

第四章 雷达侦察的信号处理

雷达侦察系统：截获，检测，测量，分选，估计，识别，决策

1. 前端：PDW 形成
2. 分选，参数估计，识别，威胁等级作战态势，决策
3. 数字接收机模糊了前后端的界限

§ 4.1 概述

一. 任务、技术要求

1. 任务：分选、估计、识别、显示、控制

$$\{PDW_i = (\mathbf{q}_{AOA_i}, f_{RF_i}, t_{TOA_i}, \mathbf{t}_{PW_i}, A_{P_i}, F_i)\}_{i=0}^{\infty}$$

2. 要求

可分选、识别的雷达辐射源类型和可信度

调制类型：AM、FM、PM

工作类型：功能、用途、体制、状态

可测量和估计的参数、范围、精度

$$\text{信号处理时间 } T_{sp}, \overline{T_{sp}} \quad \overline{T_{sp}} = \sum_{i=1}^N W_i T_{sp}^i$$

可处理的输入信号流密度

三. 基本流程和工作原理

1. 预处理 已知、未知信号预处理，实时、准实时处理

特征： $\left\{ \begin{array}{l} \text{匹配：已知雷达，放入已知雷达数据缓存区，m部雷达} \\ \text{不匹配：未知雷达，根据雷达知识，分选出n部雷达} \end{array} \right\}$ 速度要实时

2. 主处理：

已知雷达：序列相关性，统计估值，是否为已知辐射源 $\left\{ \begin{array}{l} \text{是} \\ \text{不是} \end{array} \right.$ 建档。

不相当脉冲放回不匹配脉冲，再作处理。

未知雷达：专家系统识别

可信度：

多处理机系统

§ 4.2 雷达信号时域参数的测量

一. t_{TOA} 的测量

1. 组成 P74, Fig4 - 3

2. 数字化测量。计数器，时间锁存 $s_t = \frac{t_{rs}}{\sqrt{2S/N}}$

3. 同时到达信号：

$$(1) |w_1 - w_2|^3 \gg 2pB_u \text{ 视频电路来不及反应，不会引起脉冲中断，这时 } |S_1 - Q_2|^3 \gg u_T$$

(2) $|w_1 - w_2| < 2\rho B_u j$ 交替时间内分布，分割成多个脉冲

测时电路设置在方位频率的滤波处理之后

二. t_{PW} 的测量

与测时电路同时工作，前沿触发，后沿锁存，同时清零

$$t_{PW \max} = Dt \times 2^N \quad d_{t_{PW}} = \frac{t_{rs} + t_{do}}{\sqrt{2S/N}}$$

三. A_p 的测量

与测时电路同时工作。触发，延迟，A/D 锁存

§ 4.3 雷达侦察信号预处理

$$\{PDW_i\}_{i=1}^N \quad \textcircled{R} \quad \begin{matrix} \text{已知雷达信号特征 } C_j \big|_{j=1}^m \\ \text{雷达信号的先验知识 } D_k \big|_{k=1}^n \end{matrix} \quad \begin{matrix} \textcircled{R} \text{ 已知雷达信号流 } n_g \\ \textcircled{R} \text{ 未知雷达信号流 } n_g \end{matrix}$$

一. 已知雷达信号预处理

1. $\{C_j\}$ 的生成

- (1)有限维的特征子空间：信号特征与噪声、分辨率、容量
- (2)空间聚敛性和时间平稳性

$$Q_{AOA} \quad f_{RF} \quad t_{PW} \quad F$$

2. 基本算法

$$PDW_i \in \begin{cases} \{PDW_{i,j}\}_{j=1}^m & M(PDW_i) \in \{C_j\}_{j=1}^m \\ \frac{\{PDW_{i,j}\}_{j=1}^m}{\{PDW_{i,j}\}_{j=1}^m} & M(PDW_i) \notin \bigcup_{j=1}^m C_j \end{cases}$$

$$C_i \cap C_j \equiv \emptyset \quad \forall i \neq j; i, j = 1, \dots, m$$

分选具有唯一性，但 C_j 之间不能互相交集

3. 组成：分散原理式、集中管理式，全硬件实现

比较 \textcircled{R} [重合：高雷达脉冲流
不重合：剩余脉冲 \textcircled{R} 未知雷达流处理

集中管理式，优先编码，一个 PDW 只放入一个存贮区

非矩形子空间 (1)选通信号相或.硬件复杂

(2)取小，取大，改变 C 的特征

$$D(A) = \begin{matrix} \hat{1} j & C_j \cdot C_i & v_j \geq v_i \\ \hat{1} i & C_j \cdot C_i & v_j < v_i \end{matrix}$$

二.对未知信号的预处理

$$\{D_k\}_{k=1}^n \quad \overline{\{PDW_{i,j}\}_{j=1}^m} \quad \textcircled{R} \quad \{PDW_{i,k}\}_{k=1}^n$$

1. $\{D_k\}_{k=1}^n$ 的生成原则

(1) 完备性和正交性. $\bigcup_{k=1}^n D_k = W \quad D_i \cap D_j = F \quad i \neq j$ 总可以唯一分选

(2) 避免分裂脉冲流

2. 常用的 D_k

(1) 矩阵的均匀分划, 容量、分辨力、分裂

(2) 矩阵的非均匀分划

3. 预处理的算法

4. 组成

§ 4.4 对雷达信号的主处理

一. 对已知雷达信号的主处理

信号 $\{PDW_{i,j}\}_{j=1}^m$ —— 已知雷达信号预分选结果

(1) t_{PRI} 检验 j 雷达的存在

(2) 若 j 雷达的存在, 进一步参数估计 Q, RF, PW, PRI 及其转移概率 T_s , 扫描方式, 工作起止

(3) 类型、功能、工作方式和威胁程度

1. 对已知雷达的 PRI 分选和检测

$$t_{PRI_i} = t_{TOA_i} - t_{TOA_{i-1}}$$

(1) t_{PRI} 特性及其描述

a. 固定 PRI $t_{PRI_i} = t_{PRI}$

b. 参差 PRI stagger

$$t_{PRI_i} = \begin{cases} t_{PRI_1} & i = Lk + 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_{PRI_k} & i = Lk + k \end{cases} \quad L = 0, 1, \dots$$

c. 抖动 t_{PRI} PRI jitter $t_{PRI_i} = t_{PRI_0} + dT_i$ 抖动在 1-10%

d. 参差抖动

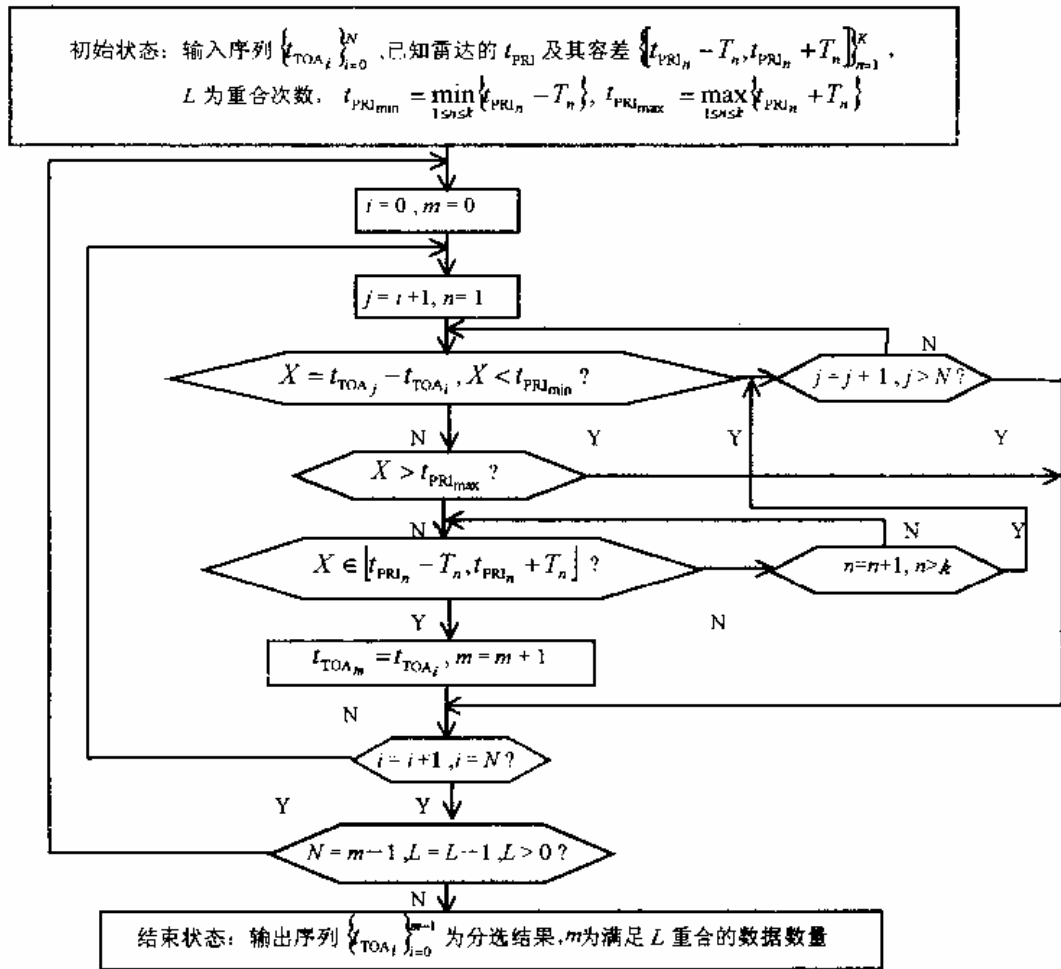
e. 成组参差

f. 成组参差抖动

$$t_{PRI_i} = \begin{cases} t_{PRI_1^n} + \delta T_i^n & L_n M_n \leq i < L_n M_n + N_1^n \\ t_{PRI_{k_n}^n} + \delta T_i^n & L_n M_n + \sum_{j=1}^{k_n-1} N_j^n \leq i < L_n M_n + \sum_{j=1}^{k_n} N_j^n \\ L_n = 0, 1, \dots; \quad M_n = \sum_{j=1}^{k_n} N_j^n; \quad n \in \{1, \dots, N\} \end{cases}$$

(2)已知PRI特征分选和检测

- a. 硬件电路，延迟，重合
- b. DSP 连续出现若干脉冲



2. 参数估计与测量

$\{PDW_{i,j}\}_{i=0}^N$ 为经过预处理分选和主处理分选, 检测后已知雷达的信号序列

- (1)RF 转移概率矩阵 $P_{K \times K}$
- (2)PW 转移概率
- (3)AoA
- (4) T_s, Q_a, T_a

3. 特性: 正交系统 if...then...rule

二. 对未知雷达信号的主处理

(1) t_{PRI} 分析®验证; (2)估计, 测量; (3)识别, 判断

1. 对未知雷达信号的 t_{PRI} 分选与检测: 直方图统计检验, 一级直方图, 多级直方图

(1) $t_{PRI_{min}}, t_{PRI_{max}}, Dt$ 多级直方图

$$\text{固定 } V = \frac{T}{t_{PRI}} \cdot a \quad 0 < a < 1$$

- (2) Stagger PRI PRI_i 存在
- (3) Jitter PRI 容差

- 2. 估计和测量
- 3. 识别

§ 4.5 数字接收机与数字信号处理

一. 数字接收机：数字接收机是将输入信号直接进行 A/D 变换、数据存储，再进行数字信号处理的接收机。由于受到数字电路工作速度等的限制，目前尚不能直接进行射频信号的 A/D 变换和数据存储，一般需要采用变频器将其转换到某一基带 B，再进行处理。

单通道数字接收机：
$$B = \left\{ \begin{matrix} \omega \\ \xi \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 0 \\ \frac{f_{ck}}{2} \end{matrix} \right\}$$

多通道数字接收机：
$$B = \left\{ \begin{matrix} \omega \\ \xi \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \frac{f_{ck}}{2} \\ \frac{f_{ck}}{2} \end{matrix} \right\}$$

量化噪声：SNR = 6.02N + 1.76dB

采样点数：对多脉冲宽

运用：数字测频，测相，脉内调制分析

二. 数字测频 FFT DFT

$$G(k) = \sum_{n=0}^{C-1} s(n) \exp\left[-j \frac{2\pi kn}{C}\right] \quad k = 0, \dots, C-1$$

单信号、载频、带宽 $f = k \frac{f_{ck}}{C}$,

多信号、多点检测

三. 数字测相. 天线阵列

1. 互谱相关相位干涉仪测向

假设在 A/D 采样时间内同时存在 m 个辐射源信号：

$$\{s_i(t) = A_i \exp[-j(\omega_i t + \varphi_i)]\}_{i=0}^{m-1}$$

各天线阵元的输出信号为：

$$x_j(t) = \sum_{i=0}^{m-1} s_i(t) \exp\left[-j \frac{\omega_i}{C} d_j \sin\theta_i\right] \quad j = 0, 1, \dots, p-1$$

然后进行 FFT 变换得到频谱：

$$\left. \begin{aligned} G_j(k) &= \sum_{n=0}^{C-1} X_j(n) \exp\left[-j \frac{2\pi nk}{C}\right] = \sum_{i=0}^{m-1} F_i(k) \exp\left[-j \frac{\omega_i}{C} d_j \sin\theta_i\right] \\ F_i(k) &= \sum_{n=0}^{C-1} s_i(n\Delta t) \exp\left[-j \frac{2\pi kn}{C}\right] \end{aligned} \right\} k = 0, \dots, C-1; j = 0, \dots, p-1$$

2. MUSIC 算法的谱估计测向

以列向量 S 表示各辐射源信号

$$\mathbf{S}^T = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_{m-1}(t))$$

矩阵 B 为各天线阵元对 S 的响应：

$$B = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{\omega_0}{c}d_0\sin\theta_0} & e^{-j\frac{\omega_1}{c}d_1\sin\theta_1} & \dots & e^{-j\frac{\omega_{m-1}}{c}d_{m-1}\sin\theta_{m-1}} \\ e^{-j\frac{\omega_0}{c}d_1\sin\theta_0} & e^{-j\frac{\omega_1}{c}d_1\sin\theta_1} & \dots & e^{-j\frac{\omega_{m-1}}{c}d_1\sin\theta_{m-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j\frac{\omega_0}{c}d_{p-1}\sin\theta_0} & e^{j\frac{\omega_1}{c}d_{p-1}\sin\theta_1} & \dots & e^{j\frac{\omega_{m-1}}{c}d_{p-1}\sin\theta_{m-1}} \end{bmatrix}_{p \times m}$$

$$R = E[XX^H] = BE[SS^T]B^H + E[WW^H]$$

R 是满秩正定矩阵，具有 P 个非零特征值： $\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \lambda_{p-2} \geq \lambda_{p-1} > 0$

M 个大的特征值可求的 M 个入射信号，P-M 个小的特征值得到的是噪声
MUSIC 算法就是以 B 在噪声子空间的最小投影方向作为辐射源方向的估计。

$$\begin{cases} G_{MUSIC}(\theta_k) = \max_{\theta} \left\{ \frac{1}{\mathbf{b}^H(\omega_k, \theta) \mathbf{V}_N \mathbf{V}_N^H \mathbf{b}(\omega_k, \theta)} \right\} & k = 0, \dots, m-1 \\ \mathbf{b}^H(\omega_k, \theta) = \left(e^{j\frac{\omega_k}{c}d_0\sin\theta} \quad e^{j\frac{\omega_k}{c}d_1\sin\theta} \quad \dots \quad e^{j\frac{\omega_k}{c}d_{p-1}\sin\theta} \right) \\ \mathbf{V}_N = (\mathbf{U}_m, \mathbf{U}_{m+1}, \dots, \mathbf{U}_{p-1})_{p \times (p-m)} \end{cases}$$

$U_i, i = m, \dots, p-1$ 分别为 p-m 个最小特征值构成的噪声特征向量。

四. 信号脉内调制的分析

1. 短时傅立叶变换：

$$W(k) = \sum_n^{C-1} s(n) \exp\left\{j \frac{2\pi nk}{C}\right\} \quad k = 0, \dots, C-1$$

每次取一段信号进行 FFT——时域二维分布

2. 瞬时自相关算法

$$R(T) = \overline{S(t) S^*(t+t)}$$

$$(1) S(t) = A \cos(W_0 t + F)$$

$$R(t) = \frac{A^2}{2} \cos W_0 t$$

$$(2) S(t) = \dot{\sum}_{i=0}^{p-1} A_i \cos(w_0(t - it_0) + a_i p) = \dot{\sum}_{i=0}^{p-1} A_i \cos(w_0(t - it_0) + F + a_i p)$$

$$R(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} A^2 \cos[w_0 t + (a_i - a_{i-1}) p] & it_0 \leq t \leq it_0 + t \\ \frac{1}{2} A^2 \cos w_0 t & it_0 + t \leq t \leq it_0 + t_0 \end{cases}$$

$$(3) S(t) = A \cos(W_0 t + \frac{1}{2} u t^2)$$

$$R(t) = \frac{1}{2} A^2 \cos[W_0 t + \frac{1}{2} u t^2 + u t t]$$

3. WIGNER 分布

瞬时自相关 FT, 去噪, 非线性运算

$$WD(t, \omega) = \int s\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \overline{s\left(t + \frac{\tau}{2}\right)} \exp(-j\omega\tau) d\tau$$

对连续时域信号 S(t)和离散时域信号 S(n)的 WIGNER 分布(记为 WD)分别定义为

$$\left. \begin{aligned} WD(t, \omega) &= \int s\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \overline{s\left(t + \frac{\tau}{2}\right)} \exp(-j\omega\tau) d\tau \\ WD(n, k) &= \sum_{m=0}^{C-1} s(n) \overline{s(n+m)} \exp\left(-j \frac{2\pi mk}{C}\right) \end{aligned} \right\}$$

ex: 2.4

上机作业:

完成给定侦察数据的分选, 识别结果, 并给出参数统计结果

信号参数: $Df = 2MHz$. $Dq = 2^0$. $DPRI = 1us$. $Dt = 0.1us$

数据结构 *RF* .unsigned int AOA unsignedint TOA unsigned pw

雷达信号: 1. $RF = 2300MHz$. $AOA = 46^0$. $PW = 2.5us$. 固定PRI = 400us

2. $RF = 2500MHz$. $DRF = \pm 6MHz$. $PW = 1.8us$. $DPW = \pm 0.5us$
 $AOA = 78^0$. $73^0 @ 83^0$. $PRI = 800us$. $DPRI = \pm 10us$
3. $RF = 3300MHz$. $DRF = \pm 10MHz$. $PW = 1us$. $DPW = \pm 0.5us$
 $AOA = 90^0$. $.DAOA = \pm 5^0$. $PRI_1 = 430us$. $.PRI_2 = 470us$. $DPRI = \pm 5us$
4. $RF = 3300MHz$. $DRF = \pm 10MHz$. $PW = 2us$. $DPW = \pm 0.3us$
 $AOA = 270^0$. $.DAOA = \pm 10^0$. $PRI_1 = 310us$. $.PRI_2 = 330us$. $JiTier$
5. $RF = 3700MHz$. $DRF = \pm 10MHz$. $PW = 2us$. $DPW = \pm 0.5us$
 $AOA = 135^0$. $.DAOA = \pm 2^0$. $PRI_1 = 600us$. $.PRI_2 = 650us$.

信号产生: (1)时间 1.25us

(2)单独产生 *TOA*. *Long*

(3)排序

雷达数 mm=5, 脉冲数 LM. M=1,2,3,4,5

m 雷达指针 n—脉冲指针 p(5)当 ∞ ∞ 脉冲指针