

基于累积变换的周期性对称调制模式的快速自动搜索算法

樊甫华¹, 张万军¹, 谭 营²

(1. 解放军电子工程学院, 安徽合肥 230037; 2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230027)

摘要: 借鉴平面变换技术, 将密集雷达脉冲序列映射成平面位图矩阵, 并提出自动搜索周期性对称调制模式的快速算法, 用于分选密集信号环境下 PRI 受周期性对称调制的雷达脉冲. 大量的仿真试验结果表明算法在密集信号环境下, 分选 PRI 是周期性对称调制的雷达脉冲的平均准确率达到 92%, 平均漏选率只有 5%, 极大地提高了雷达脉冲分选的效率 and 准确性. 最后给出模式搜索时间、脉冲分选平均准确率和平均漏选率随脉冲密度变化的结论.

关键词: 雷达信号处理; 周期性对称调制; 脉冲分选

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)07-1266-05

A Fast and Automatic Searching Algorithm of Periodic and Symmetric Patterns Based on Accumulative Transformation Technique

FAN Fuhua¹, ZHANG Wan jun¹, TAN Ying²

(1. Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei, Anhui 230037, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: By borrowing ideas from the plane transformation technique, the dense radar pulse stream is mapped into a 2 D plane matrix. And a new algorithm for fast searching the periodic and symmetric patterns is proposed and applied to deinterleave the complex radar pulses with pulse repetition interval (PRI) modulated by a periodic and symmetrical function in dense pulse environments. Extensive experimental results show that the averaged accurate rate of this algorithm for deinterleaving the complex radar pulses with a periodic and symmetrical PRI in dense environments is about 92% and averaged missing rate is merely 5%. At last, conclusions that the pattern searching time, the averaged accurate rate and missing rate of this algorithm vary as the density of radar pulse stream, are given in details and presented in figures.

Key words: radar signal processing; periodic and symmetrical modulation; pulse deinterleaving; plane bitmap matrix

1 引言

密集脉冲序列分选在雷达信号处理领域一直倍受关注. 目前主要的分选方法有时域滤波法^[1]、累积差直方图法 (CDF) ^[2]、序列差直方图法 (SDIF) ^[3]、基于脉冲到达时间 (TOA) 的方法^[4-7] 及其变换域的方法^[8], 以及结合脉冲到达角 (DOA)、射频 (RF)、脉宽 (PW) 等参数的综合分选方法^[9]. 已公开的这些方法存在以下问题: ①在脉冲密集或存在脉冲丢失时, 性能急剧下降; ②当 PRI 参差雷达的 PRI 值、PRI 抖动雷达的调制周期未知时, 算法^[4-7] 不能使用. 文献[10] 提出的平面变换技术在 PRI 的调制参数未知时, 通过观察脉冲序列映射在二维平面上的累积变换特征曲线, 人工分选复杂体制的雷达脉冲. 其缺点是脉冲密集时, 人眼难以识别累积变换特征曲线; 其次是人工搜索平面宽度的速度很慢, 效率低下. 本文在借鉴平面变换技术的基础上, 提出了一种在二维平面上自动搜索周期性模式的快速算法, 适用于分选 PRI 受周期性对

称调制的雷达脉冲.

2 周期性对称调制的雷达脉冲序列的累积变换特征

周期性对称包括整周期对称和半周期对称两类, 文中的周期性对称特指半周期对称. 已知正弦波形是典型的半周期对称, 这里首先以 PRI 受正弦调制的雷达脉冲序列为例, 分析其累积变换曲线的周期性, 再进行推理.

设脉冲序列用函数 $S(T_i)$ 表示, i 为自然数, 代表每个脉冲在序列中的序号, 变量 T_i 表示第 i 个脉冲的接收时间, 函数值为逻辑值“0”和“1”. 两个“1”脉冲之间的间隔是脉冲重复间隔 (PRI), 记为 $P(i)$, 即 $P(i) = T_{i+1} - T_i$. 假设雷达脉冲序列的 PRI 受正弦调制, 正弦函数的幅度为 A_m , 调制均值为 ω , 一个调制周期内的调制脉冲数目为 C , 若将 $P(i)$ 看作“随机点过程”, 利用与变线积分类似的方法对 $P(i)$ 进行累积变换, 雷达脉冲序列中第 n 个脉冲的累积变换表达式为:

$$L(n) = \sum_{i=1}^n P(i) = \sum_{i=1}^n (Q_i + W) = \sum_{i=1}^n Q_i + n \cdot W \quad (1)$$

$$Q_i = A_m \cdot W \sin\left(\frac{i-1}{C} \cdot 2\pi + \varphi\right) \quad (2)$$

其中, Q_i 是调制变化量, 表示 PRI 抖动的量值; $L(n)$ 是与 $P(i)$ 序列等长的离散序列。将脉冲序列映射到宽度为 W 的二维平面上, 第 n 个脉冲在平面上的坐标 (x_n, y_n) 为:

$$x_n = \text{round}(\text{mod}(L(n), W)), y_n = \lfloor L(n)/W \rfloor \quad (3)$$

其中, $\lfloor x \rfloor$ 表示向下取整, $\text{mod}(x, y)$ 为取余操作函数, $\text{round}(x)$ 为四舍五入函数。

$$\text{因 } \sum_{i=0}^{C-1} e^{j(\frac{i}{C} \cdot 2\pi + \varphi)} = \sum_{i=0}^{C-1} \cos(\frac{i}{C} \cdot 2\pi + \varphi) + j \sum_{i=0}^{C-1} \sin(\frac{i}{C} \cdot 2\pi + \varphi),$$

$$\sum_{i=0}^{C-1} e^{j(\frac{i}{C} \cdot 2\pi + \varphi)} = 0, \text{ 则 } \sum_{m=0}^{C-1} \sin(\frac{m}{C} \cdot 2\pi + \varphi) = 0 \quad (4)$$

$$\text{由式(2)和式(4)可知, 当 } n = k \cdot C, \sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (5)$$

结论 1 当显示平面宽度为正弦调制均值 W 时, PRI 为正弦调制的第 $K \cdot C$ 个脉冲在平面上的坐标为:

$$x_{K \cdot C} = 0, y_{K \cdot C} = K \cdot C \quad (6)$$

在同样调制的脉冲序列中, 对于序号为 $n_1 = (K-1) \cdot C + J, n_2 = KC + J$ (整数 $J \in [1, C-1], K$ 为自然数) 的两个脉冲, 对应宽度为 W 的显示平面上的坐标分别是 (x_{n_1}, y_{n_1}) 和 (x_{n_2}, y_{n_2}) 。

$$x_{n_1} = \text{round}(\text{mod}(\sum_{i=1}^{n_1} Q_i, W)), y_{n_1} = (k-1) \cdot C + \lfloor \sum_{i=1}^{n_1} Q_i / W \rfloor \quad (7)$$

$$x_{n_2} = \text{round}(\text{mod}(\sum_{i=1}^{n_2} Q_i, W)), y_{n_2} = k \cdot C + \lfloor \sum_{i=1}^{n_2} Q_i / W \rfloor \quad (8)$$

结论 2 当显示平面宽度为正弦调制均值 W , 且 $n_1 = (K-1) \cdot C + J, n_2 = K \cdot C + J$ (整数 $J \in [1, C-1], K$ 为自然数) 时, PRI 为正弦调制的第 n_1 个和第 n_2 个脉冲在平面上的坐标分别为:

$$x_{n_2} = x_{n_1}, y_{n_2} = y_{n_1} + C \quad (9)$$

由结论 1 和结论 2 可知, PRI 为正弦调制的脉冲序列经累积变换后, 其累积变换曲线在宽度为调制均值的显示平面上呈现出周期性, 重复周期与正弦调制周期 C 相同。该累积变换曲线文中称为累积变换特征曲线。

推论 假设函数 $f(t)$ 是周期性对称, 即 $f(t) = f(t+T), f(t) = -f(t+T/2)$ 。若在周期 T 内对 $f(t)$ 进行 C 次均匀采样, 则 C 次采样值之和为

$$\sum_{i=0}^{C-1} f(\frac{i}{C} \cdot T + t_0) = f(t_0) + \dots + f(\frac{C-1}{C} \cdot T + t_0)$$

$$+ f(\frac{C}{C} \cdot T + t_0) + \dots + f(\frac{C-1}{C} \cdot T + t_0) \quad (10)$$

当 C 为大于 0 的偶数时, 根据 $f(t)$ 的周期性对称的性质, 易证(10)式为 0。

当 C 为大于 0 的奇数时, (10)式理论上不严格为 0。 $f(t)$ 可用三角函数展开为

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t), \omega = 2\pi/T \quad (11)$$

如果所有大于 N 的谐波系数 $F_{N+i} \leq \varepsilon$ (ε 是接近 0 的小数, $i = 0, 1, \dots$), 式(11)可近似为

$$f(t) = \sum_{n=1}^N F_n \sin(n\omega t + \varphi_0), \omega = 2\pi/T \quad (12)$$

由此可知当脉冲序列的 PRI 受到 $f(t)$ 的调制, 且脉冲个数大于 $2 \cdot C$ 时, 则脉冲序列的累积变换曲线具有式(5)和式(8)的性质。通常, 实际待分选的脉冲序列的长度满足这一条件。

因此, 可以设想将宽度为 W 的虚构平面用足够细的线划分成分辨率足够高的网格, 使得每一个脉冲唯一地对应了网格的一格。根据该网格生成只有“0”和“1”元素的平面位图矩阵 PlaneMat, “1”元素对应了脉冲信号, “0”元素表示该网格内不存在脉冲, 每个元素的下标由式(3)确定。PlaneMat 的行和列的范围分别由虚构平面的宽度和高度决定。因此, 通过改变平面位图矩阵的行的数量, 采用简单的“与”操作方式, 自动搜索平面位图矩阵中由“1”元素构成的周期性模式, 并根据该周期性模式自动分选 PRI 受周期性对称调制的雷达脉冲。不需要显示累积变换曲线, 避免人工寻找、确认累积变换特征曲线和人工分选脉冲的烦琐过程。

实际接收的脉冲流交迭了多种复杂体制的雷达脉冲。对于 PRI 非周期性调制的雷达脉冲, 可以看成随机脉冲。密集随机脉冲将会影响周期性对称调制模式的搜索, 原因如下: 多种复杂体制的雷达脉冲随机叠加的脉冲流, 在时间 τ 内出现 n 个脉冲的概率^[3]服从泊松分布

$$P_n(\tau) = \frac{(\rho\tau)^n}{n!} e^{-\rho\tau} \quad (13)$$

其中 ρ 是脉冲流密度。当 $\rho \cdot \tau$ 较大时, 式(13)的泊松分布近似为 $\mu = \rho \cdot \tau, \sigma^2 = \rho \cdot \tau$ 的正态分布。因此从概率上说, 可以认为在时间 W 内出现的脉冲数为 $\rho \cdot W$ 。若平面位图矩阵映射脉冲的单位时间与 W 单位相同, 则位图矩阵的“1”元素密度, 即脉冲密度是 ρ 。若 ρ 过大, 位图矩阵中的周期性模式将会淹没在随机脉冲之中, 则需要提高位图矩阵映射雷达脉冲的时间分辨率或稀释随机脉冲。

3 周期性对称调制模式搜索算法

3.1 算法描述

利用周期性对称调制模式自动分选雷达脉冲包括三个步骤: ①建立映射雷达脉冲序列的平面位图矩阵; ②在位图矩阵中搜索周期性模式; ③根据周期性模式自动分选雷达脉冲。搜索算法简要描述如下(采用 Matlab 语言的格式):

算法: FASAP SMP (Fast and Automatic Search Algorithm of Periodic and Symmetric Modulation Pattern)

输入: 累积变换序列 $L(n)$; 调制均值搜索范围 (MeanSt, MeanEd) 和搜索步 Step; 周期性模式判定门限 ModExistTh

输出: $L(n)$ 中的周期性对称调制脉冲序列 PSMoSeries

方法:

1) for (PlaneW = MeanSt; PlaneW <= MeanEd; PlaneW = PlaneW + Step) {

2) 由 plane_mat_gen(L(n), PlaneW) 生成一个二维的

平面矩阵 PlaneMat;

```

3) for (ModPeriod= 2; ModPeriod< n/2; ModPeriod++) {
4)   从 PlaneMat 中截取与其长度相同而宽度为 Mod
   Period 的探测矩阵 DetModMat;
5)   紧邻 DetModMat 之后, 截取与其相同大小的匹
   配矩阵 SeaPlaneMat;
6)   生成调制模式矩阵 ModMat= and ( DetModMat,
   SeaPlaneMat) (注: ModMat 所代表的调制模式可
   能叠加了由随机脉冲造成的对称模式 Rand
   ModMat)
7)   if sum(ModMat)/ sum( DetModMat) >= ModExisTh {
8)     由 mod_ gen (ModMat, PlaneMat) 提取周期性对
   称调制模式序列 PSMoSeries;
9)     保存 PSMoSeries, 并从 L( n) 中删除 PSMoT
   Series 序列;
10)   }
11) }
12) }

```

```

procedure plane_ mat_ gen (L(n), PlaneW)
1) PlaneMat = zeros (PlaneW, ⌈ L(n)/PlaneW ⌉); //生成全
   “0” 的二维矩阵 PlaneMat
2) MatRow (:, 1) = ⌊ mod (L (:, 1), PlaneW) ⌋, MatCol (:, 1)
   = ⌊ L (:, 1)/PlaneW ⌋ ;
3) set ( PlaneMat (( MatCol - 1) * PlaneW + MatRow )) =
   1; // 将脉冲序列映射成位图矩阵的“1”元素
4) return PlaneMat;
procedure mod_ gen (ModMat, PlaneMat)
1) 根据模式矩阵 ModMat 和调制周期 ModPeriod, 从
   PlaneMat 中获取调制序列 PSMoSeries;
2) 利用调制模式的周期性消除叠加在 PSMoSeries 上
   的 RandModMat;
3) return PSMoSeries;

```

待分选的脉冲序列中, PRI 受周期性对称调制的周期一般不相同, FASAPSMP 算法依据不同的周期分选出所有 PRI 受周期性对称调制的雷达脉冲. ModExisTh 是预先设定的经验值, 与脉冲密度有关, 一般设为 0.1, 随着脉冲密度的增加, ModEx isTh 要设置的更小些.

3.2 算法性能分析

FASAPP 算法的计算单位: 脉冲序列累积的最大值 $L(n)_{\max}$ 与搜索范围起始值 MeanSt 之比, 即 $L(n)_{\max}/\text{MeanSt}$, 记为 N . 算法的计算量主要是模式搜索与脉冲分选. 周期性对称调制模式搜索的计算复杂度为 $O(N^2/2 - N)$; 脉冲分选的计算

复杂度为 $O(C \cdot N)$. 因此, 整个算法的计算复杂度:

$$O(N^2/2 - N) + O(C \cdot N) \sim O(N^2) \tag{14}$$

$$\text{空间复杂度: } 8 \cdot L(n)_{\max} \tag{15}$$

4 雷达脉冲分选试验

实际接收的雷达脉冲环境很复杂, 如 PRI 参差、PRI 抖动以及 PRI 伪随机变化的多种复杂体制的雷达脉冲常常交迭在一起. PRI 周期性对称调制是一种常见的 PRI 抖动的方式, 因此研究该类型雷达脉冲的自动分选方法是很有价值的. 为了检验算法在复杂背景的信号环境下的分选性能, 仿真试验产生多种复杂体制的雷达交迭脉冲, 尽可能接近实际的信号环境. 同一试验重复 200 次, 每 8 次试验数据为一组, 通过 25 组的试验结果研究脉冲流的密度对 FASAPSMP 算法分选脉冲的影响, 即对模式搜索时间、脉冲分选准确率和漏选率的影响. 雷达脉冲流的密度决定了平面位图矩阵的“1”元素密度, 文中将平面位图矩阵“1”元素的平均分布密度 (简称平面矩阵密度) 定义为 $D = (E_1/E) \cdot 100\%$, 其中 E_1 代表“1”元素的个数, E 为平面位图矩阵的元素总数. 脉冲分选的准确率和漏选率分别定义为:

(1) 准确率: $(S_R/S) \cdot 100\%$, 其中 S 是分选得到的同一雷达的脉冲数, S_R 为分选正确的脉冲数.

(2) 漏选率: $((S_M - S_R)/S_M) \cdot 100\%$, 其中 S_M 表示脉冲序列中属于同一雷达的脉冲数, S_R 同上.

模式搜索时间: 与搜索范围和计算机性能相关.

系统试验环境: Windows 2000, Intel 1.8G, 256M 内存, 编程工具为 Mat lab 6.5.

4.1 单个正弦波调制序列的分选试验

脉冲总数为 8000, 包括 500 个 PRI 受正弦波调制的脉冲, 调制周期内有 30 个调制脉冲, 调制均值是 $1000\mu\text{s}$, 脉冲丢失率为 2%; 两部 PRI 三参差雷达脉冲各 500 个, 一部雷达的 PRI 参差值为 $762\mu\text{s}$ 、 $786\mu\text{s}$ 、 $802\mu\text{s}$, 另一部为 $1106\mu\text{s}$ 、 $1132\mu\text{s}$ 、 $1166\mu\text{s}$; 以及 1000 个 PRI (单位: μs) 服从 $N(900, 45^2)$ 分布的雷达脉冲, 其余为随机脉冲. 均值搜索范围: 800~1200, 步长: 1, 检测门限: 0.05.

随着脉冲密度的增加, 正弦调制的脉冲在整个脉冲序列中所占比例减少, 模式搜索判定门限应自适应调整到 0.05. 映射到平面位图矩阵的少量随机脉冲会出现对称性, 这使得分组平均准确率和平均漏选率在小范围内随机波动, σ 是表示随机波动的标准差. 图 1、2 和 3 显示模式平均搜索时间大约为 7.25 秒; 脉冲分选的平均准确率为 95.9%; 平均漏选率为 4.8%. 注: 模式搜索的过程实质上就是脉冲分选, 因此脉冲分选时间就几乎等于模式搜索时间.

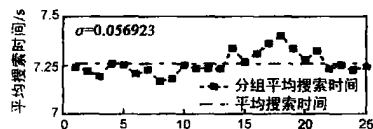


图 1 平均搜索时间 (单个正弦调制的脉冲序列)

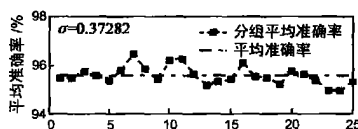


图 2 平均准确率 (单个正弦调制的脉冲序列)

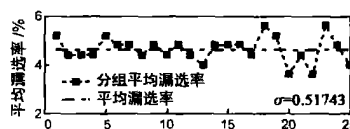


图 3 平均漏选率 (单个正弦调制的脉冲序列)

4.2 多个正弦波调制序列混迭的分选试验

脉冲总数 8000 个, 其中 PRI 受正弦波调制的脉冲序列一共 3 个, 每个序列有 500 个脉冲, 每个调制周期内分别有 29、30 和 31 个调制脉冲, 调制均值是 1000μs, 脉冲丢失率为 2%; 两部三参差雷达脉冲和 PRI 滑变的雷达脉冲参数同上, 其余

是随机脉冲. 均值搜索范围: 800~ 1200, 步长: 1 检测门限: 0.05.

图 4、5 和 6 显示多个调制模式的平均搜索时间大约为 7.28 秒; 脉冲分选的平均准确率为 95.9%; 平均漏选率为 5.1%.

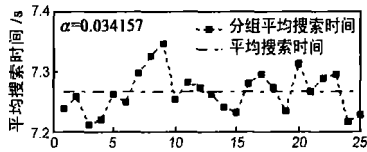


图 4 平均搜索时间 (多个正弦调制的脉冲序列)

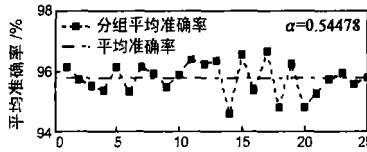


图 5 平均准确率 (多个正弦调制的脉冲序列)

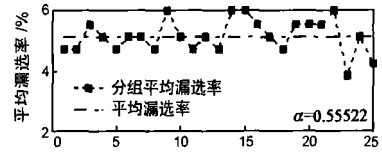


图 6 平均漏选率 (多个正弦调制的脉冲序列)

4.3 多个三角波调制序列混迭的分选试验

脉冲总数 8000 个, 其中 PRI 受三角波调制的脉冲序列一共 3 个, 每个序列有 500 个脉冲, 3 个三角波函数的周期在 5、6、7、8、9、10 之中随机选取, 每个调制周期内分别有 29、30 和 31 个调制脉冲, 调制均值都是 1000μs, 脉冲丢失率为 2%; 两部三参差雷达脉冲和 PRI 滑变的雷达脉冲参数同上, 其余是随机脉

冲. 均值搜索范围: 800~ 1200, 步长: 1 检测门限: 0.05.

图 7、8 和 9 显示平均模式搜索时间为 7.21 秒; 脉冲分选的平均准确率为 94.3%, 平均漏选率为 5.25%. 从上述试验来看, 图 2、3、5、6、8 和 9 中的标准差 sigma 相对较大, 可知受随机脉冲分布的影响, 脉冲分选的准确率和漏选率波动较大, 而模式搜索时间受随机脉冲的影响较小.

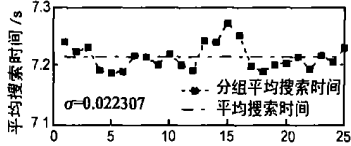


图 7 平均搜索时间 (多个三角波调制的脉冲序列)

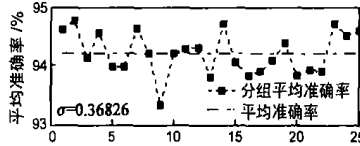


图 8 平均准确率 (多个三角波调制的脉冲序列)

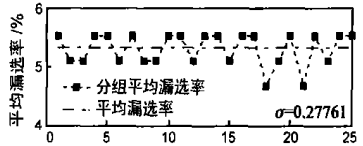


图 9 平均漏选率 (多个三角波调制的脉冲序列)

4.4 累积变换的伪特征曲线对脉冲分选的影响

文献[11]提到的分频和倍频现象是由平面变换技术的多义性造成的, 这是因为(1)式可表示为:

$$L(n) = \sum_{i=1}^n Q_i + (n \cdot \frac{k}{p}) \cdot \frac{p}{k} W' \quad (16)$$

当 p/k = 整数时, 出现分频现象; 当 p/k = (1/整数) 时出现倍频现象. 分频和倍频使得累积变换特征曲线的显示周期发生了改变, 称为伪特征曲线, 其在显示平面上发生了压缩或拉伸. 如果 (p * W)/k 在平面宽度搜索范围之内, FASAPSMP 算法同样能够搜索到由分频或倍频形成的伪特征曲线, 并不影响脉冲的自动分选. 受篇幅限制, 试验结果略去.

4.5 平面矩阵密度对算法性能的影响

为了测试平面矩阵密度对 FASAPSMP 算法的影响, 试验如下: 模拟产生 PRI 受周期性对称调制的雷达脉冲序列, PRI 调制均值为 1000μs, 每个周期内有 31 个调制脉冲, 共 400 个, 漏脉冲率为 2%; 两部 PRI 三参差雷达脉冲各 400 个, 参差值分别为 762μs、786μs、802μs 和 1106μs、1132μs、1166μs; 还有 400

个 PRI (单位: μs) 服从 N(900, 452) 分布的雷达脉冲; 其余是随机脉冲. 设定平面位图矩阵的单位行间隔对应的时间分辨率为 1μs, 在相同的时间间隔内使脉冲总数从 2000 增加到 12000, 且每次四部雷达参数和脉冲数目保持不变, 只是增加随机脉冲的个数; 对应的平面矩阵密度从 0.5% 增加到 3%. 重复脉冲密度变化试验 50 次, 得出 FASAPSMP 算法分选 PRI 受周期性对称调制的雷达脉冲的性能如图 10 和图 11.

图 10 显示了随着平面矩阵密度的增加, 搜索到的周期性模式其周期内所包括的随机脉冲数不断增多, 这使得脉冲分选准确率下降. 当平面矩阵密度达到 3% 时, 脉冲分选准确率下降到 83%, 而图 11 显示脉冲分选平均漏选率一直在 4%~5% 范围内波动. 这表明: 脉冲密度的增加虽然降低了脉冲分选准确率, 但是叠加在模式上随机脉冲并不影响对调制脉冲的判定. 这是因为随机脉冲在多个调制周期内出现周期性的概率很小. 图 11 同时显示当平面矩阵密度从 0.5% 增加到 3%, 模式搜索时间平均只增加了 0.3 秒.

平面位图矩阵的 r' 元素的密度与脉冲密度有关, 也与平面位图矩阵的单位行间隔对应 PRI 值的大小, 即时间分辨率有关. 若平面位图矩阵的单位行间隔对应的时间分辨率提高 K 倍, 则映射同一脉冲序列的矩阵的大小增加 K 倍, L(n)max 也将增加 K 倍. 由式(14)和式(15)可知, 在搜索宽度不变的条件下, 计算复杂度为 O((KN)^2), 空间复杂度为 8 * K * L(n)max. 因此, 不能无限提高位图矩阵的时间分辨率. 但是从图 10、11 可知, FASAPSMP 算法需要根据脉冲密度自适应调整时间分辨率, 保证平面矩阵密度小于 2.5%, 确保脉冲分选准确率在

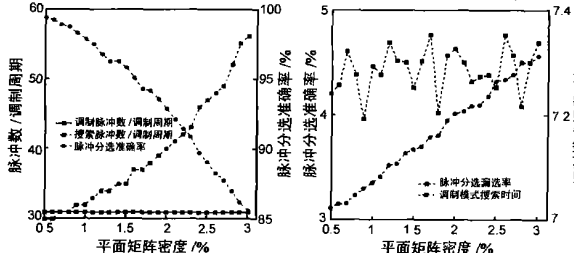


图 10

图 11

90% 以上. 所以实际应用中, 一般先通过预处理将脉冲序列稀释, 再利用 FASAPSMP 算法提取 PRI 受周期性对称调制的雷达脉冲.

4.6 FASAPSMP 算法的分选性能比较

试验表明在平面矩阵密度为 0.5% 的信号环境下, 基于 PRI 直方图的方法^[2, 3]因信号交迭严重, 已无法确定 PRI 的检测门限. 虽然使用平面变换技术可以在平面上分辨出调制脉冲序列的累积变换特征曲线, 但整个人工分选脉冲的过程需要近 16 分钟. 当平面矩阵密度为 1.5% 时, 人眼已无法辨识特征曲线, 而 FASAPSMP 算法仅需几秒钟就能分选 PRI 正弦调制的雷达脉冲. FASAPSMP 是搜索算法, 不需要 PRI 调制模式的先验信息, 且对漏脉冲不敏感.

5 结束语

PRI 周期性对称调制是 PRI 抖动的一种, 也是常见的雷达工作体制之一. 到目前为止, 没有公开的文献提出了能够分选所有复杂体制雷达脉冲的通用方法, 本文针对 PRI 受周期性对称调制的雷达脉冲而提出的自动分选算法极大地提高了已有方法的效率和准确率, 具有重要的工程价值.

参考文献:

- [1] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999. 89- 95.
- [2] Mardia H K, et al. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences [J]. IEEE proceedings Pt F, 1989, 136(4): 149- 154.
- [3] Milojevic D J, et al. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses[J]. IEEE proceedings Pt F, 1992, 139(1): 98- 104.
- [4] Ray P S. A novel pulse TOA analysis technique for radar identification [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3): 716- 721.
- [5] Tanya Conroy, et al. The limits of extended kalman filtering for pulse train deinterleaving[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(12): 3092- 3103.

- [6] Hassan H E. Deinterleaving of radar pulse in a dense emitter environment[A]. The International Conference on Radar[C]. Hilton Adelaide South Australia: IEEE, 2003. 389- 393.
- [7] Hassan H E. Joint deinterleaving/ recognition of radar pulses[A]. The International Conference on Radar[C]. Hilton Adelaide South Australia: IEEE, 2003. 177- 181.
- [8] Ken' ichi Nishiguchi, et al. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 407- 421.
- [9] 万建伟, 等. 雷达信号综合分选方法研究[J]. 电子学报, 1996, 24(9): 91- 94.
Wan Jianwei, et al. The research of synthetical sorting method for radar signal[J]. Acta Electronica Sinica, 1996, 24(9): 91- 94 (in Chinese).
- [10] 赵仁健, 等. 密集信号分选的平面变换技术[J]. 电子学报, 1998, 26(1): 77- 82.
Zhao Renjian, et al. Plane transformation for signal deinterleaving in dense signal environment[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(1): 77- 82 (in Chinese).
- [11] 赵仁健, 等. 信号平面变换中伪特征曲线的产生原理及解决途径[J]. 电子学报, 1997, 25(4): 28- 32.
Zhao Renjian, et al. Principle and settlement of the fake characteristic curve in signal plane transformation[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(4): 28- 32 (in Chinese).

作者简介:

樊甫华 男, 1975 年生于安徽繁昌, 解放军电子工程学院信号与信息处理专业 2002 级博士研究生, 主要研究方向是智能信息处理. E-mail: davidfaneei@163.com.

张万军 男, 1978 年生于吉林辉南, 解放军电子工程学院信号与信息处理专业 2001 级硕士研究生, 主要研究方向是智能信息处理.

谭 营 男, 1964 年生于四川营山, 中国科学技术大学教授、博士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE Senior Member, 在国内外核心期刊上发表论文共计 100 余篇, 出版学术专著和教材 2 部, 主要研究领域是计算智能、信号与信息处理、人工智能、模式识别、网络安全.