

## 第五章 雷达侦察距离与截获概率

侦察作用距离：对雷达辐射源能量的检测能力。

侦察截获概率：满足能量条件下，侦察机在多维信号空间中检测信号的统计特性。

### § 5.1 侦察系统的灵敏度

$P_{\min}$  是指满足侦察接收机的对接收信号的能量正常检测条件下，在侦察接收机输入端的最小输入信号的功率。

$P_{TSS}$ ：切线信号灵敏度，

$P_{ops}$ ：工作灵敏度。

一.  $P_{TSS}$ ,  $P_{ops}$  的定义

$P_{TSS}$ ：在某一输入脉冲功率电平作用，接收机输出端脉冲与噪声叠加后的信号底部与基线噪声的顶部都在一条直线上，

$(S/N)_0=8dB$ ，(视频输出端)

峰值： $U_m, U_n$ ，有效值： $U_{ml}, U_{nl}$ ，则  $U_n = K_l U_{nl}$ ， $U_m = K_l U_{ml}$ 。  $K_l$ ：峰值系数。

有信号时：由于检波器的非线性作用，一部分信号转为噪声，故  $U_m > U_n$ 。

$$\text{信号电压： } V_{SN} = \frac{1}{2}(V_n + V_m) = \frac{1}{2}K_l(U_{nl} + U_{ml}) ,$$

$$\text{信号功率： } P_{SN} = \frac{K_l^2}{4}(P_n + P_m + 2\sqrt{P_n P_m}) ,$$

$$P_n, P_m \text{ 为基线抬高部分的功率，若 } P_n = P_m, \frac{P_{SN}}{P_n} = K_l^2, K_l = 2.5 \sim 3 ,$$

当  $K_l = 2.5$  时， $K_l^2 = 6.25 \approx 8dB$ ，

$P_{OPS}$ ：脉冲作用下，视频输出端信号功率与噪声功率化为 14dB，输入脉冲信号功率为

$P_{OPS}$ ，

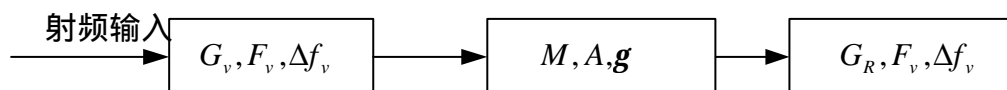
$$P_{OPS} = \begin{cases} P_{TSS} + 6dB & \text{线性检波} \\ P_{TSS} + 3dB & \text{平方律检波} \end{cases}$$

二.  $P_{TSS}$  的分析计算

雷达：匹配， $G_R$  很大， $\Delta f_R / \Delta f_v \approx 2$ ，检波视频噪声可忽略，

侦察：非匹配， $G_R$  很小， $\Delta f_R / \Delta f_v \geq 1$ ，检波视频噪声可忽略，

以晶体视频接收机为例

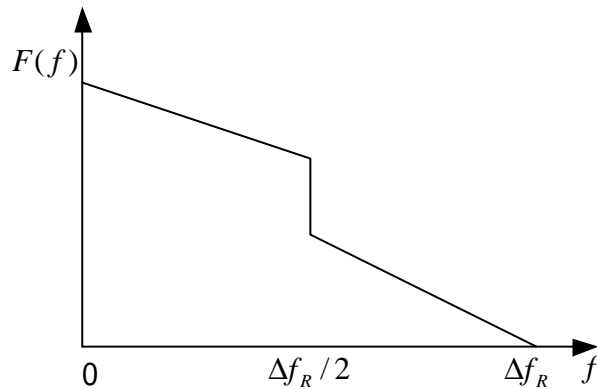


$M = g/\sqrt{R_v}$  ,  $A = \frac{4F_v}{kT_0M^2}$  ,  $M$  : 检波品质因子 ,  $g$  : 检波器开路电压灵敏度,  $A$  : 常数

在小信号条件下, 检波器工作于平方律特性区。

$$\text{噪声功率, } F(f) = \begin{cases} \frac{g^2}{2R_v} [w_0^2(\Delta f_R - f) + 2P_{s0}w_0] & 0 \leq f \leq \Delta f_R / 2 \\ \frac{g^2}{2R_v} [w_0^2(\Delta f_R - f)] & \Delta f_R / 2 \leq f \leq \Delta f_R \end{cases}$$

$w_0, P_{s0}$  分别为噪声谱密度和输入信号的功率。



$$1. \Delta f_v \leq \Delta f_R \leq 2\Delta f_v$$

$\Delta f_v$  位于  $\Delta f_R / 2$  和  $\Delta f_R$  之间时 ,

$$P_v = \int_0^{\Delta f_v} F(f)df = \frac{g^2}{2R_v} [W_0^2 \Delta f_R \Delta f_v - \frac{W_0^2 \Delta f_v^2}{2} + P_{s0} W_0 \Delta f_R] = P_{ml}$$

没有信号作用时基线视频噪声功率为 ,

$$P_{nl} = P_v |_{P_{s0}=0} = \frac{g^2}{2R_v} [W_0^2 \Delta f_R \Delta f_v - \frac{W_0^2 \Delta f_v^2}{2}] ,$$

检波器和视放产生的噪声 ,

$$P_v' = (F_v + t_{VD} - 1)KT_0 \Delta f_v = KT_0 \Delta f_v F_v$$

视放输出信号的功率 :

$$P_s = \frac{g^2}{4R_v} P_{s0}^2$$

基线功率为

$$P_n = P_{nl} + P_v'$$

$$= \frac{\gamma^2}{2R_v} [W_0^2 \Delta f_R \Delta f_v - \frac{W_0^2 \Delta f_v^2}{2}] + KT_0 \Delta f_v F_v$$

有信号作用时，

$$P_m = P_{ml} + P_v' = \frac{g^2}{2R} [W_0^2 \Delta f_R \Delta f_v - \frac{W_0^2 \Delta f_v^2}{2} + P_{s0} W_0 \Delta f_R] + KT_0 \Delta f_v F_v$$

噪声电压的峰值与有效值系数为  $K_c = \frac{U_n}{U_{nl}}$ ，

切线灵敏度时为： $U_s = (U_n + U_m) / 2$ ，

而  $U_{nl} = \sqrt{R_v P_n}$ ， $U_{ml} = \sqrt{R_v P_m}$ ， $U_s = \sqrt{R_v P_s}$ ，

$$P_s = \frac{K_c^2}{4} (P_m + P_n + 2\sqrt{P_n P_m})，$$

当输入为切线灵敏度时， $\frac{P_s}{P_m} = K_c^2 = (2.5 \sim 3) = 7.96 \sim 9.54dB$ 。

平方律检波时

$$P_s = \frac{g^2}{4R_v} P_{TSS}^2 G_R^2，P_{s0} = P_{TSS} G_R，$$

$$P_{TSS} = KT_0 F_v [\frac{K_c^2}{2} \Delta f_R + K_c \sqrt{2\Delta f_R \Delta f_v - \Delta f_v^2 + \frac{K_c^2 \Delta f_v^2}{4} + \frac{A\Delta f_v}{G_R^2 F_R^2}}] W$$

令  $K_c = 2.5$  时， $\Delta f_R, \Delta f_v$  分别以 MHz 表示时

$$P_{TSS} = -114dBm + F_R + 10\lg[3.1\Delta f_R + 2.5\sqrt{2\Delta f_R \Delta f_v - \Delta f_v^2 + 1.56\Delta f_R^2 + \frac{A\Delta f_v}{G_R^2 F_R^2}}]。$$

2.  $\Delta f_R \geq 2\Delta f_v$

$$P_v = \frac{g^2}{2R_v} [W_0^2 \Delta f_R \Delta f_v - \frac{W_0^2 \Delta f_v^2}{2} + P_{s0} W_0 \Delta f_v]，$$

$$P_{TSS} = -114dBm + F_R + 10\lg[3.1\Delta f_R + 2.5\sqrt{2\Delta f_R \Delta f_v - \Delta f_v^2 + 0.56\Delta f_R^2 + \frac{A\Delta f_v}{G_R^2 F_R^2}}]$$

3. 检波前增益不足， $A\Delta f_v / G_R^2 F_R^2$  很大，

当  $\Delta f_v \leq \Delta f_R \leq 2\Delta f_v$ ，

$$P_{TSS} = -114 + F_R + 10 \lg[3.1\Delta f_R + 2.5\sqrt{\frac{A\Delta f_V}{G_R^2 F_R^2}}] \quad (\text{dBmW}),$$

当  $\Delta f_R \geq 2\Delta f_V$  时 ,

$$P_{TSS} = -114 + F_R + 10 \lg[3.1\Delta f_R + 2.5\sqrt{\frac{A\Delta f_V}{G_R^2 F_R^2}}] \quad (\text{dBmW}),$$

4. 检波前增益很高 ,  $A\Delta f_V / G_R^2 F_R^2$  很小 ,

当  $\Delta f_V \leq \Delta f_R \leq \Delta f_V$  ,

$$P_{TSS} = -114 + F_R + 10 \lg[3.1\Delta f_R + 2.5\sqrt{2\Delta f_R \Delta f_V - \Delta f_V^2 + 1.56\Delta f_R^2 + \frac{A\Delta f_V}{G_R^2 F_R^2}}] \quad (\text{dBmW})$$

当  $\Delta f_R \geq 2\Delta f_V$  时 ,

$$P_{TSS} = -114 + F_R + 10 \lg[3.1\Delta f_R + 2.5\sqrt{2\Delta f_R \Delta f_V + 0.56\Delta f_V^2}] \quad (\text{dBmW})$$

三 .

$$P_{OPS} = \begin{cases} P_{TSS} + 6\text{dB} & \text{线性检波} \\ P_{TSS} + 3\text{dB} & \text{平方律检波} \end{cases}$$

## § 5.2 侦察作用距离

一 . 简化侦察方程 ( 不考虑传输损耗 , 大气衰减以及地面海面反射因素 )

接收功率

$$P_R = \frac{P_t G_t}{4pR^2} A_r \quad A_r = \frac{I^2}{4p} G_r$$

$$= \frac{P_t G_t G_r I^2}{(4pR)^2} ,$$

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t G_t G_r I^2}{(4p)^2 P_{r \min}} \right]^{1/2} ,$$

$A_r$  : 侦察天线有限面积 ;  $G_r$  : 侦察天线增益 ;

$P_t$  : 雷达发射功率 ;  $G_t$  : 雷达天线增益 ;

二 . 修正侦察方程 :

$$L = \sum L_i = 14.7 \sim 16.5\text{dB}$$

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t G_t G_r I^2}{(4p)^2} \right]^{1/2}$$

### 三．直视距离

$$R_{sr} = 4.1(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_r})$$

$$R_{r\max} = \min\{R_{sr}, R_{r\max}\}$$

$h_a$  : 雷达天线高度 ;  $h_r$  : 侦察天线高度

### 四．侦察作用距离 $R_r$ 对雷达作用距离 $R_a$ 的优势

$$r = \frac{R_r}{R_s} > 1 ,$$

$$R_s = \min\{R_s, R_{sa}\} ,$$

$$R_a = \left[ \frac{P_t G_t^2 S I^2}{(4p)^3 P_{a\min}} \right] ,$$

$$R_{sa} = 4.1(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_r})$$

### 五 对旁瓣的侦察 , $P_{save}$

$$G_{s\max} (dBi) = G_s (dB) - G_t (dB)$$

$G_{s\max}$  最大旁瓣电平 ,  $G_s$  最大旁瓣增益 ,  $G_t$  分瓣最大增益 ,

$$G_{save} (dBi) = 10 \lg \frac{\text{旁瓣拥有的功率}}{\text{总辐射功率}} (dBi) ,$$

雷达天线的平均旁瓣增益。

旁瓣侦察时的侦察作用距离为 :

$$R_r = \left[ \frac{P_t G_{save} G_r I^2}{(4p)^2 P_{r\min} 10^{0.1L}} \right]^{1/2} ,$$

$$G_{save} \text{ 的真值为 } 10^{0.1 \times G_{save} (dBi)} ,$$

对于旁瓣侦察和主瓣侦察 , 若想达到相同的侦察作用距离 , 旁瓣侦察的侦察接收机灵敏度要比主瓣侦察的侦察接收机灵敏度提高  $G_t (dB) - G_{save} (dBi)$  ,

## § 5.3 侦察截获概率与截获时间

### 一．前端的截获概率和截获时间 :

1. 空域截获
2. 频域截获
3. 其他条件  $T_i, t_0$ ,

$$\text{平均重合宽度: } \frac{1}{t_0} = \sum_{i=0}^n \frac{1}{t_i},$$

$$\text{重合概率: } P_0 = \prod_{i=1}^n \frac{t_i}{T_i},$$

$$\text{平均重合周期: 因为 } P_0 = \frac{\overline{t_0}}{T_0}, \overline{T_0} = \frac{\prod_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i}},$$

前端截获概率:  $P_k(T)$ , T 时间内发生 K 次重合;

$$P(T, K) = P_0 \frac{(IT)^{K-1}}{(K-1)!} e^{-IT} + (1-P_0) \frac{(IT)^K}{k!} e^{-IT}, \quad I = 1/\overline{T_0}$$

$$P(T, 0) = (1-P_0)e^{-IT}, \quad P_k(T) = \sum_{i=K}^{\infty} P(T, K) = 1 - \sum_{i=0}^K P(T, i)$$

当  $K=1$  时,  $P_1(T) = 1 - (1-P_0)\exp(-T/\overline{T_0})$ ,

$$\text{截获时间: } T = \overline{T_0} \ln \frac{1-P_0}{1-P_1(T)},$$

当信号同时到达时, 易造成丢失,  $P_{miss}$ ,

N 部雷达, 脉冲数  $Z_i$ , 宽度  $t_{PW_i}$ , 时间间隔  $t_{PRI_i} = 1/Z_i$ 。

$i$  部雷达重合  $j$  部的概率  $P_{i,j}$ ,

$$P_{i,j} = \begin{cases} \frac{t_{PW_i} + t_{PW_j}}{t_{PRI_j}} & t_{PW_i} + t_{PW_j} < t_{PRI_j}, \quad i, j = 1, 2, 3 \dots N; \quad i \neq j; \\ 1 & t_{PW_i} + t_{PW_j} > t_{PRI_j} \end{cases}$$

$i$  部雷达信号脉宽内不重合其他雷达信号的概率  $P_{miss}$  为:

$$P_{miss} = \prod_{j=1, j \neq i}^N (1 - P_{i,j}),$$

截获事件: 在 T 内发生 K 次以上搜索重合, 且无重合丢失

$$P_{Al}^K(T) = P_{miss} \left[ 1 - \sum_{i=0}^{K-1} P(T, i) \right] ,$$

$$K=1, P_{Al}^1 = P_{miss} \left[ 1 - \left( 1 - (1 - P_0) \exp(-T/\bar{T}_0) \right) \right] ,$$

二 . 系统截获概率与时间

信号质量 , 测量质量 , 软件科学。

ex : 1 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7。