

文章编号: 1001 - 893X(2012)09 - 1492 - 05

# 一种对重频调制与抖动信号的 PRI 变换分选新方法\*

罗长胜, 吴 华, 程嗣怡

(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

**摘要:**针对脉冲重复间隔(PRI)变换法及其改进方法难以分选重频变化信号的问题,提出一种新的信号分选方法,即脉冲相似度检索法。该方法把脉冲相似度引入改进的 PRI 变换法,根据脉冲相似度对雷达脉冲信号进行搜索、提取。仿真结果表明,该方法不仅使分选更加准确,而且实现了对重频抖动和重频受调制变化信号的分选,其分选准确率达到 95% 以上。

**关键词:**电子侦察;信号分选;重频抖动;PRI 变换

**中图分类号:**TN971 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.015

## A New Method for Sorting PRI Modulated and Jittered Pulse Signal Based on PRI Transformation

LUO Chang-sheng, WU Hua, CHENG Si-yi

(College of Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** PRI (pulse repetition interval) transformation is difficult to sort the PRI changed signals. In order to solve this problem, a new method called pulse similarity retrieval method is put forward. This method introduces the pulse similarity to the improved PRI transformation, then searches and extracts the radar pulse signal according to the pulse similarity. Simulation results show that this method can not only sort the radar pulse signal more accurately, but also sort jittered PRI and modulated PRI signals, and the accuracy rate of sorting is more than 95%.

**Key words:** electronic reconnaissance; signal sorting; jittered PRI; PRI transformation

### 1 引言

随着雷达信号环境的日益复杂,如何从密集、交叠的雷达脉冲流中准确分离出各雷达的脉冲序列是当前急需解决的难题。利用到达时间(TOA)来估计脉冲重复间隔(PRI)进行的重频分选是最常用和基本的分选手段,其方法有 CDIF(Cumulative Difference Histogram)、SDIF(Sequential Difference Histogram)、PRI

变换法等<sup>[1-2]</sup>。其中 CDIF、SDIF 法只能分选重频基本固定信号<sup>[3-4]</sup>,而改进的 PRI 变换法可求出重频抖动或调制信号的 PRI 值<sup>[5-6]</sup>,但利用传统的序列搜索方法仍难以分选出此类信号。

本文通过分析 PRI 变换法及其局限性,将脉冲相似度引入到 PRI 变换法中,增强了方法的实用性,最后通过计算机仿真验证了这种方法的准确性和有效性,使其可以有效分选重频抖动等信号。

\* 收稿日期:2012-02-27;修回日期:2012-04-27

基金项目:电子信息控制国防重点实验室基金资助项目(9140C1005051103);陕西省自然科学基金资助项目(2012JQ8019);陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(201113Y01)

Foundation Item: The Defense Key Laboratory Foundation of Electronic Information Control(9140C1005051103); The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2012JQ8019); The Electronic Information System Comprehensive Integrated Key Laboratory Foundation of Shaanxi Province(201113Y01)

## 2 PRI 变换法及其局限

PRI 变换法是将脉冲序列的 TOA 差值变换到一个 PRI 谱中,由对应谱的峰值位置估计出脉冲序列的 PRI 值。PRI 变换法类似于计算自相关函数的复值积分式,其变换式为<sup>[7]</sup>

$$D(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=0}^{n-1} \delta(\tau - t_n + t_m) e^{2\pi j t_n / (t_n - t_m)} \quad (1)$$

式中,  $N$  为脉冲个数,  $t_n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ) 为脉冲到达时间。 $|D(\tau)|$  给出了一种 PRI 谱图,在代表真 PRI 值的地方将出现峰值。PRI 变换式离散表达形式为

$$D_k = \sum_{t_k - b/2 < t_n - t_m < t_k + b/2} e^{2\pi j t_n / (t_n - t_m)} \quad (2)$$

式中,  $b$  为 PRI 箱的宽度。

PRI 变换法几乎完全抑制了子谐波的影响,但其仅对固定重频的脉冲序列有效。之后,又提出了 PRI 变换法的改进方法<sup>[5]</sup>,采用交叠 PRI 箱和可变的起始时间点使之能适应 PRI 抖动的脉冲序列。采用重叠的 PRI 箱,既没有降低分辨率,又增加了 PRI 箱的宽度;而采用改变开始时间的方法则减少了相位因子的误差。改进后的 PRI 变换算法对抖动量在 30% 之内的抖动脉冲序列均有效<sup>[6]</sup>。但要实现分选还需从交叠的脉冲列中按照该 PRI 值提取信号,而对于重频变化信号的提取仍会遇到困难。

若有一重频抖动信号,其平均重复间隔为  $T_{PRI}$ ,抖动范围为  $\pm 10\%$ 。要正确分选出该信号,则在进行序列搜索时选择的容差  $\Delta T$  应满足:  $\Delta T \geq 0.2T_{PRI}$ 。在这样大的容差范围内,可能包含有多个其他雷达的脉冲(如图 1 所示),致使无法辨别哪个是该雷达的信号,从而导致无法继续分选或分选错误。因此,改进的 PRI 变换法虽能得出重频变化信号的 PRI,但实际却难以分选出该类信号。

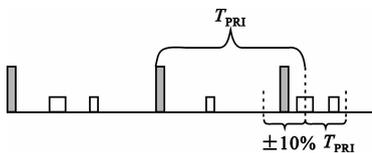


图 1 大容差时的序列搜索  
Fig. 1 Series searching with large tolerance

## 3 相似度检索法

为使 PRI 变换法能真正实现对重频变化信号的分选,本文将脉冲相似度引入到重频分选中,以便更

充分地利用了脉冲信号,而不受重频分选只利用了脉冲到达时间(TOA)的限制。

不同辐射源信号的脉宽(PW)、载频(RF)、到达方向(DOA)、脉幅(PA)等特性都不尽相同。对于同一雷达的脉冲相似性较强,而不同雷达的脉冲则相似性较弱,可用相似性的强弱来区分不同辐射源。此处先将上述各参数进行标准化和归一化处理,得到归一化后的参数值  $PW'$ 、 $RF'$  等,再利用这些参数的差值  $\Delta PW'$ 、 $\Delta RF'$  等计算欧式距离,用于描述相似度的大小。其计算式如下:

$$d = \sqrt{(\Delta PW', \Delta RF', \dots) \mathbf{W} (\Delta PW', \Delta RF', \dots)^T} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{W}$  为一对角的权值矩阵,其权值大小依据各脉冲参数的可信度以及侦察接收机对各参数的测量精确度设定。 $d$  越趋于 0,则两脉冲越相似。在进行检索时,根据  $d$  的大小判别脉冲的相似程度。

### 3.1 相似度检索法的流程

方法的实现流程如图 2 所示。

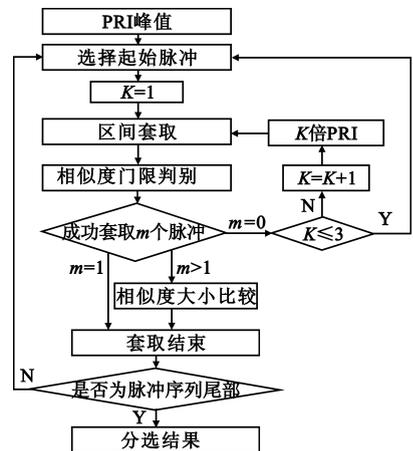


图 2 算法流程图  
Fig. 2 The flowchart of algorithm

其具体分选步骤如下。

- 步骤 1: 对 TOA 以外的脉冲参数进行归一化处理。
- 步骤 2: 对待分选的脉冲序列进行改进的 PRI 变换,求出其峰值 PRI。
- 步骤 3: 选择起始脉冲,并按照该 PRI 值和一定的容差套取脉冲。
- 步骤 4: 计算套取到的所有脉冲与起始脉冲之间的相似度,并用一门限判断所套取的信号与起始脉冲是否相似。
- 步骤 5: 若有多个脉冲与起始脉冲相似则取相似度最高的作为下一脉冲,若均不相似则以整数倍向后继续套取。

步骤 6: 以新套取的脉冲则为新的起始脉冲, 重复步骤 3~5, 继续往后套取, 直至完全提取出该信号。

步骤 7: 将已提取的信号从原脉冲序列中扣除, 并将剩余脉冲作为新的待分选脉冲序列。

步骤 8: 重复步骤 2~7, 直至待分选的信号过少或者无法继续分选为止。

### 3.2 算法的关键问题

#### (1) 容差的设置

在进行基于相似度的序列检索时, 容差  $\Delta T$  为一个与 PRI 值的变化率相关的量, 令可分选的最大重频抖动范围为  $\lambda$ , 则容差为

$$\Delta T = 2\lambda PRI \quad (4)$$

在搜索时以 PRI 为时间间隔、以  $[-0.5\Delta T, 0.5\Delta T]$  为区间往后套取信号。

#### (2) 起始脉冲选择

PRI 变换未得出起始脉冲位置, 有两种方法解决: 方法一, 计算 TOA 差值, 取差值等于该 PRI 值的首个脉冲; 方法二, 取第一个脉冲, 以该 PRI 值往后搜索, 若连续多次无法搜索到脉冲(设允许连续丢失的脉冲数为  $K$ ) 则另取下一脉冲作为起始重新搜索。由于针对 PRI 变化信号的 TOA 差值计算本身就不准确, 故此处选择第二种方法。

#### (3) 脉冲丢失的处理

遇到此处脉冲丢失, 若容差范围内无脉冲, 则以整数倍 PRI 往后搜索; 若有多脉冲, 此时任何一个都不是正确的信号, 直接取相似度相对较小的信号会带来分选错误。取一个相似度门限  $\delta$ , 只考虑  $d < \delta$  的脉冲, 从而滤除掉与前一信号相似度低的脉冲。

#### (4) PRI 变换时间长度的选取

变换时所选取的脉冲列时间长短将影响算法的计算量。对于已知脉冲序列, 无论运用何种方法, 影响计算量最直接因素是脉冲数量, 脉冲数量越多计算时间将越长。脉冲数与信号密集程度有关, 还取决于所分析的时间长度, 时间长则包含脉冲多。对于差直方图法其各级  $\Delta TOA$  数正比于脉冲数量; 而 PRI 变换法不仅本身计算量大, 并且随着脉冲数量增加, 其运算量将急剧增长。故实时性要求高的情况, 限制了脉冲序列的时间长度。

为了实现快速的分选, 可先截取一段合适的时间长度内的脉冲信号(而不是所有的脉冲), 对这些脉冲信号进行 PRI 估计, 得出该脉冲流中所含雷达的 PRI 值, 再根据该脉冲重复周期对整个时间内的信号进行搜索与提取。

## 4 分选实验结果分析

模拟产生 8 部不同雷达的脉冲信号, 其具体参数如表 1 所示。脉冲序列的时间长度为 20 ms。

表 1 雷达仿真数据

Table 1 Radar pulse data for simulation

雷达	PRI / $\mu\text{s}$	脉冲数	脉宽 / $\mu\text{s}$	到达角 / $(^\circ)$	载频 /MHz
1	95, 抖动 15%	211	0.6~0.8, 抖动	200	1 000
2	270, 正弦 5%	74	0.6, 固定	170~180, 缓增	3 200
3	310, 固定	65	1, 固定	280	3 000~ 3 200, 捷变
4	505, 固定	40	4, 固定	275~285, 缓减	9 200
5	190, 抖动 20%	105	0.4, 固定	150	4 200~ 4 500, 捷变
6	410, 固定	49	2, 固定	105	1 500
7	130, 抖动 30%	154	3, 固定	95~100, 缓增	5 200
8	620, 固定	32	1.6~2, 抖动	80	5 000~ 5 500, 捷变
误差	0.05		0.01	3	10

由于部分雷达信号的 PRI 变化, 使用传统序列搜索的方法在处理雷达 1、雷达 2、雷达 5、雷达 7 时分选效果有限, 特别是对重频抖动较大的信号将难以分选。而利用基于相似度的检索法, 则可分选上述重频抖动和受调制的信号, 下面通过仿真进行验证说明。

仿真一接收到的是 4 部雷达的交叠信号(表 1 中的雷达 1~4); 仿真二为 6 部雷达的交叠信号(表 1 中的雷达 1~6); 仿真三接收的为表 1 中全部 8 部雷达的信号, 分别对所接收信号进行分选。由表 1 可知, 仿真一至三中信号的 PRI 最大抖动量依次为 15%、20%、30%。进行相似度检索时取允许连续丢失的最大脉冲数  $K=3$ ; 相似度的门限  $\delta=0.3$ ; 求欧式距离时矩阵  $\mathbf{W}$  中各参数的权值相同且权值和为 1, 即  $\mathbf{W} = \text{diag}([1/3, 1/3, 1/3])$ 。

首先, 利用改进的 PRI 变换求出脉冲重复间隔, 其值为  $T_p$ 。为减少计算量, 可先截取一小段信号进行 PRI 变换, 再用所得的 PRI 值搜索整个时间长度内的信号。

其次, 利用相似度检索法分选出信号, 分别取容差  $\Delta T$  为  $0.1T_p$ 、 $0.2T_p$ 、 $0.3T_p$ 、 $0.4T_p$ 、 $0.6T_p$ 、 $0.8T_p$ 、

$1T_p$ 、 $1.4T_p$ 、 $1.6T_p$ 、 $1.8T_p$  等值进行计算。各仿真的分选准确率与容差的关系比较如图 3 所示,其中分选准确率等于正确分选个数与脉冲总数的比值。

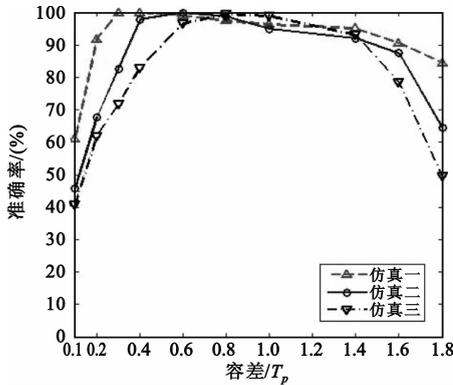


图 3 不同容差下的准确率

Fig.3 Accuracy with different tolerances

若所取容差小于抖动范围则会影响分选的准确率;容差过大,则在其范围内可能出现多个真实信号也会降低准确率,故准确率随容差的变化曲线类似于梯形。并且随着实际信号的 PRI 抖动范围的增大,在保证准确率的前提下容差可取值范围也将减小;若实际信号 PRI 的最大变化范围为  $\lambda$  时,则容差可在区间  $[2\lambda T_p, 2(1-\lambda)T_p]$  内取值。由图 3 可知,仿真一至三中容差  $\Delta T$  在较大区间内分选准确率均在 95% 以上,而改进的 PRI 变换算法对重频调制和抖动信号的分选准确率均在 92% 以下<sup>[7]</sup>,故在确保准确率的前提下容差可取的范围很广,分选效果也更加明显。考虑实际信号的重频变化范围和 PRI 变换法的适用范围,未知环境下建议取容差  $\Delta T = 0.6T_p$ 。

各仿真中进行检索的仿真运行时间与容差的关系如图 4 所示。

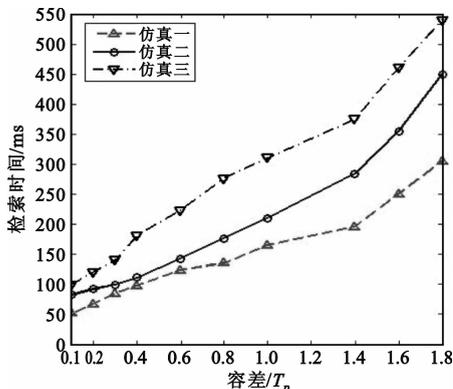


图 4 不同容差下的仿真运行时间

Fig.4 Simulation time with different tolerances

容差越大,则每次套取到的脉冲越多,需要计算的相似度也越多。由图 4 可知,随着容差的增大计算量与计算时间也会增加。

## 5 结束语

本文将对脉冲相似性的比较与重频分选方法相结合,使 TOA 参数可与其他参数同时处理,更充分地利用了脉冲信息。与同样使用脉冲相似性原理的聚类分选方法相比,其不需要反复迭代计算,且并不计算所有脉冲的相似度,而是每次只计算所套取的少数脉冲的相似度。由于检索时利用了 TOA 参数,不会出现聚类时较容易出现的增批和漏批现象。利用基于脉冲相似度的检索方法,增强了 PRI 变换法及其改进方法的实用性,使之具有更高的应用价值,并可以在复杂条件下分选重频抖动和重频调制等重频变化的信号,为重频调制和抖动信号的分选提供了新的思路。

## 参考文献:

- [1] 何明浩. 雷达对抗信息处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2010:63-70.  
HE Ming-hao. Radar countermeasures information processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 63-70. (in Chinese)
- [2] 王杰贵, 靳学明. 现代雷达信号分选技术综述[J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(2): 104-108.  
WANG Jie-gui, JIN Xue-ming. Survey on Deinterleaving Technique for Modern Radar Signal [J]. Radar Science and Technology, 2006, 4(2): 104-108. (in Chinese)
- [3] 赵长虹, 赵国庆. 一种新的重频分选检测门限选择算法[J]. 现代雷达, 2003, 25(8): 30-33.  
ZHAO Chang-hong, ZHAO Guo-qing. New Algorithm for Selecting the Detect on Threshold in Deinterleaving Pulse Trains Problem [J]. Modern Radar, 2003, 25(8): 30-33. (in Chinese)
- [4] 黄剑, 黄建冲, 徐新华. 脉冲雷达信号分选方法[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(5): 69-72.  
HUANG Jian, HUANG Jian-chong, XU Xin-hua. Pulse Radar Signal Sorting Method [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2008, 31(5): 69-72. (in Chinese)
- [5] Nishiguchi K, Kobayashi M. Improved Algorithm for Estimating Pulse Repetition Intervals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 409-421.
- [6] 韩俊, 何明浩, 冒燕. 一种雷达脉冲序列综合分选方法的实现[J]. 空军雷达学院学报, 2006, 20(2): 107-110.

HAN Jun, HE Ming-hao, MAO Yan. Realization of Radar Pulse Sequence Synthesis Sorting[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2006,20(2):107-110. (in Chinese)

[7] 田芬芳. 一种改进型 PRI 的变换雷达信号分选方法[J]. 电子科技, 2010,23(11):116-117.

TIAN Fen-fang. De-interleaving of Radar Signal Based on Improved PRI Transform Algorithm[J]. University of Electronic Science and Technology, 2010,23(11):41-44. (in Chinese)

## 作者简介:

罗长胜(1985—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为电子对抗理论与技术;

LUO Chang-sheng was born in Xinyang, Henan Province, in

1985. He is now a graduate student. His research concerns theory and technology of electronic warfare.

Email: 15349250671@163.com

吴华(1963—),女,陕西西安人,副教授、硕士生导师,主要研究方向为电子对抗理论与技术;

WU Hua was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1963. She is now an associate professor and also the instructor of graduate students.

Her research concerns theory and technology of electronic warfare.

程嗣怡(1980—),男,江苏南京人,讲师,主要研究方向为电子对抗理论与技术。

CHENG Si-yi was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1980. He is now a lecturer. His research concerns theory and technology of electronic warfare.

## 《电讯技术》征稿启事

《电讯技术》(月刊)创刊于1958年,由中国西南电子技术研究所主办,系国内外公开发行的、理论与应用相结合的综合性电子专业科技刊物,为中文核心期刊。目前,已被英国 IEE《科学文摘(SA)》INSPEC、美国《剑桥科学文摘(CSA)》、波兰《哥白尼索引(IC)》等国外知名数据和国内多个中文数据库收录。

本刊主要刊登涉及下列应用方向和技术领域的述评、论文、新概念新技术新产品介绍:

- 电子系统工程
- 通信
- 导航
- 识别
- 飞行器测控
- 卫星应用
- 雷达
- 信息战
- 共性技术(包括天线、射频电路、信号处理、信息处理、监视与控制、时间与频率、先进制造、电磁兼容等)。

本刊栏目有:系统总体、信号与信息处理技术、计算机、网络及其应用技术、信道技术、先进制造技术、基础技术与工程应用、仿真、测试与试验、述评与展望。

欢迎业内学者、专家及科技人员踊跃投稿。

### 来稿要求及注意事项:

(1)文稿务必主题明确,论述合理,逻辑严谨,数据可靠,叙述清楚,文字精炼。内容应保守国家机密,并提供所在单位的保密审查证明,引用他人作品应给出来源。

(2)文稿一般不应超过6000字,综述稿不超过8000字。稿件应附英文题名、作者名、单位名、摘要和关键词,基金项目应注明项目编号。中文题名一般不超过20个汉字,必要时可加副标题。

(3)摘要应包括目的、方法、结果和结论四要素,即用简洁的语言说明文章要解决的问题,主要工作过程及所采用的技术手段和方法,研究所获得的实验数据、结果及其意义。篇幅以200~300字为宜。

(4)关键词以3~8个为宜。为便于文献检索,应尽可能根据《中国图书馆分类法(第四版)》提供中图分类号。

(5)文中涉及的物理量和计量单位应符合国家有关标准。计量单位请用GB3100-3102-93《量和单位》规定的法定计量单位。注意区分各物理量符号的文种、大、小写、正斜体(矢量和矩阵用黑斜体)、上、下角标等。

(6)插图和表格只给出必要的,且应有图题和表题。插图最好采用计算机制作。照片以黑白为佳,也可采用扫描的电子文档(精度高于400 dpi, tif, jpg, psd等格式均可)。

(7)文稿中引用他人的成果,务请写明原作者姓名、题名、来源,一并在参考文献中给出,并在正文中相应位置进行标示,否则责任由来稿人自负。参考文献只择主要的,未公开发表的文献请勿列入参考文献。书写格式请参见GB/T 7714-2005文后参考文献著录规则。

(8)投稿邮箱: dxjs@china.com, 并尽量同时提供 Word 和 pdf 文档, 无需另寄打印稿。来稿请注明作者详细通信地址、联系电话和有效电子邮箱, 并注明拟投栏目。

(9)本刊编辑部将在3个月之内对来稿作出取舍,如逾期未收到处理意见或刊用通知,作者有权对稿件另行处理。稿件一经刊用,本刊将酌情从优支付稿酬并赠送当期样刊,本刊支付的稿酬中已包含作者著作权使用费。请勿一稿多投,否则后果自负。