

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.010

引用格式:关一夫,张国毅,刘志鹏.一种基于脉冲样本序列的PRI周期信号分选算法[J].电讯技术,2014,54(7):915-920. [GUAN Yi-fu, ZHANG Guo-yi, LIU Zhi-peng. A Novel De-interleaving Algorithm for PRI Periodic Signal Based on Pulse Sample Sequences[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7):915-920.]

一种基于脉冲样本序列的PRI周期信号分选算法*

关一夫**,张国毅,刘志鹏

(空军航空大学,长春 130022)

摘要:针对传统脉冲重复间隔(PRI)分选算法在估计PRI方面存在的不足,提出了一种对PRI周期信号的周期进行准确估计的方法。该方法首先从待分选脉冲序列中提取出属于一部雷达的脉冲样本,然后基于这些样本对该雷达脉冲序列的周期进行精确估计,并用估计到的周期值进行脉冲序列抽取从而实现准确分选。相对于传统PRI分选算法,该算法能够在保证周期估计精度的前提下大幅度减少分选过程所需要的时间,从而能够更好地满足信号分选的需求。仿真结果证明了所提算法的有效性。

关键词:雷达信号处理;脉冲样本序列;PRI周期信号;分选

中图分类号:TN971 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-0915-06

A Novel De-interleaving Algorithm for PRI Periodic Signal Based on Pulse Sample Sequences

GUAN Yi-fu, ZHANG Guo-yi, LIU Zhi-peng

(Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: For the defects in estimating pulse repetition interval (PRI) of traditional pulse repetition interval de-interleaving algorithms, this paper puts forward a new method of estimating the period of PRI periodic signals. The method firstly extracts the pulse sample sequence of a certain radar from the raw pulse sequence, then executes precise period estimation process based on the sample sequence, finally, proceeds the accurate de-interleaving process using the period value previously estimated. Compared with the traditional de-interleaving methods, this algorithm considerably shortens the time needed in the de-interleaving process and guarantees the precision of the period estimation at the same time, which satisfies the requirement of the de-interleaving process. Simulation results verify the validity of the proposed method.

Key words: radar signal processing; pulse sample sequences; PRI periodic signal; de-interleaving

1 引言

在雷达对抗侦察信号处理中,密集交叠信号的成功分选是关键的一步,对后续信号样式识别、天线扫描样式分析和雷达辐射源识别都有很大影响^[1-7]。

通过大量分析实际侦收数据发现,尽管现在雷达信号的样式复杂多变,但是大部分是周期重复的,所以对这些周期性的信号进行有效分选具有重要意义。文献[8]对这些PRI周期信号进行了详细介绍和分析,此处不再赘述。

* 收稿日期:2014-01-03;修回日期:2014-04-03 Received date:2014-01-03;Revised date:2014-04-03

** 通讯作者:guanyifu9@sina.cn Corresponding author:guanyifu9@sina.cn

经典的 PRI 分选算法的处理过程可分为 PRI 估计和脉冲序列抽取两部分^[9-11], 而其中研究的重点集中在对 PRI 的快速、准确估计上。实际中信号密集交叠, 而且由于信号能量、噪声等原因引起的 TOA 测量误差使 PRI 值存在一定的抖动, 这些原因都给准确估计出一部雷达信号的 PRI 带来很大困难; 如果不能准确估计出 PRI, 会使后续的脉冲序列抽取出现抽取错误或抽取不彻底的情况。基于直方图的分选算法^[12-14]在脉冲丢失不严重的情况下能够对 PRI 周期信号进行准确分选, 但是其对 PRI 的估计精度与对信号的正确检测概率是一对矛盾, 较高的正确检测概率势必以降低分辨率和估计精度为代价, 而且在脉冲丢失较为严重的情况下还会估计出 PRI 的谐波; 传统的序列搜索法^[15]虽然能够分选 PRI 周期信号, 但是其估计出的周期值与实际周期值存在较大的偏差, 这在 TOA 测量误差较大的情况下会出现抽取错误的现象, 而且该方法存在消耗时间长的问题; 文献[16]对传统序列搜索法在搜索时间方面进行了改进, 使其能够满足实时性的要求, 但同时又引入了新的误差来源——量化误差, 而且该算法的处理速度是以量化精度为代价的; 文献[17]的序列搜索改进算法虽然利用统计平均得到了较为准确的周期估计值, 但是该算法非常耗时, 而且基于统计平均的估计模型只有在样本很多的情况下才会得到较高的估计精度; PRI 变换法及其改进算法^[18-19]具有较高的估计精度, 但是由于相位因子的引入, 使其对 PRI 参差信号的周期峰值产生抑制以致无法检测, 故不适合对所有的周期性信号进行分选。

为了对 PRI 周期信号的周期实现快速、准确的估计, 本文提出了一种对 PRI 周期信号进行准确分选的方法。该算法首先提取出可能属于一部雷达的脉冲样本序列, 通过脉冲样本评估模型对所提取的样本质量进行评估, 将不满足评估条件的脉冲样本序列剔除, 然后对满足评估标准的脉冲样本序列进行周期估计, 最后用估计到的周期进行脉冲序列抽取从而实现准确分选。

2 算法原理

2.1 确定脉冲样本序列

首先, 在待处理的全脉冲序列中选择一个基准脉冲 P_c , 通常选择待处理脉冲序列中间的一个脉冲

作为基准脉冲, 设其到达时间为 T_c 。以此脉冲为基点, 选择提取脉冲样本序列的区间, 本文选择 4 个区间, 称为前 1 区间、前 2 区间、后 1 区间和后 2 区间, 并分别记为 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{b1} 和 A_{b2} (实际中可根据不同的需求选择不同数量的区间, 区间数量的选择主要考虑计算量和估计精度的折衷问题, 选择更多的区间就可以得到更多的样本脉冲, 这样基于这些样本进行 PRI 周期估计时就能得到更为精确的估计值, 但同时建立全差直方图时也更加耗时), 各个区间分别满足式(1)~(4)的条件。

A_{11} 区间:

$$P_{\min} < T^c - T_i^{A_{11}} < \lambda \cdot P_{\min}, i = 1, 2, \dots, I \quad (1)$$

A_{12} 区间:

$$2P_{\min} < T^c - T_j^{A_{12}} < 2\lambda \cdot P_{\min}, j = 1, 2, \dots, J \quad (2)$$

A_{b1} 区间:

$$P_{\min} < T_m^{A_{b1}} - T^c < \lambda \cdot P_{\min}, m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

A_{b2} 区间:

$$2P_{\min} < T_n^{A_{b2}} - T^c < 2\lambda \cdot P_{\min}, n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中, P_{\min} 为可能出现的最小周期值, λ 为大于 1 的常数, λ 相当于步进, 由于本文是从最小可能 PRI 开始搜索并逐渐扩大搜索范围, 这样做的目的是为了先估计出小 PRI 的雷达信号, 因为在实际中, 小 PRI 信号往往意味着高威胁性 (如 PD 雷达或其他制导雷达), 而且这些小 PRI 信号辐射的脉冲数很多, 因此先将这些脉冲抽取出来就可以大幅减少后续分选的处理负担; 如果 λ 取得大, 那么用于建立全差直方图的脉冲范围就大, 需要处理的脉冲可能就多; 如果 λ 取得小, 那么当环境中存在的都是较大 PRI 雷达信号时就可能造成在所选定的范围内很长时间无法得到全差直方图的峰值 (估计不到大的 PRI 周期), 这势必会浪费很多时间在建立没有用的全差直方图上。

确定出提取脉冲样本序列的区间后, 对 A_{12} 、 A_{b1} 、 A_{b1} 区间的脉冲到达时间进行标准化处理。根据标准化的结果对 4 个区间的脉冲进行全差直方图统计, 将构成全差直方图峰值的脉冲提取出来作为可能属于一部雷达的脉冲样本序列, 由于本文是对选定的 4 个小区域进行积累, 故为了得到更明显的峰值, 采用了这种耗时的累积办法, 实际应用中为了提高实时性可以将全差直方图换为固定阶次 (如 5 阶) 的累积差直方图。

提取脉冲样本序列的示意图如图 1 所示。

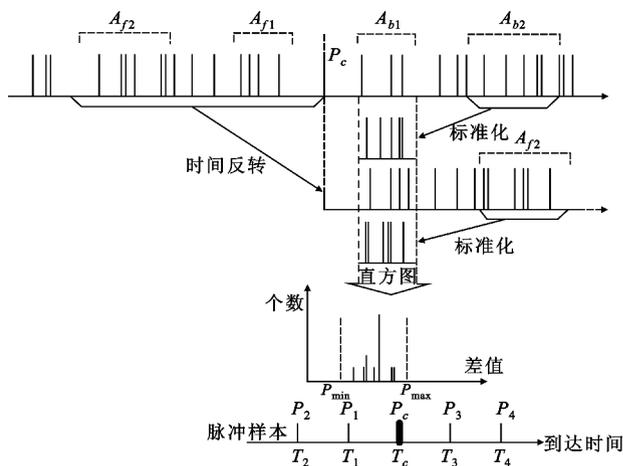


图 1 提取脉冲样本序列示意图

Fig. 1 The sketch map of extracting pulse sample sequence

上述的标准化过程是可逆的,故可以在原始全脉冲序列中得到样本脉冲序列。其中对 A_{f2} 和 A_{b2} 的标准化是将 $T_j^{A_{f2}} \in A_{f2}$ 和 $T_n^{A_{b2}} \in A_{b2}$ 进行如下处理: $T_j^{A_{f2}} - (\lambda - 1) \cdot P_{\min}$ 和 $T_n^{A_{b2}} - (\lambda - 1) \cdot P_{\min}$ 。而且需要注意,在查找形成全差直方图峰值的脉冲序列时,脉冲序列中一定要包含基准脉冲,否则认为查找失败。

2.2 样本脉冲序列的评估模型

由于全差直方图是对周期在一定容差范围内的脉冲进行统计,在脉冲密集的时候可能混入其他雷达的脉冲,即使不混入其他干扰脉冲,直方图统计的脉冲之间的周期值仍可能存在较大的抖动,所以建立对脉冲样本序列的评估模型,将周期抖动较大的脉冲样本序列剔除。

在建立评估模型之前,先将脉冲样本序列中的各脉冲到达时间变换为以 P_c 为圆心的单位圆中的单位向量。设提取到的脉冲样本序列除 P_c 外为 P_i , $i = 1, 2, \dots, L$, 此处假设 $L = 4$, 则与之对应的在单位圆中各单位向量的角度分别为

$$\theta_1 = \pi \frac{T_c - T_1 - P_{\min}}{\Delta} \quad (5)$$

$$\theta_2 = \pi \frac{T_c - T_2 - 2P_{\min}}{2\Delta} \quad (6)$$

$$\theta_3 = \pi \frac{T_3 - T_c - P_{\min}}{\Delta} \quad (7)$$

$$\theta_4 = \pi \frac{T_4 - T_c - 2P_{\min}}{2\Delta} \quad (8)$$

其中, $\Delta = P_{\max} - P_{\min}$ 与单位圆中 $(0, \pi)$ 的角度范围相对应; $T_i (i = 1, 2, \dots, 4)$ 为 $P_i (i = 1, 2, \dots, 4)$ 的到达时间, T_c 为基准脉冲 P_c 的到达时间。上述到达时间变换的示意图如图 2 所示。

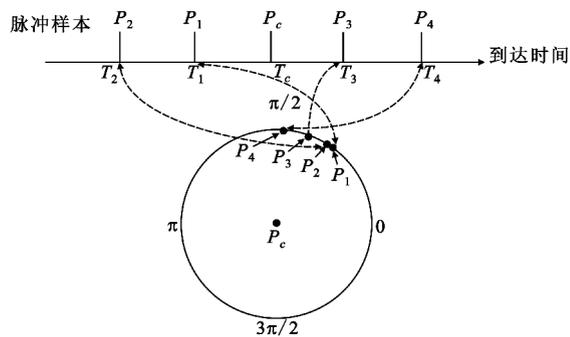


图 2 到达时间变换示意图

Fig. 2 The sketch map of TOA transformation

在完成变换之后,建立如式(9)所示的评估模型:

$$Conf = \frac{S^2 + C^2}{4(w_1 + w_2)^2} \quad (9)$$

式中, w_1 和 w_2 为预先设定的权值,通常取 $w_2 > w_1$, S 和 C 分别如式(10)和式(11)所示:

$$S = w_2(\sin\theta_2 + \sin\theta_4) + w_1(\sin\theta_1 + \sin\theta_3) \quad (10)$$

$$C = w_2(\cos\theta_2 + \cos\theta_4) + w_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_3) \quad (11)$$

很容易证得,当 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4$ 即 $\frac{T_c - T_2}{2} = \frac{T_4 - T_c}{2}$

$= T_c - T_1 = T_3 - T_c$ 时, $Conf = 1$, 此时代表所选的脉冲序列样本各个脉冲之间的周期值抖动很小,样本序列质量很高,可以用于后续的脉冲序列周期估计;反之,若该值低于某一预先设定的门限 η , 则认为所提取的脉冲序列样本质量不符合要求,应该进行剔除处理。

2.3 估计脉冲序列的周期

对于满足 $Conf$ 评估标准的脉冲样本序列,用其进行序列周期估计,估计模型如式(12)所示:

$$P = \frac{\Delta}{\pi} \arccot\left(\frac{C}{S}\right) + P_{\min} \quad (12)$$

式中, $\arccot\left(\frac{C}{S}\right)$ 为样本脉冲序列在单位圆中各个单位向量的矢量和的角度(图 2 中由圆心和圆周上各点形成的单位向量的矢量和的角度)。

2.4 脉冲序列抽取

在得到满足式(9)评估条件的脉冲样本序列后,可以选择文献[16]中的量化方法将脉冲样本序列和待分选脉冲序列量化并以基准脉冲为起点前后做与运算以实现脉冲序列抽取;也可以用估计到的周期值以中心脉冲为起点进行前后关联抽取。第一种抽取方法虽然具有速度快的优点,但是引入了量化误差,而且处理速度是以量化精度为代价的,故本

文选择后一种方式。由于可能估计到 PRI 参差、PRI 滑变等 PRI 周期信号的帧周期,故而在进行抽取的时候需要从基准脉冲开始以前后每一个脉冲为基准点用估计到的周期进行抽取,这样可以将这些 PRI 周期信号完整地抽取出来,示意图如图 3 所示。

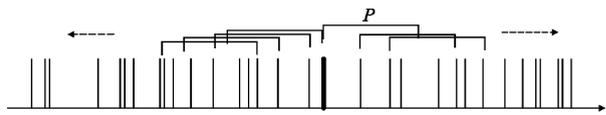


图 3 脉冲序列抽取示意图

Fig. 3 The sketch map of the pulse sequence extraction process

2.5 算法处理流程

Step 1: 选择基准脉冲 P_c ;

Step 2: 选择脉冲样本序列的提取区间 A_{j1} 、 A_{j2} 、 A_{b1} 和 A_{b2} ,对区间标准化,建立全差直方图进行统计,将构成全差直方图峰值的脉冲样本序列提取出来,若该脉冲样本序列包含基准脉冲 P_c ,则进行 Step 3,否则回到 Step 1 重新向后选择新的基准脉冲;

Step 3: 对提取的脉冲样本序列进行评估,设定门限 η ,对 $Conf < \eta$ 的脉冲样本序列进行剔除,回到 Step 1 重新选择基准脉冲,反之若 $Conf \geq \eta$,则进行 Step 4;

Step 4: 用满足评估条件的脉冲样本序列进行

周期估计;

Step 5: 用估计到的周期值以 P_c 为起点向前向后进行脉冲序列的抽取。

若通过改变基准脉冲仍无法得到满足条件的脉冲样本序列,这可能是由于存在较大的周期,这时就需要加大 λ 值,从而扩大 A_{j1} 、 A_{j2} 、 A_{b1} 和 A_{b2} 的范围。为了自动地实现这一过程,事先就需要将 λ 设置成在一定的范围内取值,然后以一定步进依次取到这个范围内的各个值,若 λ 取到这个范围内可取的最大值仍然无法提取到脉冲样本序列,则终止算法。

3 仿真结果

3.1 算法有效性分析

下面对算法的有效性进行仿真验证,用于仿真的信号源如表 1 所示,其中组变信号 S_5 每组中有 5 个脉冲,即每发射 5 个脉冲就改变一次 PRI 值。仿真条件:由于干扰、噪声和测量误差等造成的 PRI 抖动量设为 $5 \mu s$,脉冲丢失率设为 5%,样本评估置信度的门限设为 $\eta = 0.9$, P_{min} 取美军 F16 飞机火控雷达在高重频模式下辐射的 PRI 为 $33 \mu s$,这个值只是一个 PRI 搜索的初始值,实际应用时应该考虑侦察环境中可能的雷达类型,如果是针对地面雷达进行侦察的话,这个值可以增大到 $100 \mu s$ 以上,这样可以减少不必要的时间耗费。

表 1 仿真数据
List 1 Simulation data

信号源	参数设置				分选结果		评估	
	PRI/ μs	周期/ μs	样式	脉冲数	周期估计/ μs	正确分选个数	周期估计精度/%	分选准确率/%
S_1	106	106	固定	100	106.611 3	91	99.42	91.00
S_2	123/162/145	430	参差	300	430.747 1	281	99.83	93.67
S_3	53/82/69/117	321	参差	200	320.239 7	188	99.76	94.00
S_4	60/80/100/120	360	滑变	150	364.370 5	137	98.79	91.33
S_5	27#41#76	720	组变	300	716.191 3	271	99.47	90.33
汇总						968	99.45	92.07

由表 1 可以看出,本文的算法对脉冲序列的周期具有很高的估计精度,平均估计精度为 99.45%,平均分选准确率为 92.07%。

3.2 算法性能对比

下面将本文算法与文献[17]的二维特征向量分选法、序列搜索法和 CDIF 算法在平均估计精度和平均分选准确率方面进行对比,仿真所用的信号源和仿真条件与 3.1 节是一样的,仿真结果如表 2

所示。

表 2 算法比较结果
Table 2 The comparison results of the algorithms

算法	平均估计精度/%	平均分选准确率/%
本文方法	98.27	92.07
二维特征向量法	97.24	91.99
序列搜索法	93.51	81.33
CDIF	93.30	85.78

从表中可以看出, 本文算法在周期平均估计精度和平均分选准确率方面均优于其他 3 种算法。

3.3 抖动量对估计精度的影响

图 4 为本文算法、二维特征向量法、序列搜索法和 CDIF 在不同抖动量下对周期的估计精度情况。根据分析实际侦收数据确定平均抖动量的范围为 $3 \sim 8 \mu\text{s}$ 。从图中可以看出本文算法对抖动具有更好的容忍性。

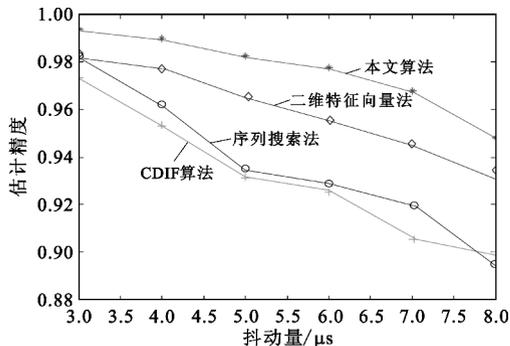


图 4 抖动量对估计精度的影响

Fig. 4 The impact of jitter on the estimation accuracy

4 结论

通过仿真分析可以看出本文算法对于脉冲序列的变化周期具有很好的估计精度, 即使在干扰严重、测试误差较大的情况下仍能以较高的精度对脉冲序列的周期进行估计。本文算法通过小范围统计检测出该范围内脉冲序列存在的周期规律性, 并将这些满足周期性的脉冲提取出来作为可能属于一部雷达的脉冲样本序列, 基于这些样本进一步对其周期进行准确估计, 这样做的优势是在保证估计精度的前提下, 减少了运算量; 此外, 先提取出小周期信号然后通过逐步扩大统计的范围提取出大周期信号是符合实际需要的, 因为实际信号中存在脉冲多普勒信号, 这种信号的特点就是周期很小, 在一段时间内产生大量脉冲从而给信号处理机带来很大负担, 因此优先将这种信号分选出来会给后续分选处理减少很多计算量。本文算法存在的问题主要集中在对 PRI 组变信号的分选上, 由于这类信号和多个 PRI 固定信号的组合非常相似, 因此在估计周期时经常先估计到组变信号的子 PRI 值并将其作为多个 PRI 固定信号抽取出来, 从而造成了增批, 故需要进一步研究估计出 PRI 组变信号帧周期的方法。

参考文献:

- [1] Wiley R G. ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals[M]. Norwood, MA: Artech House, 2006: 214-219.
- [2] Siroris. Detection and Identification of Stable PRI Patterns Using Multiple Parallel Hypothesis Correlation Algorithms; US, 44269E[P]. 2013-06-04.
- [3] Newham. Surveillance System and Method; US, 8111187B2[P]. 2012-02-07.
- [4] Card. Method, System and Program Product for De-interleaving and Classifying Arbitrary Radar Pulse Patterns Using Non-Deterministic Finite State Automata; US, 8587468B2[P]. 2013-11-19.
- [5] Drake. Method and System for De-interleaving Signals; US, 8102297B2[P]. 2012-01-24.
- [6] Song. Method and Device for Recognizing PRI Modulation Type of Radar Signal; US, 8531330B2[P]. 2013-09-10.
- [7] Guillaume. Fast Learning of Gramma Production Probabilities in Radar Electronic Support[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 46(3): 1262-1287.
- [8] 赵仁建, 熊平, 陈元亨. 脉冲序列的快速搜索法及可信度分析[J]. 信号处理, 1996, 12(2): 141-162.
ZHAO Ren-jian, XIONG Ping, CHEN Yuan-heng. A Fast Sequence Search Algorithm and Its Confidence Analysis[J]. Signal Processing, 1996, 12(2): 141-162. (in Chinese)
- [9] Hassan H E. De-interleaving of Radar Pulses in a Dense Emitter Environment[C]//Proceedings of 2003 International Radar Conference. Huntsville, Alabama, USA: IEEE, 2003: 389-393.
- [10] 王晓峰. 雷达信号快速分选算法研究[D]. 长春: 空军航空大学, 2011.
WANG Xiao-feng. Research on Radar Signal Fast Sorting Algorithm[D]. Changchun: Aviation University of Air Force, 2011. (in Chinese)
- [11] Wang. System and Method for Detecting and De-interleaving Radar Emitters Using Snapshots of Varying Lengths; US, 7830297B1[P]. 2010-11-09.
- [12] 高双成, 陈莹. 基于 PRI 的未知雷达脉冲序列分选综合算法[J]. 电子科技, 2012, 25(2): 8-11.
GAO Shuang-cheng, CHEN Ying. Comprehensive De-Interleaving Algorithm of Unknown Radar Signals Based on the PRI[J]. Electronic Science & Technology, 2012, 25(2): 8-11. (in Chinese)
- [13] Davies C L, Hollands P. Automatic Processing for ESM[J]. IEE Proceedings F-Communications, Radar and Signal Processing, 1982, 129(3): 164-171.
- [14] 马爽, 吴海斌, 柳征, 等. 基于递归扩展直方图的辐射源时差分选方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(5): 83-89.
MA Shuang, WU Hai-bin, LIU Zheng, et al. Method for Emitter TDOA Sorting Based on Recursive Extended

- Histogram[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(5):83-89. (in Chinese)
- [15] Mardia H K. New Technique for the De-interleaving of Repetitive Sequence[J]. IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing, 1989, 136(4):149-154.
- [16] 赵仁建,熊平. 用变步长检测法分选周期性信号[J]. 四川大学学报(自然科学版), 1995, 32(5):527-532. ZHAO Ren-jian, XIONG Ping. De-interleaving Periodic Signal Based on Variable Step Length Detection Method [J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 1995, 32(5):527-532. (in Chinese)
- [17] 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):35-38. LI Ying-da, XIAO Li-zhi. A Method of Signal Sorting for Radar Signal of Pulse Repetition Interval Complex Modulated [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(10):35-38. (in Chinese)
- [18] Deng Bin, Qin Yu-liang, Wang Hong-qiang, et al. SFM Signal Detection and Parameter Estimation Based on Pulse Repetition Interval Transform[C]//Proceedings of 20th European Signal Processing Conference. Romania; IEEE, 2012:1855-1859.
- [19] Mahdavi A, Pezeshk A M. A Fast Enhanced Algorithm of PRI Transform [C]//Proceedings of 2011 6th International Symposium on Parallel Computing in Electrical Engineering. Luton; IEEE, 2011:179-184.

作者简介:



关一夫(1988—),男,黑龙江哈尔滨人,现为空军航空大学硕士研究生,主要研究方向为雷达信号分选和雷达辐射源识别;

GUAN Yi-fu was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1988. He is now a graduate student. His research concerns radar signal de-interleaving and radar emitter recognition.

Email: guanyifu9@sina. cn

张国毅(1965—),男,吉林长春人,2002年于哈尔滨工业大学获通信与信息系统专业博士学位,现为教授、博士生导师,主要从事雷达信号分选算法、雷达辐射源识别、脉内识别等研究;

ZHANG Guo-yi was born in Changchun, Jilin Province, in 1965. He received the Ph. D. degree in Communication and Information System from Harbin Industry University in 2002. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns radar signal sorting, radar emitter recognition, intra-pulse recognition, etc.

刘志鹏(1990—),男,吉林长春人,现为空军航空大学硕士研究生,主要研究方向为雷达信号分选算法。

LIU Zhi-peng was born in Changchun, Jilin Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns radar signal sorting.