

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.04.013

引用格式:贺文娇.基于特征值和灰度关联的双机关联定位[J].电讯技术,2016,56(4):424-429.[HE Wenjiao. Dual-aircraft correlation and localization based on characteristic value and gray correlative degree[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(4):424-429.]

基于特征值和灰度关联的双机关联定位*

贺文娇**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:针对双机协同对多目标进行定位跟踪的应用背景,研究了不同侦察平台、不同侦察传感器测向数据的关联和定位问题,提出了一种双机实时关联定位方法。该方法利用各类传感器的关联特征要素建立双机同类型传感器的数据关联模型,利用 B 型灰色关联度的纯方位关联算法建立同机不同类型传感器的关联矩阵,结合目标身份信息进行测向结果关联,对关联上的测向结果进行提纯、滤波和交叉定位,最后得到目标定位结果。仿真试验结果证明了该方法的有效性。

关键词:无源定位;多目标跟踪;双机协同侦察;数据关联

中图分类号:TN971 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)04-0424-06

Dual-aircraft Correlation and Localization Based on Characteristic Value and Gray Correlative Degree

HE Wenjiao

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: For multi-target localization and tracking by dual-aircraft cooperation, this paper researches the problem of different reconnaissance platform and different sensors' data for correlation and localization, and proposes a real-time localization method using two aircrafts. The method builds a correlation model with sensors' characteristics for the same type sensors installed on different aircraft, and a gray correlation grade matrix by B-gray correlation analysis for the different sensors installed on the same aircraft. With the target identity information, it purifies and filters the correlation data for direction of arrival (DOA) localization, and finally gets the target localization. The simulation results demonstrate the effectiveness of this method.

Key words: passive localization; multi-target tracking; dual-aircraft cooperation reconnaissance; data correlation

1 引言

多平台无源定位技术是研究最多也是使用最广泛的一种定位技术。多机动平台协同定位能够提高定位精度,解决对动目标的定位和跟踪问题。机动侦察平台由于受使用成本、天气、航管等因素的影响,使用两架以上的飞机对同一区域进行监视的可能性较小,大多是双机协同侦察,比较常见的工作模式有双有人机协同、有人/无人机协同、双无人机协

同等。

双机在同一区域内执行协同侦察任务,同时对协同侦察任务中携带的协同侦察信号列表进行控守测向,双机的测向结果汇聚后进行关联和定位,得出定位结果。

对双机多传感器多目标侦测数据的关联一直是双机协同定位的研究重点,尤其针对复杂电磁环境下的密集运动目标的关联,难度很大。文献[1]介

* 收稿日期:2015-11-10;修回日期:2016-02-29 Received date:2015-11-10;Revised date:2016-02-29

** 通信作者:tairan2732@163.com Corresponding author:tairan2732@163.com

绍的方法适用于雷达信号侦察传感器之间的目标关联,但没有考虑其他类型信号侦察的情况。文献[2]介绍了同平台不同传感器纯方位关联的情况,提出的算法对航迹质量较高的情况下关联置信度较高,对被动传感器的关联置信度较低。本文在灰关联的基础上,增加了目标身份特征关联,提高关联可信度。

本文重点研究双机同类型传感器数据的关联模型、同机不同类型传感器的关联方法以及消除因飞机姿态、观测角等原因造成的测向误差的方法,提高双机定位精度。

2 测向结果关联

测向结果关联是双机多传感器定位技术的核心内容,如果测向结果关联的结果错误,那么后期无论使用什么样的算法,定位结果自然都不会正确。

在双机协同定位过程需要用到的测向结果关联包含两大类:双机同类型传感器测向结果关联和同机不同类型传感器测向结果关联。在实时处理系统中,这两种关联方法均属于同一时间关联,即关联双方的测向时间要在同一时间段内。双机关联还要求协同的双机之间的距离不超过各自传感器的探测距离之和。

2.1 双机同类型传感器测向结果关联

双机同类型传感器的测向结果关联以特征级关联为主、出现时间和区域位置关联为辅,这就需要研究不同传感器得到的信号特征。

雷达信号侦察传感器系统在侦察过程中能够快速分析得到雷达信号的特征参数,包括载频、重频、脉宽和脉内特征。关于雷达信号关联的特征要素,国内外的研究已经非常多,普遍认为通过雷达的载频、重频、脉宽3个参数^[1]能够达到较好的关联效果,尤其是双机协同侦察的情况下,关联结果是非常可靠的。

由于侦察方接收到的雷达信号的频率存在多普勒频率^[3],就是雷达接收到的频率与发射频率之差,需要考虑在关联前是否消除这个频移的影响。多普勒频率 f_d 为

$$f_d = \frac{2v(t) \cos\gamma(t)}{c} f_r. \quad (1)$$

式中: f_r 为雷达信号频率; c 为光速; $v(t)$ 表示 t 时刻目标的运动速度; $\gamma(t)$ 表示 t 时刻目标运动方向与径距的夹角。令 $v_r = v(t) \cos\gamma(t)$ 为雷达对目标的径

距变化率,则有

$$f_d = \frac{2v_r}{c} f_r. \quad (2)$$

设侦察的对象为小功率雷达(频率10 GHz),海面目标的最大运动速度不超过30 m/s,则 v_r 的最大值为+30 m/s,最小值为-30 m/s, $f_r = 10$ GHz,代入公式(2)得 f_d 最大值为2 kHz,最小值为-2 kHz,远小于雷达信号接收机的测频精度。因为被测目标运动产生的多普勒频移在雷达信号接收机的测频误差范围之内,在关联之前,不需要考虑多普勒频移修正的问题,否则,就需要在关联前进行多普勒频移修正。

常规通信信号的关联,国内外的研究也非常多,常用的关联特征包括信号类型、调制方式、带宽、调制频率等^[4]。跳频通信信号的关联特征主要包括跳频速率、跳频周期、调制方式等^[5]。通信信号还能通过对信息层的解译,得到内涵信息,利用这些信息进行关联的准确度非常高。故我识别信号的关联特征包括目标地址码、信号的频率、脉冲描述字、信号模式等。

不同的传感器得到的信号特征各不相同,关联特征也不相同,因此需要建立一个统一的关联模型。

设 P_i 为第 i 个关联要素的权重值,表示该要素对关联的贡献度, $\sum_{i=0}^N P_i = 1$ 。总的关联度 $R = \sum_{i=0}^N B_i P_i C_i$ 。其中: B_i 为布尔型,1表示该要素项的值有输入,0表示接收到的关联数据不包括该要素项的值; C_i 为该项的特征值与待比对目标该项特征值的相似度, $C_i < 1$; R 大于阈值,即可认为相关。

2.2 不同类型传感器测向结果的关联

多种侦察传感器共址安装在同一侦察平台,具有在时空校准方面的先天优势。多传感器的侦测数据关联可以提高对目标发现的概率和目标识别的准确度。

由于多传感器探测的目标参数类别各不相同,因此关键的问题就是要把这些异类的情报素材建立统一的相关性度量。比如雷达信号和通信信号,装载有雷达传感器的目标,大多数都配备有通信电台,这两种手段的统一的相关性度量主要是信号的出现时间、方位。

利用目标身份对异构信息进行关联,可信度非常高,这种情况适用于对常规监视目标和常规侦察区域内的有知识积累的目标进行侦察,身份确认之

后,利用多种手段对该目标进行跟踪监视,掌握目标的活动规律和行为状态。

在实时处理系统中,对关联的效率要求非常高,而大多数关联算法都需要将目标两两进行比较从而得到关联结果,难以满足实时系统的要求。为了提高系统的效率,当目标数量大于一定个数后,在使用关联算法之前,需要对数据进行预关联,如果目标数量较少,则直接进行关联。本文采用网格划分^[6]的方法对数据进行预关联,根据信号的出现时间、方位进行网络划分,再对每个网格内的目标进行关联。

对网格内的目标,能确认身份的首先按身份进行关联。对不能确认身份的目标,如果是不同侦测平台,那么先将同一平台的测向结果进行定位计算,再将双机的定位结果根据位置进行关联;如果是同一侦测平台,则按照测向线的示向度变化率进行关联,采用纯方位 B 型灰度关联算法^[2]。

下面介绍灰度关联的具体步骤。

传感器 1 观测到参考目标的示向度为

$$Y_0 = (y_0(1), y_0(2), \dots, y_0(N)) \quad (3)$$

式中: $y_0(j)$ ($j=1, 2, \dots, N$) 为传感器 1 所探测到参考目标第 j 个测向结果; N 为测向线条数。

传感器 2 观测到 S 个目标的示向度为

$$X_k = (x_k(1), x_k(2), \dots, x_k(M)), k=1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中: $x_k(j)$ ($j=1, 2, \dots, M$) 为传感器 2 所探测到的在第 j 个采样周期对第 k 个目标的测向结果, $x_k(j) \in [0^\circ, 360^\circ]$ 。

计算传感器 1 的参考目标与传感器 2 观测到的 S 个目标之间的灰色关联度:

$$\bar{d}_{0j}^{(0)} = \sum_{k=1}^N |y_0(k) - \bar{x}_j(k)| \quad (5)$$

$$\bar{d}_{0j}^{(1)} = \sum_{k=1}^{N-1} |y_0(k+1) - \bar{x}_j(k+1) - y_0(k) + \bar{x}_j(k)| \quad (6)$$

$$\bar{d}_{0j}^{(2)} = \sum_{k=2}^{N-1} \left| \begin{matrix} [\bar{y}_0(k+1) - \bar{x}_j(k+1)] - \\ 2[\bar{y}_0(k+1) - \bar{x}_j(k)] + \\ [\bar{y}_0(k-1) - \bar{x}_j(k-1)] \end{matrix} \right| \quad (7)$$

则传感器 1 的参考目标与传感器 2 的第 j 个目标的 B 型灰关联度为

$$\gamma(\bar{Y}_0, \bar{X}_j) = \frac{1}{1 + \frac{1}{N} \bar{d}_{0j}^{(0)} + \frac{1}{N-1} \bar{d}_{0j}^{(1)} + \frac{1}{N-2} \bar{d}_{0j}^{(2)}}, \quad j=1, 2, \dots, M \quad (8)$$

式中: $\bar{d}_{0j}^{(0)}$ 、 $\bar{d}_{0j}^{(1)}$ 与 $\bar{d}_{0j}^{(2)}$ 分别是描述相似性的状态差、一阶斜率差和二阶斜率差,三者共同反映序列间的

相关联程度。显然, $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.62 & 0.017 \\ 0.12 & 0.72 \end{bmatrix}$; $\bar{d}_{0j}^{(1)} \geq 0$; $\bar{d}_{0j}^{(2)} \geq 0$; 当比较序列 X_i 与参考序列 X_0 完全相等时, 有 $\bar{d}_{0j}^{(0)} = \bar{d}_{0j}^{(1)} = \bar{d}_{0j}^{(2)} = 0$; 当比较序列 X_i 与参考序列 X_0 相差最大时, $\frac{1}{N} \bar{d}_{0j}^{(0)} = \frac{1}{N-1} \bar{d}_{0j}^{(1)} = \frac{1}{N-2} \bar{d}_{0j}^{(2)} = 360$, 故 B 型关联度 $\gamma(\bar{Y}_0, \bar{X}_j) \in [0.0009, 1]$ 。

构建灰色关联矩阵

$$\mathbf{R} = [r_{11} \dots r_{1M}]_M \quad (9)$$

式中: $r_{0j} = \gamma(\bar{Y}_0, \bar{X}_j)$, $j=1, 2, \dots, M$ 。

计算 λ -截灰关联阵即 \mathbf{R}_λ 。 \mathbf{R} 中的元素 r_{0j} 反映了传感器 1 的参考目标与传感器 2 第 j 个目标关联的可能性, r_{0j} 越大表明两个目标关联上的可能性越大。因此,可以认为关联可能性小于 λ 的航迹对是不相关的。可设 $0 < \lambda < 1$, 考虑被动传感器的测向误差,这里给定 $\lambda = 0.6$, 计算 λ -截航迹灰色关联矩阵 \mathbf{R}_λ :

$$\mathbf{R}_\lambda = [r_{0j}^\lambda]_M \quad (10)$$

$$\text{式中: } r_{0j}^\lambda = \begin{cases} r_{0j}, & r_{0j} \geq \lambda \\ 0, & r_{0j} < \lambda \end{cases}, \quad j=1, 2, \dots, M。$$

3 多传感器侦察信号定位技术

对关联上的目标的测向结果进行定位计算,首先要进行数据提纯,提纯的主要依据是测向线的聚合度,剔除发散的测向线,保留聚合程度高的测向线,具体步骤见图 1。

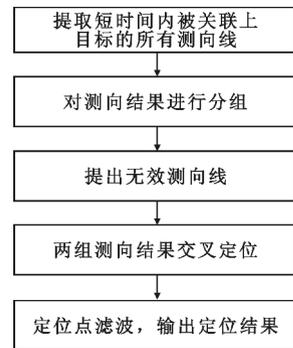


图 1 定位计算步骤
Fig. 1 Localization steps

其中,对测向结果进行分组的原则为:同一载机平台的测向线,测向角度较大的为一组,测向角度较小的为一组;不同载机平台的测向线,同一平台的为一组。具体步骤如下:

(1) 判断载机平台的个数,如果载机平台个数

大于 1, 继续步骤 2, 否则, 转至步骤 3;

(2) 根据载机平台编号对每一个测向线进行分组, 编号相同的为一组;

(3) 根据测向角度大小进行分组, 首先通过排序, 得到最大测向角度 θ_{\max} 和最小测向角度 θ_{\min} ;

(4) 轮询每一条测向线, 计算测向角度 θ 更靠近最大值还是最小值, 如果 $|\theta_{\min} - \theta| > |\theta - \theta_{\min}|$ 成立, 那么将该测向线分到第一组, 否则, 分到第二组。

剔除无效测向线的步骤如下:

(1) 将第一组中的每一根测向线 m_i 与第二组中的所有测向线 n 进行三角交叉定位计算, 得到一组定位点迹;

(2) 从这一组定位点迹中找到周围点迹最为密集的定位点位置, 作为第一组的一个定位点 p_i , 具体为: 给每一个定位点设置计数器, 统计与该点相距一定范围内的定位点个数; 计算每一个定位点与本组得到的其他所有定位点之间的距离, 如果距离值小于门限, 则将计数器加 1; 取计数值最大的定位点作为本组最密集的定位点输出;

(3) 第一组所有测向线计算完毕后得到 m 个定位点, 再用卡尔曼滤波算法, 对这 m 个定位点迹进行收敛, 得到一个定位结果 p ;

(4) 将 p_i 与 p 进行距离计算, 距离超过阈值的定位点认为是非值点, 将第一组测向线中得到非值点的测向线 m_i 剔除;

(5) 同理, 采用这种办法将第二组测向线中的无效线进行剔除。

将提纯后的两组测向线进行定位, 得到 $m' \times n'$ 个定位点, 再将这组定位点进行卡尔曼滤波, 得到一个定位结果并最终输出。

目前国内外研究得到定位算法非常多, 但是不管哪一种定位算法的定位精度都很大程度上取决于测向精度, 因此测向线提纯效果很大程度上决定了定位效果。实践证明, 采用测向线与定位点迹双重滤波的方式得到的定位精度最高, 计算效率和提纯精度能够满足传感器实时快速定位的要求。

通过滤波处理, 可以实现对定位结果的优化, 提高定位精度。

4 试验结果

4.1 双机同类型传感器测向结果关联试验

仿真场景想定两架侦察机对两架搭载有雷达辐

射源的无人机进行侦察, 两架无人机从一个机场起飞, 沿着相反的轨迹飞行。两架侦察机在同一时间段内得到的雷达信号测向结果如图 2 所示。其中蓝色为主机测向线, 黄色为从机测向线, 1 和 2 分别表示两架无人机的航迹。两架侦察机通过侦察各自得到两个目标, 其信号特征参数如表 1 所示。

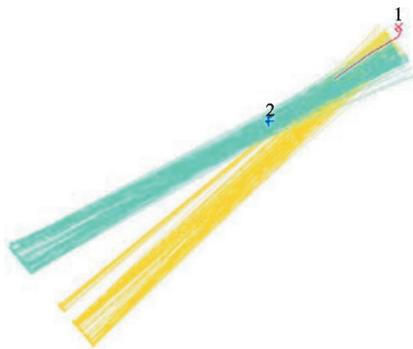


图 2 接收到的双机雷达信号测向结果
Fig. 2 The azimuth measurement by different radar sensor in two aircraft

表 1 双机得到的目标信号特征参数
Tab. 1 Signal characteristic parameters for target investigated by both aircrafts

飞机平台	目标编号	载频/MHz	重频/ μs	脉宽/ μs
主机	1	1 255.00	3 130.10	5.90
主机	2	1 229.84	668.56	30.07
从机	1	1 257.00	3 130.00	6.00
从机	2	1 229.98	665.00	29.96

建立雷达信号关联模型, 计算双机目标间的关联度。

关联度 $R = \sum_{i=0}^3 B_i P_i C_i$, 3 个特征参数都有值, 有 $B_1, B_2, B_3 = 1$, 设权重 $P_1 = 0.4, P_2 = 0.4, P_3 = 0.2$, 则有

$$R = 0.4C_1 + 0.4C_2 + 0.2C_3。$$

设关联度阈值为 f_T , 取载频阈值为 5 MHz, 重频阈值为 3 μs , 脉冲阈值为 0.2 μs , 两个特征值之差的绝对值为 f_{abs} , 计算特征值的相似度 C_i :

$$C_i = \begin{cases} 1.0, & f_{\text{abs}} < f_T \\ (2f_T - f_{\text{abs}}) / f_T, & f_{\text{abs}} < 2f_T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

通过计算得到双机目标的特征关联度如表 2 所示。

表 2 特征关联度计算结果

Tab.2 Results of characteristics correlative degree

目标	从机目标 1	从机目标 2
主机目标 1	1	0.000
主机目标 2	0	0.925

设关联度阈值为 0.8,得到主机目标 1 和从机目标 1 相关,主机目标 2 和从机目标 2 相关,与仿真一致,如图 3 所示。

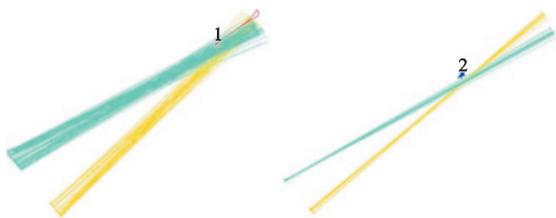


图 3 双机同类型传感器测向线关联结果
Fig.3 The correlation result for the same sensor placed on different aircraft

4.2 不同类型传感器测向结果关联试验

设某侦察机搭载有两种不同类型的传感器,跟踪两个目标,各自得到两组测向结果。假定不能判定目标身份,利用时空信息对测向结果进行网格划分,利用灰关联算法计算同一网格内两种传感器目标的灰关联度。

计算两个传感器探测目标的灰色关联矩阵,结果见表 3。

表 3 灰色关联矩阵

Tab.3 Matrix of gray correlative degree

传感器 1	传感器 2	$\bar{d}_{ij}^{(0)}$	$\bar{d}_{ij}^{(1)}$	$\bar{d}_{ij}^{(2)}$	λ
目标 1	目标 2	5.10	2.01	0.150	0.620
目标 1	目标 1	98.60	16.40	16.400	0.017
目标 2	目标 1	87.86	34.18	34.180	0.120
目标 2	目标 2	1.20	0.23	0.021	0.720

得到灰色关联矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.62 & 0.017 \\ 0.12 & 0.72 \end{bmatrix},$$

关联度阈值为 0.6,得到传感器 1 的目标 1 与传感器 2 的目标 1 相关,传感器 2 的目标 2 与传感器 2 的目标 2 相关。

4.3 定位试验

经过第一轮滤波后,将第一组的两条测向误差较大的测向线剔除,再对第二组测向线提纯,如图

4~6所示。

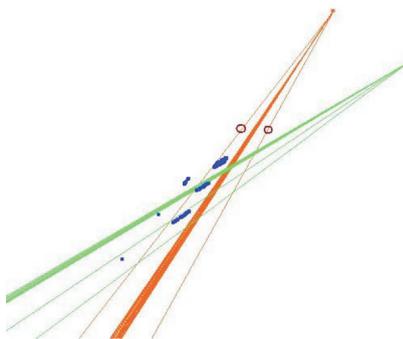


图 4 第一组测向线提纯
Fig.4 Purification for the first group lines

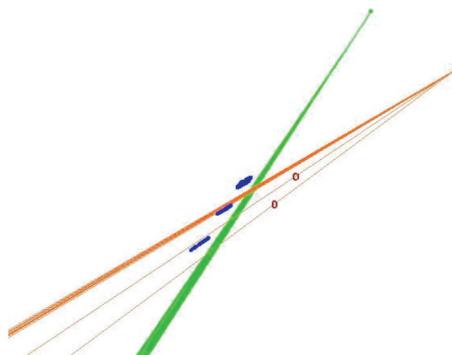


图 5 第二组测向线提纯
Fig.5 Purification for the second group lines

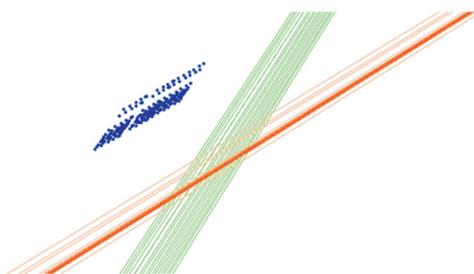


图 6 提纯后的测向线进行交会定位
Fig.6 Pure Lines to localization

将提纯后的测向线进行定位计算得到的定位点迹,对这组定位点迹再次滤波,收敛得到一个定位点,如图 7 所示。

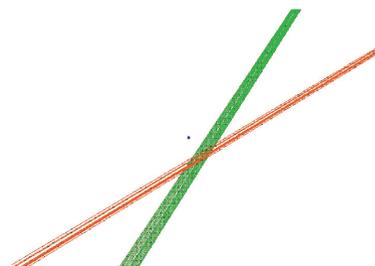


图 7 输出最终定位结果
Fig.7 Export the final localization result

计算该定位点距离两架飞机的距离,不超过双机的侦察范围,认为该位置点可信,直接输出。

利用该定位方法对 4.1 节中双机协同侦察试验得到的目标 1 的关联对作定位计算,得到定位点迹如图 8 所示。从图中可看出,定位点与目标运动轨迹之间误差满足要求。

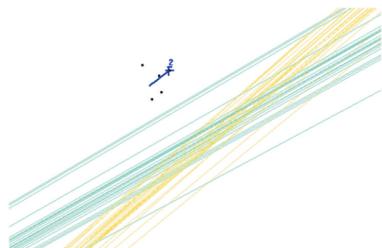


图 8 目标 1 定位点迹(黑色圆点表示)
Fig. 8 Localizations for the first target

5 结束语

本文介绍了双机协同对多目标进行实时关联和定位的方法和步骤,并利用仿真数据进行了验证。该方法在复杂电磁环境下对多目标的关联和跟踪能够满足实时要求,利用信号特征得到的关联模型可支持目标识别,得到目标身份信息,进一步提高目标关联的可信度。B 型灰关联算法对主动手段获取的目标航迹关联效果较好,针对被动手段获取的目标方位关联效果较差,实际使用过程中,主要用于辅助目标身份关联,用作关联对的初判。该方法解决了对动目标的跟踪问题,具有非常高的实用价值,同样适用于侦察车、侦察船等机动侦察平台的双站协同定位。

参考文献:

[1] 王杰贵,罗景青. 基于多目标多特征信息融合数据关联的无源跟踪方法[J]. 电子学报,2004,32(6):1014-1016.
WANG Jiegui, LUO Jingqing. Passive tracking based on data correlation with information fusion of multi-feature and multi-target[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6):1014-1016. (in Chinese)

- [2] 黄友澎,周永丰,谭秀湖,等. 基于 B 型灰色关联度的纯方位航迹关联算法[J]. 武汉理工大学学报,2009,33(5):989-991.
HUANG Youpeng, ZHOU Yongfeng, TAN Xiuhu, et al. Bearings-only track correlation algorithm based on gray correlative degree of B-mode[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 33(5):989-991. (in Chinese)
- [3] 汪日平. 雷达数据关联及融合算法研究[D]. 无锡:江南大学,2009.
WANG Riping. Research on radar data correlation and fusion algorithm[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009. (in Chinese)
- [4] 贾可新. 通信侦察中的信号分选算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2011.
JIA Kexin. Research on signal sorting algorithm for communication reconnaissance[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011 (in Chinese)
- [5] 唐瑶. 跳频通信信号参数估计[D]. 成都:电子科技大学,2012.
TANG Yao. Parameter estimation for frequency hopping communication signal[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [6] 张成宝. 密集目标环境下的数据关联算法研究[D]. 北京:中国航船研究院,2013.
ZHANG Chengbao. Data correlation algorithm in dense target environment[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2013. (in Chinese)

作者简介:



贺文娇(1985—),女,四川简阳人,2009 年于华中科技大学获工学硕士学位,现为工程师,主要从事信息处理算法研究和实现等工作。

HE Wenjiao was born in Jianyang, Sichuan Province, in 1985. She received the M. S. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2009. She is now an engineer. Her research concerns information processing algorithm and realization.

Email: tairan2732@163.com