

雷达间歇辐射对测向交叉定位性能的影响分析

王亚涛*^① 曾小东^② 周龙建^①

^①(中国电子科技集团公司航空电子信息系统技术重点实验室 成都 610036)

^②(中国电子科技集团公司第十研究所 成都 610036)

摘要: 针对雷达采取间歇辐射的射频隐身管控措施,以双站测向交叉定位为例,该文研究了辐射时间比与定位性能的影响关系。首先分析了雷达间歇辐射的管控方法,然后在载机做匀速直线运动的假设下,采用克拉美罗下界(CRLB)方法,建立了辐射时间比对定位精度的影响模型。最后给出了模型的求解步骤并进行了仿真验证。仿真结果表明,不同辐射时间比对定位性能的影响不同,在初始距离为100 km,辐射时间比小于0.5时,定位收敛时间超过10 s,可以有效降低测向交叉定位的性能。

关键词: 射频隐身; 间歇辐射; 交叉定位; 克拉美罗下界

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)02-0452-06

DOI: 10.11999/JEIT190110

Analysis for Effect of Radar Intermittent Radiation on the Performance of Cross Location

WANG Yatao^① ZENG Xiaodong^② ZHOU Longjian^①

^①(Key Laboratory of Avionic Information System Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

^②(The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: For the radio frequency stealth control measure of radar intermittent radiation, the relationship between radiation time ratio and positioning performance is studied which takes cross location with two stations as an example. Firstly, the control method of radar intermittent radiation is analyzed. Then, under the assumption of uniform linear motion of the carrier aircraft, the influence model of radiation time ratio on positioning accuracy is established by using the Cramer-Rao Lower Bound (CRLB). Finally, the solution steps of the model are given and verified by simulation. The simulation results show that different radiation time ratios have different effects on the location performance. When the initial distance is 100 km and the radiation time ratio is less than 0.5, the location convergence time exceeds 10 s, which can effectively reduce the performance of cross location with two stations.

Key words: Radio frequency stealth; Intermittent radiation; Cross location; Cramer-Rao Lower Bound (CRLB)

1 引言

雷达通过射频传感器管理系统调节传感器的辐射时机^[1],在保证正常任务功能实现的前提下,采取间歇辐射的方式尽可能地减少传感器辐射时间^[2]。吴巍等人^[3,4]提出了基于辐射控制的机载多传感器系统协同跟踪方法。通过对雷达开关机进行实时控制,使得雷达间歇向外辐射电磁波。熊久良等人^[5]提出火控雷达组网间歇式目标跟踪方法。Zhang等人^[6,7]通过自适应设计雷达在目标跟踪时的采样间

隔,减少雷达在目标跟踪过程中的采样次数。Benounnine等人^[8]研究了杂波中的相控阵雷达自适应机动目标跟踪算法。刘学全等人^[9]研究了在日益恶劣的电子战环境下,为了提高作战飞机的生存能力,以雷达猝发控制来进行辐射控制。为了减少作战过程中雷达的开机时间,文献^[10,11]采用ESM辅助方法的进行定位。文献^[12]则提出了基于目标跟踪的多传感器最优选择算法。文献^[13,14]提出一种机载雷达辅助无源传感器对杂波环境下机动目标的跟踪算法。

本文研究了对双站测向交叉定位的影响机理,建立了辐射时间比对定位性能的影响模型。最后给出了模型的求解步骤并进行了仿真验证。

2 雷达间歇辐射模型

雷达间歇辐射是指雷达在有源和无源探测两种模式以一定周期交替工作，避免雷达的持续辐射，实现雷达辐射时间的缩减^[15]。在辐射段内，雷达持续辐射脉冲串信号，雷达执行有源探测任务；关辐射段内，雷达执行无源探测任务。间歇辐射特征采用辐射时间比 β 描述。

$$\beta = \tau/T \quad (1)$$

其中， τ 为时隙宽度， T 为时隙重复周期。

雷达间歇辐射过程中 τ 和 T 可以是固定的，也可以变化的，如图1所示。

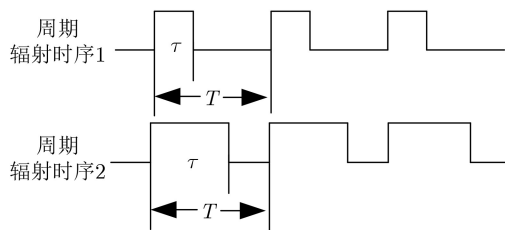


图1 间歇辐射特征变化情形

辐射时间比 β 的选择与雷达的工作模式有关，本文研究了背景搜索和目标跟踪两种典型工作模式下的，辐射时间比 β 的选择方法。

2.1 背景搜索

在背景搜索模式下，雷达间歇辐射时间比 β 的计算公式为

$$\beta = \frac{T_{rd_b} \cdot N}{T_{es_b} \cdot M} \quad (2)$$

其中， T_{rd_b} 表示有源探测背景扫描时间， N 表示有源探测背景扫描次数， T_{es_b} 表示无源探测的背景扫描时间， M 表示无源探测的搜索次数。

式(2)中

$$T_{rd_b} = \alpha \cdot \frac{\theta_{AZ}}{\phi_{AZ}} \cdot N_{EL} \cdot T_R \quad (3)$$

其中， α 为扫描交叠系数， θ_{AZ} 为有源探测方位扫描范围， N_{EL} 为有源探测俯仰扫描线数， T_R 为有源探测驻留时间， ϕ_{AZ} 为有源探测扫描波束宽度。

式(2)中

$$T_{es_b} = \alpha \cdot \frac{\theta_{es_AZ}}{\phi_{es_AZ}} \cdot \frac{\theta_{es_EL}}{\phi_{es_EL}} \cdot T_{es} \cdot N_f \quad (4)$$

其中， θ_{es_AZ} 为无源探测方位扫描范围， θ_{es_EL} 为无源探测俯仰扫描范围， ϕ_{es_AZ} 为无源探测方位波束宽度， ϕ_{es_EL} 为无源探测俯仰波束宽度， T_{es} 为无源探测频域驻留时间， N_f 为无源探测频域扫描次数。

2.2 目标跟踪

在目标跟踪模式下，雷达间歇辐射时间比 β 的计算公式为

$$\beta = \frac{\left(\frac{T_{rt}}{T_{st}} \cdot N_T\right) \cdot T_{es_b} + T_{rd_b}}{\left(1 - \frac{T_{rt}}{T_{st}} \cdot N_T\right) T_{es_b}} \quad (5)$$

其中， T_{rt} 表示有源探测的跟踪驻留周期， T_{st} 表示有源探测的跟踪回访周期， N_T 表示有源探测的同时跟踪目标数。

3 雷达间歇辐射对测向定位的影响分析

研究雷达间歇辐射对双站测向交叉定位的影响。双站测向交叉定位，站1(x_1, y_1, z_1)和站2(x_2, y_2, z_2)，分别对目标(x, y, z)进行测向以确定目标的位置。站1对目标的测量角度集为(β_1, ε_1)，站2对目标的测量角度集为(β_2, ε_2)，基站和目标的位置关系见图2^[16]。

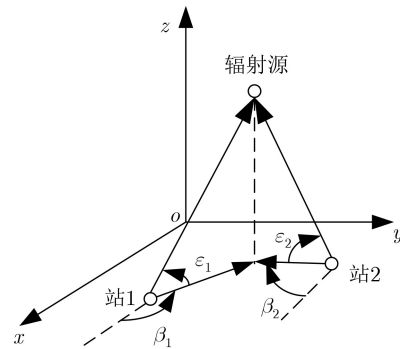


图2 观测站、目标的位置关系

3.1 瞬时测向定位克拉美罗界

双站测角交叉定位的观测方程^[17]为

$$\mathbf{z}_t = [\mathbf{u}_{t0} \mathbf{u}_{t1}]^T + [\mathbf{n}_t \mathbf{n}_\varepsilon]^T \quad (6)$$

其中， $\mathbf{u}_{ti} = [\beta_i \ \varepsilon_i]^T$ ， $\mathbf{n}_t = [n_\beta \ n_\varepsilon]^T$ 为测角误差矢量。

$$\left. \begin{aligned} \beta_i &= \arctan\left(\frac{x - x_i}{y - y_i}\right) \\ \varepsilon_i &= \arctan\left(\frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中， n_β 和 n_ε 为测角误差， x, y, z 为目标真实位置， x_i, y_i, z_i 为观测站真实位置。

为考虑导航误差对目标位置估计的影响，建立观测站的导航观测方程，即

$$\mathbf{z}_{nav} = [\mathbf{u}_{nav0} \ \mathbf{u}_{nav1}]^T + [\mathbf{n}_{nav} \ \mathbf{n}_{nav}]^T \quad (8)$$

其中， $\mathbf{u}_{navi} = [x_i \ y_i \ z_i]$ 为观测站真实位置， $\mathbf{n}_{nav} = [n_x \ n_y \ n_z]$ 为观测站导航误差。

联合以上的交叉定位观测方程和导航观测方程，建立矢量观测方程为

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_t \\ \mathbf{z}_{nav} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_t \\ \mathbf{u}_{nav} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_t \\ \mathbf{n}_{nav} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{u}_t = [\mathbf{u}_{t0} \ \mathbf{u}_{t1}]^T$, $\mathbf{u}_{\text{nav}} = [\mathbf{u}_{\text{nav}0} \ \mathbf{u}_{\text{nav}1}]^T$ 。

基于上述观测方程, 设量测噪声 \mathbf{n}_t 为均值为0矢量、协方差阵为 \mathbf{C}_t 的高斯噪声, 导航输出噪声 \mathbf{n}_{nav} 为均值为0矢量、协方差阵为 \mathbf{C}_{nav} 的高斯噪声。假设 \mathbf{n}_t , \mathbf{n}_{nav} 相互独立, 则

$$\left. \begin{aligned} z &\sim N(\mathbf{u}(\boldsymbol{\theta}), \mathbf{C}) \\ \mathbf{C} &= \text{diag}\{\mathbf{C}_t, \mathbf{C}_{\text{nav}}\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, $\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\theta}_t \ \boldsymbol{\theta}_{\text{nav}}]$, $\boldsymbol{\theta}_t$ 和 $\boldsymbol{\theta}_{\text{nav}}$ 分别为目标位置坐标和两个测向站位置坐标形成的矢量。协方差阵 \mathbf{C} 与 $\boldsymbol{\theta}$ 无关, 因此根据式(10)可以得到, 高斯噪声

$$\text{CRLB}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{I}(\boldsymbol{\theta})^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{-1} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{U}(\mathbf{D} - \mathbf{V}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{U})^{-1}\mathbf{V}\mathbf{A}^{-1} & -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{U}(\mathbf{D} - \mathbf{V}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{U})^{-1} \\ -(\mathbf{D} - \mathbf{V}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{U})^{-1}\mathbf{V}\mathbf{A}^{-1} & (\mathbf{D} - \mathbf{V}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{U})^{-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{J}_t^T \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}_t \\ \mathbf{U} &= \mathbf{J}_t^T \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}_{\text{nav}} \\ \mathbf{V} &= \mathbf{J}_{\text{nav}}^T \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}_t \\ \mathbf{D} &= \mathbf{J}_{\text{nav}}^T \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}_{\text{nav}} + \mathbf{C}_{\text{nav}}^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{J}_t = \frac{\partial \mathbf{u}_t}{\partial (\boldsymbol{\theta}_t)^T}, \quad \mathbf{J}_{\text{nav}} = \frac{\partial \mathbf{u}_t}{\partial (\boldsymbol{\theta}_{\text{nav}})^T} \quad (14)$$

由此, 目标位置 $\boldsymbol{\theta}_t$ 无偏估计的CRLB为

$$\begin{aligned} \text{CRLB}(\boldsymbol{\theta}_t) &= \mathbf{A}^{-1} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{U}(\mathbf{D} - \mathbf{V}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{U})^{-1}\mathbf{V}\mathbf{A}^{-1} \\ &= (\mathbf{A} - \mathbf{U}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{V})^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{A}^{-1} = (\mathbf{J}_t^T \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}_t)^{-1}$ 为导航参量无误差条件下 $\boldsymbol{\theta}_t$ 估计误差方差的CRLB。

3.2 间歇辐射对跟踪滤波的影响分析

利用目标动状态方程, 计算跟踪过程中的CRLB_k

$$\text{CRLB}_k = \mathbf{I}_k^{-1} \quad (16)$$

当采用先定位后跟踪的方法进行滤波跟踪, 且考虑雷达间歇辐射时, 有

$$\mathbf{I}_k = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{I}_{k-1} \boldsymbol{\Phi} + d_k \begin{bmatrix} \mathbf{R}_k^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, \mathbf{R}_k 为当前时刻的瞬时定位CRLB, $\boldsymbol{\Phi}$ 为状态转移矩阵, d_k 表示雷达在有源和无源探测两种模式以一定周期交替工作。当雷达在有源模式时 $d_k = 1$, 此时对应于滤波跟踪算法同时进行状态预测和量测更新; 当雷达在无源模式时 $d_k = 0$, 此时对应于滤波跟踪算法只进行状态预测而无量测更新。因此可以看出, 从实际应用的角度来看, 建立的CRLB计算模型符合雷达间歇辐射对测向交叉定位性能的影响分析要求。

初始值

$$\mathbf{I}_0 = \text{inv} \begin{pmatrix} \mathbf{R}_0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sigma_v^2 \mathbf{E} \end{pmatrix} \quad (18)$$

中最大似然估计参数 $\boldsymbol{\theta}$ 的Fisher信息矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}) &= \mathbf{J}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{J} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_t & \mathbf{J}_{\text{nav}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{C}_t^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{\text{nav}}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_t & \mathbf{J}_{\text{nav}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_t^T \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}_t & \mathbf{J}_t^T \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}_{\text{nav}} \\ \mathbf{J}_{\text{nav}}^T \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}_t & \mathbf{J}_{\text{nav}}^T \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}_{\text{nav}} + \mathbf{C}_{\text{nav}}^{-1} \end{bmatrix} \\ &\triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{U} \\ \mathbf{V} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, \mathbf{E} 为单位矩阵。

参数 $\boldsymbol{\theta}$ 的CRLB为

其中, $\sigma_{v \max}$ 为速度估计误差标准差, 取目标运动速度, \mathbf{R}_0 为初始时刻的瞬时定位CRLB, \mathbf{E} 为单位矩阵。

4 仿真分析

为了验证算法的有效性, 做了如下仿真。仿真场景示意图见图3。假定目标和观测平台在10 km的同高度平面内相向飞行, 目标和观测平台均以300 m/s的速度沿平行于参考坐标系的 x 轴方向做匀速直线运动。目标初始位置坐标为(100, 0, 10) km或(70, 0, 10) km, 观测平台1初始位置坐标为(0, 15, 10) km, 观测平台2初始位置坐标为(0, -15, 10) km, 目标与观测平台1和观测平台2的中垂线初始距离为100 km或70 km。

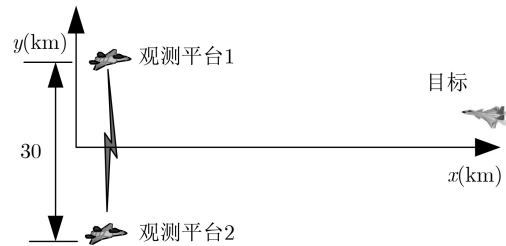


图3 仿真场景

仿真参数如表1所示。

当初始距离为100 km, 时隙重复周期 $T=1500$ ms时, 不同时隙宽度的定位精度如图4所示。

当初始距离为100 km, 时隙宽度 $\tau=300$ ms时, 不同时隙重复周期的定位精度如图5所示。

当初始距离为100 km和70 km, 时隙宽度 $\tau=1200$ ms, 时隙重复周期 $T=1500$ ms时, 定位精度如图6所示。

由图4—图6的仿真结果可见, 雷达间歇辐射将会使测向交叉定位的跟踪精度发生“震荡”, 延缓其误差收敛过程。不同的时隙宽度和时隙重复周期

表1 仿真参数

参数	取值
有效辐射功率	110 dBm
发射频率	8 GHz
波束宽度	2.2°×2.2°
副瓣电平	-25 dB
初始距离	100 km, 70 km
载机飞行速度	300 m/s
侦察飞机飞行速度	300 m/s
基线长度	30 km
测向精度	0.5°
导航精度	50 m
采样周期	100 ms

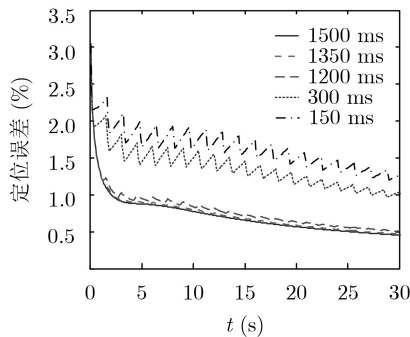


图4 不同时隙宽度对定位误差影响

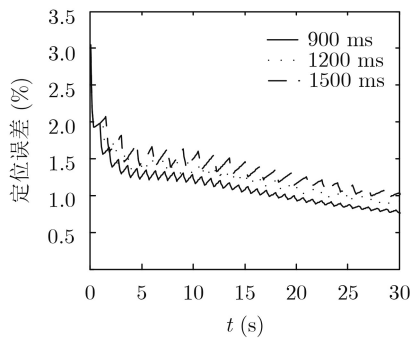


图5 不同时隙重复周期对定位误差影响

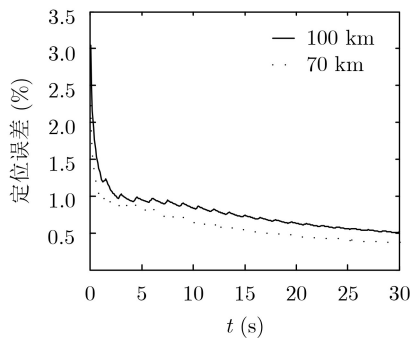


图6 不同初始距离对定位误差影响

直接决定了辐射时间比，在同一初始距离下，辐射时间比越小，跟踪精度“震荡”越剧烈，而在同一

辐射时间比下，初始距离越大，误差收敛过程越长。以相对定位精度1%为门限，时隙重复周期 $T=1500$ ms时，不同辐射时间比 β 下定位的收敛时间如表2所示。

表2 不同辐射时间比对收敛时间的影响(s)

辐射时间比 β	初始距离100 km	初始距离70 km
1.00	2.1	0.9
0.90	2.2	1.0
0.80	3.3	1.5
0.75	3.8	1.6
0.66	7.4	2.8
0.50	12.2	6.2
0.33	19.0	10.9
0.25	25.3	14.5
0.20	31.6	18.1
0.10	46.5	27.3

从表2可以看出，辐射时间比越小，相应的定位收敛时间越长，因此小的辐射时间比可以造成测向交叉定位系统无法在规定时间内实现定位跟踪，从而不能引导干扰等对抗措施。

此外，本文进行了收敛时间的仿真，仿真结果如表3所示。仿真场景同文献[18]，假定目标和观测平台在10 km的同高度平面内相向飞行，目标以500 m/s的速度沿平行于参考坐标系的 x 轴方向做匀速直线运动；观测平台1和观测平台2均以0.1 g的加速度沿平行于参考坐标系的 x 轴方向做匀加速直线运动，观测平台1和观测平台2初始速度均为250 m/s。目标初始位置坐标为(280, 0, 10) km，观测平台1初始位置坐标为(0, 15, 10) km，观测平台2初始位置坐标为(0, -15, 10) km，目标与观测平台1和观测平台2的中垂线初始距离为280 km。

从表3可以看出，当时隙重复周期不变时，辐射时间比越小，跟踪误差越大，收敛时间越长。当辐射时间比不变时，时隙重复周期的取值对跟踪误差和收敛时间的影响几乎不明显。本文分析得到的

表3 不同辐射时间比及时隙重复周期下的收敛时间(s)

$\tau/T(\%)$	$T(s)$				
	0.5	1	2	3	4
100	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
80	4.1	4.1	4.1	3.9	4.2
50	6.8	7.1	6.5	6.6	5.4
40	10.1	9.3	8.6	7.2	8.8
30	20.5	29.2	24.5	15.8	13.0
20	51.5	50.1	48.3	40.8	44.7

辐射时间比、时隙重复周期以及收敛时间的变换趋势结果同文献[18],同时由于测向交叉定位体制观测测量更多,相同条件下比单站定位体制的跟踪误差更小,故收敛时间整体比文献[18]更短。

5 结束语

本文在目标做匀速直线运动的条件下,给出了雷达间歇辐射对双站测向交叉定位性能的影响模型和仿真分析结果。建立的基于CRLB的跟踪性能影响模型,全面地考虑了辐射时间比、测量误差、导航误差、基线长度、初始距离等因素,并且适用于间歇辐射特征固定或动态变化的情形。仿真结果表明,在雷达间歇辐射时,辐射时间比是影响测向交叉定位性能的主要因素,雷达采用小的时间比将使得测向交叉定位系统无法正常实现跟踪收敛。

本文的研究结果可以为雷达射频隐身设计提供初步的理论指导。文中的分析方法还可以进一步推广应用到间歇辐射对多站无源定位跟踪的性能影响分析中。

参考文献

- [1] PARIKH A, KAMALAPURKAR R, and DIXON W E. Target tracking in the presence of intermittent measurements via motion model learning[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(3): 805–819. doi: [10.1109/TRO.2018.2821169](https://doi.org/10.1109/TRO.2018.2821169).
- [2] YADAV R, DAHIYA P K, and MISHRA R. Comparative analysis of automotive radar sensor for collision detection and warning system[J]. *International Journal of Information Technology*, 2018(12): 1–6. doi: [10.1007/s41870-018-0167-3](https://doi.org/10.1007/s41870-018-0167-3).
- [3] 吴巍, 柳毅, 王国宏, 等. 辐射限制下有源无源协同跟踪技术[J]. *信息与控制*, 2011, 40(3): 418–423. doi: [10.3724/SP.J.1219.2011.00418](https://doi.org/10.3724/SP.J.1219.2011.00418).
WU Wei, LIU Yi, WANG Guohong, et al. Active and passive synergy tracking technique with emission constraint[J]. *Information and Control*, 2011, 40(3): 418–423. doi: [10.3724/SP.J.1219.2011.00418](https://doi.org/10.3724/SP.J.1219.2011.00418).
- [4] 吴巍, 王国宏, 李世忠. 雷达间歇辅助下雷达红外协同跟踪技术[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(1): 155–158. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2012.01.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2012.01.040).
WU Wei, WANG Guohong, and LI Shizhong. Research on radar andIRST synergistic tracking with radar intermittent assistant[J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(1): 155–158. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2012.01.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2012.01.040).
- [5] 熊久良, 徐宏, 韩壮志, 等. 基于组网的火控雷达间歇式目标跟踪技术研究[J]. *现代雷达*, 2011, 33(8): 13–16. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2011.08.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2011.08.004).
XIONG Jiuliang, XU Hong, HAN Zhuangzhi, et al. A study on intermittent target tracking technology in fire-control radar network[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(8): 13–16. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2011.08.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2011.08.004).
- [6] ZHANG Zhenkai, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, et al. Multiple-target tracking with adaptive sampling intervals for phased-array radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(5): 760–766. doi: [10.3969/j.issn.1004-4132.2011.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4132.2011.05.006).
- [7] ZHANG Zhenkai, ZHU Jiehao, TIAN Yubo, et al. Novel sensor selection strategy for LPI based on an improved IMMPF tracking method[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2014, 25(6): 1004–1010. doi: [10.1109/jsee.2014.00115](https://doi.org/10.1109/jsee.2014.00115).
- [8] BENOUDNINE H, KECHE M, OUAMRI A, et al. New efficient schemes for adaptive selection of the update time in the IMMJPDAF[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 197–214. doi: [10.1109/taes.2012.6129630](https://doi.org/10.1109/taes.2012.6129630).
- [9] 刘学全, 李波, 万开方, 等. 基于多传感器协同的雷达猝发技术研究[J]. *中国民航大学学报*, 2012, 30(6): 17–20. doi: [10.3969/j.issn.1674-5590.2012.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5590.2012.06.005).
LIU Xuequan, LI Bo, WAN Kaifang, et al. Study on radar burst technology based on multi-sensor synergy[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2012, 30(6): 17–20. doi: [10.3969/j.issn.1674-5590.2012.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5590.2012.06.005).
- [10] ZHOU Biao, SUN Chao, AHN D, et al. A novel passive tracking scheme exploiting geometric and intercept theorems[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 895. doi: [10.3390/s18030895](https://doi.org/10.3390/s18030895).
- [11] 张国凯, 何佳洲, 戴霄. 基于椭球模型的雷达/ESM联合定位算法[J]. *指挥控制与仿真*, 2013, 35(5): 30–33. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2013.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2013.05.007).
ZHANG Guokai, HE Jiazhou, and DAI Xiao. Radar/ESM locating algorithm based on the ellipsoid model of globe[J]. *Command Control & Simulation*, 2013, 35(5): 30–33. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2013.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2013.05.007).
- [12] NARYKOV A S and YAROVOY A. Sensor selection algorithm for optimal management of the tracking capability in multisensor radar system[C]. 2013 European Microwave Conference, Nuremberg, Germany, 2013: 1811–1814.
- [13] 吴卫华, 江晶, 高岚. 机载雷达辅助无源传感器对杂波环境下机动目标跟踪[J]. *控制与决策*, 2015, 30(2): 277–282. doi: [10.13195/j.kzyjc.2013.1781](https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1781).
WU Weihua, JIANG Jing, and GAO Lan. Tracking maneuvering target in clutter with passive sensor aided by airborne radar[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(2): 277–282. doi: [10.13195/j.kzyjc.2013.1781](https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1781).
- [14] YANG Chao, ZHENG Jiangying, REN Xiaoqiang, et al. Multi-sensor Kalman filtering with intermittent

- measurements[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(3): 797–804. doi: [10.1109/TAC.2017.2734643](https://doi.org/10.1109/TAC.2017.2734643).
- [15] HUANG He and WANG Wenqin. FDA-OFDM for integrated navigation, sensing, and communication systems[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2018, 33(5/6): 34–42. doi: [10.1109/MAES.2018.170109](https://doi.org/10.1109/MAES.2018.170109).
- [16] 汪晗, 成昂轩, 王坤, 等. 无线传感器网络分布式迭代定位误差控制算法[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(1): 72–78. doi: [10.11999/JEIT170344](https://doi.org/10.11999/JEIT170344).
WANG Han, CHENG Angxuan, WANG Kun, *et al.* Error control algorithm of distributed localization in wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(1): 72–78. doi: [10.11999/JEIT170344](https://doi.org/10.11999/JEIT170344).
- [17] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 291–294.
SUN Zhongkang, ZHOU Yiyu, and HE Lixing. *Active and Passive Location Technology by Single and Multiple Platforms*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 291–294.
- [18] 张保群. 辐射时序对单站无源跟踪性能的影响[J]. *电讯技术*, 2015, 55(7): 746–752. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.007).
ZHANG Baoqun. Effect of radiation time sequence on passive tracking with single observation platform[J]. *Telecommunication Engineering*, 2015, 55(7): 746–752. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.007).
- 王亚涛: 男, 1981年生, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电子侦察、射频隐身.
- 曾小东: 男, 1985年生, 硕士, 工程师, 研究方向为信号处理、射频隐身.
- 周龙建: 男, 1988年生, 博士, 工程师, 研究方向为计算电磁学、雷达隐身、射频隐身.