

文章编号: 1672-2892(2012)01-0088-06

基于截距分析的改进雷达信号分选算法

何艾玲, 陶荣辉, 蔡英武, 李合生

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 常用的雷达分选算法易出现脉冲重复间隔谐波和同部雷达信号脉冲序列断裂的问题, 鉴于此提出了一种基于脉冲到达时间拟合直线截距分析的改进雷达信号分选算法。该算法通过对到达时间拟合直线截距的分析, 判断出上述 2 种情况, 整合相应脉冲序列, 从而得到正确的分选结果。到达时间截距分析算法能增强雷达信号分选算法的鲁棒性, 降低算法对搜索容限的依赖, 具有良好的工程应用价值。仿真表明, 改进的信号分选算法比序列差值直方图算法的分选概率高 20%。

关键词: 信号分选; 谐波抑制; 直线拟合; 脉冲重复间隔估计; 序列差分直方图
中图分类号: TN971.1 **文献标识码:** A

Improved algorithm for radar signal sorting based on intercept analysis

HE Ai-ling, TAO Rong-hui, CAI Ying-wu, LI He-sheng

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: There are some problems existing in common radar signal sorting methods, which are easy to generate Pulse Repetition Interval(PRI) harmonics and split the pulse stream belonging to the same radar into several pieces. In view of these problems, this paper presents an improved algorithm for radar signal sorting basing on an intercept of Time of Arrival(TOA) fitting straight line analysis algorithm. The algorithm can solve these two problems to a large extent. In the improved algorithm of radar signal sorting, the two situations mentioned above are judged by analyzing the intercepts of TOA fitting straight lines, and then corresponding pulse sequences are merged to obtain the correct sorting results. The intercept analysis algorithm enhances the robustness of the sorting algorithm to reduce the algorithm dependence on search tolerance, and it shows good engineering application value. The simulations have proved that, the sorting probability of improved algorithm is higher than that of Sequential Difference histogram(SDIF) by 20%.

Key words: signal sorting; harmonic suppression; straight line fitting; Pulse Repetition Interval estimation; Sequential Difference histogram

雷达信号分选是雷达侦察导引系统的重要组成部分, 信号分选的正确与否直接关系到系统的性能指标。通常, 用于信号分选的参数主要有 6 个: 到达时间(TOA)、到达角、载频、脉宽、脉冲幅度和脉内调制参数。其中, 最重要的是 TOA 参数, 它将导出雷达辐射源的关键参数——脉冲重复间隔(PRI)。在各种信号分选方法中, TOA 是各种方法均要用到的参数, 对 TOA 进行的 PRI 分选称为主分选, 也叫重频分选; 而根据其他参数进行的分选称为预分选^[1-3]。本文着重对重频分选算法进行分析。当前工程应用比较多的重频分选算法有动态关联算法、累积差值直方图(Cumulative Difference histogram, CDIF)^[4]算法、序列差值直方图(SDIF)^[5]算法和 PRI 变换算法^[6]。这些算法有各自的问题: 动态关联算法受容差影响大, 对脉冲丢失很敏感; CDIF 和 SDIF 利用 TOA 差值的统计特性进行 PRI 估计, 其面临的主要问题是脉冲丢失情况下会产生 PRI 谐波; SDIF 算法中虽然考虑了谐波检验算法, 但效果却不是理想, 这一点后文会作分析; 改进的 PRI 变换算法能很好地抑制 PRI 谐波的产生, 并且对抖动重频有较好的分选效果, 但是其计算量比较大, 难以应用于实时性要求较高的工程中^[7-9]。为增强分选算法的工程实用性和稳定性, 本文在分析 PRI 谐波和脉冲序列断裂产生原因的基础上, 提出 TOA 拟合直线截距分析算法, 较好解决了谐波和断裂问题, 增强了常用雷达信号分选算法的鲁棒性。该算法主要思想是通过 TOA 拟合直线截距的分析, 分辨出 PRI 谐波脉冲列和断裂脉冲列, 从而整合脉冲列, 得到正确的分选结果。

收稿日期: 2011-03-02; 修回日期: 2011-05-23

1 问题分析

重频分选是将交错的脉冲流分离成属于各自雷达的脉冲序列。在常用的重频分选算法中,动态关联、CDIF和SDIF都包含了PRI估计和序列检索,而PRI变换算法实际上只是一种PRI估计方法,还需要进行序列检索才能实现重频分选。

1.1 谐波问题

SDIF算法的原理及算法流程详见参考文献[5]和[8]。值得注意的是,SDIF算法不对不同级的差值直方图进行累积,仅检测某一级的差值直方图。文献中给出了SDIF的检测门限:

$$T_{\text{threshold}}(\tau) = x(E - C)e^{-\tau k E/T} \quad (1)$$

式中: τ 是时刻; x 是小于1的常数; E 是脉冲总数; C 是差值直方图的级数; k 为小于1的正常数; T 为观察时间。对 x 的设置可从2个方面考虑:一方面,它是脉冲丢失概率的反映;另一方面,它表示1次差值直方图能反映某个PRI值的概率大小。

SDIF算法中为了抑制子谐波,提出了子谐波检验算法,其流程如下:先找出直方图中最大值对应的PRI值,记为 PRI_1 ,如果它小于门限,则检验第1个超过门限的峰值对应的PRI值是否为 PRI_1 的倍数。若是,则此PRI值是 PRI_1 的子谐波,以 PRI_1 进行序列搜索;若不是,则以此PRI进行序列搜索。这里可以看出,谐波即指真实脉冲PRI值的倍数。

子谐波检验的目的是希望抑制SDIF算法中谐波的产生,但仿真发现子谐波检验难以达到预期效果。其主要原因是:SDIF只检测某一级的差值直方图,在该级直方图中能统计出 PRI_m (某一真实PRI值)对应直方图统计值最大,而且 PRI_m 谐波直方图统计值能超过门限的情况很少,也就是说进行子谐波检验的条件实际上很难满足,所以谐波抑制效果不好。经分析可知,子谐波出现的原因是:在差值直方图中,PRI处的直方图没有超过门限,随着差值级数的增大,在 $nPRI$ 处直方图超过了门限,于是算法以 $nPRI$ 进行序列检索,从而搜索出谐波脉冲列。这样,同属1部雷达的脉冲串会分选成 n 列脉冲重复周期为 $nPRI$ 的脉冲列。这就是脉冲列的谐波问题。

1.2 断裂问题

在PRI估计出来之后,就要进行序列检索,以便分选出PRI对应的脉冲序列。序列检索算法流程参见文献[8]。当检索到5个以上的脉冲时,认为成功搜索出1个脉冲列。

分析序列检索算法流程可以发现,由于测量误差、噪声及PRI本身的抖动的存在,直接求出的PRI一般是不够准确的。为了得到更准确的PRI,提高后续分选概率,可以对分选出的脉冲进行PRI迭代算术平均,计算公式见式(2):

$$\overline{PRI}_n = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{n-1} PRI(i) + PRI(n) \right] = \frac{1}{n} \left\{ (n-1) \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} PRI(i) \right] + PRI(n) \right\} = \frac{1}{n} \left[(n-1) \overline{PRI}_{n-1} + PRI(i) \right] \quad (2)$$

然而搜索容差的设定,对搜索结果影响更大:容差大了,会有多个脉冲落入容差窗口;容差小了,会漏掉脉冲,导致脉冲列不能完全被搜索出来。对于前者,可以选择落入容差窗的多个脉冲中最靠近中心值的脉冲;而对后者,没有被搜索出来的脉冲可能在下次SDIF算法中被检测到,再被搜索出来。这样就出现同一部雷达的脉冲列被分选成了PRI相近的多列脉冲列。这里将这种情况称为脉冲断裂。

从上面的分析可以看到,PRI谐波和脉冲断裂是重频分选算法中经常遇到的情况,如不加以解决,会导致PRI估计错误和分选增批,降低分选正确率。本文提出TOA拟合直线截距分析算法,较好解决了上述2种问题,提高了分选算法的鲁棒性。

2 TOA拟合直线截距分析算法

分选过程中的PRI谐波和脉冲断裂情况有个共同的现象,这就是:同属于1部雷达的脉冲串都被分选成了若干列PRI相近的脉冲序列。这种情况有点类似于分选出的参差脉冲列。于是,问题归结为对具有相近PRI脉冲序列的分析。

2.1 相近PRI脉冲序列分析

参差PRI脉冲列存在子周期的概念,见图1, PRI_{frame} 是该参差脉冲列的帧周期, sub_1, sub_2 和 sub_3 是子周期。

按上文的分析,谐波序列是同属于1部雷达的脉冲序列等间隔抽取得到的若干PRI相近的脉冲序列;断裂序列是同部雷达脉冲串由前至后被分为了若干PRI相近的脉冲序列。若将谐波和断裂脉冲列当作参差PRI脉冲列计算它的子周期,则谐波序列的子周期会“相等”(指子周期比较接近,并不是完全相等),且能“整除”帧周期(指在一定容差范围内整除帧周期);而断裂脉冲列的子周期会远大于帧周期。由此,就可以将这2种存在相近PRI的情况分开。

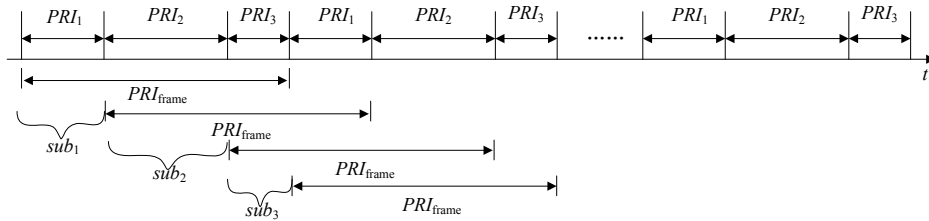


Fig.1 Sub-cycles schematic of the stagger pulse stream
图1 参差脉冲子周期示意图

图2给出了谐波、断裂脉冲列分析算法流程。 $S_m(m=1,2,3,\dots,M)$ 表示通过常规方法分选出的脉冲列共有 M 列; PRI_m 表示各脉冲列对应的PRI值; sub_i 表示PRI相近脉冲列的子周期。

该算法首先判断是否存在PRI相近的脉冲列。若没有,则直接退出程序;若有,则将相近的PRI及其相应脉冲列抽取出来,计算其子周期,并进行“是否是断裂脉冲列”的判别。如果存在断裂脉冲列,则将脉冲列合并;如果不是断裂脉冲,接下来则进行谐波和参差脉冲列的鉴别。如果子周期全都能“整除”PRI,则判定为谐波脉冲列,将其合并,并将子周期作为合并脉冲列的PRI;否则认为是参差脉冲列,不做任何处理。然后将判别后形成的PRI与还未进行判别的PRI进行整合,重新再判断有无相近PRI,直到程序结束。

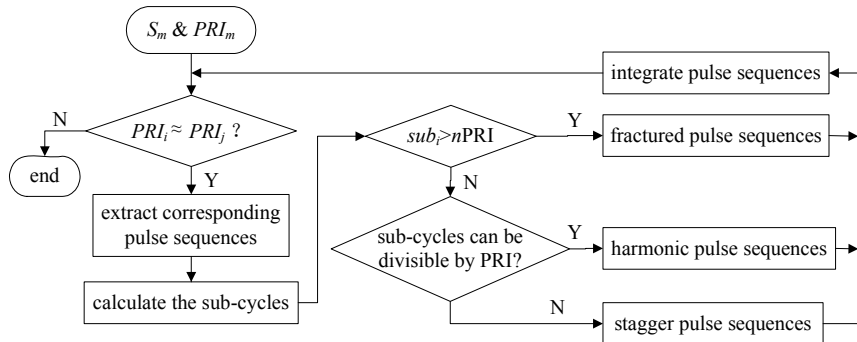


Fig.2 Flow chart of harmonic and fractured pulse sequences analysis algorithm
图2 谐波、断裂脉冲列分析算法流程框图

2.2 子周期估计算法

子周期估计算法采用直线拟合的思想。理想的脉冲序列具有恒定的PRI,其TOA在直角坐标系里的连线是1条直线,其横坐标 x 为脉冲序号,纵坐标 y 为脉冲的TOA。该直线方程见公式(3),其中 a 代表脉冲列PRI, b 代表首个脉冲的到达时间。实际得到的脉冲序列,由于脉冲信号的抖动以及TOA的测量误差,各脉冲的TOA不会落在1条直线上,见图3(a)。

$$y = ax + b \quad (3)$$

假设的脉冲列的直线方程为式(3),则最好的拟合直线方程为公式(4),其中 x 是脉冲到达序号, y' 是拟合后的TOA值。显然,只要求得直线方程的 a' 和 b' 就能实现最佳拟合。 a' 就是最接近脉冲列真实PRI的值, b' 就是脉冲到达的相对起始点。要找的最佳拟合直线就是 N 个数据点偏离该直线的偏差所构成的总偏差最小的1条直线。总偏差的表达式为式(5)。 x_i 是第 i 个脉冲的到达序号,

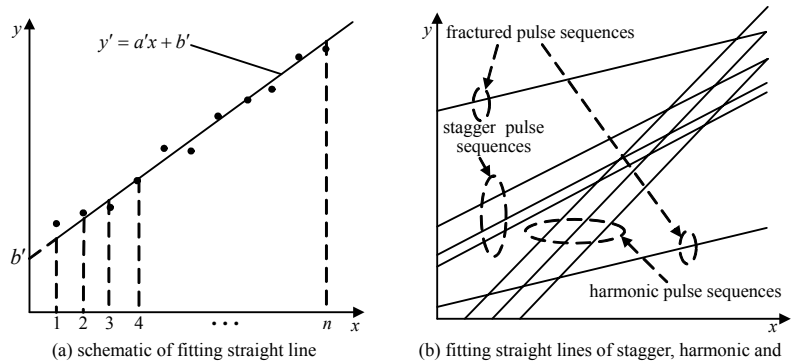


Fig.3 Schematic of calculating sub-cycle
图3 子周期计算示意图

y_i 是第 i 个脉冲的到达时间。要满足均方误差 ε 最小, 即有 $\partial \varepsilon / \partial a' = 0$ 和 $\partial \varepsilon / \partial b' = 0$, 解得 a' 和 b' 的表达式为式(6)。

$$y' = a'x + b' \tag{4}$$

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a'x_i - b')^2 \tag{5}$$

$$a' = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left[\sum_{i=1}^n x_i \right]^2}, b' = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left[\sum_{i=1}^n x_i \right]^2} \tag{6}$$

PRI 相近的脉冲列拟合出的直线接近于平行线。断裂、谐波、参差脉冲列的拟合直线见图 3(b), 直线截距表示脉冲到达的相对起始点, 截距之差即为子周期。

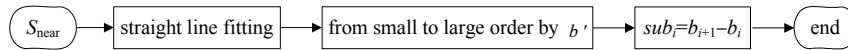


Fig.4 Flow chart of calculating sub-cycle
图 4 子周期算法流程

图 4 给出了子周期估计算法的流程框图。先将 PRI 相近的各脉冲列(S_{near})分别进行直线拟合, 然后将拟合直线的截距 b' 按从小到大排序, 最后按从大到小对截距做差分即得到 PRI 相近脉冲列的子周期。

3 实验仿真与分析

为验证上文对常用雷达信号分选算法存在问题所做分析的正确性以及 TOA 拟合直线截距分析算法的有效性, 本文进行了下面 3 组仿真。

3.1 谐波问题仿真分析

本次仿真模拟 3 部雷达脉冲信号, 按照到达时间进行混合。仿真参数设置为: 固定重频脉冲列 $PRI_1=370 \mu s$, 随机抖动 $\pm 1\%$; 抖动重频脉冲列 $PRI_2=510 \mu s$, 随机抖动 $\pm 4\%$; 参差重频脉冲列 $PRI_3=864 \mu s$, 子周期分别为 $293 \mu s$, $310 \mu s$ 和 $261 \mu s$, 随机抖动 $\pm 0.5\%$ 。由于信号分选处理的数据是参数估计后形成的脉冲描述字, 仿真时认为不同 SNR 对分选的影响已包含在参数估计得到的 TOA 中, 即体现在仿真参数的随机抖动中。

仿真采用 SDIF 算法进行 PRI 估计和序列搜索。SDIF 门限参数设置: $x=0.6, k=0.3$; 序列检索容差设置为 0.015。仿真得到 SDIF 分选结果, 对其再运用 TOA 拟合直线截距分析算法, 两者结果对比见表 1 和表 2。

表 1 给出了 PRI 估计值与仿真值的对比情况。从 SDIF 算法估计出的 PRI 值中可以看到, 固定 PRI(369.79) 和参差 PRI 的 2 支子列(864.10,864.15)被正确分析了出来, 但是参差 PRI 的另一支和抖动 PRI 分析出的是其谐波成分(1 728.23,1 728.39 和 1 523.70,1529.97,1 528.02)。而从改进信号分选算法得到的结果中可以看到, 3 列脉冲的 PRI 均得到正确估计, 没有了谐波成分, 参差 PRI 子周期估计值由表 2 给出。

综合 2 个表的数据, 可以看到 TOA 拟合直线截距分析算法较好解决了 SDIF 算法的谐波问题并且能较准确地估计参差子周期。

表 1 PRI 估计值与仿真值的对比
Table1 Comparison between estimated and simulated PRIs/ μs

	stable PRI	jitter PRI	stagger PRI
simulated PRI	370	510	864
estimated PRI by SDIF	369.79	1 523.70,1 529.97,1 528.02	864.10,864.15,1 728.23,1 728.39
estimated PRI by improved algorithm	369.79	509.16	864.15,864.10,864.09

表 2 参差 PRI 子周期估计值与仿真值的对比
Table2 Comparison between estimated and simulated values of sub-cycles of the stagger pulse sequences/ μs

NO.	1	2	3	frame period
simulated sub-cycle	293	310	261	864
estimated sub-cycle	292.12	309.68	262.29	864.11

3.2 断裂问题仿真分析

为了直观看出搜索容限对雷达信号分选的影响, 本次仿真仅模拟 1 部雷达脉冲信号。仿真参数设置为: $PRI=370 \mu s$, 随机抖动 $\pm 1.5\%$ 。SDIF 门限参数设置同上。搜索容限范围为[0.01,0.035], 步进为 0.005。在每个搜索容限下进行 100 次 Monte-Carlo 实验, 得到搜索容限与分选概率曲线见图 5。这里的容限是 1 个比例值, 如果脉冲重复周期为 PRI_1 , 搜索容限为 0.01, 表明搜索容许的误差范围为 $[PRI_1 \cdot (1-0.01), PRI_1 \cdot (1+0.01)]$ 。

从图中可以看到,当搜索容限小于0.02时,SDIF的分选情况非常糟糕。这是由于存在脉冲断裂情况,SDIF将同一部雷达信号的脉冲列分成了多列,即出现了分选增批。而运用TOA截距分析算法后,在小搜索容限情况下,分选概率仍然可以达到90%以上。

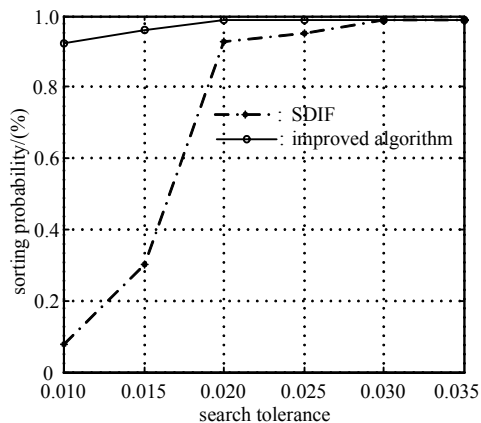


Fig.5 Sorting probability of one radar signal in different search tolerances

图5 单部雷达信号在不同搜索容限下的分选概率

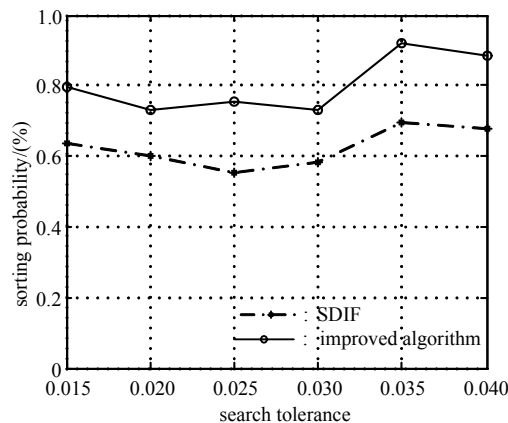


Fig.6 Sorting probability of three radars signal in different search tolerances

图6 多部雷达信号在不同搜索容限下的分选概率

3.3 多部雷达信号仿真分析

本次仿真条件与3.1中相同,搜索容限范围为[0.015,0.04],步进为0.005。在每个搜索容限下进行100次Monte-Carlo实验,得到搜索容限与分选概率曲线见图6。可以看到在不同的搜索容限下,采用改进的雷达信号分选算法的分选概率比SDIF算法的分选概率提高了近20%。在适当的搜索容限下(0.35),改进的雷达信号分选算法的分选概率可达91.45%。

4 结论

本文分析了工程常用雷达信号分选算法易出现的PRI谐波和脉冲断裂问题,在此基础上,提出了基于TOA拟合直线截距分析算法的改进雷达信号分选算法。该算法能较好解决上述2种问题。仿真实验表明,改进的雷达信号分选算法的分选概率比SDIF算法提高了近20%,在搜索容限为0.35时,分选正确率达91.45%。TOA拟合直线截距分析算法在一定程度上降低了分选算法对搜索容限的依赖,增强了分选算法的鲁棒性,具有较好的工程实用价值。

参考文献:

- [1] Wiley R G. Electronic Intelligence: The Interception and Analysis of Radar Signal[M]. Boston, USA: Artech House Inc, 2006.
- [2] 李合生, 韩宇, 蔡英武, 等. 雷达信号分选关键技术研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(12): 2035-2040. (LI Hesheng, HAN Yu, CAI Yingwu, et al. Overview of the crucial technology research for radar signal sorting[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(12): 2035-2040.)
- [3] HE Ailing, ZENG Deguo, WANG Jun, et al. Multi-Parameter Signal Sorting Algorithm Based on Dynamic Distance Clustering[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2009, 7(3): 249-253.
- [4] Mardia H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. IEE Proceedings, 1989, 136(4): 149-154.
- [5] Mилоjević D J, Popović B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses[J]. IEE Proceedings, 1992, 139(1): 98-104.
- [6] Nishiguchi K, Kobayashi M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 407-421.
- [7] 刘扬, 刘璘, 杨波. 雷达信号分选技术[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(5): 64-68. (LIU Yang, LIU Lin, YANG Bo. Radar Signal Sorting Techniques[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2008, 31(5): 64-68.)
- [8] 何伟. 雷达信号分选关键算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007. (HE Wei. Researches of the key algorithms in radar signal sorting[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007.)

(下转第102页)