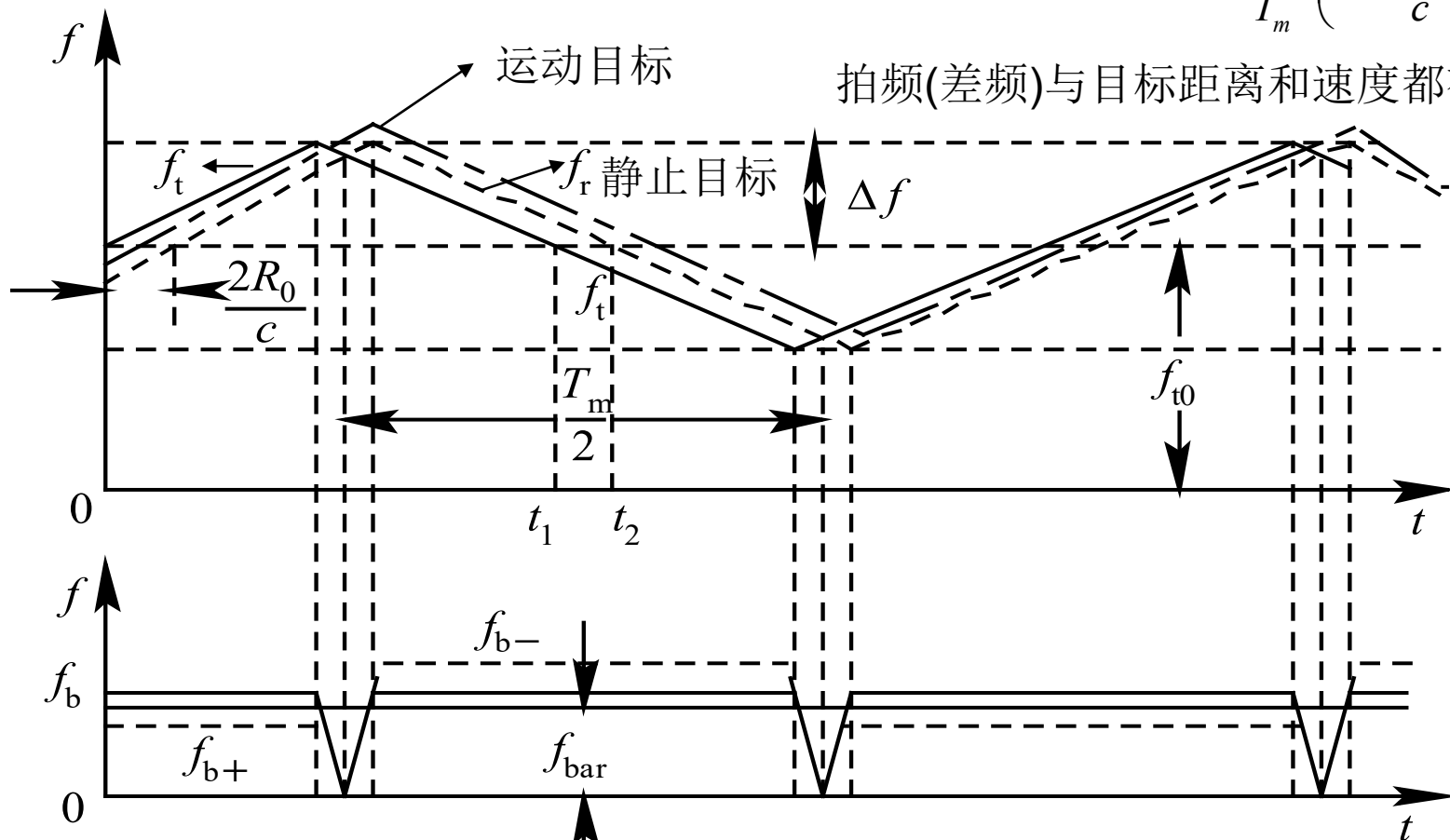
有测距模糊吗？

$T_m$ 为数百分之一秒

$$\text{发射信号频率 } f_t = f_{t0} + \frac{df}{dt}t = f_{t0} + \frac{\Delta f}{T_m/4}t$$

$$\text{接收信号频率 } f_r = f_{t0} + \frac{4\Delta f}{T_m} \left( t - \frac{2R_0}{c} \right)$$

拍频(差频)与目标距离和速度都有关



调频雷达工作原理示意图

## 三角波调频连续波雷达

### 三角波调频连续波雷达（续）

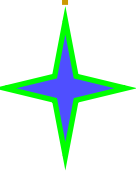
- 目标频率与发射频率变化规律相同，时间滞后
- 设三角波调频信号中心频率  $f_{t0}$ ，周期  $T_m$ ，调制频率  $f_m$ ，最大频偏  $\pm \Delta f$ ，收发信号拍频  $f_b$
- 静止目标的拍频

$$f_b = |f_t - f_r| = \frac{2\Delta f}{T_m/2} \times \frac{2R}{c} = \frac{8\Delta f R}{T_m c}$$

- 对应目标距离

$$R = \frac{c}{8\Delta f} f_b T_m = \frac{c}{8\Delta f} \frac{f_b}{f_m}$$

$$T_m \gg \frac{2R_0}{c} \longrightarrow f_{bav} = \frac{8\Delta f R}{T_m c} \left[ \frac{T_m - \frac{2R_0}{c}}{T_m} \right] \approx \frac{8\Delta f}{T_m c} R_0 = f_b \quad \text{用平均频偏 } f_{bav} \text{ 估计 } f_b$$



当反射回波来自运动目标，其距离为 $R$ 而径向速度为 $V$ 时，其回波频率 $f_r$ 为

$$f_r = f_0 + f_d \pm \frac{4\Delta f}{T_m} \left( t - \frac{2R_0}{c} \right)$$

$$f_{b+} = f_t - f_r = \frac{8\Delta f}{T_m c} R_0 - f_d \quad (\text{前半周正向调频范围})$$

$$f_{b-} = f_r - f_t = \frac{8\Delta f}{T_m c} R_0 + f_d \quad (\text{后半周负向调频范围})$$

$$\text{距离 } R = \frac{c}{8\Delta f} \frac{f_{b+} + f_{b-}}{2f_m}$$

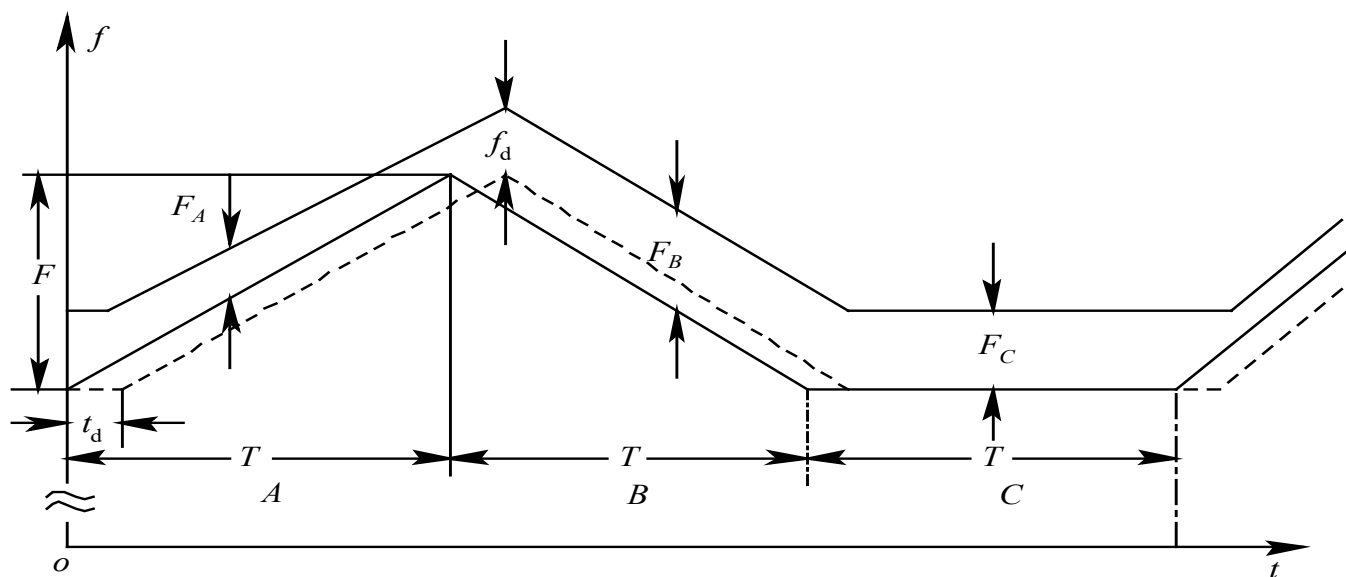
$$\text{多普勒频移 } f_d = \frac{f_{b-} - f_{b+}}{2}$$



## 三角波调频连续波雷达

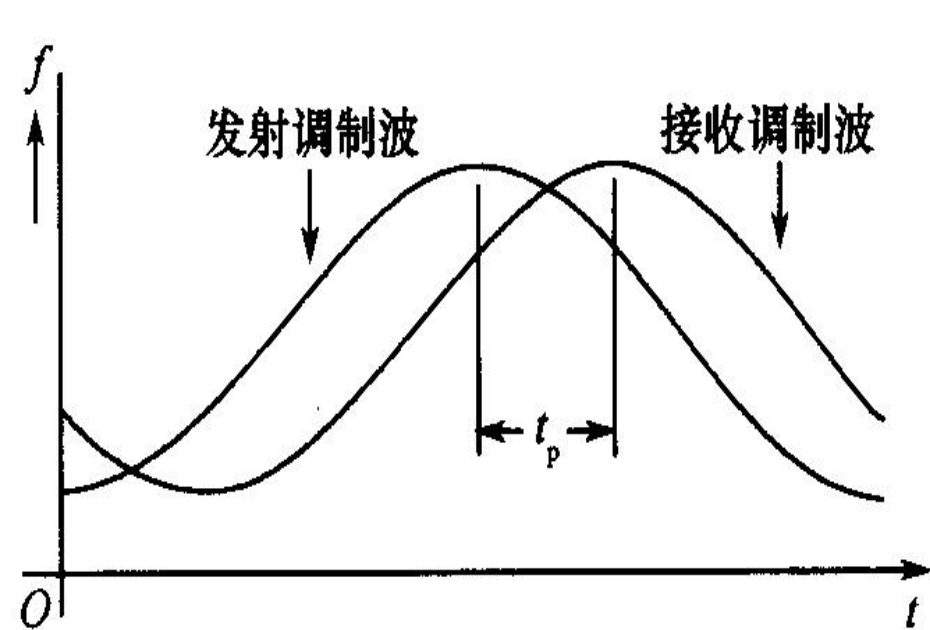
### ■ 三角波调频连续波雷达（续）

- 要求严格的线性调频，工程实现和调整不易
- 两个运动目标，对应的两组  $f_{b+}$  和  $f_{b-}$  之间将有两组配对方式，其中一组是假的，造成幻影
- 用三斜率周期的调频信号可消除幻影

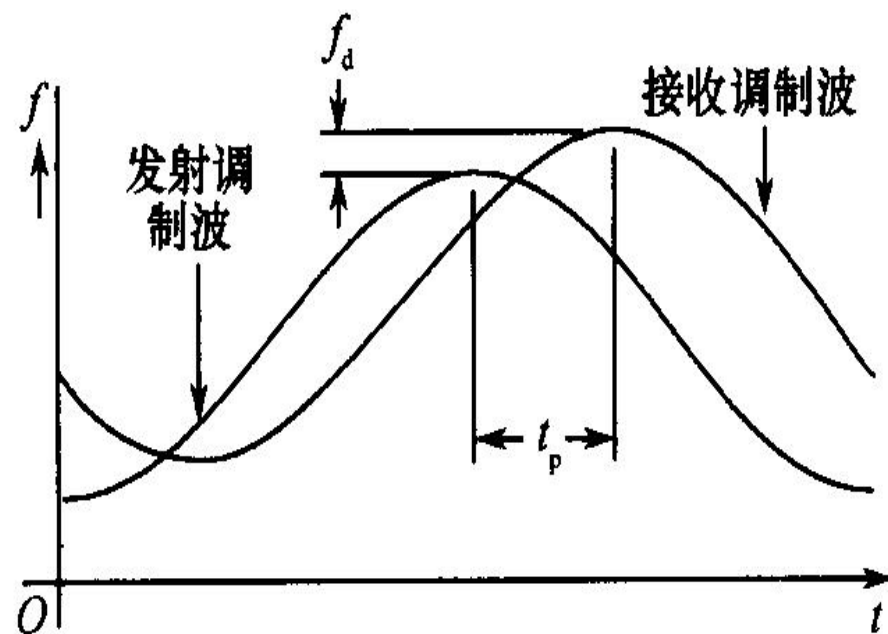


## 正弦波调频连续波雷达

- 正弦波调频连续波雷达
  - 最简单的线性调频连续波（FMCW）体制
  - 缺点：不能分辨多个目标



(a) 无多普勒频移



(b) 有多普勒频移

## 正弦波调频连续波雷达

### ■ 正弦波调频连续波雷达（续）

#### □ 发射频率

$$f_t = \frac{d\varphi_t}{dt} \cdot \frac{1}{2\pi} = f_0 + \frac{\Delta f}{2} \cos 2\pi f_m t$$

#### □ 接收频率

$$f_r = f_0 + f_d + \frac{\Delta f}{2} \cos 2\pi f_m \left( t - \frac{R}{c} \right)$$

#### □ 收发拍频

$$f_b = f_t - f_r = -\Delta f \sin \left( 2\pi f_m \frac{R}{c} \right) \sin \left( 2\pi f_m \left( t - \frac{R}{c} \right) \right) - f_d$$

## 正弦波调频连续波雷达

### ■ 正弦波调频连续波雷达（续）

- 通常， $f_m R \ll c$ ，则

$$f_b = -\frac{2\pi f_m \Delta f}{c} R \sin\left(2\pi f_m \left(t - \frac{R}{c}\right)\right) - f_d$$

- 拍频在半个调整周期内平均

$$f_{bp+} = kR - f_d$$

$$f_{bp-} = kR + f_d$$

- 对应目标的距离和多普勒频移

$$R = \frac{f_{b+} + f_{b-}}{2k}$$

$$f_d = \frac{f_{b-} - f_{b+}}{2}$$

# 调频连续波雷达的特点

连续波雷达的特点：

发射频谱窄（减少了无线电干扰，使得相应滤波和波形处理简化）。

峰值功率比平均功率大不了多少。

收发间难以完善隔离。

调频连续波雷达的**优点**是：

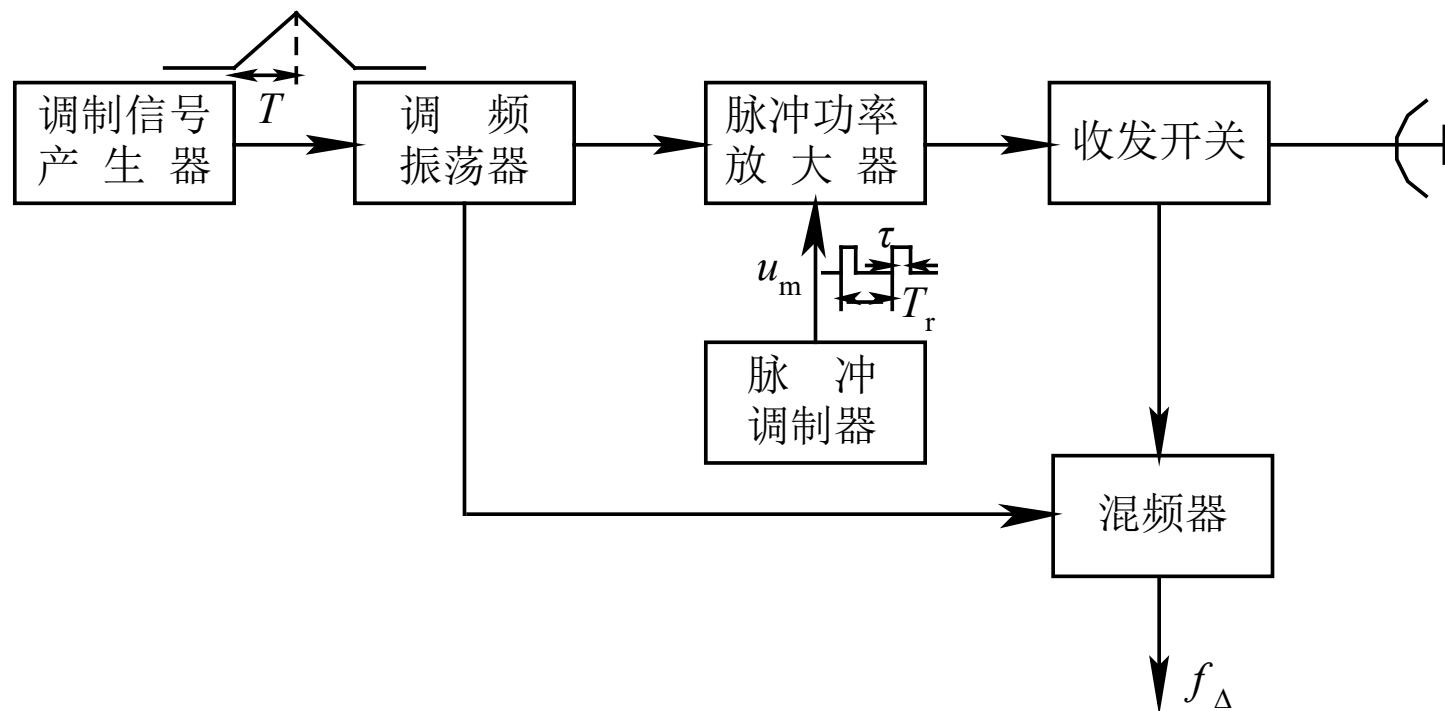
(1) 能测量很近的距离，一般可测到数米，而且有较高的测量精度。

(2) 雷达线路简单，且可做到体积小、重量轻，普遍应用于飞机高度表及微波引信等场合。

## 调频连续波雷达的主要缺点是：

- (1) 难于同时测量多个目标。如欲测量多个目标，必须采用大量滤波器和频率计数器等，使装置复杂，从而限制其应用范围。
  - (2) 收发间的完善隔离是所有连续波雷达的难题。发射机泄漏功率将阻塞接收机，因而限制了发射功率的大小。发射机噪声的泄漏会直接影响接收机的灵敏度。
-

## 6.2.2 脉冲调频测距



(a)

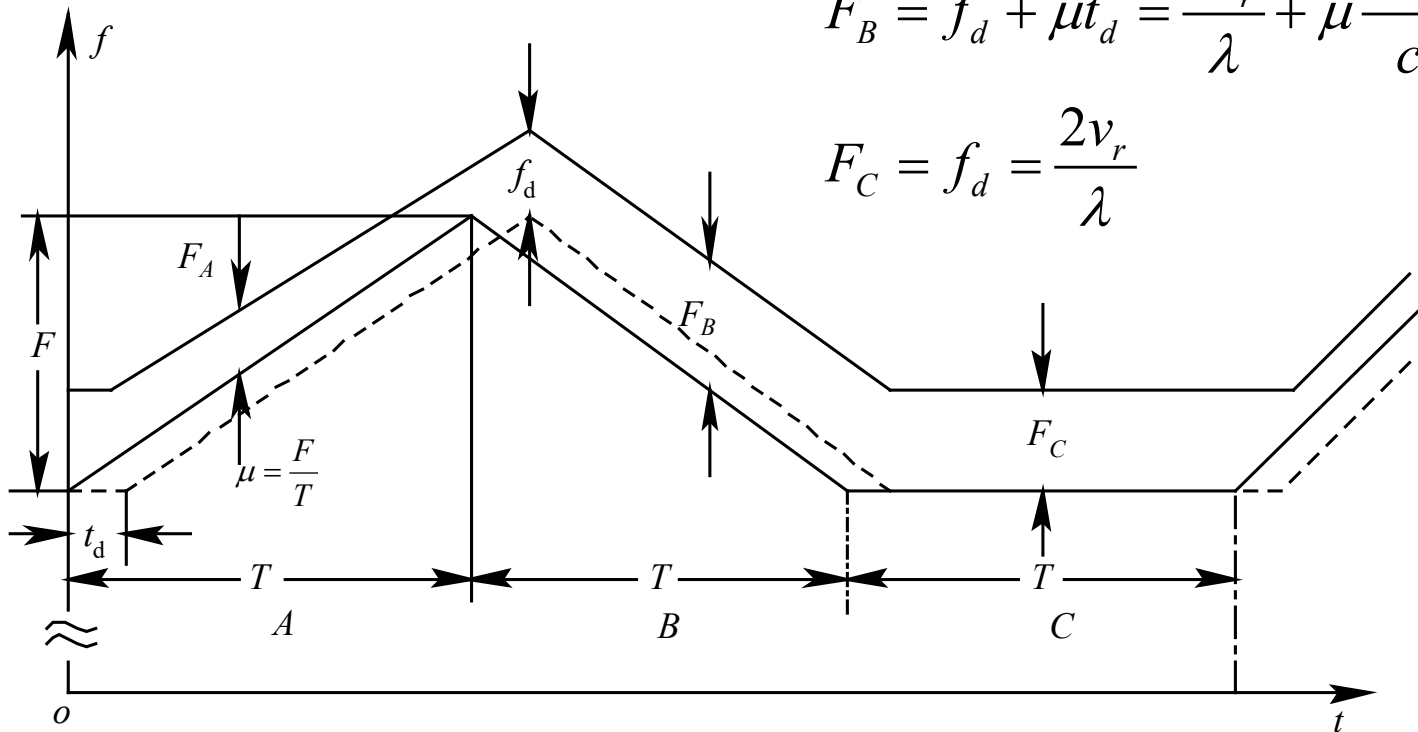
脉冲调频测距原理

(a) 原理性方框图组成;

$$F_A = f_d - \mu t_d = \frac{2v_r}{\lambda} - \mu \frac{2R_0}{c}$$

$$F_B = f_d + \mu t_d = \frac{2v_r}{\lambda} + \mu \frac{2R_0}{c}$$

$$F_C = f_d = \frac{2v_r}{\lambda}$$

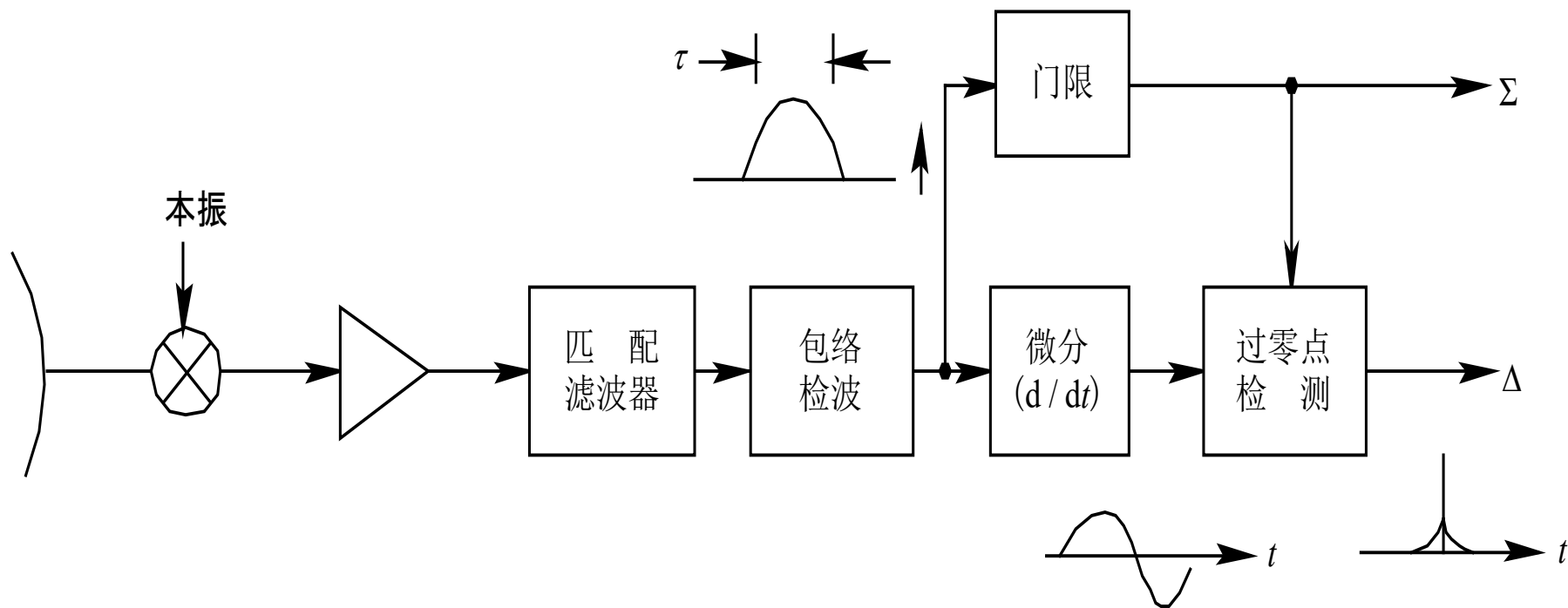


(b)

脉冲调频测距原理  
(b) 信号频率调制规律;



注意：合回路的作用是什么？



回波脉冲中心估计

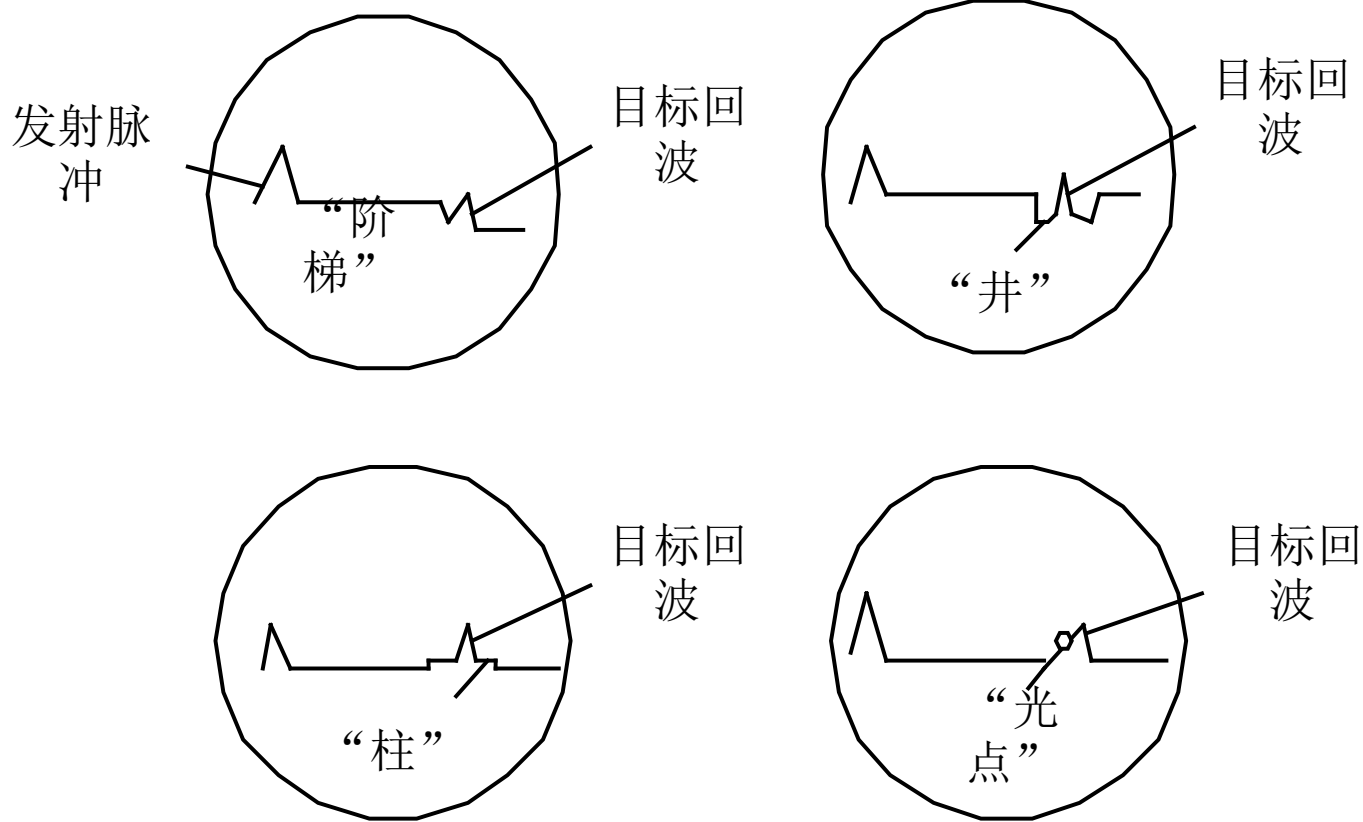


## 6.3 距离跟踪原理

### 6.3.1 人工距离跟踪

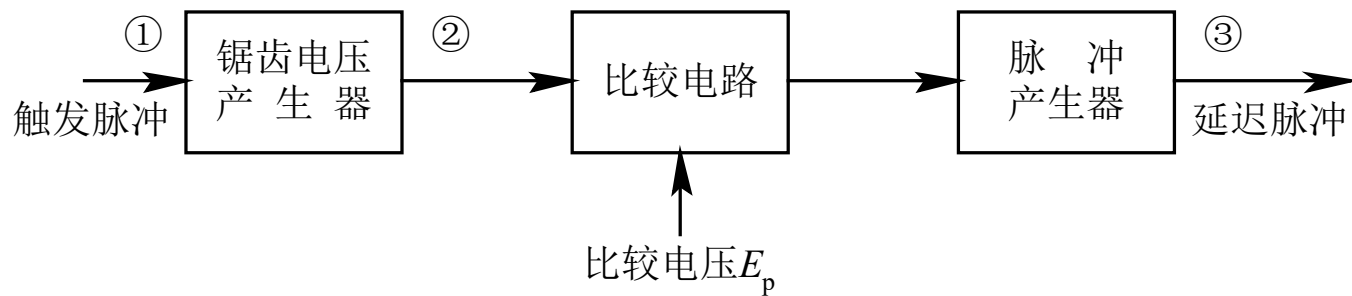
操作员按照显示器上的画面，将电刻度对准目标回波。

---

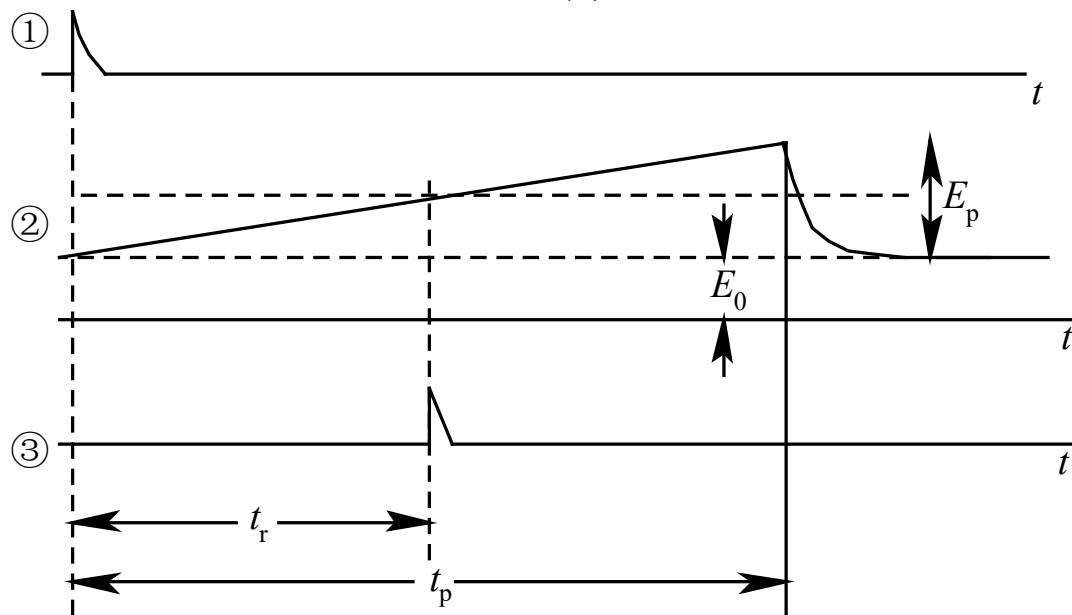


电刻度及其在扫掠线上的位置

# (1) 锯齿电压波法



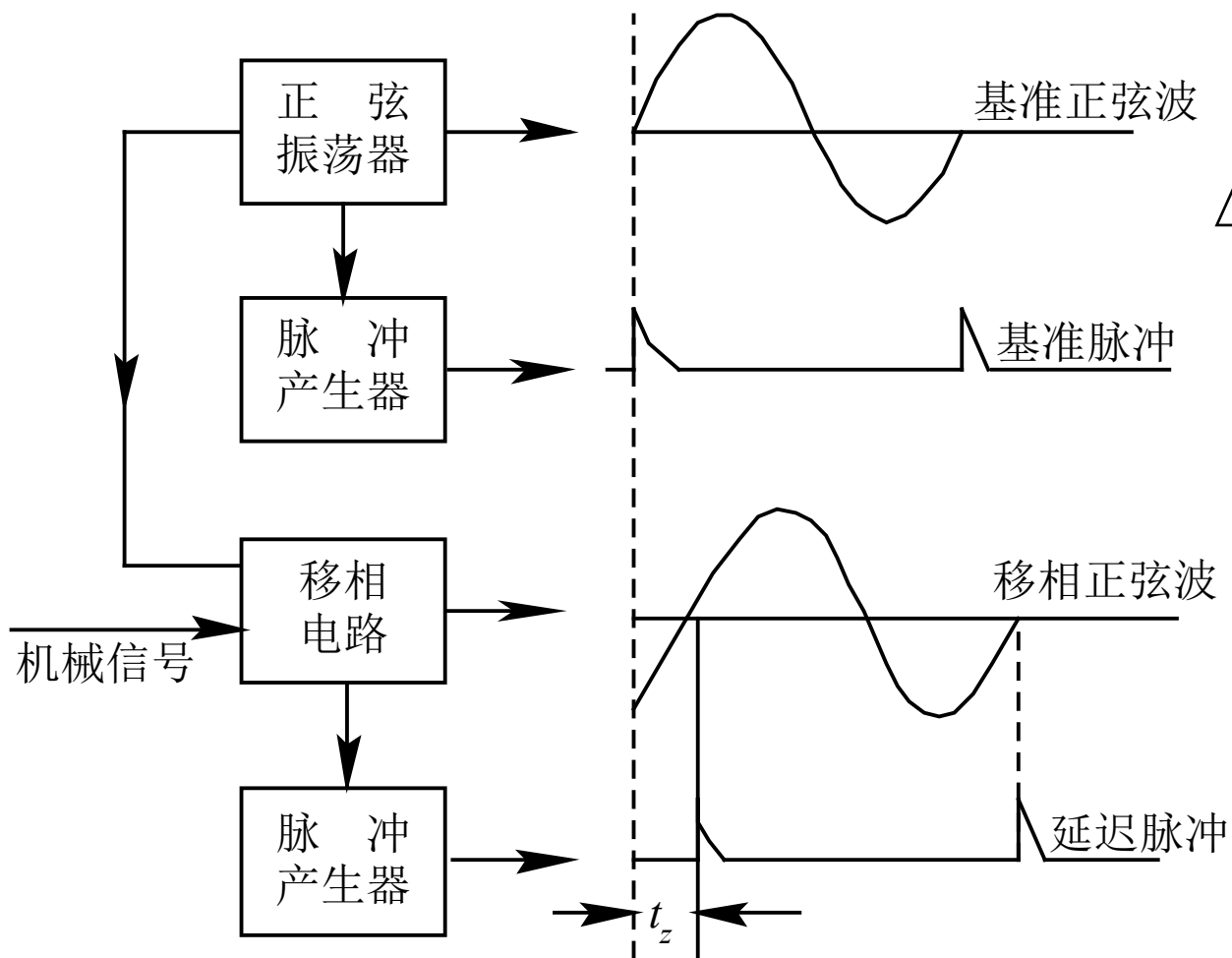
(a)



锯齿电压波法产生移动指标

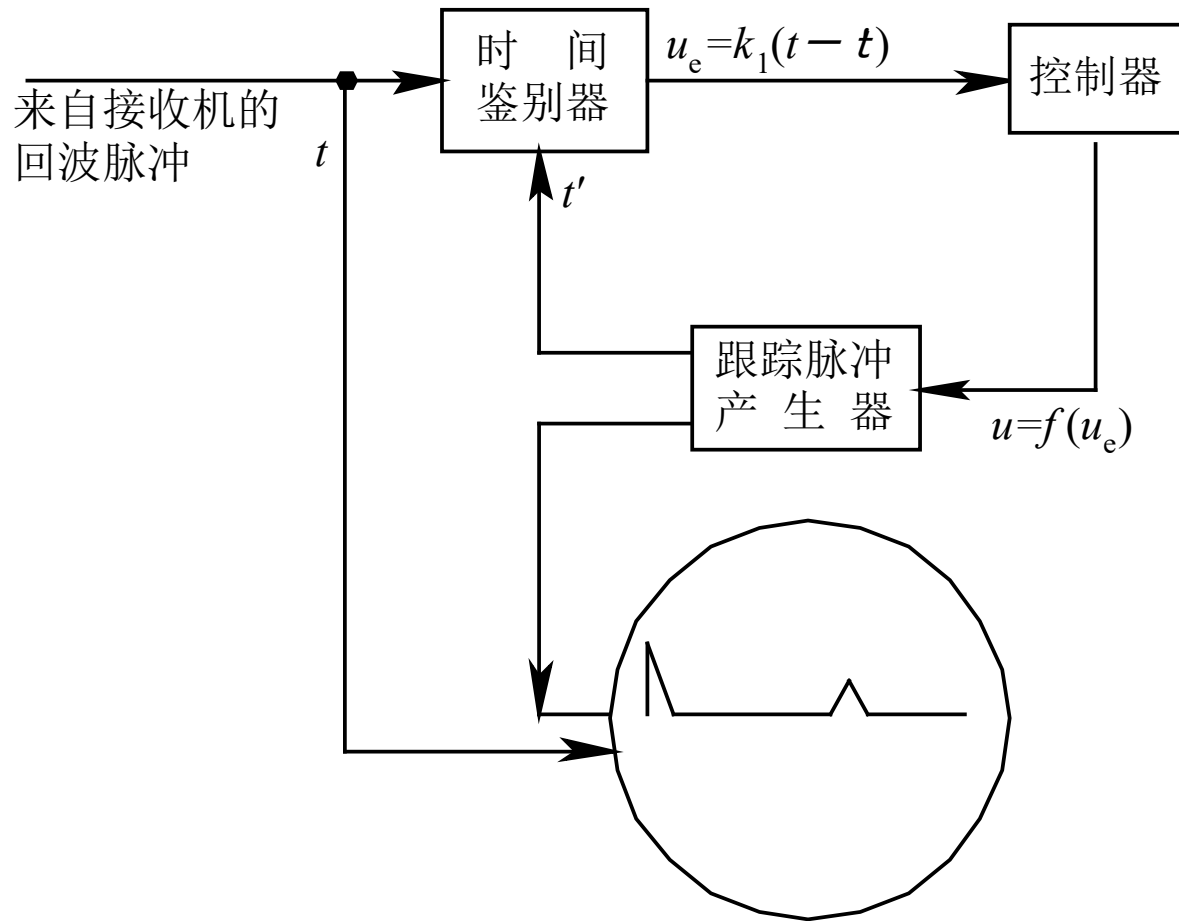
## (2) 相位调制法

W不低于15KHz



相位调制法产生移动指标

## 6.3.2 自动距离跟踪



自动距离跟踪简化方框图

# 自动距离跟踪系统

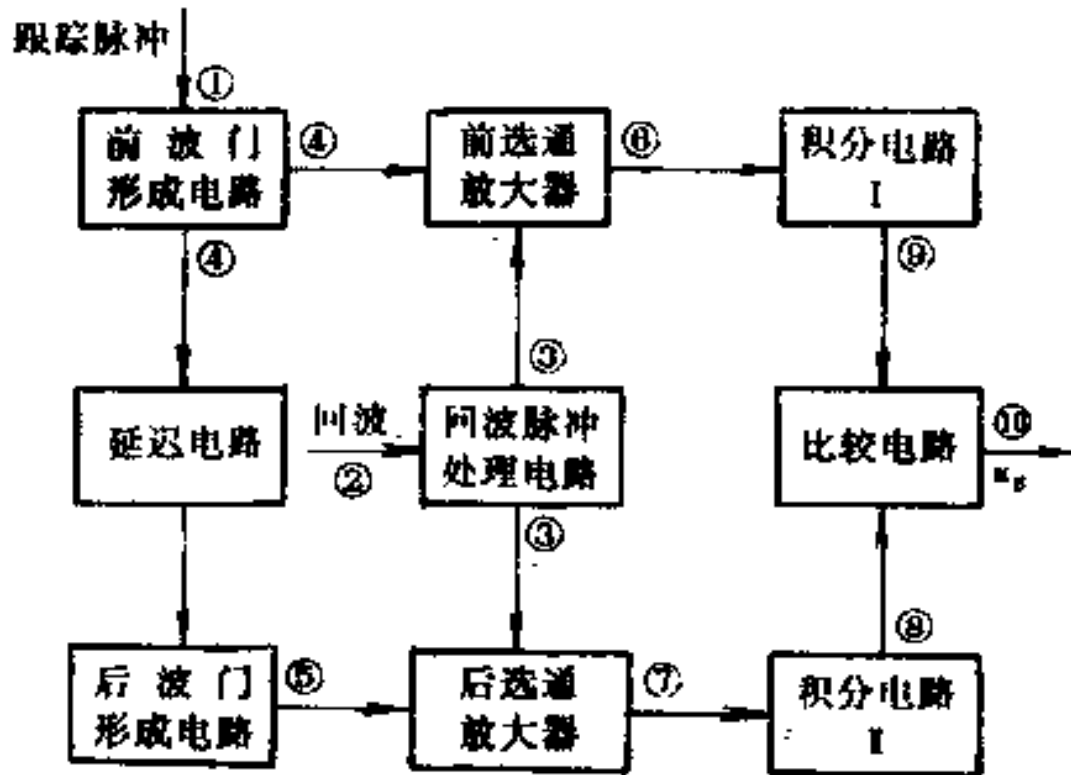
- 时间鉴别器：比较回波信号与跟踪脉冲之间迟延时间差，并将转换成与它成比例的误差电压
- 控制器：把误差信号进行加工变换，将其输出去控制跟踪波门的向减小误差的方向移动
- 跟踪脉冲产生器：根据控制器输出的控制信号，产生所需的迟延时间的跟踪脉冲

# 时间鉴别器

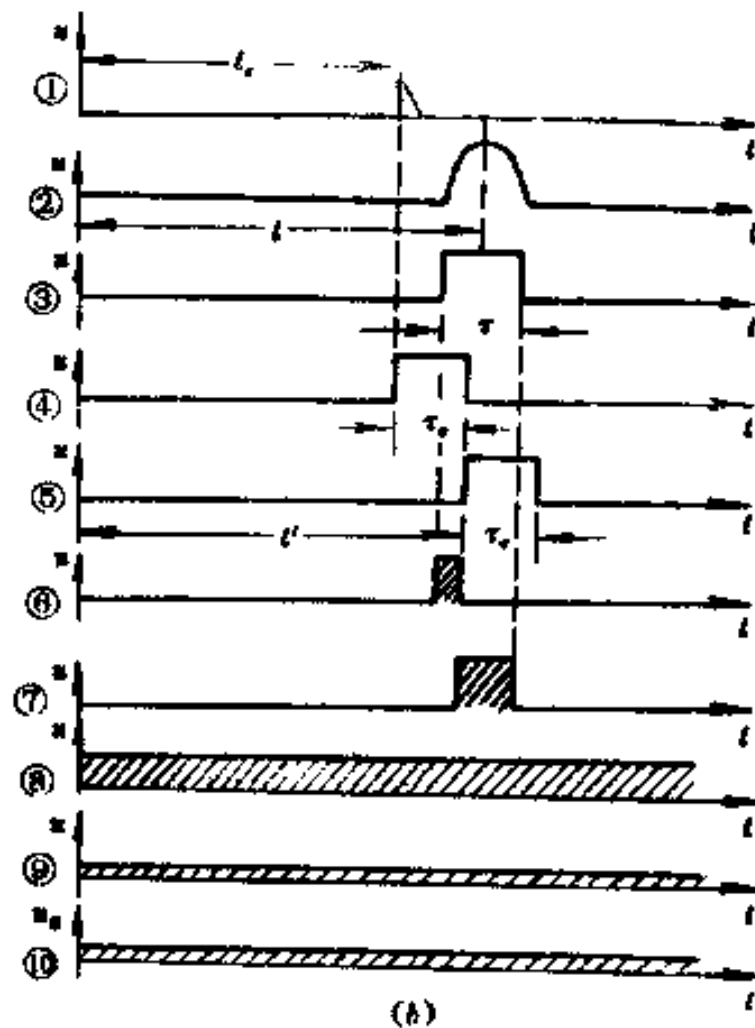
作用:

比较回波信号与跟踪脉冲之间延迟时间，并将延迟时间差转换成与之成比例的误差电压





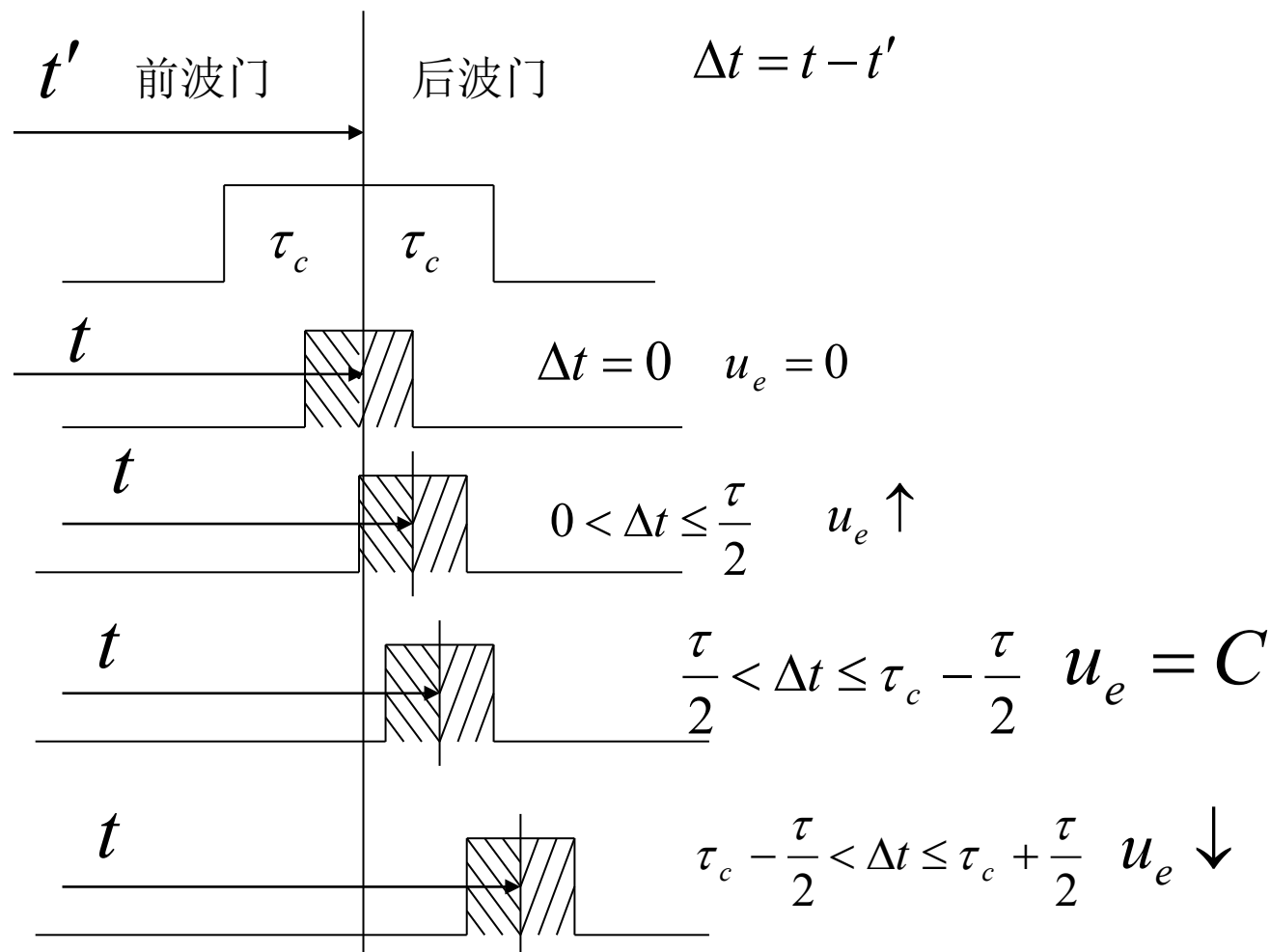
框图



各点波形

# 时间鉴别器特性曲线形成

回波



## 2. 控制器

控制器的作用是把误差信号 $u_\varepsilon$ 进行加工变换后, 将其输出去控制跟踪波门移动, 即改变时延 $t'$ , 使其朝减小 $u_\varepsilon$ 的方向运动。设控制器的输出是电压信号 $E$ , 则其输入和输出之间可用下述通常函数关系表示:

$$E=K_2u_\varepsilon$$

$$u_\varepsilon=K_1(t-t')$$

$$E=K_2u_\varepsilon=K_1K_2(t-t') \quad (6.3.2)$$



当用锯齿电压波法产生移动指标时，下式成立：

$$t' = K_3 E \quad (6.3.3)$$

将式(6.3.2)代入后得

$$E = K_2 u_\varepsilon = K_1 K_2 (t - t') \quad (6.3.2)$$

$$t' = K_1 K_2 K_3 (t - t') \quad (6.3.4)$$

跟踪脉冲绝不可能无误差地对准目标回波，这称为位置误差。

目标的距离越远 ( $t'$  较大)，跟踪系统的误差  $\Delta t = t - t'$  越大。

---

如果控制器采用积分元件，则可以消除位置误差，这时候的工作情况为，输出 $E$ 与输入 $u_\varepsilon$ 之间的关系可以用积分表示，

$$E = \frac{1}{T} \int u_\varepsilon dt \quad (6.3.5)$$

综合式  $u_\varepsilon = K_1(t - t') \quad t' = K_3 E$

$$t' = \frac{K_1 K_3}{T} \int (t - t') dt \quad (6.3.6)$$



如果将目标距离  $R$  和跟踪脉冲所对应的距离  $R'$  代入上式

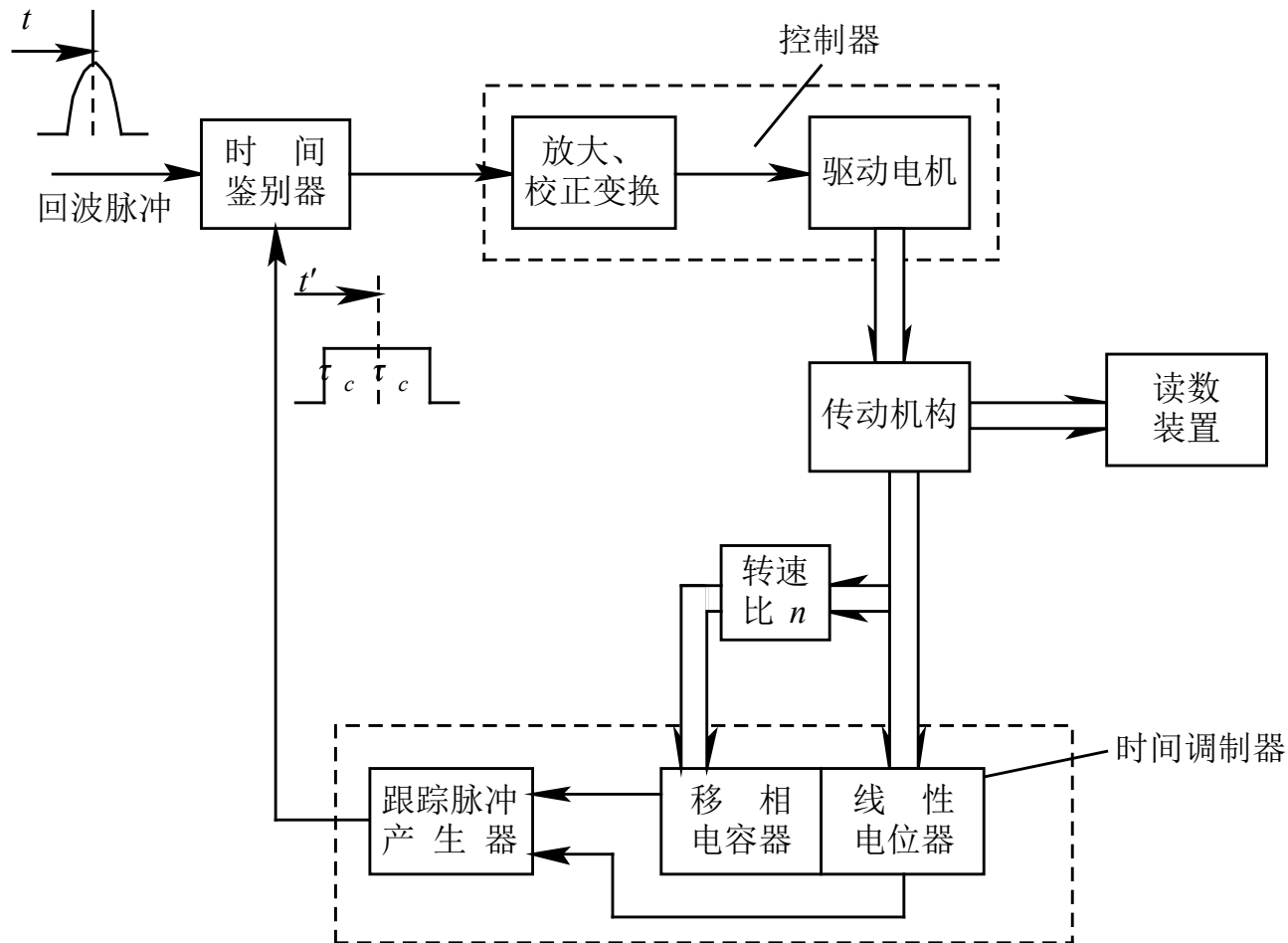
$$R' = \frac{K_1 K_3}{T} \int (R - R') dt$$

微分得

$$\frac{dR'}{dt} = \frac{K_1 K_3}{T} (R - R') = \frac{K_1 K_3}{T} \Delta R \quad (6.3.7)$$

$$\frac{dR'}{dt} = v \quad \Delta R = \frac{T}{K_1 K_3} v$$

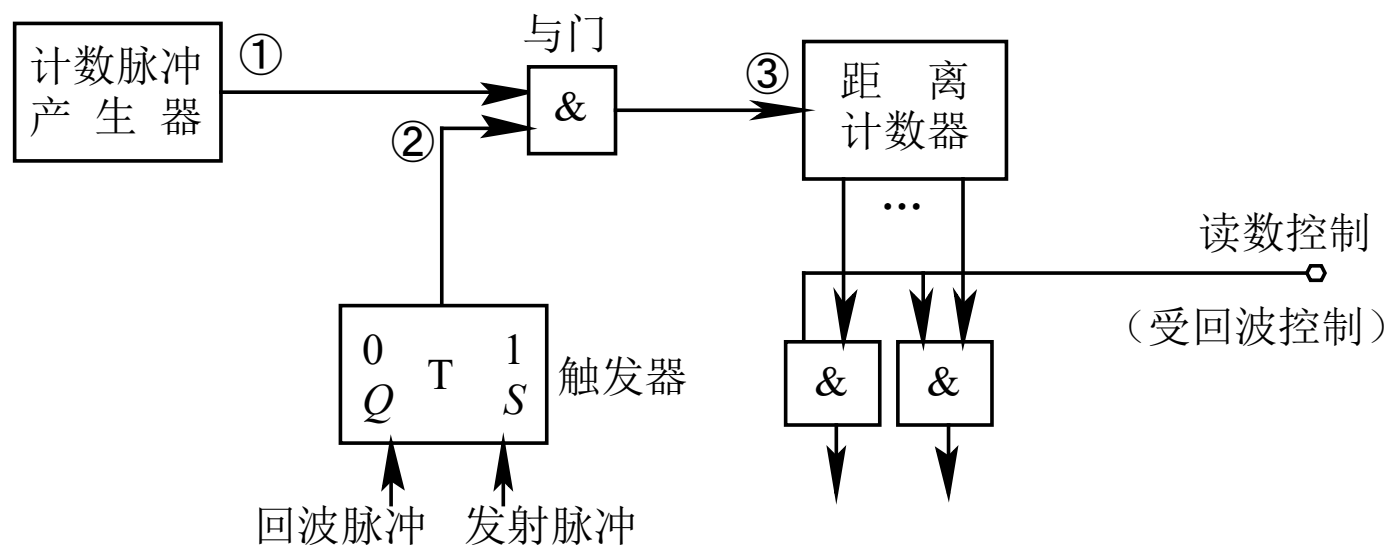
### 3. 跟踪脉冲产生器



机电模拟式距离自动跟踪系统方框图

## 6.4 数字式自动测距器

### 数字式测距的基本原理

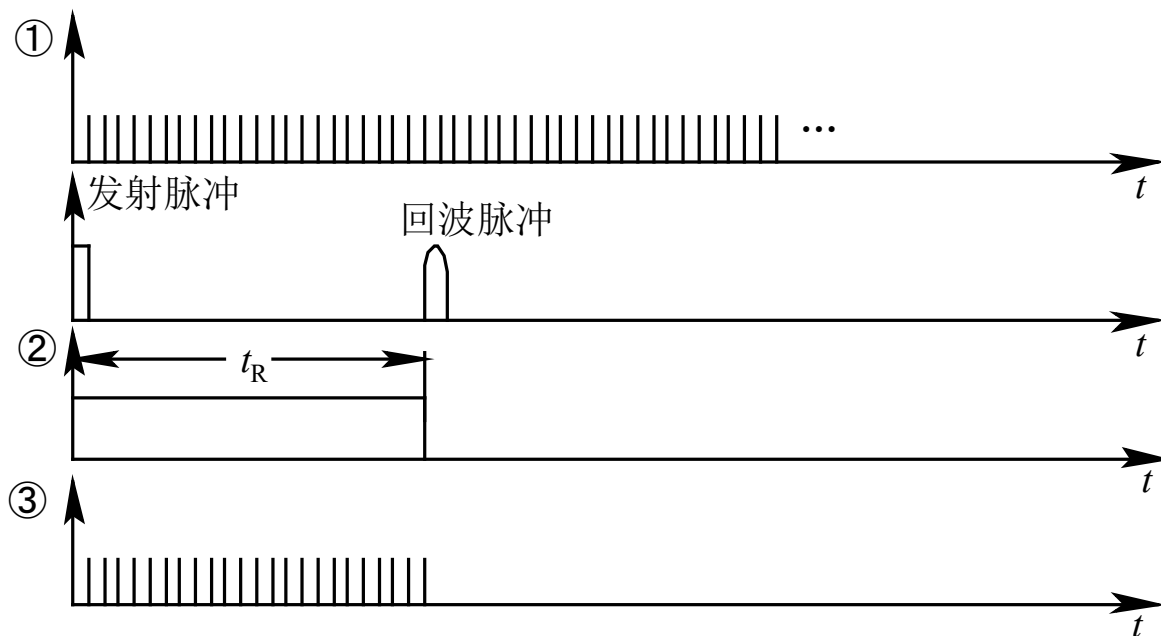


(a)

数字式测距

(a) 原理框图; (b) 波形图





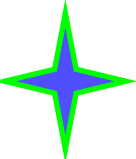
$$n = t_R f = \frac{2R}{c} f$$

$$R = \frac{c}{2f} n$$

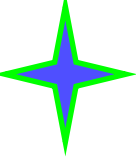
数字式测距

(a) 原理框图; (b) 波形图

# 本章课后总结与练习

- 
- 复习测距原理
  - 区别连续波与脉冲雷达测距方法
  - 阅读相关参考文献
  - 王军等译《雷达手册》，电子工业出版社
-

## 目标距离的测量——习题

- 
1. 设雷达采用双重复频率消除距离模糊。两个重复频率  $f_{r1}=2000\text{Hz}$ ,  $f_{r2}=2500\text{Hz}$ , 设用  $f_{r1}$  测得目标距离为  $7.5\text{km}$ , 用  $f_{r2}$  测的目标距离为  $22.5\text{km}$ , 求目标的真实距离。
  2. 自动距离跟踪系统应具备那些特征?
  3. 测距的方法有哪些?
  4. 某常规脉冲雷达, 脉宽为  $4\mu\text{s}$ ,  $f_r=300\text{Hz}$ , 光点扫描速度  $v_m=0.05\text{cm/km}$ , 光点直径  $d=0.03\text{cm}$ , 收发开杆时间  $t_0=0.1\mu\text{s}$ , 求(1) 距离分辨力与最小探测距离;  
(2) 能否准确确定  $250\text{km}$  处目标。
  5. LFM CW测距, 要求距离分辨力为  $0.5\text{m}$ , 最大不模糊距离为  $2\text{km}$ , 则波形的调频非线性度应低于多少? 其调制带宽至少为多少?