

新体制雷达信号 PRI 样子图周期搜索提取方法

孟祥豪 罗景青 马贤同

(电子工程学院电子对抗与信息处理重点实验室, 合肥 230037)

摘 要: 针对侦察接收机截获的交错脉冲序列中雷达信号的提取问题, 在脉冲重复周期(PRI)样子图描述技术的基础上, 提出一种基于 PRI 样子图周期搜索的脉冲提取算法。算法改传统 PRI 搜索法中的相邻脉冲间隔搜索思想为 PRI 样子图周期搜索思想, 通过构造由脉冲到达时间和准 PRI 样子图周期构成的二维提取函数, 将搜索过程中符合某一假定 PRI 样子图周期的匹配脉冲数存储于二维提取函数中, 然后根据二维提取函数的最大值确定 PRI 样子图周期, 提取对应的脉冲, 实现复杂 PRI 类型的雷达信号提取。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 雷达信号提取; 脉冲重复间隔样子图周期; 二维提取函数; 脉冲到达时间; 匹配脉冲数

中图分类号: TP181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2015)04-0399-08

A New System Radar Signal Extraction Method by Searching PRI Pulse Sequence Subpattern Cycle

MENG Xiang-hao LUO Jing-qing MA Xian-tong

(Electronic Engineering Institute, Laboratory of Electronic Counterstroke and Information Processing, Hefei 230037, China)

Abstract: Aiming at the problem of radar signal extraction of interleaved pulse sequences intercepted by reconnaissance receiver, according to the description technique of pulse recurrence interval(PRI), a pulse extraction algorithm is proposed based on the searching of PRI pulse sequence subpattern(PSS) cycle. In this algorithm, the idea of searching adjacent pulses intervals in traditional PRI searching algorithm is replaced by that of searching the PRI-PSS cycle. A two-dimensional extraction function consisting of time of arrival and paracycle of PRI PSS is constructed to store the number of matching pulses which conform to a certain assumed PRI-PSS cycle during the searching process. Then the PRI-PSS cycle is determined according to the maximum value of the function, thus the equivalent pulses can be extracted, realizing the signal extraction of complex type of PRI radar signals. The validity of this method has been verified by simulation experiments.

Key words: radar signal extraction; pulse sequence subpattern cycle of pulse reputation interval; two-dimensional extraction function; pulse time of arrival; matching pulses number

1 引言

随着现代战争形式的发展, 雷达侦察系统在战争中的作用越发重要^[1]。获取敌方雷达的位置参数信息, 是雷达侦察系统的主要任务。雷达信号分选是雷达侦察系统的重要组成部分, 是雷达信号参数估计和型号识别的基础^[2-3]。因此, 脉冲信号分

选的效果好坏直接影响侦察系统的性能。随着雷达技术的快速发展, 雷达信号形式日趋多样化, 参差、组变调制类型雷达信号的出现对分选技术提出了更高的要求^[5-7]。然而, 目前常用的基于脉冲重复周期(Pulse Reputation Interval, PRI)的分选方法, 如 PRI 搜索法^[4, 10-11]、累计差直方图法^[12]、序列差直方图法^[13]、支持向量机^[14-18]应用于分选等, 由

于不具备抑制二次及高次谐波的能力,较容易产生虚假的分选信息。PRI 变换法^[19]及其一些改进算法^[20-21]虽然对脉冲重复周期固定、抖动和滑变类型的雷达信号有很好的检测效果,但是对 PRI 参差、组变等变化复杂的信号不适用,而且在存在脉冲丢失的信号环境中,分选效果不够理想。此外,脉内特征越来越广泛的应用于雷达信号的分选^[23-25],但是,不可避免的是,脉内特征提取复杂度较高,运算量较大,对分选实时性的要求难以达到,在进行实时性数据处理时,利用脉内特征进行分选难以实现。

基于以上问题,针对侦察接收机截获的交错雷达脉冲信号,本文提出一种基于 PRI 样本子图周期搜索的 PRI 规律变化的雷达信号提取方法。该方法将脉冲的到达时间(Time of Arrival, TOA)与 PRI 样本子图相结合,将经典的 PRI 搜索法应用于 PRI 样本子图周期的搜索,构造二维提取函数,通过计算二维提取函数的值实现 PRI 规律性变化的复杂雷达信号提取。该方法将 TOA 信息与雷达信号骨架周期相结合,改 PRI 搜索为 PRI 样本子图周期搜索,能够有效抑制原有分选算法产生的谐波干扰和增批、分批问题,在脉冲丢失的条件下,依然能够以较高的成功率实现对雷达信号的提取。

2 PRI 样本子图

首先对样本子图的定义做一简要说明。从概念上看,样本子图描述技术是脉冲样本图^[22]描述技术的扩展,从内容上看,样本子图是脉冲样本图的简化。样本子图的描述方式不仅秉承了脉冲样本图描述方式的优点,可以将特征参数的时间变化规律表达清楚,而且可以根据实际情况设定子图的维数,更加灵活。PRI 样本子图即为一维样本子图。

在通常情况下,雷达的 PRI 特征参数是周期性变化的,因此,若选取该特征参数的一个变化周期作为样本模板,就能准确地对脉冲到达时间这一维参数进行描述,这个样本模板就是 PRI 样本子图。

对于雷达情报侦察而言,侦察设备获得的雷达信号实际上是一个脉冲序列信号,该脉冲序列中的某一特征参数序列可以记录为:

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_M) \quad (1)$$

通常 \mathbf{X} 都是周期序列,从 \mathbf{X} 中选取一个周期的序列,也就是一个能准确表示整个序列的最小子序列 \mathbf{X}' ,即

$$\mathbf{X}' = (x_1, x_2, \dots, x_l) \quad (2)$$

把该子序列中取值相同的相邻脉冲进行合并,并记录取值相同脉冲的数量,则有

$$\mathbf{X}'' = (x_1, x_2, \dots, x_m; n_1, n_2, \dots, n_m) \quad (3)$$

显然有 $n_1 + n_2 + \dots + n_m = l$ 。如果把脉冲重复周期参数的变化类型记录在此子序列中,这样就得到了雷达某一工作模式下的 PRI 样本子图,表示如下:

$$\mathbf{X}^i = (x_1, x_2, \dots, x_m; n_1, n_2, \dots, n_m; c) \quad (4)$$

\mathbf{X}^i 表示的是第 i 种工作模式下的 PRI 样本子图, c 表示脉冲重复周期参数的变化类型。

通常来说, PRI 的变化类型包括重频固定 ($c=1$)、重频参差 ($c=2$)、重频组变 ($c=3$)、重频抖动 ($c=4$)、重频联合变化 ($c=5$) 等。图 1 所示为一 PRI 参差类型雷达脉冲信号 PRI 样本子图示意图,根据定义,其 PRI 样本子图表示为:

$$\mathbf{X}^i = ([T_1, T_1], [T_2, T_2], [T_3, T_3]; 1, 1, 1; 2) \quad (5)$$

式中, T_i ($i=1, 2, 3$) 表示该雷达信号的 PRI 子周期。

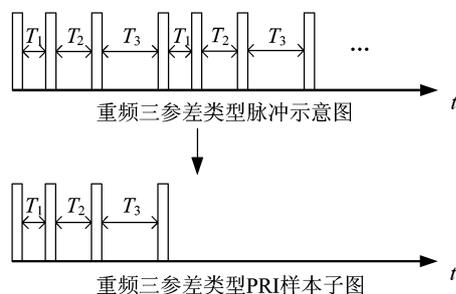


图1 重频三参差类型 PRI 样本子图示意图

Fig. 1 PRI PSS of three-staggered-PRF pulse signals

3 基于 PRI 样本子图周期搜索的雷达信号提取

3.1 PRI 搜索法^[8]

PRI 搜索法是最简单也最经典的减法分选,它把两个脉冲的 TOA 值相减,求得两个脉冲的时间间隔,然后以此间隔进行外推,以分选出 PRI 等于该时间间隔的脉冲列。若以此间隔进行外推得不到所期望的脉冲列,则另选一个时间间隔,重复以上过程,直到成功分选出一个脉冲列为止。当成功分选出一个脉冲列以后,从总的输入脉冲流中扣除这一脉冲

列,即实现该雷达信号的提取。接下来,再对剩余脉冲进行 PRI 搜索,这一过程一直进行到剩余脉冲小于人工经验设置的最少脉冲数门限。图 2 所示为 PRI 搜索法进行雷达信号分选提取的流程框图。

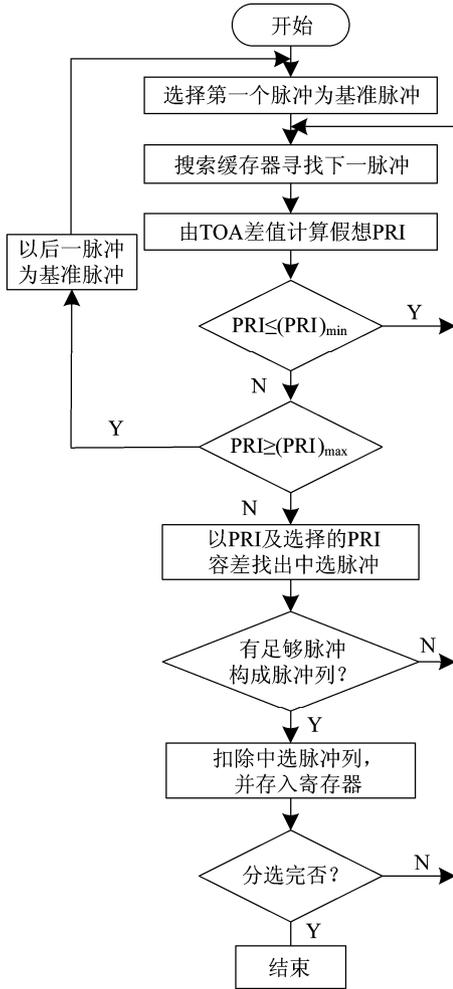


图 2 PRI 搜索法分选流程图

Fig. 2 The flow diagram of PRI searching algorithm

这种经典的 PRI 搜索算法具有原理简单、易于实现的优点,在先验信息丰富的情况下,能够较快的提取出感兴趣的雷达信号,但是,这种算法仅适用于 PRI 固定的雷达信号,对于当前参差、组变等变

化复杂的雷达信号无法实现分选,增批、漏分选的现象严重,分选准确率很低。

3.2 PRI 样本子图周期搜索算法

首先给出 PRI 样本子图(Pulse Pattern Sequence of Pulse Repetition Interval, PRI-PSS)的数学描述。设某雷达在一工作模式下的 PRI 样本子图如式(5)所示,则其 PRI 样本子图周期为:

$$\text{Frame}_i = T_1 + T_2 + T_3 \quad (6)$$

设全脉冲列的到达时间为 $t_n = 1, 2, \dots, N$, N 为脉冲个数。如果只考虑脉冲列的到达时间 TOA 这个参数,则脉冲列就可以模型化为单位冲激函数的和:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N \delta(t - t_n) \quad (7)$$

通过对全脉冲数据中的 PRI 参数规律进行分析可知,一部雷达在某一时间段内发射的脉冲序列 PRI 是有规律可循的,与全脉冲数据中的干扰脉冲不同之处在于,假设某一脉冲隶属于某一部参差雷达,若以此脉冲作为基准脉冲,并沿时间向前或向后平移 PRI 样本子图周期的倍数时,理论上可以匹配到同属于这部雷达的脉冲,且匹配个数多于以其他 PRI 平移时的匹配个数,而干扰脉冲是不具备这种性质的。图 3 所示为某一重频三参差雷达脉冲序列示意, Frame_i 为其 PRI 样本子图周期。由图 3 可以得出,以脉冲序列中任一脉冲作为基准脉冲,沿时间轴向前或向后平移 Frame_i 的倍数进行匹配相关时匹配到的脉冲个数最多。这是因为, PRI 样本子图周期描述的是该参差雷达在时间维上全面且整体的变化规律,相比于每一个单独的 PRI,这种描述更具体也更准确,因此可以提取到更多的该雷达对应的脉冲。利用 PRI 样本子图周期的这个特点,可以对选取的基准脉冲构造关于 TOA 和 PRI 样本子图周期的二维提取函数,通过计算该函数的最大值,提取函数最大值对应的脉冲列,进而实现对参差雷达对应脉冲的提取。

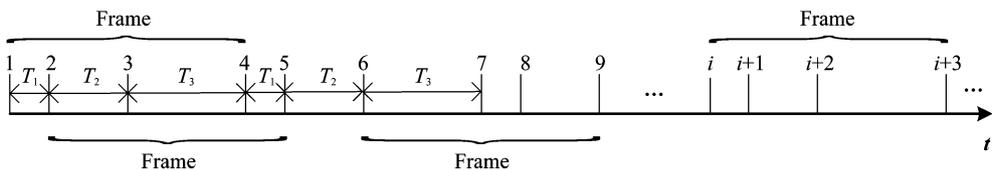


图 3 重频三参差信号脉冲序列

Fig. 3 Pulse sequence of three-staggered-PRF signals

定义二维提取函数为:

$$E(\text{TOA}_n, \text{Frame}_{mn}) = \sum_{-U}^V x[\text{TOA}_n + q\text{Frame}_{mn}] \quad (8)$$

式中, $\text{TOA}_n (n=1, 2, \dots, N)$ 表示脉冲列中第 n 个脉冲的到达时间; Frame_{mn} 为全脉冲数据中可能的某一参差雷达信号对应的 PRI 样本子图周期, $\text{Frame}_{mn} = \text{TOA}_m - \text{TOA}_n (m > n)$; U, V 分别表示以基准脉冲沿时间轴向前和向后匹配的次数, 计算方法如下:

$$U = \left\lfloor \frac{\text{TOA}_n - \text{TOA}_1}{\text{Frame}_{mn}} \right\rfloor$$

$$V = \left\lceil \frac{\text{TOA}_N - \text{TOA}_n}{\text{Frame}_{mn}} \right\rceil \quad (9)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算。

与 PRI 搜索法相同, 设定 PRI 样本子图周期范围为 $[T_{\min}, T_{\max}]$, 只有当计算的 PRI 在这个范围之内时才进行匹配。分别以 $\text{TOA}_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为基准脉冲进行 PRI 样本子图周期搜索, 当以脉冲序列中第 i 个脉冲作为基准脉冲进行匹配时, 若 $\text{TOA}_i + q\text{Frame}_{ji} (p=-U, -U+1, \dots, V; i < j < N)$ 时刻存在脉冲, 则匹配成功, 函数 $E(\text{TOA}_i, \text{Frame}_{ji})$ 的值加 1, 相对应脉冲分选标志字置 1。通过这种方法, 对于脉冲数据中脉冲个数最多的雷达对应的 PRI 样本子图周期, 其二维提取函数会得到最大值, 并可以将相对应脉冲进行临时提取。

3.3 PRI 样本子图周期对应脉冲提取

通过 PRI 样本子图周期的搜索, 提取使二维提取函数 $E(\text{TOA}_n, \text{Frame}_{mn})$ 取得最大值的 PRI 样本子图周期 Frame_{\max} , 与每个脉冲的二维提取函数中的 Frame_{mn} 进行比较, 提取 $\text{Frame}_{mn} = \text{Frame}_{\max}$ 的脉冲。将提取的脉冲个数 L 与设定的脉冲个数阈值 rN 进行比较, 若满足

$$L > rN \quad (10)$$

则将对脉冲存至寄存器, 实现该雷达信号的提取。式(10)中, r 为人工设置的脉冲提取个数百分比, 可根据不同情况进行更改, 通常设置在 3% ~ 4%。 N 表示每进行一次脉冲列提取以后, 更新的脉冲序列中脉冲总的个数。

图 4 所示为利用 PRI 样本子图周期搜索算法提取雷达信号的流程框图, 可以得到利用 PRI 样本子图周期搜索算法提取雷达信号的具体步骤如下:

(1) 读取全脉冲数据, 将脉冲分选标志字置 0。

(2) 读取首脉冲的 TOA 信息, 作为首脉冲 n 。

(3) 将首脉冲后相邻脉冲设为 m , 求两脉冲的时间间隔, 并设置为 Frame_{mn} , 若 Frame_{mn} 在设置的 PRI 样本子图取值范围内, 则继续步骤(4); 若 $\text{Frame}_{mn} < T_{\min}$, 则令 $m = m + 1$, 重新计算 Frame_{mn} , 若 $\text{Frame}_{mn} > T_{\max}$, 则更新首脉冲, 令 $n = m$, 重复步骤(3)。

(4) 以 Frame_{mn} 为搜索步长进行脉冲搜索, 计算 $t = \text{TOA}_n + q \cdot \text{Frame}_{mn}$ 时刻是否有匹配脉冲, 若有, 则 $E(\text{TOA}_n, \text{Frame}_{mn}) = E(\text{TOA}_n, \text{Frame}_{mn}) + 1$, 对应脉冲分选标志字置 1, 其中, q 的取值范围由式(9)定义; 若连续 4 次搜索均未发现匹配脉冲, 则返回步骤(3)。

(5) 搜索至最后一个脉冲, 确定 PRI 样本子图周期, 并将分选标志字为 1 脉冲提取出来, 对剩余脉冲重复以上步骤, 直至剩余脉冲数目小于设定门限。

(6) 将提取出的脉冲按 PRI 样本子图周期值合并, 将同一 PRI 样本子图周期值的脉冲列归为一类, 输出分选结果。

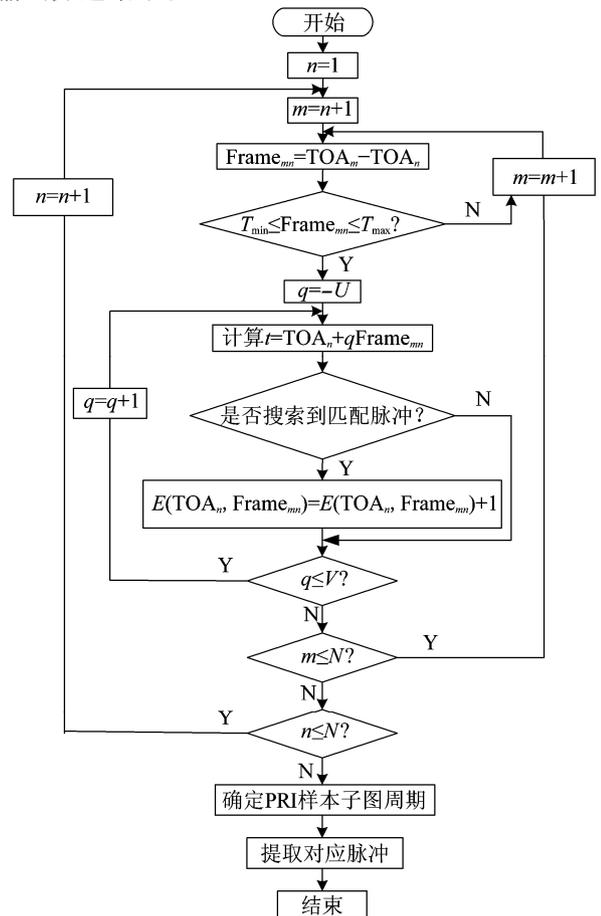


图 4 PRI 样本子图周期搜索算法流程框图

Fig. 4 The flow diagram of PRI-PSS cycle searching algorithm

4 计算机仿真分析

在以下仿真实验中,首先验证 PRI 样本子图周期搜索算法对交错脉冲列中雷达信号提取的有效性,并与经典的 PRI 搜索法、文献[19]中改进的 PRI 变换法的分选效果进行比较,然后分析脉冲丢失率对算法性能的影响。算法的源代码为 matlab,仿真计算的硬件条件为 Pentium (R) 2.6G(双核),2G 内存;软件环境为 Windows XP, Matlab R2010a。仿真脉冲参数设置以真实卫星侦收数据为依据。

4.1 算法仿真实现与效果比较

根据卫星侦收雷达脉冲信号的真实情况,仿真产生一组多个雷达信号交叠的全脉冲数据,每个雷达的 PRI 参数类型及具体设置如表 1 所示。

对仿真产生的脉冲序列,分别采用 PRI 样本子图周期搜索算法(以下简称为 PRI-PSS 算法)、PRI 搜索法和改进的 PRI 变换法^[19]进行处理。在进行处理时,改进的 PRI 变换法各参数值设定为: $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.15$, $\gamma = 3$, $\tau_{\min} = 50$, $\tau_{\max} = 2500$, $K = 6000$, $\zeta_0 = 0.03$;PRI 样本子图周期搜索算法中的 r 取为 4%;PRI 搜索法中可认为是一个辐射源的最小脉冲数目为分选总脉冲数的 5%;为更加逼近真实卫星

侦收信号,对每一个接收到的脉冲增加一个到达时间随机误差,均值为 0,标准差为 $1\mu\text{s}$ 。表 2 所示是本文算法在处理过程中得到的各个 PRI 样本子图周期对应的该信号样本子图具体表示形式。图 5 所示为三种算法的处理结果。

由图 5(a)的提取结果可以看出,在全脉冲数据中的雷达信号个数未知,并且全脉冲中含有干扰脉冲的情况下,PRI 样本子图周期搜索算法可以实现对四种雷达信号 PRI 样本子图周期的准确提取,并将对应的脉冲提取出来,实现信号的分选。由图 5(b)PRI 搜索算法的分选结果可以看出,该算法可以将脉冲重复周期固定的雷达信号提取出来,而对于参差或者组变的雷达脉冲,算法无法实现统一的提取,而出现了增批的情况,4 部雷达信号被分选成 21 部,且只有 Radar_1 雷达进行了正确提取,分选效果不够理想。图 5(c)所示为文献[19]中提出的改进 PRI 变换算法,算法能够对抖动类型信号进行提取,然而对于子重复周期较多的雷达信号,该算法无能为力。从图中可以看出,该算法成功实现了对 PRI 固定类型信号的提取,而对于其他的参差或者组变类型雷达脉冲,未能实现准确的提取,仅仅提取出某一个子重复周期。

表 1 雷达信号 PRI 参数设置表

Tab. 1 PRI parameter setting of radar signals

雷达编号	PRI 变化类型	PRI 值(μs)	PRI 样本子图周期(μs)	脉冲数目
Radar_1	固定	153	153	300
Radar_2	三参差	130/86/71	287	300
Radar_3	3 组变,组内脉冲数 4	133/121/350	2416	300
Radar_4	固定,参差联合变化	330,330,98/113/154	1025	300
干扰脉冲	-	-	-	200

表 2 依次提取出的样本子图

Tab. 2 PRI-PSS extracted in turn

提取出的雷达编号	自提取的样本子图(us)	样本子图维数
Radar_1	$PSS_1 = ([153, 153]; 1; 1)$	1
Radar_2	$PSS_2 = ([130, 130], [86, 86], [71, 71]; 1, 1, 1; 2)$	3
Radar_3	$PSS_3 = ([133, 133], [121, 121], [350, 350]; 4, 4, 4; 3)$	12
Radar_4	$PSS_4 = ([330, 330], [98, 98], [113, 113], [154, 154]; 2, 1, 1, 1; 5)$	5

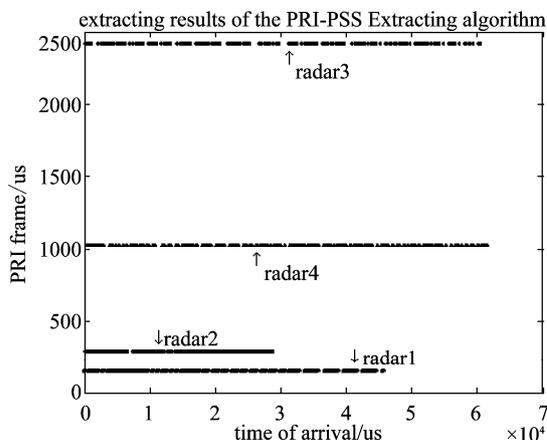


图5(a) PRI样本子图周期搜索算法提取结果

Fig.5(a) Extracting results of PRI-PSS cycle searching algorithm

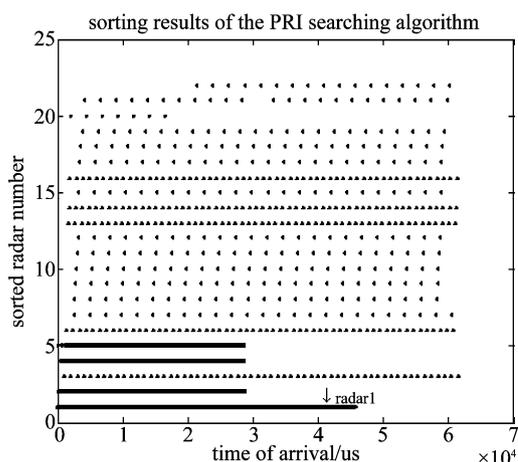


图5(b) PRI搜索算法分选结果

Fig.5(b) Sorting results of PRI searching algorithm

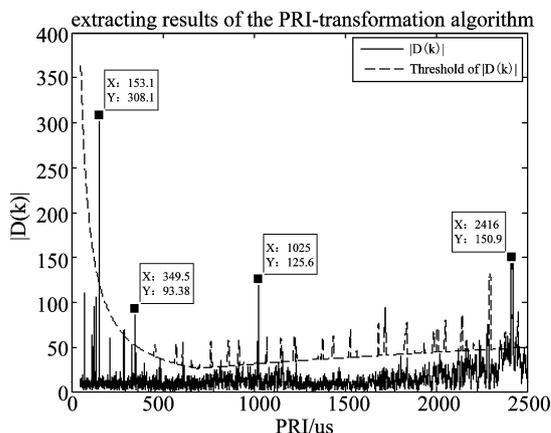


图5(c) 改进的PRI变换法分选结果

Fig.5(c) Sorting results of modified-PRI transform algorithm

4.2 脉冲丢失率对算法性能的影响

为了检验全脉冲数据中存在脉冲丢失的情况下算法的提取性能,本小节对 PRI 样本子图周期搜索算法在不同脉冲丢失率 (Ratio of Lost Pulses, RLP) 情况下的提取性能进行了仿真分析。首先定义提取准确率 P_{accurate} 计算公式为:

$$P_{\text{accurate}} = \frac{L}{U} \quad (11)$$

式中, L 表示提取的脉冲列中正确的脉冲个数, U 表示对应雷达在全脉冲数据中的实际脉冲个数。提取准确率表示提取的脉冲序列与实际该雷达脉冲序列的相似程度。

根据表1 参数设置产生含有四部不同 PRI 调制类型雷达的全脉冲数据。脉冲丢失率在 0 ~ 40% 之间变化,每个脉冲丢失率的情况进行 400 次 Monte-Carlo 实验,将每次 Monte-Carlo 实验时得到的各个雷达辐射源的提取准确率分别进行平均,得到每部雷达的平均提取准确率 $\overline{P_{\text{accurate}}}$ 。图6 所示为每部雷达的平均提取准确率随脉冲丢失率的变化曲线。

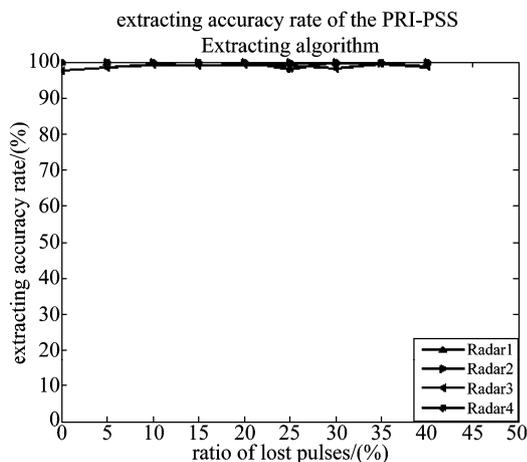


图6 雷达提取准确率随 RLP 变化曲线图

Fig.6 Changing curve of radar extracting accuracy rate

由图6 的曲线图可以看出,利用 PRI 样本子图周期搜索算法可以实现丢脉冲情况下雷达脉冲信号的提取。随着全脉冲数据中脉冲丢失率的增加,算法对雷达辐射源的提取准确率降低较少。当脉冲丢失率达到 40% 时,算法对每部雷达辐射源的提取准确率依然能够达到 98%,这是因为, PRI 样本子图周期提取成功的对应雷达,其脉冲的丢失对 PRI 样本子图周期的影响较小,全脉冲中含有的该雷达

综上所述, PRI 样本子图周期搜索算法可以准确提取出交错的脉冲序列中的各个雷达脉冲列,且效果要明显优于经典的 PRI 搜索算法和改进的 PRI 变换法^[19]。

脉冲列依然可以通过PRI样本子图周期进行匹配提取。这验证了本文算法在模拟的真实信号环境中,依然能够以较高的准确率实现对雷达信号的提取。

5 结论

依据交错雷达脉冲数据中每个脉冲的到达时间(TOA)信息和雷达信号的PRI样本子图描述方式,本文提出了一种利用PRI样本子图周期搜索提取脉冲序列中相应雷达的算法。算法改传统PRI搜索法中的单个脉冲间隔搜索为PRI样本子图周期搜索,并构造了二维提取函数,将搜索过程中符合某一假定PRI样本子图周期的匹配脉冲数目存储于二维提取函数中,最后根据二维提取函数的最大值确定PRI样本子图周期,提取对应脉冲,实现雷达信号的提取。仿真分析验证了该算法能够有效地提取复杂雷达信号,效果明显优于传统的PRI搜索法和改进的PRI变换法;存在脉冲丢失和干扰脉冲情况下的仿真结果验证了算法在真实信号环境中使用的可行性。本文算法在处理过程中,对数据量有一定要求,必须能够体现该雷达信号的周期性变化规律;同时,本文算法依赖于脉冲数目的积累,因此,实时性相对一般。在后续工作中,针对现有算法如何提高分选的实时性和降低系统占用率,是下一步研究的主要方向。

参考文献

- [1] Nishigehi K, Kobayashi M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2):409-421.
- [2] 李星雨,杨承志,张荣. 基于PRI熵和转移矩阵的雷达信号主分选算法[J]. *舰船电子工程*, 2013, 33(9): 45-49.
LI X Y, Yang C Z, Zhang R. A radar signal main sorting algorithm based on PRI entropy and transfer matrix[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013, 33(9): 45-49. (in Chinese)
- [3] Pace P E. Detecting and classifying low probability of intercept radar[M]. 2nd ed. Norwood: Artech House, 2009: 31-37.
- [4] 黄宇,刘锋,王泽众,等. 基于FRFT的雷达信号chirp基稀疏特征提取及分选[J]. *航空学报*, 2013, 34(2): 393-400.
Huang Y, Liu F, Wang Z Z, et al. Chirp function sparse feature extraction and sorting of radar signals based on FRFT[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(2): 393-400. (in Chinese)
- [5] Fadili M J, Starck J L, Bobin J, et al. Image decomposition and separation using sparse representations; an overview[C] // *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(6): 983-994.
- [6] Cho N, Kuo C C J. Sparse music representation with source-specific dictionaries and it's application to signal separation[C] // *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2011, 19(2): 326-337.
- [7] Visnevski N. Syntactic modeling of multi-function radars[D]. McMaster University, PhD Thesis, 2005.
- [8] Wiley R G. ELINT: The interception and analysis of radar signals[M]. Second Edition, Boston, MA: Artech House, 2006:317-356.
- [9] 罗长胜,吴华,程嗣怡. 一种对重频调制域抖动信号的PRI变换分选新方法[J]. *电讯技术*, 2012, 52(9): 1492-1496.
Luo C S, Wu H, Cheng S Y. A new method for sorting PRI modulated and jittered pulse signal based on PRI transformation[J]. *Telecommunication Engineering*, 2012, 52(9): 1492-1496. (in Chinese)
- [10] 李英达,肖立志. 一种脉冲重复间隔复杂调制雷达信号分选方法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(10): 2494-2497.
Li Y D, Xiao L Z. A method of signal sorting for radar signal of pulse repetition interval complex modulated[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(10): 2494-2497. (in Chinese)
- [11] Wang J, Lei P, Yang D. et al. A novel deinterleaving algorithm of radar pulse signal based on DSP[C] // *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)*, Seoul, Korea, July 5-8, 2009:1899-1903.
- [12] 易波,刘培国,薛国义. 一种自适应容差的雷达信号分选聚类算法[J]. *现代电子技术*, 2012, 35(15): 22-24.
Yi B, Liu P G, Xue G Y. A radar signal sorting algorithm based on adaptive tolerance[J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(15): 22-24. (in Chinese)
- [13] 易波,刘培国,薛国义. 一种基于顺序差值直方图算法的改进雷达信号分选方法[J]. *舰船电子对抗*, 2012, 35(1): 6-10.
Yi B, Liu P G, Xue G Y. An improved method for radar signal sorting based on SDIF histogram algorithm[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2012, 35(1): 6-

10. (in Chinese)
- [14] 王世强,张登福,毕笃彦,等. 基于快速支持向量聚类和相似熵的多参数雷达信号分选方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2735-2741.
Wang S Q, Zhang D F, Bi D Y, et al. Multi-parameter radar signal sorting method based on fast support vector clustering and similitude entropy[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(11): 2735-2741. (in Chinese)
- [15] Fan F H, Yin X Z. Improved method for deinterleaving radar pulse trains with stagger PRI form dense pulse series [C]//2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS), Dalian, China, July 5-7, 2010: V3-250-V3-253.
- [16] Ben-Hur A, Horn D, Siegelmann H T, et al. Support vector clustering[J]. Journal of Machine Learning Research, 2001, 2: 125-137.
- [17] Lee J, Lee D. An improved cluster labeling method for support vector clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(3): 461-464.
- [18] Lee S H, Daniels K M. Cone cluster labeling for support vector clustering[C]//Proceedings of 6th SIAM Conference on Data Mining, Bethesda MD, USA, April 20-22, 2006: 484-488.
- [19] 乔宏乐,王超,王鹏. 基于 PRI 变换法的脉冲信号分选算法[J]. 火控雷达技术, 2012, 41(2): 34-38.
Qiao H L, Wang C, Wang P. Pulse signals deinterleaving algorithm based on PRI transform[J]. Fire Control Radar Technology, 2012, 41(2): 34-38. (in Chinese)
- [20] 孙鹏,潘谊春,郁春来,等. 基于频谱分析的雷达信号分选新方法[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(2): 109-113.
Sun P, Pan Y C, Yu C L, et al. A novel sorting method of radar signal based on spectrum analysis[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(2): 109-113. (in Chinese)
- [21] 于新星,王永. 基于在线核聚类的雷达信号分选方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(3): 270-275.
Yu X X, Wang Y. Radar signal sorting method based on online kernel clustering [J]. Computer Engineering, 2012, 38(3): 270-275. (in Chinese)
- [22] 旷平昌,王杰贵,罗景青. 基于脉冲样本图和 Vague 集的雷达辐射源识别[J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1639-1644.
Kuang P C, Wang J G, Luo J Q. Radar emitter recognition based on pulse sequence pattern and vague set[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(7): 1639-1644. (in Chinese)
- [23] Gee W A. Radar warning receiver (RWR) time-coincident pulse data extraction and processing[C]//IEEE National Radar Conference-Proceedings, Atlanta, United states, 2012, 3: 752-757.
- [24] He Qing-bo. Vibration signal classification by wavelet packet energy flow manifold learning [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(7): 1881-1894.
- [25] 梁华东,韩江洪. 采用双谱多类小波包特征的雷达信号聚类分选[J]. 光子学报, 2014, 43(3): 1-8.
Liang H D, Han J H. Clustering and sorting radar signals based on multi-wavelet packets characteristics of bispectrum[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 1-8. (in Chinese)
- [26] 陈昌孝,何明浩,徐璟,等. 基于模糊函数相像系数的雷达辐射源信号分选[J]. 电波科学学报, 2014, 29(2): 260-264.
Chen C X, He M H, Xu J, et al. Radar emitter signal sorting based on resemblance coefficient of ambiguity function[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(2): 260-264. (in Chinese)

作者简介



孟祥豪 男,1987年生,河北邯郸人,现为合肥电子工程学院博士研究生,主要研究方向为雷达与雷达对抗理论新技术。E-mail:xiaoyaotan0508@163.com



罗景青 男,1957年生,四川南溪人,现为合肥电子工程学院教授、博士生导师,863 专家组成员,主要研究方向为雷达对抗信号处理、阵列信号处理等。E-mail:luojingqing001@163.com



马贤同 男,1987年生,安徽六安人,现为合肥电子工程学院博士研究生,主要研究方向为空间信息处理理论与技术。E-mail:mxtzhy@foxmail.com