

## 一种密集信号环境下雷达脉冲分选方法

魏娟<sup>1</sup>, 杨万麟<sup>1</sup>, 植强<sup>2</sup>, 王松煜<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054; 2. 中国电子科技集团第二十九研究所 成都 610036)

**【摘要】**针对电子战所面临的高密度, 占空比大, 脉冲重叠丢失率高的信号环境, 构建了一个实时的脉冲信号预分选系统, 改进了基于概率统计的分选算法, 并提出一个剔除TOA倍数及加和关系的算法, 通过试验证明了该系统和算法的可行性。通过硬件电路进行了具体实现, 该系统能实时的对雷达脉冲序列进行分选, 并在密集的信号环境下具有良好的分选正确率。

**关键词** 信号分选; 到达时间; 关联比较器; 去交错

中图分类号 TB114.3 文献标识码 A

## A Signal Sorting Algorithm for Radar Pulses in High Pulse-Density Environment

WEI Juan<sup>1</sup>, YANG Wan-lin<sup>1</sup>, ZHI Qiang<sup>2</sup>, WANG Song-yu<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054;

2. China Electronics Technology Group Corporation No.29 Research Institute Chengdu 610036)

**Abstract** A real-time signal sorting system and an improved sorting algorithm based on the probability statistics is introduced. It is for the special radar signal environment of high pulse-density and high pulse-losing probability in electronic warfare. The feasibility of this sorting system and algorithm is verified through lots of experiments. By designing the hardware circuits, the signal sorting system is realized. It performs well for duplex requirement of high-accuracy and real-time processing in high pulse-density environment.

**Key words** signal sorting; toa; associative comparator; deinterleaving

信号分选的任务是完成雷达脉冲的去交错和提取辐射源的详细特征参数, 可用于识别不同雷达的脉冲, 也可用于稀释信号密度, 减轻后续处理环节的速度压力。寻求处理速度快, 正确率高的分选方法是信号分选的宗旨。目前国内外提出的主要方法有: 基于脉冲到达时间(TOA)差值直方图和序列搜索相结合的方法<sup>[1]</sup>; 基于神经网络模型的人工智能系统<sup>[2]</sup>; 基于平面变换技术的信号分选等<sup>[3]</sup>。这些方法各有优缺点: 直方图方法直观, 计算速度快, 但在信号密集, 丢失概率较高的情况下虚警率较高; 神经网络识别性能较好, 但事先需要经过大量样本进行迭代训练, 在未知辐射源的情况下很难做到实时处理; 平面变换技术需要接受同一信号的脉冲数很多, 才能在平面显示中利用信号累计显示出特征曲线, 但搜索雷达信号分析时, 大量脉冲数的条件往往并不满足, 所以其在实际中的应用受到限制。因此, 基于准确性和实时性的双重要求, 本文将构建一个实时分选系统, 并针对所面临的信号环境, 对基于概率统计的预分选算法进行改进。

收稿日期: 2004-8-26

作者简介: 魏娟(1980-), 女, 硕士生, 主要从事数字信号处理方面的研究。

## 1 信号环境及面临的问题

电子战所面临的信号环境相对常规的雷达信号环境更加的密集和特殊。为反侦察的需要,脉冲占空比设置得更大,辐射源数量的增多及脉宽的增加造成了信号的密集和重叠,使脉冲重叠丢失概率明显上升。

在进入某一路接收机的脉冲信号流中,如果相邻脉冲前沿的间隔时间小于或等于前一脉冲的脉宽,也就是相邻脉冲的首尾衔接,则后一脉冲就会丢失。任一脉冲可能被丢失的概率就是在这脉冲的存在时刻其他脉冲可能存在的概率。因为在密集的雷达信号环境中,各个雷达辐射的脉冲串是相互独立的,在任一时刻,脉冲存在的概率是相同的。另外还考虑到同一部雷达辐射的脉冲串是不可能重合的,所以,任一脉冲丢失的概率就是除了这一脉冲所在的雷达脉冲串以外,其他雷达的脉冲可能出现的概率<sup>[4]</sup>。

设有 $n$ 部雷达辐射源,某一部雷达的脉冲存在的概率就是该雷达脉冲串的占空比 $\alpha$ ,则脉冲不存在的概率为 $1-\alpha$ ,而其他雷达脉冲不存在的概率 $P_1$ 为:

$$P_1 = \prod_{i=1}^{n-1} (1-\alpha_i) \quad (1)$$

则脉冲丢失概率 $P$ 为:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^{n-1} (1-\alpha_i) \quad (2)$$

又考虑到一部雷达的脉冲串的占空比 $\alpha \ll 1$ ,则 $(1-\alpha)$ 接近于1,而且同时辐射的雷达部数很多(10部以上)。因此可以用所有雷达脉冲不存在的概率 $\prod_{i=1}^n (1-\alpha_i)$ 来代替除某一部雷达而外的其他雷达脉冲不存在的概率 $\prod_{i=1}^{n-1} (1-\alpha_i)$ 。则脉冲丢失概率为:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1-\alpha_i) \quad (3)$$

用近似计算法化简,由于 $\exp(-\alpha) = 1 - \alpha + \frac{\alpha^2}{2!} - \frac{\alpha^3}{3!} + \dots$ ,且 $\alpha \ll 1$ ,略去高次项得 $1 - \alpha \approx \exp(-\alpha)$ ,所以

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1-\alpha_i) = 1 - \exp(-\sum_{i=1}^n \alpha_i) = 1 - \exp(-\alpha) \quad (4)$$

式中 $\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i$ 为所有雷达脉冲信号流的总占空比。式(4)显示脉冲丢失概率随总占空比的增大而显著增加。

当几个脉冲重叠合为一个,相应的脉冲载频,脉宽等信息都会发生改变或丢失。因此在脉冲丢失概率较大的情况下,传统分选算法的正确率显著下降。算法实验证明,在脉冲丢失概率大于20%的环境下,基于直方图算法的正确率降到了50%以下,并且出现了大量虚假信号。

## 2 算法描述

通常可用于信号分选的参数有TOA,脉冲宽度(PW),信号载频(RF),信号到达角(AOA)(或到达方位(DOA))等,因为AOA的提取需要整个接收机系统综合较多相关联数据得出,所以在重点考虑实时性的情况下,本文采用三个预分选参数:TOA,PW和RF。首先由RF和PW组成两参数相关联比较器,对输入的脉冲描述字(PDW)序列进行分区域存储,然后对每个区域的数据采用改进的基于概率统计思想的算法提取雷达特征参数。

算法流程如图1所示。算法分为两大部分,详细描述如下:

1) 分区域存储:由RF和PW组成的两参数相关联比较器先预存 $n$ 部雷达的RF和PW的上下限,输入的PDW序列经过相关联比较器后分别储存到与之特征参数匹配的区域,每个区域的脉冲序列按TOA排序,与 $n$ 个区域的特征参数均不匹配的脉冲将会被送到第 $n+1$ 个存储区域。

2) 把每个区域的脉冲按TOA作差分,统计每个TOA差值的出现概率,设定合适的阈值,根据概率分布来判断属于哪种雷达类型,并提取出相应的PRI(脉冲重复周期)和特征参数报表。把特征参数报表与已知的数据库相比较,如果匹配则把相应区域的脉冲从序列中删除,存入匹配雷达库,然后把经稀释后的脉冲序

列送到后续信号处理环节。

电子战所面临的是高脉冲重叠率的信号环境。当信号发生重叠时，载频，脉宽都会发生变化，与原脉冲出现偏差而导致不能通过上下限比较，则这个合成的脉冲必然会被储存到区域 $n+1$ 中，从而使相应的脉冲序列中丢失一个脉冲。因此在做TOA差值统计时，就会由丢失的脉冲前后相邻的脉冲相减，使此TOA差值变为 $2PRI$ 。而由于脉冲的高丢失率，TOA差值中会出现大量的 $PRI$ 的倍数，和，差的关系。

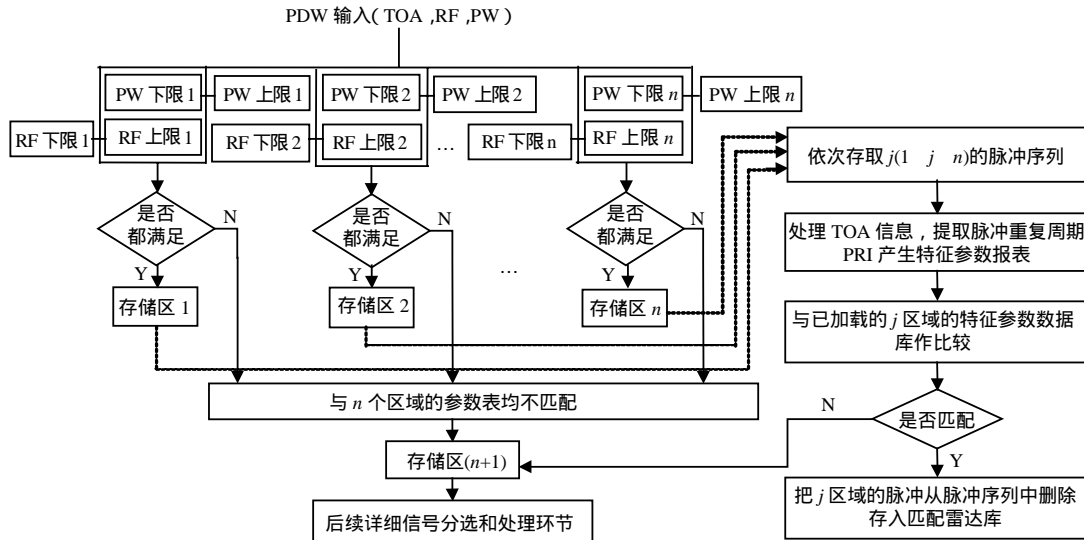


图1 算法流程图

图2a中所示的是一个PRI为1.1 ms的雷达脉冲序列的TOA差值统计概率直方图，图2b中所示的是一个PRI为[0.63, 0.71, 1.13] ms的三参差雷达TOA差值统计概率直方图。可以看到，由于脉冲丢失，两图均在真实PRI的倍数和加和值上有较大概率出现，严重影响了TOA差值的概率分布，使系统虚警率较高。

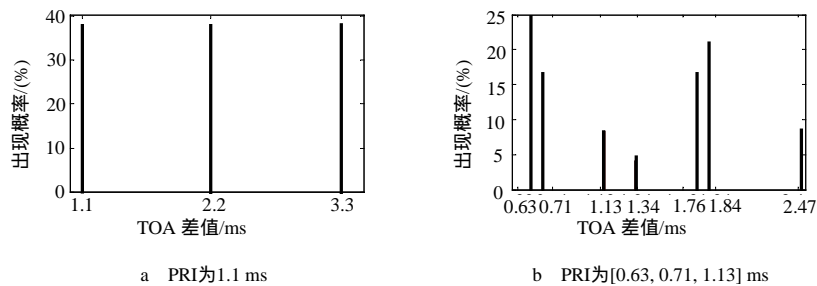


图2 未经两步校验算法处理的TOA差值统计概率直方图

针对这种情况，本文提出一个还原正确TOA差值的两步校验修正算法流程解决此问题。

当一个区域的数据完成TOA差值出现次数统计后，将存在的差值由小到大进行排序。设  $T_i$  是一组包含  $m$  个元素的TOA差值序列，并且  $T_1 < T_2 < \dots < T_m$ ， $N_1, N_2, \dots, N_m$  为  $T_1, T_2, \dots, T_m$  所分别对应的出现次数， $P_1, P_2, \dots, P_m$  为  $T_1, T_2, \dots, T_m$  所对应的出现概率。

1) 倍数校验：

如果所有差值都是最小差值的倍数，即对于  $2 \leq i \leq m$ ，均满足  $T_i = kT_1$  ( $k$  为任意正整数)，则把其余差值的出现概率  $P_i$  置为0，而  $T_1$  的出现概率  $P_1$  置为1，即  $P_i = 0, P_1 = 1$ ，并结束整个校验过程。如果存在  $T_i \neq kT_1$ ，( $k$  为任意正整数)，则说明有可能是参差雷达，则转入2)加和关系校验。

2) 对  $T_i$  由大到小进行加和关系校验：

如果某一差值是其余几个差值的加和，即若存在  $T_r = T_{i_1} + T_{i_2} + \dots + T_{i_n}$  ( $1 \leq r, i_1, i_2, \dots, i_n \leq m$ )，则把  $T_r$  的

出现次数  $N_r$  折合到  $N_{r_1}, N_{r_2}, \dots, N_{r_n}$  上去, 然后把  $N_r$  置为0, 即  $N_{r_i} = N_{r_1} + N_r, N_r = 0$ 。对  $T_i$  序列从  $T_m$  开始由大到小依次校验, 直到不再存在加和关系, 则根据新的  $N_i$  序列计算出概率分布  $P_i$  序列。

经过两步校验, 由于脉冲丢失而形成的TOA差值倍数和加和关系基本被消除。图3a和图3b中所示分别是图2a和图2b中的差值统计概率直方图经两步检验修正算法处理后的结果, 可以看到, 图3中的TOA差值呈现正确的概率分布, 下一步就可以设定阈值, 提取脉冲重复周期PRI。

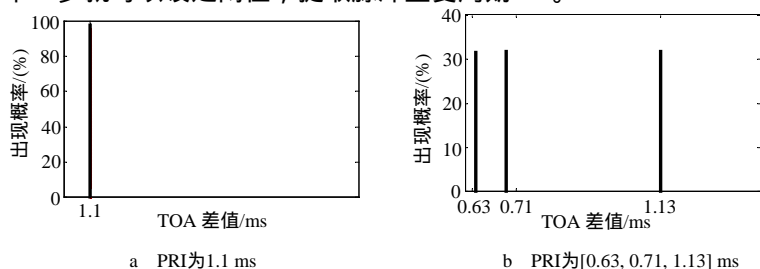


图3 经两步校验算法处理后的TOA差值统计概率直方图

### 3 仿真结果分析及软硬件实现

不失一般性, 在仿真中主要采用常规雷达信号和具有代表意义的几种特殊雷达信号: 重频参差雷达信号, 频率捷变雷达信号, 重频抖动雷达信号。由于处理的是经过变频后的中频信号, 载频范围为650 ~ 850 MHz。考虑到真实环境下存在一定的测量误差, 根据实践经验, 设定脉宽误差为200 ns(最大误差), 载频误差为3 MHz(均方误差), 10部雷达参数设置如表1所示。

表1 10部雷达参数设置

雷达序号	雷达类型	PW/ms	RF/MHz	PRI/ms
1	常规	0.006 0	800	1.10
2	常规	0.005 0	700	0.70
3	常规	0.053 0	650	0.50
4	常规	0.006 9	680	0.87
5	常规	0.033 0	780	0.33
6	重频抖动	0.002 5	630	0.67
7	捷变频	0.003 0	750 ~ 850	0.59
8	两参差	0.090 0	850	[1.17, 0.93]
9	两参差	0.001 2	830	[0.73, 0.57]
10	三参差	0.004 0	770	[0.63, 0.71, 1.13]

可以看到, 有3部雷达的占空比达到了10%(雷达3, 5, 8), 在这种环境下, 经过试验, 脉冲重叠丢失率达到了27%, 这已经是电子战中能面临到的较恶劣的信号环境。经过100次算法的matlab仿真试验, 得到算法提取脉冲序列特征参数正确率均值为96.77%, 反映出了算法能把错误的前后脉冲时间间隔还原到正确值上, 有效的补充出由于脉冲重叠而造成的丢失的脉冲信息, 并很大程度的稀释了信号流, 减轻了后续信号处理的速度压力。

在算法仿真后, 进行了算法的软硬件实现。把算法的第一部分分区域存储的功能放在FPGA芯片中完成, 把算法的第二部分在DSP芯片中实现。每过一个采样周期40 ms, 就把FPGA里的PDW数据分区域送到DSP中处理。在DSP对脉冲信号序列处理的同时, FPGA进行下一个周期的PDW采样。试验证明, FPGA芯片能实时完成分区域存储的工作, 而DSP芯片每处理FPGA芯片传来的一个区域的数据需要耗时100 ~ 200  $\mu$ s, 处理完10个区域的数据, 总共耗时不超过2 ms, 相对于采样周期是有较大余量的, 可以为其他的信号处理环节留出充裕的时间。

## 4 结 论

针对面临的信号环境所具有的高密度, 占空比大, 脉冲重叠丢失率高的特点, 本文构建了一个实时的信号预分选系统框架, 改进了基于概率统计的分选算法, 结果显示算法分选正确率达到了96%以上, 大大减轻了后续信号处理的压力。同时, 本文提出的方法, 计算简单, 物理意义明确, 这对于实时性要求高的场合是有利的。通过硬件实现验证, 本系统对信号的预分选处理, 有较大余量的满足了实时性的要求, 因此具有广泛的工程应用意义。

### 参 考 文 献

- [1] Mardia H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. IEE Proc F, Commun. Radar&Signal Process., 1989, 136(4): 149-154
- [2] 赵国庆. 雷达侦察信号的预处理[J]. 电子对抗, 1996, 1: 23-33
- [3] 赵建仁, 龙德浩, 熊平. 密集信号分选的平面变换技术[J]. 电子学报, 1998, 26(1): 77-82
- [4] 祝正威. 脉冲丢失概率的计算方法[J]. 电子对抗技术, 1990, 12: 21-26
- [5] Hanna C A. The Associative comparator: adds new capabilities to ESM signal processing [J]. Defense Electronics, 1984, (2): 51-54

编辑 徐安玉

(上接第322页)

### 参 考 文 献

- [1] Balageas D L, Krapez J C. Pulsed photothermal modeling of layered materials[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 59(2): 348-357
- [2] Reynolds W N. Inspection of laminates and adhesive bonds by pulsed-video thermography[J]. NDT international, 1990,21(4): 153-158
- [3] Hobbs C, Temple A. The inspection of aerospace structures using transient thermography[J]. British J. of NDT,1993, 35: 183-189
- [4] Lau S K, Almond D P. A quantitative analysis of pulsed video thermography[J]. NDT & E international, 1991, 24: 195-202
- [5] Takahide S, Shiro K. Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations[J]. Infrared Physics & Technology, 2002, 43: 211-218
- [6] Maldague X, Galmiche F, Ziadi A. Advances in pulsed phase video thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2002, 43: 175-181
- [7] 薛书文, 宗明成. 尼龙材料内部缺陷的红外热成像无损检测[J]. 红外技术, 1997, 19(5): 40-44
- [8] 薛书文, 宗明成, 丁铁英, 等. 利用红外热成像技术检测金属内部近表缺陷[J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(6): 424-428
- [9] 梅林, 陈自强, 王裕文, 等. 脉冲加热红外热成像无损检测的有限元模拟及分析[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(1): 66-70
- [10] 梁昆森. 数学物理方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998

编辑 孙晓丹