

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.009

一种基于动态规划的雷达合批新算法*

关一夫^{1,**}, 张国毅¹, 王晓峰²

(1. 空军航空大学, 长春 130022; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要:针对信号分选结果增批现象严重、影响识别准确度的问题,通过分析实际侦收信号的特点,并借鉴生物信息学中动态规划比对算法的思想,提出了对脉冲重复周期(PRI)信号在载频维和脉宽维进行合批的方法,并结合该方法设计了动态合批处理流程。该算法通过比较两批数据在PRI值及其排列顺序上的相似性来进行合批,利用PRI周期性这一很稳定的特征较好地解决了批信号在载频和脉宽维上的增批问题。仿真结果表明,该算法在存在脉冲丢失和干扰脉冲的情况下仍能准确合批。

关键词:雷达辐射源;合批;PRI周期性;动态规划比对

中图分类号:TN971 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)11-1446-06

A New Radar Batching Algorithm Based on Dynamic Programming

GUAN Yi-fu¹, ZHANG Guo-yi¹, WANG Xiao-feng²

(1. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;
2. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Given the fact that the results of the signal sorting have some false batches, which seriously affects the accuracy of the recognition process, by analyzing the characteristics of the received pulses, and learning dynamic programming alignment algorithm in bioinformatics, this paper puts forward a batching algorithm using the periodic characteristics of pulse repetition interval(PRI) to solve the problem appearing especially at the carrier frequency dimension and pulse width dimension, and in combination with the method this paper designs a dynamic batching processes. By comparing the similarities of two batches of data both in the values of PRI and its sequence order, it determines whether to batch or not. Simulation results show that the algorithm can work robustly even in the presence of missing pulses and interference pulses.

Key words: radar emitter; batching; PRI period; dynamic programming alignment

1 引言

雷达信号合批是辐射源识别处理中的重要环节,它可以有效地消除虚假和重复雷达信号^[1]。侦察接收机接收到的脉冲将通过分选算法基于测量参数分成若干批数据,这些批数据将与雷达数据库中已知雷达的对应参数进行匹配以给出这些批数据的辐射源类型、用途等信息,并为下一步指挥决策提供依据。如果批数据存在增批的现象,那么识别过程将给出一些错误的雷达识别结果,对这些错误的雷达采取措施将浪费资源^[2]。

所谓雷达增批,可以理解成在雷达分选处理中分选得到的雷达数目大于实际存在的雷达数目^[3]。很多因素可以导致雷达分选出现增批现象:比如在复杂体制雷达的工作模式中载频、脉宽、重频等具有较复杂的样式使现有算法对其分选应用具有局限性,脉冲大量丢失破坏了原有脉冲间的规律及环境因素的影响等。本文主要解决的是由第一种原因造成的增批问题。

雷达辐射源为实现高分辨探测、动目标显示以

* 收稿日期:2013-07-11;修回日期:2013-09-25 Received date:2013-07-11;Revised date:2013-09-25

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

及成像功能,运用了更为复杂的波形;同时为了满足抗干扰、反侦察的需求,其辐射波形在载频(RF)、脉宽(PW)和脉冲重复周期(PRI)上变得复杂多变;载频维有脉组频率捷变、脉间频率捷变、频率伪随机编码和频率分集等样式;脉宽维有组变、较大范围的单调渐变、编码和双脉冲等样式;脉冲间隔维有参差、组变、滑变、抖动和编码等样式^[4-7]。目前的分选算法无法很好地适应 RF、PW 和 PRI 存在的如此复杂的变化样式,同时这些复杂的信号样式也给电子情报侦察数据的分析增加了难度^[8-9]。现有合批算法的思路主要是利用各批数据间特征参数的统计特性,如隶属度^[10],这种方法的局限性在于:对于脉组捷变同时在重复周期上脉组参差的典型雷达样式将无能为力。

在对批数据进行人工分析时发现,尽管 PRI 的调制样式呈现出多样和复杂的特点^[11],但是对于 PRI 周期性调制信号,除了各子 PRI 值外,一个帧周期内各子 PRI 值的排列顺序能够提供很有价值的分类信息,而且这一特征即便在较短的观察时间内仍具有很好的稳定性。当一个帧周期内各个 PRI 值的排列很复杂时,其规律很难被发现而且很难找到一个合适的模型来对其进行描述,但是如果对这种信号进行长时间的观察,提取较长的数据段来对这个信号进行跟踪,仍可以发现其内在规律和周期性。所以,可以利用 PRI 的周期性作为一个稳定且可靠度高的特征对合批进行判定。

此外, PRI 调制样式中除了参差、组变和滑变这些具有强周期型的样式外,还存在 PRI 编码这种具有弱周期型规律的样式, PRI 编码信号的特点是码值为固定的几个数,各个码值出现的顺序不像强周期型样式那样可以预测,但是在人工分析时仍能较容易地将其规律挖掘出来,只是在脉冲丢失严重的情况下若不仔细分析其数据容易将其判为参差类型。第五部分的仿真将说明该算法对于 PRI 编码这种弱周期型的信号具有较好的适应性。

2 对 PRI 周期信号的合批算法

2.1 分选算法的选择

该合批算法需要各个批数据中能够保留较完整的 PRI 周期性,即不会因为信号中 PRI 的多值性而造成增批。本文假设分选算法为脉冲累积抽取的改进算法^[12],该算法能够对 PRI 参差、组变、滑变等

PRI 周期调制信号进行分选。在这种条件下我们得到的批数据中存在的增批绝大部分是由 RF、PW 维所存在的多值性引起的。

2.2 合批算法原理

借鉴生物信息学中基因序列配对的经典算法——动态规划比对算法^[13]的主要思想,结合增批问题的特点设计打分矩阵和部分得分矩阵,并将回溯路径所经过的各个点的分值相加,作为判定合批与否的依据。该算法的原始算法 Needleman-Wunsch 算法对于长序列需要建立巨大的打分矩阵和部分得分矩阵,并且在回溯的时候很费时,其时间复杂度和空间复杂度均为 $O(n^2)$ (n 为序列长度),这就限制了其在实际中的应用。后来人们提出了改善其时间、空间复杂度的算法,典型的有 Hirschberg 算法、Ukkonen 算法和 Divide-and-Conquer 算法。其中 Divide-and-Conquer 算法的时间和空间复杂度分别为 $O(n \lg d + d^2)$ 和 $O(d)$ (d 为两条序列的得分值),在实际中有较好的应用。关于上述算法的原理可参考文献^[14],在此不再赘述。

本文利用动态规划的思想,设计了对 PRI 周期信号的合批算法,步骤如下所述。

步骤 1: 从批数据中选取用于判定的样本序列

由于批数据中存在大量的数据冗余,在选取用于判定的样本序列时,其实只要选取能够完整描述一个帧周期内结构的几个典型脉冲就够了,例如三参差信号,只要选出具有 PRI 三参差值的脉冲能够用于进行合批判定,至于这三参差值的排列顺序下文中的仿真会证明该算法对排列顺序有很强的适应性,不影响判定结果。然而在批数据中不容易对各种 PRI 周期调制信号都准确提取出典型脉冲,而且事实上也没有这个必要,后面将证明更多的脉冲会使算法对脉冲丢失、干扰脉冲具有更强的适应性。

具体的选取样本序列的方法还需进一步研究,目前只是综合考虑序列的完整性、算法对复杂电磁环境的适应性以及算法的计算量粗略地选取。单从运算量上来说,该算法的改进算法对于长度为 10 000 以上的序列具有较快的处理速度^[14]。

步骤 2: 计算部分得分矩阵 M

设从批数据 1 和批数据 2 提取出的样本序列分别为 e_1 和 e_2 , 两序列的长度分别为 n_1 和 n_2 , 则 M 是一个 $(n_1 + 1) \times (n_2 + 1)$ 的矩阵。首先按照空位得分规则^[14]初始化 M 的第一行和第一列, 然后从 m_{22}

开始,按式(1)计算 m_{ij} :

$$m_{ij} = \max\{m_{(i-1)j} - 1, m_{i(j-1)} - 1, m_{(i-1)(j-1)} + p(S_{1i}, S_{2j})\} \quad (1)$$

其中, $p(S_{1i}, S_{2j})$ 表示将 M 第 i 行对应序列 e_1 中的元素值与 M 第 j 列对应 e_2 中的元素值进行匹配,如果两个数值在预先设定的匹配容差 σ 范围内则匹配结果为 1, 否则结果为 -1。

步骤 3: 回溯并进行合批判定

回溯是从 $m_{(n1+1)(n2+1)}$ 开始,沿向左、向上或向左上 3 个方向,移动到 m_{11} 的过程。当回溯到 m_{ij} 后,从 $m_{(i-1)j}$ 、 $m_{i(j-1)}$ 和 $m_{(i-1)(j-1)}$ 3 个选项中选择满足式(1)的位置继续前进,直到回溯到 m_{11} 。

完成回溯后,对回溯路径上各元素的分值求和,若该和值超过合批判定门限 η 则将两批数据进行合批,否则不进行合批。

2.3 动态合批处理流程

在侦察装备的一个侦察周期^[15]中会给出该侦察周期以及之前各周期数据的批数据结果,随着侦察周期的延续,对于每一个侦察周期给出的结果,在新生成的各批数据内部进行合批处理,然后再与原来生成的批数据进行合批处理,直到下一个侦察周期的数据到来。在对侦察周期新生成的批数据进行合批时,为了改善其处理的实时性,可采用如下的处理方法:将新生成的各批数据随机分成两组,即组 1 和组 2,依次从组 1 中选取批数据与组 2 的所有批数据进行合批判定,满足合批条件的就进行合批,当组 1 中的批数据都处理完之后,将所有这些处理完的批数据再重新随机分为两组,按上述方法继续合批,直到某个循环结束合批成功的次数小于某一门限 γ 或为 0 时,停止合批处理循环。示意图如图 1 所示。

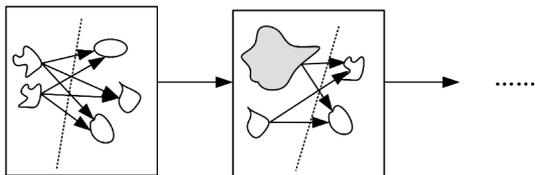


图 1 动态合批处理示意图
Fig. 1 Dynamic batching process

3 仿真结果

3.1 算法的稳健性分析

下面先以 PRI 三参差为例分别对两序列完全匹

配、不匹配、存在脉冲丢失、存在干扰脉冲和序列错位 5 种情况进行仿真,验证该算法的有效性以及对后 3 种情况的适应性,三参差 PRI 值分别为 $PRI1$ 、 $PRI2$ 和 $PRI3$,取两个周期的序列长度,另一部未知雷达的 PRI 值分别为 $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 、 $X4$,干扰脉冲的 PRI 值用 $U1$ 和 $U2$ 表示;然后以 PRI 四编码信号为例说明该算法对 PRI 编码信号的适应性, PRI 编码的 4 个 PRI 值分别用 PRI_1 、 PRI_2 、 PRI_3 和 PRI_4 表示。仿真结果如图 2~7 所示。

	$PRI1$	$PRI2$	$PRI3$	$PRI1$	$PRI2$	$PRI3$	
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
$PRI1$	-1	1	0	-1	-2	-3	-4
$PRI2$	-2	0	2	1	0	-1	-2
$PRI3$	-3	-1	1	3	2	1	0
$PRI1$	-4	-2	0	2	4	3	2
$PRI2$	-5	-3	-1	1	3	5	4
$PRI3$	-6	-4	-2	0	2	4	6

图 2 完全匹配时的部分得分矩阵
Fig. 2 Partial score matrix when completely matching

	$X1$	$X3$	$X2$	$X4$	$X1$	$X3$	
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
$PRI1$	-1	-1	-2	-3	-4	-5	-6
$PRI2$	-2	-2	-2	-3	-4	-5	-6
$PRI3$	-3	-3	-3	-3	-4	-5	-6
$PRI1$	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-6
$PRI2$	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-6
$PRI3$	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6

图 3 不匹配时的部分得分矩阵
Fig. 3 Partial score matrix when not matching

	$PRI1$	$PRI3$	$PRI1$	$PRI2$	
	0	-1	-2	-3	-4
$PRI1$	-1	1	0	-1	-2
$PRI2$	-2	0	0	-1	0
$PRI3$	-3	-1	1	0	-1
$PRI1$	-4	-2	0	2	1
$PRI2$	-5	-3	-1	1	3
$PRI3$	-6	-4	-2	0	2

图 4 存在脉冲丢失时的部分得分矩阵
Fig. 4 Partial score matrix with missing pulses

	$PRI1$	$U1$	$PRI3$	$PRI1$	$PRI2$	$PRI3$	
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
$PRI1$	-1	1	0	-1	-2	-3	-4
$PRI2$	-2	0	0	-1	-2	-1	-2
$PRI3$	-3	-1	-1	1	0	-1	0
$U2$	-4	-2	-2	0	0	-1	-1
$PRI2$	-5	-3	-3	-1	-1	1	0
$PRI3$	-6	-4	-4	-2	-2	0	2

图 5 存在干扰脉冲时的部分得分矩阵
Fig. 5 Partial score matrix with interfering pulses

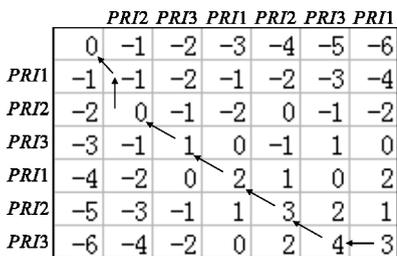


图 6 序列错位时的部分得分矩阵

Fig. 6 Partial score matrix with disorder sequences

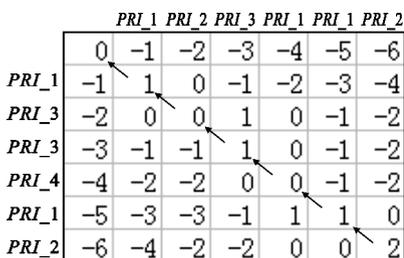


图 7 PRI 编码信号的部分得分矩阵

Fig. 7 Partial score matrix of PRI coded signal

以上 6 种情况下部分得分矩阵回溯路径上各元素的总分分别为 21、-21、9、5、12 和 5。除了图 3 的情况外都是我们希望判为合批的情况, 通过比较 6 种情况的总分可以发现用于判定是否合批的门限很容易设定, 比如说设 η 为 0 就可以正确判定是否合批, 即使是在更恶劣的电磁环境下, 该门限值也是较易设定的, 但是如何设计一个理论的门限值还需进一步研究。此外, 提取太长的序列将使得得分矩阵过于庞大, 从而提高算法的时间复杂度和所需存储空间, 算法的稳健性使得在对批数据提取样本序列时并不需要提取很长的序列就可以进行合批判定(但并不一定能完整描述批数据在 PRI 上的分布特点), 从而提高算法的实时性。但是下面也将看到, 提取较长的序列将使合批判定结果更为准确。

3.2 长序列对合批判定结果的改善

下面将通过仿真说明如果提取的样本序列较长、包含多个周期时, PRI 的周期性优势将更加明显, 这实质是由于对回溯路径上的分值求和得到的累加效果, 这使得判定结果对脉冲丢失、干扰脉冲等影响的适应性更强, 对不匹配的情况其分值将趋于更小的数值, 而且使 PRI 编码信号的弱周期性得到增强, 仅以上面的 PRI 四编码信号进行说明, 此处 PRI 四编码序列长度取为 10, 如图 8 所示。该部分得分矩阵的总分为 15, 而之前序列长度为 6 时总分为 5, 可见长序列对结果的改善。

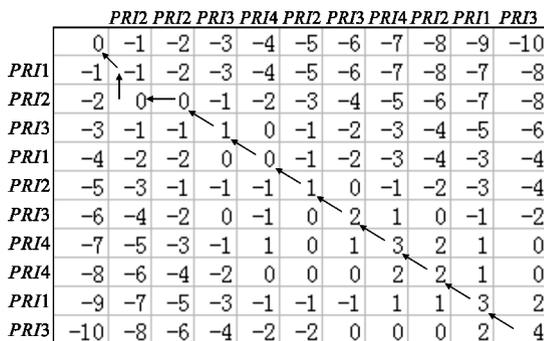


图 8 序列长度为 10 的 PRI 四编码信号的部分得分矩阵

Fig. 8 Partial score matrix of PRI coded signal with the length of 10

通过上面两个仿真可以看出, 在从批数据中提取样本序列时, 需要折衷考虑算法的时间空间复杂度和合批判定的准确性, 以提取出合适长度的序列; 尽管算法的稳健性使得提取批数据的部分序列可以满足合批判定的需求, 但是除了将批数据全部作为样本序列外, 如何提取样本序列使其能够以较少的脉冲完整反应批数据在 PRI 上的分布特点还需要进一步研究。

3.3 合批结果分析

该部分取分选算法给出的 10 批数据, 其中各批数据在 RF、PW 和 PRI 维的代表值(容差为 1 时的均值)在表 1 中给出, 用本文的合批算法对其进行合批, 合批结果在表 2 中给出。

表 1 原始批数据

Table 1 Original batch data

批号	PRI/ μ s	RF/MHz	PW/ μ s
1(PRI 参差)	1 342, 1 217, 1 301, 1 175	3 176	18.5
2(PRI 参差)	1 342, 1 216, 1 300, 1 174	3 172	17.0
3(PRI 参差)	1 340, 1 217, 1 301, 1 174	3 169	19.0
4(PRI 参差)	1 342, 1 217, 1 301, 1 175	3 166	20.0
5(PRI 组变)	129, 134, 157, 166, 170	5 752	3.0, 6.1
6(PRI 组变)	128, 133, 158, 166, 171	5 750	3.1, 5.9
7(PRI 组变)	129, 134, 157, 167, 169	5 749	6.0
8(PRI 编码)	1 568, 1 642, 1 475, 1 600	3 750	0.9
9(PRI 编码)	1 569, 1 641, 1 474, 1 601	3 751	1.0
10(PRI 编码)	1 568, 1 642, 1 475, 1 599	3 749	0.7

表 2 合批后的批数据

Table 2 Data after batching process

批号	PRI/ μ s	RF/MHz	PW/ μ s
1(PRI 参差) 原 1, 2, 3, 4 批	1 342, 1 217, 1 301, 1 175	3 166 ~ 3 176	18.0
2(PRI 组变) 原 5, 6, 7 批	129, 134, 157, 166, 170	5 751	3.1, 6.2
3(PRI 编码) 原 8, 9, 10 批	1 568, 1 642, 1 475, 1 599	3 750	0.8

取匹配容差为 $1 \mu\text{s}$, 合批门限为 0, 按第三部分的合批方法和流程进行合批。合批后的数据第一批为 *PRI* 参差、*RF* 捷变(带宽为 10 MHz)、*PW* 固定的信号形式, 第二批为 *PRI* 组变、*RF* 固定、双脉宽信号形式, 第三批为 *PRI* 编码、*RF* 固定、*PW* 固定的信号形式, 合批结果与实际情况相符。

4 结论与展望

本文借鉴生物信息学中动态规划的思想提出了一种对 *PRI* 周期信号的合批算法, 通过讨论与仿真分析可看出, 对于增批形成的多批数据, 提取出样本序列之后, 利用 *PRI* 的周期性以及本文算法对周期特性的累积效果, 可以较好地适应脉冲丢失、干扰脉冲、序列错位的情况以及 *PRI* 编码的信号形式; 对于批数据不匹配的情况, 累加效果可使其部分得分矩阵总分为很小的负值, 故而可以准确地对合批进行判定。在复杂的电磁环境下, 由于干扰脉冲不具有周期性, 当选取的观察时间较长时, 通过该算法对 *PRI* 周期信号的累积效果, 其合批判定的准确度将更高。

下一步还需要进一步研究的问题主要有合批门限的设定和用于合批判定的样本序列的选取。

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] Hassan H E. Deinterleaving of Radar Pulses in a Dense Emitter Environment[C]//Proceedings of 2003 International Radar Conference. Huntsville, Canada: IEEE, 2003: 389-393.

[3] 孙鑫, 侯慧群, 杨承志. 基于新的特征向量和 Kalman 的复杂体制雷达合批算法[J]. 雷达与对抗, 2010, 30(3): 18-21.

SUN Xin, HOU Hui-qun, YANG Cheng-zhi. A Batching Algorithm Based on New Eigenvectors and Kalman for Radars with Complicated System[J]. Radar & ECM, 2010, 30(3): 18-21. (in Chinese)

[4] Ray P S. A Novel Pulse TOA Analysis Technique for Radar Identification[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3): 716-721.

[5] Hassan H E, Chan F, Chan Y T. Queuing Analysis of the Deinterleaving of Radar Pulses in a Dense Emitter Environment[C]//Proceedings of 2003 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Montreal, Canada: IEEE, 2003: 2015-2020.

[6] Banasiak K, Pieniezny A. SACD Algorithm of Pulse Stream Analysis[C]//Proceedings of 17th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communication. Wroclaw: IEEE, 2007: 1-4.

[7] 黄渊凌, 郑辉, 万坚. 特定辐射源识别的信息论描述[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(6): 125-130.

HUANG Yuan-ling, ZHENG Hui, WAN Jian. Information Theory Description of Specific Emitter Identification[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(6): 125-130. (in Chinese)

[8] Ware P J, McDowall J B. The Application of Pulse Analyser in Passive Sensor Systems[C]//Proceedings of 28th European Microwave Conference. Amsterdam, Netherlands: IEEE, 1998: 560-565.

[9] Ahmadi M, Mohamedpour K. A New Method for Recognizing Pulse Repetition Interval Modulation[C]//Proceedings of 2009 International Conference on Signal Processing Systems. Singapore: IEEE, 2009: 146-151.

[10] 张国柱, 黄可生, 姜文利, 等. 电子对抗系统中雷达情报综合技术研究[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(4): 81-84.

ZHANG Guo-zhu, HUANG Ke-sheng, JIANG Wen-li, et al. Radar Association Algorithm in the Electronic Counter System[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(4): 81-84. (in Chinese)

[11] Latombe G, Granger E, Dilkes F A. Fast Learning of Grammar Production Probabilities in Radar Electronic Support[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 46(3): 1262-1287.

[12] 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 Fast Sorting Algorithm for Radar Signal [D]. Changchun: Aviation University of Air Force, 2011. (in Chinese)

[13] 马爽, 王莹桂, 柳征, 等. 基于序列比对的多功能雷达搜索规律识别方法[J]. 电子学报, 2012, 40(7): 1435-1439.

MA Shuang, WANG Ying-gui, LIU Zheng, et al. A method for Search Scheme Recognition of Multifunction Radars Based on Sequence Alignment[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(7): 1435-1439. (in Chinese)

[14] 唐玉荣. 生物信息学中的序列比对算法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.

TANG Yu-rong. Research on Sequence Alignment Algorithm in Bioinformatics[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)

[15] 沈阳, 陈永光, 李修和. 雷达辐射源识别的多元信息融合算法研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2329-2332.

SHEN Yang, CHEN Yong-guang, LI Xiu-he. Multi-data Fusion Algorithm for Radar Emitter Identification [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(10):2329-2332. (in Chinese)

作者简介:



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

GUAN Yi-fu was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1988. He is now a graduate student. His research concerns radar 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 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.

王晓峰(1987—),男,河北隆化人,2011年于空军航空大学获军事情报学专业硕士学位,现为海军航空工程学院博士研究生,主要研究方向为雷达信号分选与雷达辐射源识别、脉内识别。

WANG Xiao-feng was born in Longhua, Hebei Province, in 1987. He received the M. S. degree from Aviation University of Air Force in 1987. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns radar signal sorting, radar emitter recognition and intra-pulse recognition.