

基于主动探测与被动截获协同的多源异类 数据融合定位算法研究

杨 军, 张 萌

(中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094)

摘 要: 针对当前主动雷达在复杂电磁环境下的使用风险, 以及无源被动定位精度较差的问题, 本文提出了一种基于极大似然意义下的雷达主动探测与电子侦察被动截获相结合的数据融合最优定位算法, 该算法有效地提高了目标定位精度. 通过 Monte Carlo 仿真表明, 在信噪比适当的情况下, 所提算法能够达到 CRLB 界, 验证了该算法的有效性.

关键词: 主被动雷达协同定位; 信息融合; 极大似然; 理论精度界

中图分类号: TN971

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)10-2467-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.10.021

Research on Multi Source Heterogeneous Data Fusion Location Algorithm Based on Active Detection and Passive Acquisition

YANG Jun, ZHANG Meng

(Systems Engineering Research Institute of China State Shipbuilding Corporation, Beijing 100094, China)

Abstract: For the current operation risk of active radar which encounter frequently under the complicated electromagnetic environment, based on the Maximum Likelihood Estimation (MLE), a novel optimal locating algorithm which make a data fusion combining the active detection of radar and the passive interception of electronic reconnaissance is proposed in this paper. This new algorithm also aims at the common problem of the low accuracy in the passive location, and it can increase the location accuracy effectively. The result of the Monte Carlo simulation demonstrates the effectiveness of the proposed algorithm, by which can attain CRLB boundary when SNR is appropriate.

Key words: active and passive radar co-location; information fusion; MLE; theoretical precision boundary

1 引言

现代化战争重点在于敌我双方电磁空间的争夺, 对对方重点目标的探测与监控, 有源的主动雷达对目标的探测具有定位精度高的特点受到了重视. 但在复杂电磁环境下, 有源雷达由于需要发射大功率的信号对目标进行照射而导致容易暴露, 被对方的反辐射导弹摧毁; 因此需要采用隐蔽式的侦察手段. 无源定位借助于对方辐射源所发射的电磁信号, 通过多侦察站方向交汇或者双曲线交汇的方式进行目标定位, 其特点是能够实现隐蔽侦察, 但所需要的侦察站较多, 定位精度较低, 需要各个接收站之间的数据同步. 采用主动探测与被动截获协同的定位方案可以综合上述两种方案

的优点, 首先是定位精度比上述两种方案高, 所需侦察站相对较少, 借助于主动雷达提供先验信息, 后续可以将主动雷达关机静默, 实现隐蔽接收.

利用主动探测与被动截获进行协同目标定位, 其本质是多源异类信息融合问题, 信息融合算法是指分布式多传感器对同一目标状态的综合估计^[1,2]. 目前主要用到的方法是凸组合优化方法^[3], 包括不考虑两测量相关的方差融合算法^[1]、Covariance Intersection^[2], 考虑两测量相关的 BC 算法^[4]、解析迭代算法^[5]. 这些方法是最小均方误差下的最优或者准最优算法, 但其应用的前提条件是要求所有参与融合传感器均含有待测量目标的全部信息, 但这在有些场景下是无法达到的. 例如, 在典型的战场环境下, 可以利用主动雷达对目

标进行较为精确的照射测量,为了实现对目标的隐蔽侦察,需要采用被动接收的被动式侦察,但当侦察接收机数目较少时,其信息量可能不足以获取目标信息,如在二维平面上两个侦察站测量时差.此时,上述方法均不能直接应用.

就目标定位本身而言,主动雷达利用自身辐射电磁波照射目标,通过接收回波来获得目标的距离和方位信息,并根据距离和方位信息来确定目标位置.但由于主动雷达辐射的电磁波容易被敌方探测到,受到敌方攻击和干扰.被动雷达自身不辐射电磁波,而是通过测量信号到达不同接收机的时间差来得到双曲线,通过曲线交汇来定位.但通常的二维平面目标无源定位算法要求至少需要三站来获得两条双曲线^[6],求得双曲线交点来定位.通过主被动雷达协同探测,既解决了主动雷达容易被攻击和干扰的缺点,又解决了被动雷达在基站数量较少的情况下的定位模糊问题.对于单目标的主被动数据融合,已有很多算法^[7,8],如最近邻算法、概率数据关联法、全邻最优关联法、多模型算法、相互作用多模型概率数据关联算法、等加权算法和方差加权算法等.文献[9]通过引入模糊推理函数,利用信息方差的实际值与量测误差协方差的变化率的值作为模糊输入的控制量,文献[10]提出了一种利用目标先验信息改变权值的方法.而对于跟踪的初值——航迹起始却少有文献提及,在实际工程中难以应用.

在多辐射源与多平台的情况下,对目标的主被动雷达信息融合,首先需要解决数据关联问题^[1,2],可以首先通过属性关联将载频、脉宽、重频不一样的辐射源区分开,再利用主动雷达测得的平台与被动辐射源双曲线之间距离最小(最近邻法)进行关联,在此基础上进行数据融合.从而实现了辐射源到平台之间的归类.

本文提出了一种主被动雷达异类融合的算法,该方法是基于一站主动与两站被动雷达的一种融合主动雷达测向测距与被动雷达时差信息的算法.由于两站被动雷达只能获得一条双曲线,目标可能位于双曲线上的任意位置,由于信息量不够而无法定位.在时差信息融合了主动雷达的信息之后,能获得更精确的定位解,并且不存在三站无源定位中定位模糊的问题.利用计算机仿真分析验证了该方法的有效性.

2 主被动雷达定位融合模型

对于二维平面上三站主被动协同定位系统,指定主站为主动雷达 $s_1 = [x_1, y_1]^T$,其余两站使用被动雷达,分别位于 $s_2 = [x_2, y_2]^T$, $s_3 = [x_3, y_3]^T$. 目标位于 $x = [x, y]^T$,如图1所示.

测量模型:主动雷达可以获得目标的角度和距离信息,可以实现瞬时定位,被动雷达可以获得目标相对

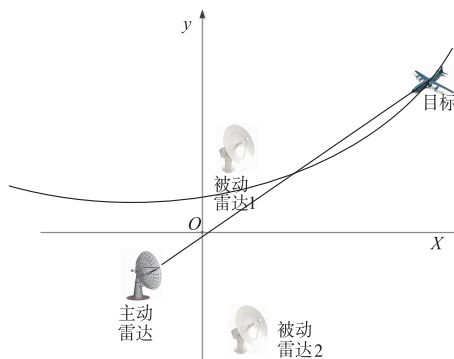


图1 主被动雷达协同定位示意图

于两个观测站的时间差信息,即距离差信息,在几何关系上体现为一条双曲线,如图1虚线所示,在只有两个被动雷达时,无法完成瞬时定位,其测量模型分别描述如下.

测距方程:

$$f_d(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{s}_1\| + n_d \quad (1)$$

测角方程:

$$f_\theta(\mathbf{x}) = \arctan \frac{y - y_1}{x - x_1} + n_\theta \quad (2)$$

时差方程:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{1}{c} f_r(\mathbf{x}) \\ &= \frac{1}{c} (\|\mathbf{x} - \mathbf{s}_2\| - \|\mathbf{x} - \mathbf{s}_3\|) + n_\tau \end{aligned} \quad (3)$$

假设主/被动雷达观测到的测距离值为 d , 测角值为 θ , 时差为 τ , 则距离差 $r = c\tau$. 由于测量值与真值之间存在误差,我们假设误差均为零均值的高斯白噪声,且测距、测向、和距离之差的误差 n_d, n_θ, n_τ 的方差分别为: $\sigma_d^2, \sigma_\theta^2, \sigma_\tau^2$.

3 主被动雷达数据关联算法

当侦察场景中出现多目标的情况下,会出现主动雷达获取多组目标平台的位置信息,而被动雷达获取多组目标辐射源的位置信息,将主动被动雷达信息进行融合的先决条件是将平台与辐射源关联起来,此处采用最近邻(NN)的方法进行数据关联.

根据主动雷达信息得到每个目标平均位置 $\hat{\mathbf{x}}_k, k = 1, 2, \dots, K$, 计算出其与被动雷达对应时差 $\hat{\tau}_k$, 与通过被动雷达测量得到 K 组时差值 $\hat{\tau}_j$ 对比, 遍历 $k, j (k = 1, \dots, K; j = 1, \dots, K)$, 当 $\min (\hat{\tau}_k - \hat{\tau}_j)^2$ 时, $k = j$, 则认为相应目标平台与辐射源匹配正确. 流程图如图2所示.

4 主被动雷达定位融合算法

由主动雷达可得到目标的定位初值

$$\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}, \hat{y}]^T = \mathbf{s}_1 + d \cdot \boldsymbol{\theta} \quad (4)$$

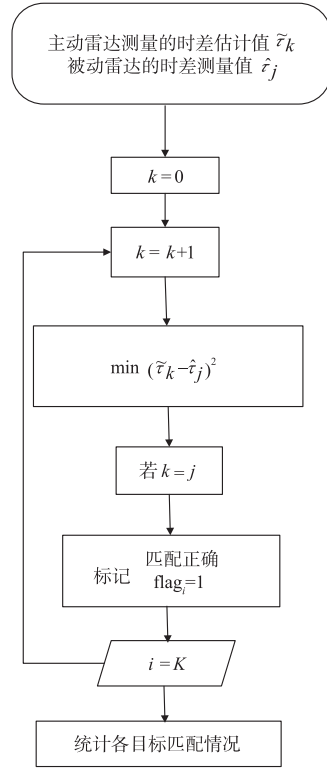


图2 主被动雷达目标关联匹配流程图

其中 $\theta = [\cos\theta, \sin\theta]^T$ (5)

由于测量噪声的存在,式(4)的定位结果存在着误差,不妨令

$$\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{x}} \quad (6)$$

$\tilde{\mathbf{x}}$ 是主动雷达定位与真实目标坐标间的微小误差. 另一方面,考察测量的似然函数有

$$\begin{aligned} \ln L(\mathbf{x}) = & \frac{1}{\sigma_d^2} (\|\mathbf{x} - \mathbf{s}_1\| - d)^2 \\ & + \frac{1}{\sigma_\theta^2} \left(\arctan \frac{y - y_1}{x - x_1} - \theta \right)^2 \\ & + \frac{1}{\sigma_r^2} (\|\mathbf{x} - \mathbf{s}_2\| - \|\mathbf{x} - \mathbf{s}_3\| - r)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

方程(7)是一个关于位置参数 $\mathbf{x}$ 的非线性方程,难以直接求解,结合方程(6)可以通过求解 $\tilde{\mathbf{x}}$ 的方式获取位置参数 $\mathbf{x}$,将测量方程在 $\hat{\mathbf{x}}$ 处进行一阶泰勒公式展开,有

$$f_d(\mathbf{x}) = f_d(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{F}_d(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\mathbf{x}} \quad (8)$$

$$f_\theta(\mathbf{x}) = f_\theta(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{F}_\theta(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\mathbf{x}} \quad (9)$$

$$f_r(\mathbf{x}) = f_r(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{F}_r(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\mathbf{x}} \quad (10)$$

其中设 $a_i = \hat{x} - x_i, b_i = \hat{y} - y_i, (i = 1, 2, 3)$

$$\mathbf{F}_d(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{\partial f_d}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = \left[\frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}, \frac{b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \right] \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_\theta(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{\partial f_\theta}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = \left[\frac{-b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}, \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \right] \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_r(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{\partial f_r}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = \left[\frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}} - \frac{a_3}{\sqrt{a_3^2 + b_3^2}}, \frac{b_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}} - \frac{b_3}{\sqrt{a_3^2 + b_3^2}} \right]^T \quad (13)$$

将式(8)~(10)带入式(7)可得关于残差 $\tilde{\mathbf{x}}$ 的二次方程

$$\begin{aligned} K = \ln L(\mathbf{x}) \\ = \frac{1}{\sigma_d^2} l^2 + \frac{1}{\sigma_\theta^2} m^2 + \frac{1}{\sigma_r^2} n^2 \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$l = f_d(\hat{\mathbf{x}}) - d + \mathbf{F}_d(\hat{\mathbf{x}})^T \tilde{\mathbf{x}}$$

$$m = f_\theta(\hat{\mathbf{x}}) - \theta + \mathbf{F}_\theta(\hat{\mathbf{x}})^T \tilde{\mathbf{x}}$$

$$n = f_r(\hat{\mathbf{x}}) - r + \mathbf{F}_r(\hat{\mathbf{x}})^T \tilde{\mathbf{x}}$$

定义

$$a_d = f_d(\hat{\mathbf{x}}) - d$$

$$a_\theta = f_\theta(\hat{\mathbf{x}}) - \theta$$

$$a_r = f_r(\hat{\mathbf{x}}) - r \quad (15)$$

对于式(14)中 K 求关于 $\tilde{\mathbf{x}}$ 的导数,并令之为 0,得到关于 $\tilde{\mathbf{x}}$ 的线性等式

$$\frac{\partial K}{\partial \tilde{\mathbf{x}}} = \frac{r}{\sigma_d^2} + \frac{s}{\sigma_\theta^2} + \frac{t}{\sigma_r^2} = 0 \quad (16)$$

其中

$$r = \mathbf{F}_d(\hat{\mathbf{x}})^T (a_d + \mathbf{F}_d(\hat{\mathbf{x}})^T \tilde{\mathbf{x}})$$

$$s = \mathbf{F}_\theta(\hat{\mathbf{x}})^T (a_\theta + \mathbf{F}_\theta(\hat{\mathbf{x}})^T \tilde{\mathbf{x}})$$

$$t = \mathbf{F}_r(\hat{\mathbf{x}})^T (a_r + \mathbf{F}_r(\hat{\mathbf{x}})^T \tilde{\mathbf{x}})$$

求得偏差 $\tilde{\mathbf{x}}$ 如下

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}} &= (-\mathbf{p}^{-1}) \cdot \mathbf{q} \\ \mathbf{p} &= \frac{\mathbf{u}^T \mathbf{u}}{\sigma_d^2} + \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{\sigma_\theta^2} + \frac{\mathbf{w}^T \mathbf{w}}{\sigma_r^2} \\ \mathbf{q} &= \frac{\mathbf{u}^T \mathbf{a}_d}{\sigma_d^2} + \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{a}_\theta}{\sigma_\theta^2} + \frac{\mathbf{w}^T \mathbf{a}_r}{\sigma_r^2} \end{aligned} \quad (17)$$

其中

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}_d(\hat{\mathbf{x}}), \mathbf{v} = \mathbf{F}_\theta(\hat{\mathbf{x}}), \mathbf{w} = \mathbf{F}_r(\hat{\mathbf{x}}).$$

最终的定位解可以表示为

$$\mathbf{x}_{ML} = \hat{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{x}} \quad (18)$$

5 仿真分析

仿真 1 主被动雷达目标数据关联分析

两个观测站位置和中心目标位置为 $\mathbf{s}_1 = (25, 106)$ km, $\mathbf{s}_2 = (25, 193)$ km, $\mathbf{u}_0 = (200, 150)$ km, 其余目标以 $\mathbf{u}_0$ 为中心,等间距分布在平行于 y 轴的直线上,距离为 R ,它们相对几何位置如图 3 所示. 雷达目标平台定位误差,被动雷达时差测量误差为 $\sigma_u = 700$ m, $\sigma_t = 50 \times 10^{-9}$ s,进行 10 万次蒙特卡罗实验. 各目标配对正确率如图 4 所示.

从图中可以看到,随着目标间距的增加平台与辐射源之间的配对正确率随之上升,当目标间距在 2 km 时,各个目标平台关联正确率超过 95%.

仿真 2 主被动雷达目标数据融合分析

假设目标位于 $(200, 150)$ km 处,三站坐标分别为

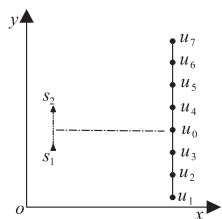


图3 目标与传感器几何关系示意图

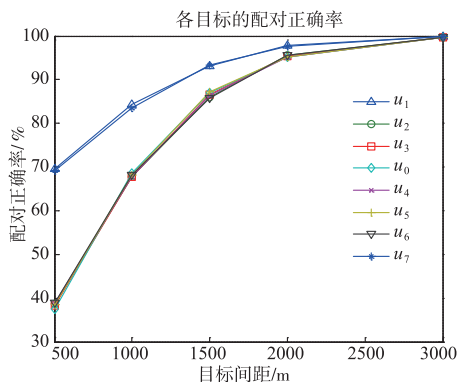
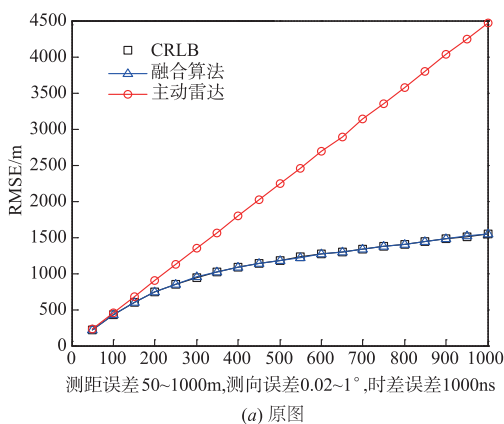
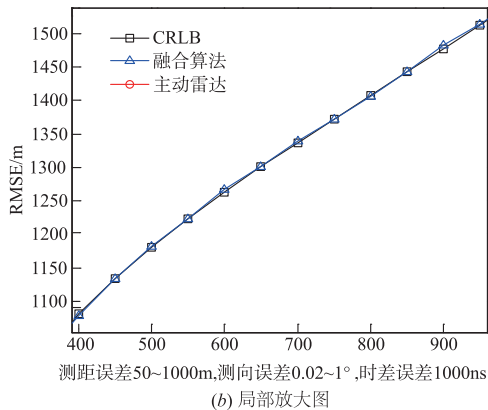


图4 主被动雷达目标数据关联正确率



(a) 原图



(b) 局部放大图

图5 融合算法，主动雷达定位结果与CRLB随测距测向误差增大的RMSE曲线图

(0,0) km, (-50,0) km, (50,0) km. 固定 $\sigma_r = 300$ m. 测距误差 σ_d 为变量, 其值从 50 ~ 1000 m, 取测角误差 $0.001\sigma_d^\circ$. 蒙特卡洛仿真次数为 10 万次, 结果如图 5

所示.

从图中可以看到, 随着主动测量误差的增加, 主动被融合的精度相对于主动雷达而言精度更优.

仿真条件同上, 将 σ_r 也设为变量, 且 $\sigma_r = \sigma_d$ 和 $\sigma_r = 3\sigma_d$, 并加上了与主动雷达定位结果的对比, 如图 6 所示.

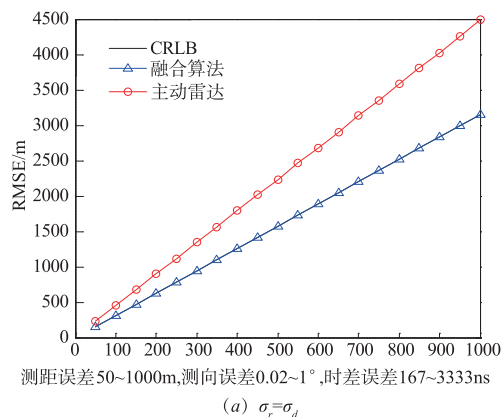
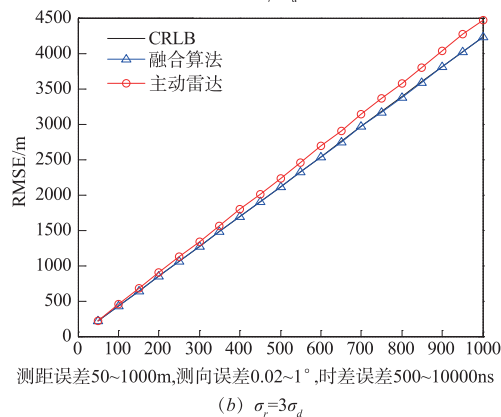
(a) $\sigma_r = \sigma_d$ (b) $\sigma_r = 3\sigma_d$

图6 融合算法，主动雷达定位结果与CRLB随测距测向测时误差增大的RMSE曲线图

仿真结果显示了本文所提出的方法可以达到克拉美罗下界(CRLB). 相较于仅有一站主动雷达的定位结果, 融合算法可以获得更高的精度, 并可以实现辐射源与平台之间的关联.

6 结论

本文针对主/被动雷达协同定位体制, 采用了基于似然函数的泰勒公式展开方法对主动雷达测距测角信息以及被动雷达时差信息进行融合, 利用蒙特卡洛仿真实验, 考察定位结果表明基于 TDOA 的被动雷达与主动雷达的协同体制相较于主动雷达具有较好的定位效果, 且本文提出的方法能达到 CRLB 界, 并能够完成目标平台与辐射源之间的关联, 完成目标的航迹起始, 具有较强的工程实用价值.

参考文献

[1] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 北京: 清华

- 大学出版社,2006. 159 – 163.
- HAN Chong-zhao, ZHU Hong-yan, DUAN Zhan-sheng. Multi Source Information Fusion[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2006. 159 – 163. (in Chinese)
- [2] 何友. 信息融合理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010. 68 – 73.
- HE You. Information Fusion Theory and Application[M]. Beijing: Electronic Industry Press,2010. 68 – 73. (in Chinese)
- [3] Chong C Y, Allen B, Hamilton I, et al. Convex combination and covariance intersection algorithms in distributed fusion [A]. Proceedings of International Society of Information Fusion (Fusion'01) [C]. USA: Fusion Press,2001. 1 – 8.
- [4] Bar-Shalom Y, Campo L. the effect of the common process noise on the two-sensor fused track covariance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, AES-22(11): 803 – 805.
- [5] Zhou J, Zhu Y, You Z, et al. An efficient algorithm for optimal linear estimation fusion in distributed multi-sensor systems [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part A Systems and Humans, 2006, 36 (5): 1000 – 1009.
- [6] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Process-ing, 1994, 42(8): 1905 – 1915.
- [7] 计征宇, 皮亦鸣. TVM 制导中数据融合的一种新算法 [J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(2): 98 – 103.
- JI Zheng-yu, PI Yi-ming. A new algorithm for data fusion in TVM guidance [J]. Radar Science and Technology, 2006, 4(2): 98 – 103. (in Chinese)
- [8] 康耀红. 数据融合理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997. 93 – 96.
- KANG Yao-hong. Data Fusion Theory and Application [M]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University Press, 1997. 93 – 96. (in Chinese)
- [9] 周峰, 张亮亮, 王建军, 等. 一种主/被动雷达协同探测跟踪模式及算法研究 [J]. 电光与控制, 2014, 21 (2): 12 – 16.
- ZHOU Feng, ZHANG Liang-liang, WANG Jian-jun, et al. A main/passive radar cooperative detection tracking mode and algorithm [J]. Electro-Optic and Control, 2014, 21 (2): 12 – 16. (in Chinese)
- [10] 潘宁, 张林让. 主被动雷达数据融合及跟 [J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(1): 61 – 64.
- PAN Ning, ZHANG Lin-rang. The main passive radar data fusion and tracking [J]. Radar Science and Technology, 2008, 6 (1): 61 – 64. (in Chinese)

作者简介



杨 军 男. 1967 年 5 月出生, 北京人. 1989 年毕业于西北工业大学电子工程系, 其后在中国船舶工业系统工程研究院工作, 主要从事电子对抗和无人机系统技术方面的研究.
E-mail: yangjun_cb@ sina. com



张 萌(通信作者) 男. 1988 年 5 月出生, 山西忻州人. 2013 年毕业于北京航空航天大学中法工程师学院, 其后在中国船舶工业系统工程研究院工作, 主要从事无人机系统设计和机载电子对抗技术研究.
E-mail: zhangmengzolo@ 163. com