

一种脉冲重复间隔复杂调制雷达信号分选方法

李英达* 肖立志

(空军航空大学信息对抗系 长春 130022)

摘要: 雷达辐射源分选是电子战系统的关键技术之一。为了解决传统的基于脉冲重复间隔(PRI)的分选方法不能有效分选 PRI 复杂调制雷达信号的问题, 该文提出一种利用脉冲到达时间与雷达帧周期的对应关系构成的 2 维特征向量来提取脉冲序列中 PRI 的变化规律, 进而实现 PRI 复杂调制雷达信号分选的新方法。该方法可以在脉冲丢失严重且存在噪声脉冲的情况下获得满意的分选结果, 并利用模拟仿真验证了方法的有效性。

关键词: 雷达信号处理; 信号分选; 脉冲重复间隔; 复杂调制; 2 维特征向量

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2493-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00060

A Method of Signal Sorting for Radar Signal of Pulse Repetition Interval Complex Modulated

Li Ying-da Xiao Li-zhi

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

Abstract: Sorting of radar emitters is a vital technology of the radar countermeasure system. To solve the problem that the traditional methods which are based on the Pulse Repetition Interval (PRI) can not sort the signal of PRI complex modulated effectively, this paper introduces a new method which use two-dimensional feature vector that consists of Time Of Arrived (TOA) with frame period to sort radar signals of PRI complex modulated. Even in noisy environment it can get appropriate accuracy of sorting. Extensive Monte Carlo simulation results indicate the effectiveness of the method.

Key words: Radar signal processing; Signal sorting; Pulse Repetition Interval (PRI); Complex modulation; Two-dimensional feature vector

1 引言

雷达辐射源信号分选是电子战系统的关键技术之一^[1-3]。随着各种新型复杂体制雷达的广泛应用, 雷达信号多采用参差、正弦、排定、组变、抖动等脉冲重复间隔(PRI)调制类型, 这对雷达信号分选技术提出了更高的要求^[4,5]。然而, 目前常用的基于脉冲重复间隔的分选方法中, 扩展关联法^[6,7]、累积差直方图法^[8]、序列差直方图法^[9,10]由于不具备抑制二次及高次谐波的能力^[11], 因此容易产生虚假的辐射源信息。PRI 变换法^[12-15]及其改进算法虽然对脉冲重复间隔固定、抖动和滑变的雷达脉冲信号都有很好的检测效果, 但对其它 PRI 调制类型的信号仍然不适用, 且在存在脉冲丢失的情况下, 分选结果并不理想。

针对上述问题, 本文提出通过改进扩展关联这一经典算法, 建立由侦收到的每一个脉冲信号的到

达时间与其所属雷达帧周期之间的对应关系构成的 2 维特征向量, 利用该 2 维特征向量实现信号分选的新方法, 并得到了满意的效果。该算法能够有效地抑制扩展关联法中所产生的谐波, 并且在存在脉冲丢失和噪声脉冲的条件下, 仍能实现对 PRI 复杂调制雷达信号的准确分选。

2 扩展关联法

扩展关联法是一种经典的基于脉冲重复间隔的信号分选方法, 其基本原理是: 首先, 在脉冲序列中任选一个脉冲作为基准脉冲。然后, 试探性地选择另一个脉冲作为参考脉冲, 将两者之间的到达时间差记为准 PRI, 利用准 PRI 逐个对脉冲流进行扩展关联, 若能够连续关联到的脉冲个数大于成功分选所需的脉冲个数, 则认定为已确定出一个雷达脉冲序列, 并随之进行脉冲抽取。最后, 重新选取基准脉冲和参考脉冲, 重复以上过程直至分选完成。

传统的扩展关联法其优点是原理简单, 易于实现, 在已知辐射源特性参数的情况下, 可以大大降低算法的计算复杂度, 其缺点是难以准确选取准

PRI, 且仅适用于 PRI 固定雷达, 对于 PRI 复杂调制雷达信号无法实现分选, 虚警现象严重, 在脉冲丢失严重且存在大量噪声脉冲的情况下, 分选准确率较低。

3 2 维特征向量提取算法

设用脉冲前沿的时间来表示脉冲的到达时间 (TOA)。令 $t_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 为脉冲的到达时间, 其中 N 为采样脉冲数。在只考虑将 TOA 作为分选参数的情况下, 采样脉冲串则可以模型化为单位冲激函数的和

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

通过对大量实际侦测到的脉冲序列深入分析可知, 除干扰脉冲外, 脉冲序列中其余的每一个脉冲都对应于某一部雷达, 并以某一脉冲作为参考脉冲, 其对应雷达的帧周期作为准 PRI 在时间上向前(或向后)进行匹配关联时, 可以关联到的脉冲个数多于以其它准 PRI 关联得到的脉冲个数。图 1 是子 PRI 分别为 P_1, P_2, P_3 的三参差雷达信号脉冲序列, P 为参差雷达的帧周期。从图中可以得知, 若取脉冲序列中某一脉冲作为基准脉冲, 以帧周期 P 为准 PRI 进行匹配关联时能够匹配到的脉冲个数最多。因此, 为全面描述脉冲列中蕴含的 PRI 变化规律, 本文利用脉冲序列的这一特点, 建立脉冲到达时间与其所属雷达帧周期之间的对应关系构成的 2 维特征向量, 通过该 2 维特征向量进行信号分选。

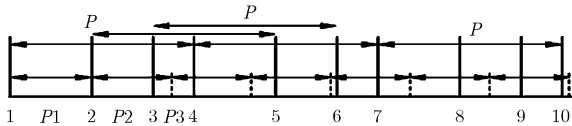


图 1 三参差雷达信号脉冲序列

建立函数

$$f(\text{TOA}_m, \text{PRI}_{nm}) = \sum_{u=-A}^B g[\text{TOA}_m + u\text{PRI}_{nm}] \quad (2)$$

式中 $\text{TOA}_m (m = 1, 2, \dots, N)$ 为脉冲列中第 m 个脉冲的到达时间; PRI_{nm} 为交迭脉冲列中可能存在的 PRI, 即 $\text{PRI}_{nm} = \text{TOA}_n - \text{TOA}_m (n > m)$; A 和 B 分别表示以准 PRI 向前和向后关联的次数, 即 $A = \text{ceil}((\text{TOA}_m - \text{TOA}_1) / \text{PRI}_{nm})$ 和 $B = \text{ceil}((\text{TOA}_N - \text{TOA}_m) / \text{PRI}_{nm})$, 函数 $\text{ceil}(x)$ 为上取整。

令 $[\text{PRI}_{\min}, \text{PRI}_{\max}]$ 为所研究雷达帧周期的范围, 只有准 PRI 在此范围内时才进行匹配关联, 并且在以 $\text{TOA}_m (m = 1, 2, \dots, N)$ 时刻的脉冲为参考脉冲, PRI_{nm} 为准 PRI 进行匹配关联时, 若

$\text{TOA}_m + u\text{PRI}_{nm} (u = -A, -A + 1, \dots, B)$ 时刻存在脉冲, 则记为匹配到一个脉冲。这样既可以克服测量误差和噪声对分选算法产生的影响, 同时也可减少算法的计算量, 使算法适应当前复杂的电磁环境。

分别以到达时间 $\text{TOA}_m (m = 1, 2, \dots, N)$ 为参考脉冲, 提取可使函数 f 匹配到的脉冲个数最多的 PRI_{nm} , 即为该脉冲所属雷达的帧周期, 记为 FP_m 。构建 2 维特征向量 $(\text{TOA}_m, \text{FP}_m)$, 将向量中相同的 FP_m 值所对应的脉冲视为同属于一部雷达的脉冲信号, 若其脉冲个数大于成功分选所需的最小脉冲个数 λN 时, 则进行脉冲抽取, 进而完成信号分选。其中 λ 为可变因子, 经过 1000 次 Monte Carlo 仿真实验得出 λ 一般取 3%~4%。具体分选流程如图 2 所示。

4 仿真实验

本文的仿真环境: Windows XP, Intel CPU Q8200, 1 GB 内存, 编程工具为 MATALAB7.0。

为了验证本文方法的有效性, 选取 4 种典型 PRI 调制类型的雷达辐射源信号进行仿真实验, 调制类型和具体参数如表 1 所示。其中, 雷达 3 在一个调

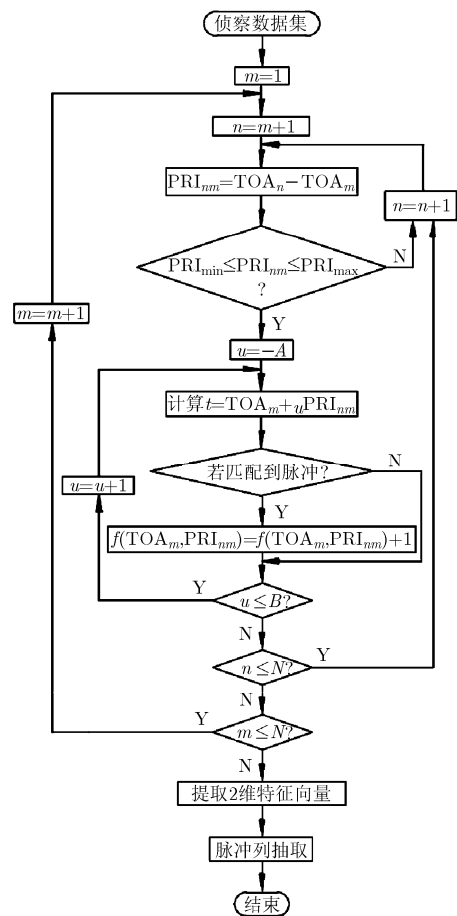


图 2 本文算法流程图

表 1 雷达信号参数

雷达序号	PRI 调制类型	PRI 中心值 (μs)	帧周期 (μs)	脉冲个数
雷达 1	固定调制	96	96	200
雷达 2	参差调制	110,73,99	282	200
雷达 3	正弦调制	105	840	200
雷达 4	排定调制	81,128,101,91 115,70,88,120	794	200
噪声脉冲	-	-	-	200

制周期内包含 8 个调制脉冲，并给定所研究雷达帧周期的范围为 [90, 1000]，噪声脉冲的到达时间在观测时间段内随机分布。

为验证本文算法相对于其它传统算法在 PRI 复杂调制雷达信号分选方面的优越性，本文分别采用 2 维特征向量提取算法及经典的改进 PRI 变换算法在两种不同情况下进行仿真实验。仿真中，2 维特征向量提取算法中 λ 的取值为 3.5%，改进 PRI 变换中各参数的取值分别为： $K = 5000$ ， $\zeta_0 = 0.03$ ， $\alpha = 0.3$ ， $\beta = 0.15$ ， $\gamma = 3$ 。

模拟理想情况下，脉冲序列中不存在脉冲丢失及噪声脉冲，仿真结果如图 3 所示。图 3(a)中“*”表示的是对于同一雷达帧周期所关联到的脉冲个数不满足成功分选所需最小个数的脉冲，不对其进行抽取，视为噪声。由图 3(a)可知，本文算法在雷达辐射源个数未知的情况下，能够准确地将 4 部雷达信号的帧周期提取出来，然后依据 2 维特征向量中脉冲到达时间与其所属雷达帧周期的对应关系准确地将信号分选出来。由图 3(b)可知，改进 PRI 变换算法能够有效地将 PRI 固定雷达信号检测出来，但其它 PRI 调制类型的信号淹没在噪声中，无法得到有效的分选结果。

模拟真实情况下，脉冲序列中存在 15%的脉冲

丢失以及 200 个噪声脉冲，仿真结果如图 4 所示。由图 4(a)可知，本文算法在脉冲丢失严重且存在大量噪声脉冲的情况下，仍能够准确地将 4 部雷达信号的帧周期提取出来，得到满意的分选结果。由图 4(b)可知，改进 PRI 变换算法在将 PRI 固定雷达信号检测出来的同时，在 PRI 为 484.8 μs 处产生错误检测，无法得到有效的分选结果。

综上所述，本文算法在雷达个数未知且脉冲序列中存在大量噪声脉冲和脉冲大量丢失的情况下，仍能够对 PRI 复杂调制雷达信号进行分选，且分选结果明显优于其它传统分选算法，具体分选结果如表 2 所示。

为验证本文算法中选取的成功分选所需最小脉冲个数 λN 的有效性，本文分别仿真生成由 4 部、5 部、6 部、7 部雷达信号组成的脉冲序列，并采用本文算法分别对生成的脉冲序列进行分选。如图 5 所示，当 λ 取值过小时，分选出的雷达个数将呈指数形式增长，而当 λ 取值过大时，分选出的雷达个数呈逐级递减形式。在 λ 取值为 3%~4%时，均能够准确地将每部雷达信号分选出来，并有效滤除噪声脉冲。因此，采用本文所给定的成功分选所需最小脉冲个数能够满足分选条件。

5 结束语

本文提出了一种利用脉冲到达时间与雷达帧周期构成的 2 维特征向量来提取蕴含在脉冲序列中的 PRI 变化规律，进而实现 PRI 复杂调制雷达信号分选的新方法。该方法有效解决了传统信号分选方法对 PRI 复杂调制雷达信号分选能力较差的问题，且能够在存在大量噪声脉冲和脉冲丢失严重的情况下，得到满意的分选结果。因此，本文提出的方法符合工程实现的需求，在工程应用上具有一定的现实意义。

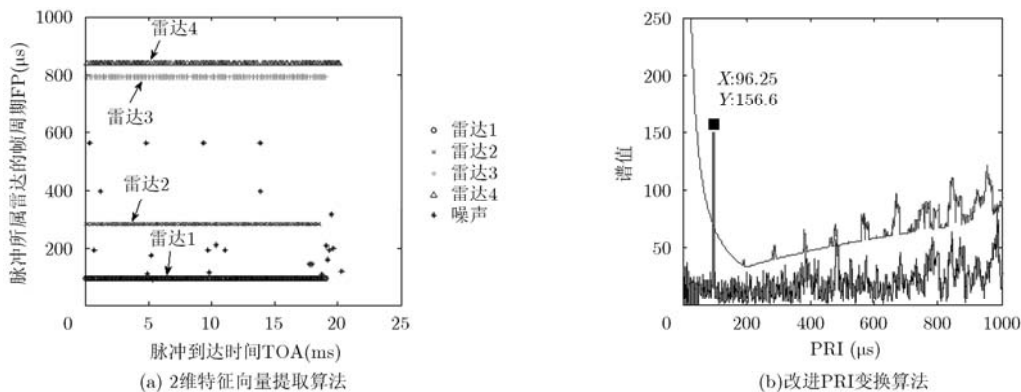


图 3 模拟理想情况下的分选结果

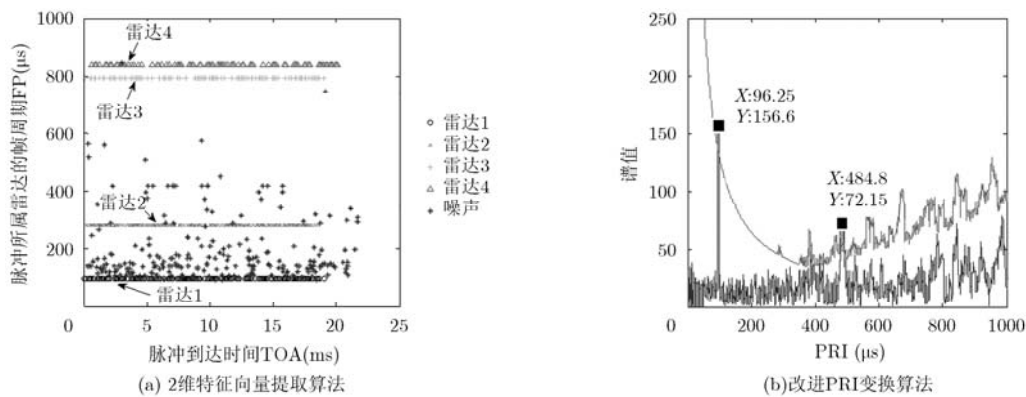


图4 模拟真实情况下的分选结果

表2 不同情况下分选结果对比

雷达序号	模拟理想情况下				模拟真实情况下			
	脉冲个数	分选脉冲数	准确分选	准确率(%)	脉冲个数	分选脉冲数	准确分选	准确率(%)
雷达1	200	199	199		168	166	163	
雷达2	200	196	193		171	164	158	
雷达3	200	189	185	95.7	163	155	149	92.6
雷达4	200	193	189		175	169	157	
统计	800	777	766		677	654	627	

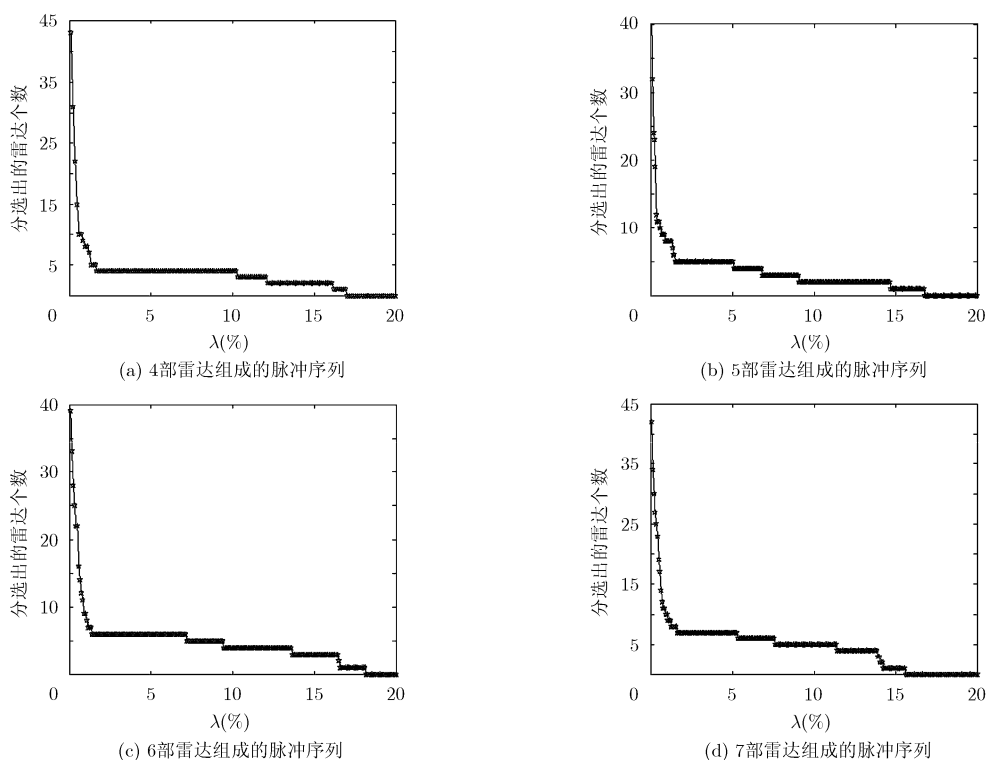


图5 不同λ取值下所分选出雷达个数

参考文献

[1] 柴娟芳, 司锡才, 马晓东. 基于PRI谱的双门限雷达信号分选算法及其硬件平台设计[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(1):

38-43.

Chai Juan-fang, Si Xi-cai, and Ma Xiao-dong. Double-threshold PRI sorting algorithm based on PRI spectrum and

- its sorting platform design[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, 24(1): 38-43.
- [2] 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 Hong-le, Wang Chao, and Wang Peng. Pulse signals deinterleaving algorithm based on PRI transform[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2012, 41(2): 34-38.
- [3] 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 Peng, Pan Yi-chun, Yu Chun-lai, et al. A novel sorting method of radar signal based on spectrum analysis[J]. *Command Control & Simulation*, 2012, 34(2): 109-113.
- [4] 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 Xin-xing and Wang Yong. Radar signal sorting method based on online kernel clustering[J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(3): 270-275.
- [5] 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 Bo, Liu Pei-guo, and Xue Guo-yi. A radar signal sorting algorithm based on adaptive tolerance[J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(15): 22-24.
- [6] 周政, 唐宏, 张永顺. 基于 PRI 的参差雷达脉冲列分选方法[J]. 现代防御技术, 2009, 37(5): 123-126.
- Zhou Zheng, Tang Hong, and Zhang Yong-shun. Algorithm for sorting stagger pulse series based on PRI[J]. *Modern Defence Technology*, 2009, 37(5): 123-126.
- [7] 李国君, 舒洪, 赵栋华. 一种改进的动态关联信号分选算法[J]. 雷达科学与技术, 2011, 12(6): 547-550.
- Li Guo-jun, Shu Hong, and Zhao Dong-hua. An improved dynamic association signal sorting algorithm[J]. *Radar Science and Technology*, 2011, 12(6): 547-550.
- [8] 黄桂根, 傅有光, 武月婷. 一种改进的基于 DTOA 统计的信号分选算法[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(4): 430-435.
- Huang Gui-gen, Fu You-guang, and Wu Yue-ting. Improved radar signal deinterleaving algorithm based on DTOA histogram[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2011, 26(4): 430-435.
- [9] 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 Bo, Liu Pei-guo, and Xue Guo-yi. An improved method for radar signal sorting based on SDIF histogram algorithm[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2012, 35(1): 6-10.
- [10] 王世强, 张登福, 毕笃彦, 等. 基于快速支持向量聚类 and 相似熵的多参雷达信号分选方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2735-2741.
- Wang Shi-qiang, Zhang Deng-fu, and Bi Du-yan, 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.
- [11] 韩俊, 何明浩, 朱元清, 等. 基于多参数的雷达辐射源分选新方法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(1): 91-94.
- Han Jun, He Ming-hao, and Zhu Yuan-qing, et al. Sorting of radar emitter based on multi-parameters[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, 24(1): 91-94.
- [12] Ala Mahdavi and Amir Mansour Pezeshk. A fast enhanced algorithm of PRI transform[C]. 2011 Sixth International Symposium on Parallel Computing in Electrical Engineering, Luton, 2011: 179-184.
- [13] 罗长胜, 吴华, 程嗣怡. 一种对重频调制与抖动信号的 PRI 变换分选新方法[J]. 电讯技术, 2012, 52(9): 1492-1496.
- Luo Chang-sheng, Wu Hua, and Cheng Si-yi. A new method for sorting PRI modulated and jittered pulse signal based on PRI transformation[J]. *Telecommunication Engineering*, 2012, 52(9): 1492-1496.
- [14] 雍霄驹, 张登福, 王世强. 一种新的雷达辐射源分选算法[J]. 现代防御技术, 2011, 39(3): 148-151.
- Yong Xiao-ju, Zhang Deng-fu, and Wang Shi-qiang. A new method of sorting radar emitter signals[J]. *Modern Defence Technology*, 2011, 39(3): 148-151.
- [15] 韩卫国, 胡进, 倪静静. 基于 PRI 谱内特征的参差雷达信号分选算法研究[J]. 雷达与对抗, 2011, 31(2): 39-42.
- Han Wei-guo, Hu Jin, and Ni Jing-jing. A study on signal sorting algorithm based on PRI spectrum signatures for staggered radars[J]. *Radar & ECM*, 2011, 31(2): 39-42.
- 李英达: 男, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理、电子对抗.
- 肖立志: 男, 1965 年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、电子对抗.