目标到雷达的距离 R 可以通过测量电波往返一次所需时间 t_R 得到：

$$R=\frac{1}{2}ct_R$$

时间 t_R 就是回波相对于发射信号的延迟，因此，目标距离测量就是要精确测量延迟时 t_R 。

根据雷达发射信号的不同，测定延迟时间通常可以采用：

- 脉冲法
- 频率法
- 相位法

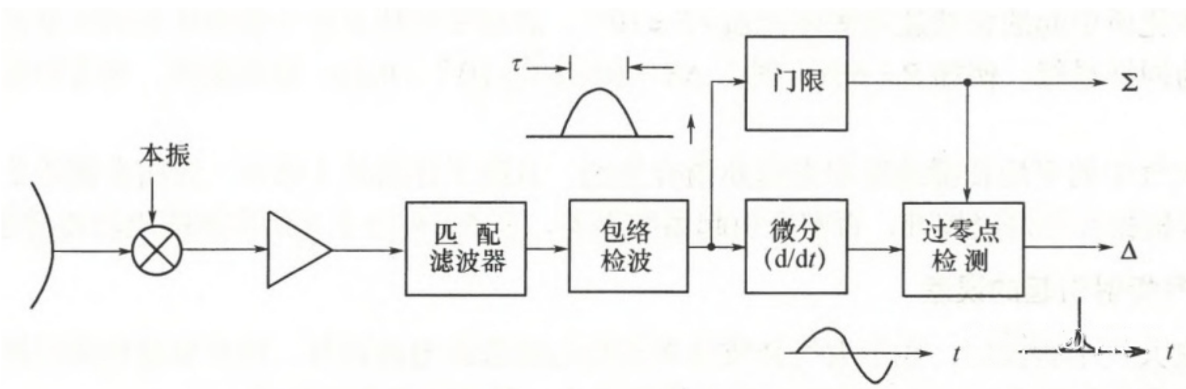
一，脉冲法测距

1，基本原理

有两种定义回波到达时间 t_R 的方法：一种是以目标回波脉冲的**前沿**作为它的到达时刻；另一种是以回波脉冲的**中心（或最大值）**作为它的到达时刻。

如果要测定目标回波的前沿，由于实际的回波信号不是矩形脉冲而近似为**钟形**，此时可将回波信号与一比较电平相比较，把回波信号穿越比较电平的时刻作为其前沿。用电压比较器是不难实现上述要求的。用脉冲前沿作为达时刻的缺点是容易受回波大小及噪声的影响。

后面讨论的**自动距离跟踪系统**通常采用**回波脉冲中心**作为到达时刻。回波脉冲中心估计如下图所示。



当微分器的输出经过零值时便产生一个窄脉冲，该脉冲出现的时间正好是回波视频脉冲的最大值，通常也是回波脉冲的中心。

2，影响测距精度的因素

根据公式：

$$R=\frac{1}{2}ct_R$$

可知，R 和 c、t_R 有关。

分析精度通常使用高等数学里面的全微分的概念。对上式做全微分得：

$$dR=\frac{1}{2}cdt_R+\frac{1}{2}t_Rdc$$

用增量代替微分，可得到测距误差为：

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

其中，Δc 为电波传播速度平均值的误差，Δt_R 为测量目标回波迟延时间的误差。

（1）时间差的影响--------> dt_R越小，dR越小

（2）电波传播速度变化的影响---------> $\frac{dR}{R}=\frac{dc}{c}$

（3）大气折射的影响

（4）测读方法的影响

3，距离分辨率和测距范围

1）距离分辨力

距离分辨力（或距离分辨率）是指同一方向上两个大小相等点目标之间的最小可区分距离。用 ΔR 表示。

$$\Delta R=\frac{1}{2}c(\tau+\frac{d}{v_N})$$

d：光电直径（单位：m）

v_N：扫掠速度（单位：m/s）

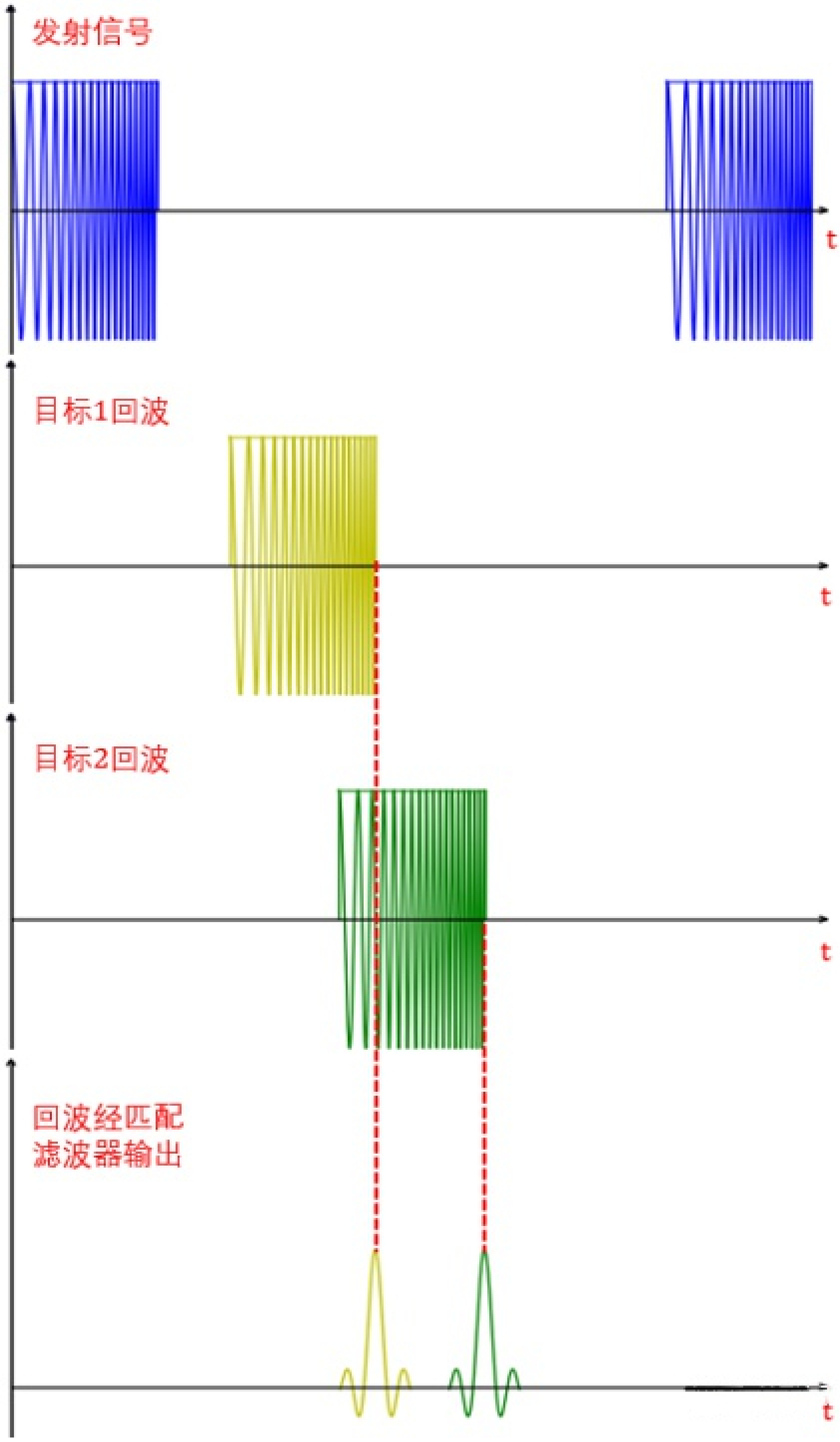
d/v_N：考虑光电的宽度之后得到的距离分辨率

我们希望距离分辨力 ΔR 越小越好。根据上面的公式可知，这时对应的脉宽 τ 就应该越小。 τ 小之后会带来什么问题呢?

根据能量表示的雷达方程，$E=P_t\tau$，如果 τ 过小，信号能量就小，雷达最大作用距离就会下降。这就是说存在距离分辨力和最大作用距离的矛盾问题。

该怎么解决这个矛盾呢?

发射脉冲压缩波形，比如线性调频信号，接收时对回波进行匹配滤波。匹配滤波除了能提高信号的输出信噪比，还可以完成脉冲压缩的功能。这就可以解决距离分辨力和最大作用距离的矛盾问题。



如果不做特殊处理，两个回波信号在时间轴上就叠加到了一起，无法区分开两个目标。如果将两个回波信号通过匹配滤波器，就可以得到如图所示的波形。匹配滤波器是一个线性系统，根据线性系统的叠加性，将两个回波信号叠加之后通过线性系统的输出，可以看成回波 1 通过线性系统的输出加上回波 2 通过线性系统的输出。

本来无法区分的两个目标，经过匹配滤波器之后变得可以区分，也就是说匹配滤波器有提高距离分辨力的作用。

那么提高之后的距离分辨力是多少呢?

这就跟图中两个辛克函数形状波形的宽度有关。如果这两个波形再靠近，直到相互交叠，目标也就无法区分开了。所以，距离分辨力也不说可以无限制的提升。

对于辛克函数，我们往往采用 -3dB 宽度来表示其宽度。但是，-3dB 的点往往不太规整，而 -4dB 的点反而比较规整，正好是 $1/B$ 。所以，这里采用 -4dB 的点的宽度来表示辛克函数的宽度。

对于脉压雷达:

$$\Delta R=\frac{1}{B}\frac{c}{2}=\frac{c}{2B}$$

这里的 $1/B$ 相当于前面的 τ 。 B 为线性调频信号带宽。

线性调频信号:

$$s(t)=Acos(2\pi f_0t+\pi\mu t^2+\phi_0)$$

对于频率:

$$f(t)=\frac{d\phi}{2\pi dt}=f_0+\mu t，\ 0\leq t\leq\tau$$

线性调频信号带宽为:

$$B=信号最大频率-信号最小频率=\mu\tau$$

对于普通雷达， τ 增大， ΔR 增大；对于线性调频信号， τ 增大， B 增大， ΔR 减小。

匹配滤波对于普通雷达而言，可以达到输出信噪比最大的作用。对于脉压雷达，可以提高距离分辨力。

关于 -3dB 的说明： 在角度、时间和频域三个维度都有 -3dB 的说法。-3dB 衡量的是最大值往下落 3dB 点位置之间的间隔。

a）如果间隔的单位为**秒**，就代表时间维度上的 -3dB，比如这一节中线性调频信号通过匹配滤波器之后的波形； b）如果间隔的单位为**度**，就代表角度维度上的 -3dB，主要用来衡量天线波束宽度； c）如果间隔的单位为**赫兹**，就代表频率维度上的 -3dB，比如门函数的频谱。

2）最大无模糊测距范围

测距范围包括最小可测距离和最大单值测距范围。所谓最小可测距离，是指雷达能测量的最近目标的距离。

收发共用天线的雷达系统中，在发射脉冲宽度 τ 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 。也就是说在 $\tau+t_0$ 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:

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

t_0 ：收发转换时间。

雷达的最大无模糊距离由其脉冲重复周期 T_r 决定:

$$R_{max}=\frac{1}{2}cT_r$$

注意这里的 R_{max} 指最大无模糊距离。想要增大最大无模糊距离，可以增大 T_r 。

根据上一章的结论，积累脉冲数:

$$M=\frac{\theta_{0.5}}{\omega}\frac{1}{T_r}$$

如果 T_r 增大，积累的回波数 M 就会减小。积累脉冲数减少，雷达探测距离就会下降（相参积累之后，最大作用距离变为 $R_{max}\sqrt[4]{M}$，这个 R_{max} 表示雷达最大作用距离）。这里就存在矛盾的地方。

雷达探测目标，首先应该考虑达到最大作用距离，这时 T_r 就确定下来了。再来考虑是否满足最大无模糊距离。如果不满足，就需要解模糊。

$$R=\frac{1}{2}ct_R=\frac{1}{2}c(mT_r+t_r)，\quad 0\leq t_r<T_r$$

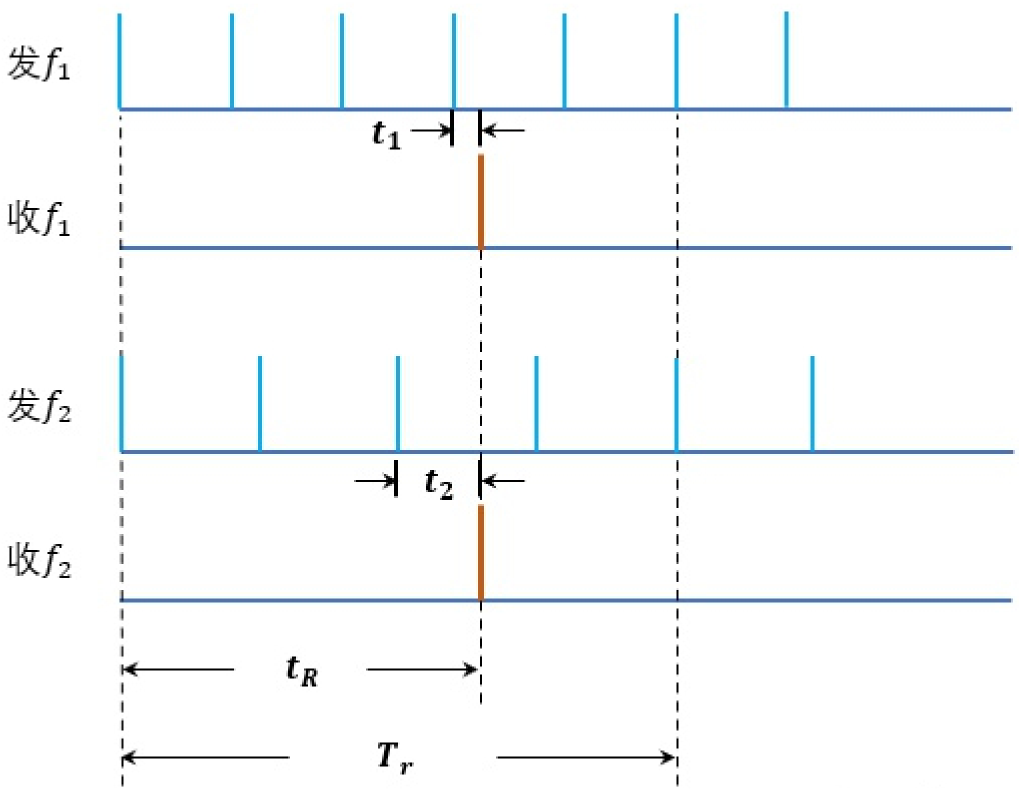
R：目标到雷达的距离；

m：假设跨了 m 个周期；

t_r：回波离它最近主波之间的时间差。

3）距离模糊的判决方法

重频参差（两重频） 如下图所示：



$$\begin{aligned}t_R&=t_1+n_1\frac{1}{f_{r1}}，\quad 0\leq t_1\leq T_{r1}\\&=t_2+n_2\frac{1}{f_{r2}}，\quad 0\leq t_2\leq T_{r2}\end{aligned}$$

n_1、n_2：对应两组发射脉冲的跨周期数。

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

一般取 $a=1$，上图中 $N=4$。f_{r1} 和 f_{r2} 可以看成是一个基础频率 f_r 上的一个倍频量。所以有：

$$\frac{f_{r1}}{f_{r2}}=\frac{N+1}{N}$$

根据公式：

$$t_R=t_1+n_1\frac{1}{f_{r1}}=t_2+n_2\frac{1}{f_{r2}}$$

当 $a=1$ 时，n_1 和 n_2 的关系可能有两种，即 $n_1=n_2$ 和 $n_1=n_2+1$ 。

假设 $n_1=n_2$ ，可得：

$$t_R=\frac{t_1f_{r1}-t_2f_{r2}}{f_{r1}-f_{r2}}$$

假设 $n_1=n_2+1$，可得：

$$t_R=\frac{t_1f_{r1}-t_2f_{r2}+1}{f_{r1}-f_{r2}}$$

如果按前式算出 t_R 为负值，则应采用后式。

重频参差的最大无模糊距离：

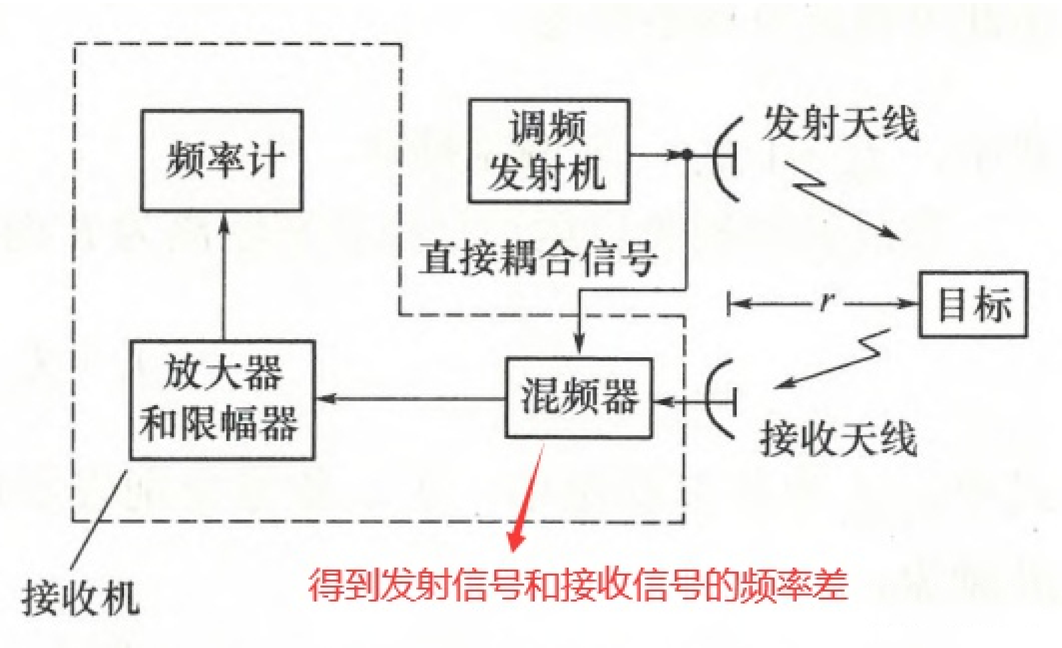
$$R_{max}=\frac{1}{2}c(T_{r1}\text{和}T_{r2}\text{的最小公倍数})$$

还有一个舍脉冲法，每发射M个脉冲，少发1个脉冲，那么接收回波也会在对应位置少一个脉冲，相当于用舍的脉冲做了一个标记，扩大了无模糊距离，扩大了M倍。

二、调频法测距

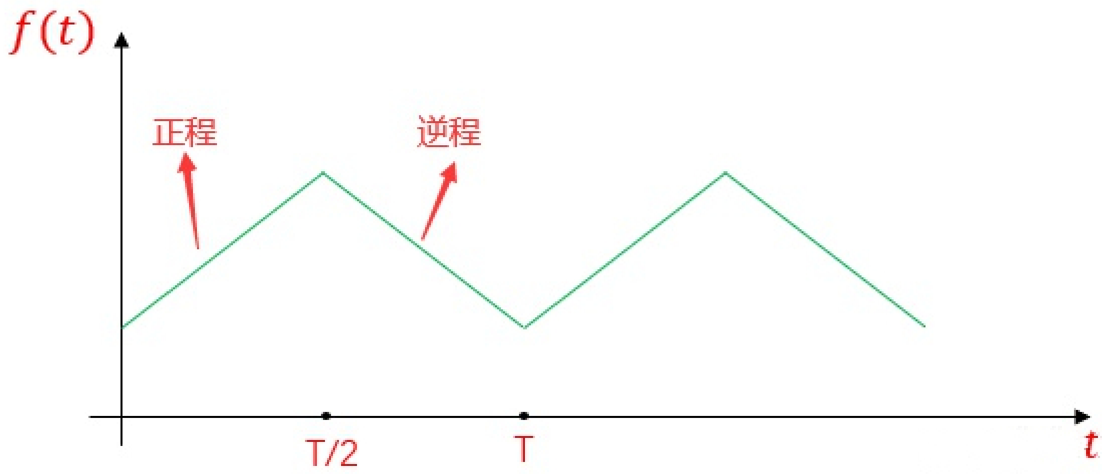
调频法测距可以用在连续波雷达中，也可以用于脉冲雷达。

调频连续波雷达的组成框图如下所示。发射机产生连续高频等幅波，其频率在时间上按**三角形规律**或按**正弦规律**变化，目标回波和发射机直接耦合过来的信号加到接收机混频器内。在无线电波传播到目标并返回天线的这段时间内，发射机频率较之回波频率已有了变化，因此在混频器输出端便出现了差频电压。后者经放大、限幅后加到频率计上。差频电压的频率实际上就与目标距离有关。



下面说明**三角形波调制测距的数学原理**。

发射频率按周期性三角波形的规律变化，如下图所示。



a）正程

发射频率： $f(t) = f_0 + \mu t$

对应发射信号的时域表示：

$$s_t(t) = Acos(2\pi f_0 t + \pi\mu t^2)$$

对应接收信号的时域表示：

$$s_r(t) = ks_t(t - t_r)$$
$$= kAcos(2\pi f_0(t - \frac{2(R_0 - vt)}{c}) + \pi\mu(t - \frac{2(R_0 - vt)}{c})^2)$$

v： 目标相对于雷达的径向速度， R_0 ： 目标到雷达的初始距离。所以，接收信号的频率可以表示为：

$$f_r = f_0 + \frac{2v}{\lambda} + \mu(t - \frac{2R_0}{c})(1 + \frac{2v}{c})$$

$\frac{2v}{\lambda} = f_d$ ： 多普勒频率。由于 $c >> v$ 。

$$f_r = f_0 + f_d + \mu(t - \frac{2R_0}{c})$$

假设目标静止不动，即 $f_d = 0$ ，上式可以写成：

$$f_r = f_0 + \mu(t - \frac{2R_0}{c})$$

从上式可以看出，接收信号的频率实际上就是将发射信号的频率迟延 $2R_0/c$ 。

b）逆程

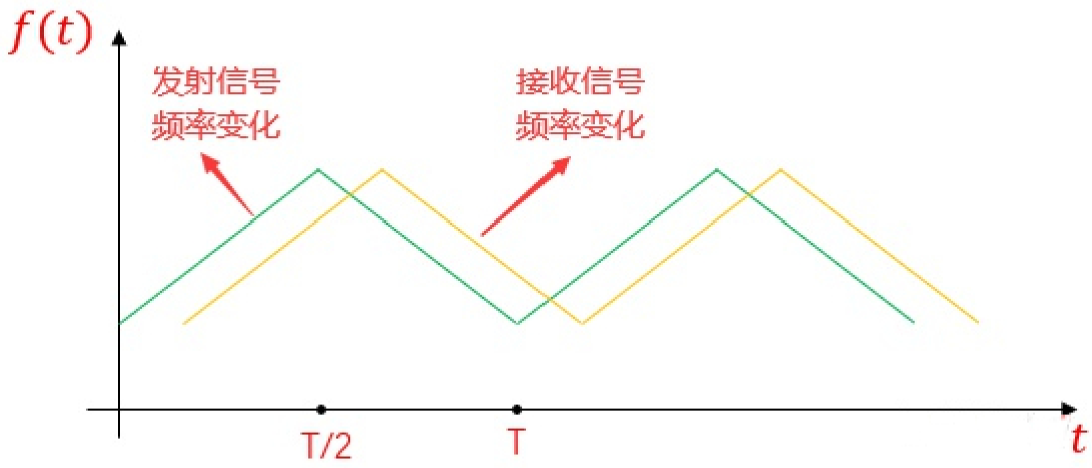
发射频率：

$$f_r = f_0 - \mu t$$

接收频率:

$$f_r = f_0 - \mu(t - \frac{2R_0}{c}) + f_d$$

发射信号和接收信号频率变化如下图所示。



c）求差频的平均值

正程频率差，用 f_{b^+} 表示:

$$f_{b^+} = f_t - f_r = \frac{2\mu R_0}{c} - f_d$$

逆程频率差，用 f_{b^-} 表示:

$$f_{b^-} = f_r - f_t = \frac{2\mu R_0}{c} + f_d$$

频率计测得的差频的平均值，用 f_{bav} 表示:

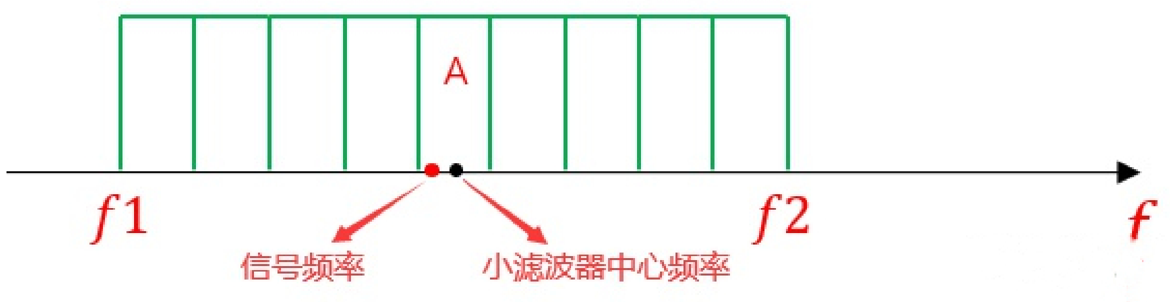
$$f_{bav} = \frac{f_{b^+} + f_{b^-}}{2} = \frac{2\mu R_0}{c}$$

因此，可得:

$$R_0 = \frac{c f_{bav}}{2\mu}$$

频率计测频的一种方法

假设能够测频的范围为 $[f_1, f_2]$ 。一种方法就是在这个范围内设计很多带宽相等的小滤波器，每个小滤波器都有一个中心频率。将差频得到的信号，送入如下的滤波器组。假设滤波器 A 有输出，其中心频率为图中黑点所示，真实信号频率为图中红点所示。我们就将滤波器 A 的中心频率作为该信号频率的测量值。如果滤波器带宽越窄，测频精度就越高。



三、距离跟踪的原理

测距时需要对目标距离进行连续的测量称为**距离跟踪**。

1、人工距离跟踪

主要采用的方法是**锯齿电压波法**和**相位调制法**。

2、自动距离跟踪

1）系统组成及功能

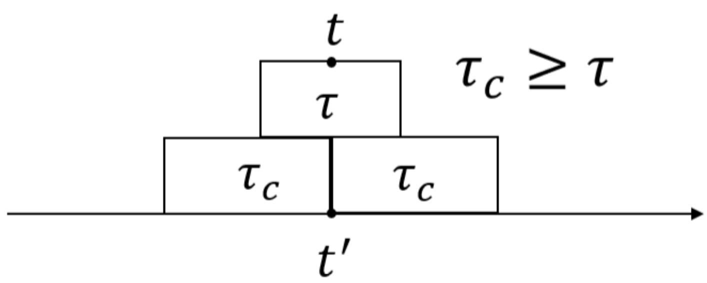
自动跟踪系统主要包括三部分：

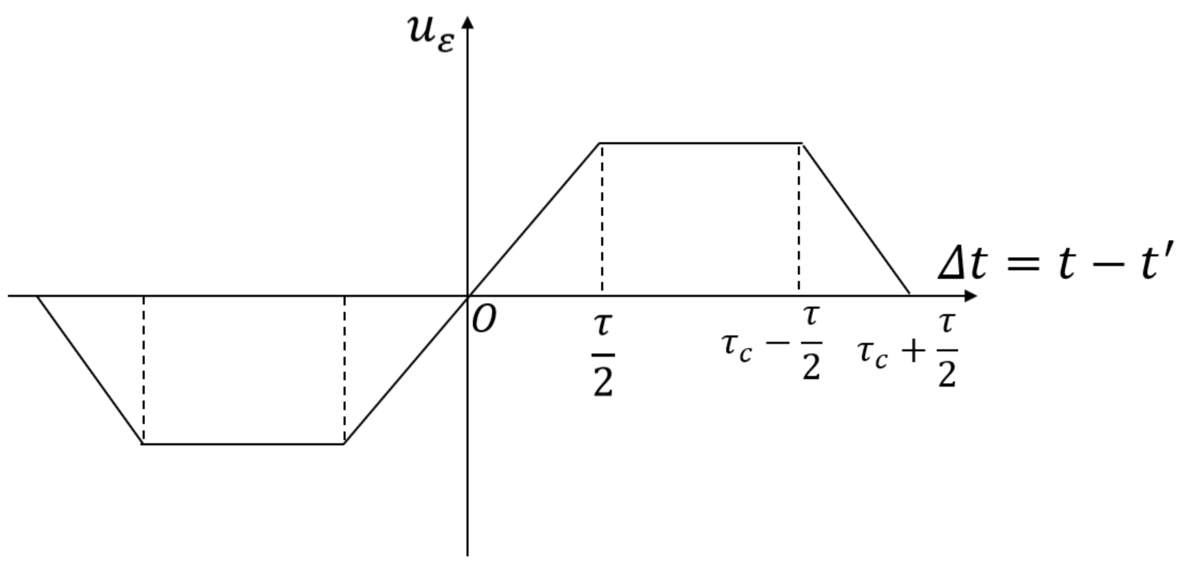
时间鉴别器

时间鉴别器的作用是将跟踪脉冲与回波脉冲在时间上加以比较，鉴别出它们之间的差 Δt。其数学模型为：

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

Δt 表示回波脉冲相对于基准发射脉冲的延迟时间。





控制器的数学模型如下：

$$E = \frac{1}{T}\int u_\epsilon dt$$

跟踪脉冲产生器的数学模型如下

$$t' = K_3 E$$

上述过程是建立在 $|\Delta t| \le \tau_c + \frac{\tau}{2}$.

2）自动距离跟踪的步骤

- 搜索过程
- 跟踪过程
- 失锁，重新搜索