

# 基于协同噪声干扰的机载雷达射频隐身性能优化算法

时晨光 汪 飞 周建江 李海林

(南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京, 210016)

**摘要:** 随着现代战场中无源探测系统能力的不断提升, 机载雷达的生存环境受到日益严峻的威胁和挑战。针对当今电子战中对射频(RF)隐身技术的需求, 提出了一种基于协同噪声干扰的机载雷达射频隐身性能优化算法。本文首先以电子对抗中的功率准则为基础, 研究了协同噪声干扰对机载雷达射频隐身性能的影响; 然后建立了雷达信号截获概率模型, 并提出了一种基于协同噪声干扰的机载雷达射频隐身性能优化算法, 通过自适应地调整机载雷达的发射功率和协同干扰机的噪声干扰信号功率, 在满足系统资源和性能要求的前提下, 最小化截获概率; 最后通过仿真实验验证了所提算法的可行性和有效性。

**关键词:** 射频隐身; 协同噪声干扰; 机载雷达; 截获概率; 截获接收机

**中图分类号:** TN951      **文献标志码:** A

## Radio Frequency Stealth Performance Optimization in Airborne Radar System Based on Cooperative Noise Jamming

Shi Chenguang, Wang Fei, Zhou Jianjiang, Li Hailin

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** With rapid development of passive radar systems in modern battlefield, the environment of airborne radar faces serious threat and challenge. A novel radio frequency (RF) stealth performance optimization algorithm based on cooperative noise jamming in airborne radar system is proposed for RF stealth technology in modern electronic warfare. Firstly, the influence of cooperative noise jamming on RF stealth performance in airborne radar system is investigated in detail on the basis of power rule. Then, the probability of intercept is formulated. A novel RF stealth performance optimization algorithm in airborne radar system based on cooperative noise jamming is proposed, where the probability of intercept is minimized by optimizing the transmitting power and the cooperative jamming power on the guarantee of system performance. Numerical simulation results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** radio frequency (RF) stealth; cooperative noise jamming; airborne radar; probability of intercept; intercept receiver

## 引 言

随着无源探测系统能力的提升,机载雷达等机载电子设备的射频隐身性能直接影响了其搭载平台的战场生存能力<sup>[1-2]</sup>。因此,开展机载雷达的射频隐身技术研究具有很强的紧迫性和现实意义。射频隐身是指无源探测系统与机载雷达等机载有源辐射系统之间的对抗,射频隐身技术可以有效地降低机载雷达被敌方无源探测系统截获、分选、识别和跟踪的概率<sup>[3]</sup>。目前,国内外学者针对机载雷达的射频隐身技术开展了广泛而深入的研究。张贞凯等<sup>[4]</sup>分析了影响雷达搜索性能的参数,首次提出了一种基于射频隐身的机载相控阵最优雷达搜索算法,通过优化波束宽度、波束驻留时间和平均发射功率,最小化机载雷达能量消耗函数和估计检测概率与期望检测概率的 2 范数,并利用带精英策略的非支配排序遗传算法对雷达搜索模型进行优化。仿真结果表明,相比于其他算法,文中所提算法在保持较好目标检测性能的情况下,具有更好的射频隐身性能。文献<sup>[5]</sup>提出了基于射频隐身的机载雷达宽带发射波束形成算法,根据目标的距离和目标雷达散射截面(Radar cross section, RCS)确定主瓣方向的发射功率大小和工作阵元数,并基于截获接收机位置的先验信息进行发射波束的零陷设计。文献<sup>[6]</sup>通过分析截获概率原理,给出了目标特性和雷达系统性能对驻留时间和波位间隔等搜索控制参量的影响关系,构建了目标探测性能与隐身性能约束下的优化模型。刘宏强等<sup>[7]</sup>在目标检测性能和雷达系统资源的约束下,以最小化截获概率为优化目标,提出了跟踪状态下机载雷达单次辐射能量实时控制方法。Godrich 等<sup>[8]</sup>研究了利用分布式多输入多输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)雷达系统进行目标定位时的功率分配问题,提出了一种基于最优功率分配的单目标定位算法。该算法包含两种优化模型:一种是在满足预先设定的定位精度的条件下,最小化系统总发射功率;另一种是给定分布式 MIMO 雷达系统的总发射功率,以达到最好的目标定位精度。文献<sup>[9]</sup>提出了基于射频隐身性能优化的 MIMO 雷达目标跟踪算法,通过建立表征射频隐身性能的目标函数,在满足目标跟踪性能的条件下,自适应地调整 MIMO 雷达天线子阵划分个数、平均发射功率、驻留时间和采样间隔,从而优化系统的射频隐身性能。文献<sup>[10]</sup>则从目标搜索的角度研究了 MIMO 雷达的射频隐身优化问题,在满足一定目标检测性能的前提下,通过控制 MIMO 雷达天线子阵数、信号占空比、驻留时间及搜索采样间隔,提升系统的射频隐身性能。Alexey 等<sup>[11-12]</sup>提出了基于目标跟踪的多传感器优化选择算法,该算法定义了表征传感器时间资源消耗的代价函数,在每一个采样时刻,选择具有最大采样间隔和最小驻留时间的传感器对目标进行跟踪,从而在保证一定目标跟踪性能的前提下,最小化多传感器系统的时间资源消耗。文献<sup>[13]</sup>首次研究了机载雷达组网系统的射频隐身性能优化问题,在满足系统跟踪性能要求的前提下,以最小化机载雷达组网系统的 Schleher 截获因子为目标,通过优化分配组网雷达的发射功率,达到提升机载雷达组网系统射频隐身性能的目的。文献<sup>[14]</sup>则从波形优化的角度,研究了基于射频隐身的分布式雷达组网系统稳健波形设计方法,从而在目标真实频率响应未知的情况下,有效提升了系统射频隐身性能的最优下界。针对防空火控雷达网中的多传感器管理问题,文献<sup>[15]</sup>从雷达网对抗反辐射导弹的实际需求出发,研究了基于协方差控制与辐射控制的多传感器管理方法,在保证满足系统预期跟踪精度的前提下,通过最小化感知代价,实现对各主动传感器单独的辐射控制。文献<sup>[16]</sup>针对预警机引导下的多机载平台多传感器目标搜索问题,提出了一种基于“自由市场”中竞争与协作的机载编队传感器协同搜索模型。该方法以编队飞机由远及近接近搜索目标的飞行过程为应用背景,当某飞机传感器对某目标的检测概率高于“单独探测概率门限”时,则该目标直接由对应的机载平台传感器搜索,当某飞机传感器对某目标的检测概率低于“静默门限”时,该平台无法有效对该目标进行探测,当检测概率在“单独探测概率门限”和“静默门限”之间时,目标和传感器利用市场理论进行竞争和合作,实现传感器协同探测与管理。

上述针对机载雷达的射频隐身技术研究主要集中在被动对抗上<sup>[4-15]</sup>,而对敌方无源探测系统主动对抗(主动干扰)的研究还比较少。杨军佳等<sup>[17-18]</sup>以无源探测系统的工作流程为出发点,首次从理论上

研究了有源噪声干扰对抗无源探测系统的可能性,并基于此,给出了有源噪声干扰对无源探测系统性能指标影响的模型。文献[19]基于干扰方程和截获方程,建立了空间无源探测系统电子干扰有效部署区域模型,从而指导电子干扰设备的部署,以对空间无源探测系统进行有效的干扰。文献[20]则提出了基于噪声干扰的雷达信号射频隐身方法,仿真结果表明,可以通过对无源侦察系统实施噪声干扰,降低其信噪比以达到提升雷达系统射频隐身性能的目的。文献[21]借鉴无线通信中安全容量的概念,提出了表征机载雷达射频隐身性能的安全信息因子,从信息论的角度研究了影响机载雷达射频隐身性能的因素。在此基础上,文献[22]将安全信息因子的概念扩展到机载雷达组网系统中,并分别建立了基于射频隐身性能优化的机载雷达组网功率分配模型<sup>[22]</sup>和发射波形优化设计模型<sup>[23]</sup>。

总的来说,上述算法提出了采用有源噪声干扰提升机载雷达系统射频隐身性能的思想,给后续的研究奠定了坚实的基础。但是却存在如下几个不足之处:(1)文献[17~19]研究了有源噪声干扰对无源探测系统性能的影响,而未考虑实际应用中满足雷达探测性能需求的发射功率约束;(2)文献[19]对建立的空间无源探测系统电子干扰有效部署区域模型进行了求解,然而实际作战场景中的雷达、电子干扰设备和空间无源侦察系统都是相对运动的,很难在瞬息万变的战场环境中对电子干扰设备的位置进行实时和最优的布置;(3)文献[20]研究了噪声干扰对敌方无源探测系统截获能力的影响,为提升雷达信号的射频隐身性能指引了新的方向,但并未考虑基于噪声干扰的雷达射频隐身性能优化问题。针对上述情况,本文首先以电子对抗中的功率准则为基础,研究了协同噪声干扰对机载雷达射频隐身性能的影响。仿真结果验证了本文算法的可行性和有效性,并分析了目标与雷达距离的远近、协同干扰机与截获接收机的相对位置以及目标 RCS 等因素对机载雷达射频隐身性能的影响。

## 1 基于协同噪声干扰的射频隐身优化算法

对敌方截获接收机实施压制性干扰是用噪声或类似噪声的干扰信号进入截获接收机,以遮盖或淹没己方雷达等射频辐射源信号,从而降低截获接收机的截获性能,提升己方有源辐射系统的射频隐身性能。本文假设协同噪声干扰信号的频带能够完全覆盖己方机载雷达的频率。协同干扰机在机载雷达的引导下对敌截获接收机进行压制性噪声调幅信号干扰,以提高己方机载雷达的射频隐身性能。协同干扰机在对截获接收机进行干扰以避免雷达信号被截获、分选和识别时,当干扰机发射的噪声干扰功率不同,相对于机载雷达和敌方截获接收机的空间位置关系不同,对截获接收机的截获性能影响差异很大。因此,需要从机载雷达、协同干扰机和截获接收机之间的空间能量关系入手,研究协同噪声干扰对机载雷达射频隐身性能的影响及优化方法。

本文考虑截获接收机由目标搭载的情况。这是由于当截获接收机与目标分置时,机载雷达可在截获接收机方向通过自适应波束形成产生超低旁瓣或宽零陷,从而可以较好地实现射频隐身。考虑在某一时刻机载雷达、目标(截获接收机)和协同干扰机的空间位置关系,如图 1 所示。从图 1 可知,机载雷达与目标(截获接收机)之间的距离为  $R_{rt}$ ;协同干扰机到机载雷达和目标的距离分别为  $R_{rj}$  和  $R_{jt}$ ;协同干扰机天线主瓣与机载雷达天线主瓣之间的夹角为  $\theta$ ;协同干扰机天线主瓣与机载雷达旁瓣之间的夹角为  $\alpha$ 。

基于协同噪声干扰的机载雷达射频隐身算法是在保证机载雷达目标探测性能的前提下,通过自适应调整机载雷达的发射功率和协同干扰机的噪声信号功率,提升机载雷达的射频隐身性能。根据文献[19],此处考虑的基于协同噪声干扰的机载雷达射频隐身优化算法包括机载雷达有效探测目标模型、协同噪声干扰

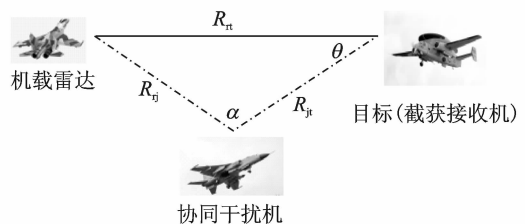


图 1 机载雷达、目标和协同干扰机的空间位置关系  
Fig. 1 Relative geometry between airborne radar, target and cooperative jammer.

对截获接收机干扰模型以及协同噪声干扰不影响雷达正常工作模型。

### 1.1 机载雷达有效探测目标模型

根据文献[24],传统单基地雷达的探测方程为

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{rt}^4 L_{rt}} \quad (1)$$

式中:  $P_r$  为雷达接收机处接收到的回波功率;  $P_t$  为雷达发射功率;  $G_t$  为雷达发射天线增益;  $G_r$  为雷达接收天线增益;  $\lambda$  为雷达信号波长;  $\sigma$  为目标 RCS(假设目标 RCS 各向同性);  $L_{rt}$  为雷达各部分损耗引入的损耗系数。

雷达接收到的回波功率  $P_r$  必须超过接收机灵敏度  $S_{rmin}$ , 雷达才能可靠地探测到目标。在一定的  $R_{rt}$  下, 当  $P_r$  正好等于  $S_{rmin}$  时, 就可得到雷达检测该目标的最小发射功率  $P_t$ 。当小于这个发射功率时, 雷达接收机接收到的回波功率  $P_r$  会进一步减小, 就不可能可靠地检测到目标。因此, 为可靠地检测到目标, 必须满足下式约束

$$P_r \geq S_{rmin} \quad (2)$$

其中, 机载雷达接收机灵敏度为

$$S_{rmin} = kT_0 B_r F_r \left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{rmin} \quad (3)$$

式中:  $k$  为玻尔兹曼常数,  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T_0$  为标准室温, 一般取 290 K;  $B_r$  为雷达接收机的噪声带宽;  $F_r$  为雷达接收机的噪声系数;  $\left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{rmin}$  为接收机输出端的最小可检测信噪比。

将式(3)代入式(2), 得

$$P_t \geq \frac{(4\pi)^3 R_{rt}^4 L_{rt}}{G_t G_r \lambda^2 \sigma} \left[ kT_0 B_r F_r \left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{rmin} \right] \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 当给定目标 RCS、机载雷达与目标距离  $R_{rt}$  和一个最小可检测的输出信噪比  $(S_0/N_0)_{rmin}$  的情况下, 就可以得到雷达可靠检测目标所需的最小发射功率。

### 1.2 协同噪声干扰对截获接收机干扰模型

本文采用压制性噪声调幅信号干扰主要破坏或降低敌方无源探测系统对机载雷达信号的截获、分选和识别的能力, 使其截获性能降低。如果敌方无源探测系统受到己方协同干扰机的压制性干扰, 则系统对机载雷达信号的截获性能与其受到的干扰强度有关。由文献[19]可知, 协同干扰机有效干扰敌方截获接收机模型可表示为

$$\begin{cases} P_{ji} = \frac{P_j G_j G_i \lambda^2 \gamma_j}{(4\pi)^2 R_{ji}^2 L_{ji}} \\ P_{ji} \geq S_{imin} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{ji}$  为截获接收机接收到的干扰信号功率;  $P_j$  为干扰机的发射功率;  $G_j$  为干扰机的主瓣天线增益;  $G_i$  为截获接收机天线增益;  $\gamma_j$  为干扰信号对截获接收机天线的极化损失, 一般取 0.5;  $L_{ji}$  为干扰信号从发射到被截获接收机接收过程中的所有损耗;  $S_{imin}$  为截获接收机灵敏度。其中, 截获接收机灵敏度为

$$S_{imin} = kT_0 B_i F_i \left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{imin} \quad (6)$$

式中:  $B_i$  为截获接收机的噪声带宽;  $F_i$  为截获接收机的噪声系数;  $\left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{imin}$  为截获接收机输出端的最小可检测信噪比。

由于假设截获接收机由目标搭载, 则有  $P_{ji} = P_{jt}$ ,  $R_{ji} = R_{jt}$ ,  $L_{ji} = L_{jt}$ 。因此将式(6)代入式(5), 在一定

的  $R_{jt}$  和  $S_{imin}$  下,为了实现对方截获接收机的干扰,最小协同噪声干扰功率应满足

$$P_j \geq \frac{(4\pi)^2 R_{jt}^2 L_{jt}}{G_j G_t \lambda^2 \gamma_j} \left[ k T_0 B_i F_i \left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{imin} \right] \quad (7)$$

### 1.3 协同噪声干扰不影响雷达正常工作模型

为了使协同噪声干扰不对机载雷达的正常工作造成影响,雷达接收到的目标反射干扰信号功率和干扰机旁瓣或主瓣增益较低处的直射干扰功率应小于雷达接收机灵敏度,即满足下式约束

$$\begin{cases} P_{jtr} = \frac{P_j G_t G_j \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{rt}^2 R_{jt}^2 L_{jtr}}, P_{jr} = \frac{P_j G'_t G'_j(\alpha) \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{jr}^2 L_{jr}} \\ P_{jtr} \leq S_{rmin}, P_{jr} \leq S_{rmin} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_{jtr}$  为雷达接收到的经目标反射的干扰信号功率;  $P_{jr}$  为雷达接收到的干扰机旁瓣或主瓣增益较低处的直射干扰功率;  $L_{jtr}$  和  $L_{jr}$  分别为干扰信号从发射经目标反射到被雷达接收过程中的所有损耗和干扰机旁瓣或主瓣增益较低处的干扰信号从发射到直接被雷达接收过程中的所有损耗;  $G'_t$  为机载雷达旁瓣增益,考虑采用超低旁瓣;  $G'_j(\alpha)$  为协同干扰机天线主瓣在机载雷达旁瓣方向的增益。为了研究方便,根据文献[24],天线增益表达式为

$$G'_j(\alpha) = \begin{cases} G_j & 0 \leq \alpha \leq \frac{\theta_{0.5}}{2} \\ K \left( \frac{\theta_{0.5}}{\alpha} \right)^2 G_j & \frac{\theta_{0.5}}{2} \leq \alpha \leq 90^\circ \\ K \left( \frac{\theta_{0.5}}{90} \right)^2 G_j & 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\theta_{0.5}$  为干扰机天线波瓣宽度;  $K$  为常数,对于低增益、宽波束的天线,  $K$  一般取  $0.04 \sim 0.06$ ,对于高增益、窄波束天线,  $K$  一般取  $0.07 \sim 0.10$ 。

因此,在一定的空间位置关系下,为了使协同噪声干扰不对机载雷达的正常工作造成影响,协同噪声干扰功率应满足

$$P_j \leq \min \left\{ \frac{(4\pi)^3 R_{rt}^2 R_{jt}^2 L_{jtr}}{G_t G_j \lambda^2 \sigma} S_{rmin}, \frac{(4\pi)^2 R_{jr}^2 L_{jr}}{G'_t G'_j(\alpha) \lambda^2} S_{rmin} \right\} \quad (10)$$

式中:  $\min\{a, b\}$  表示取  $a$  和  $b$  中较小的值。

### 1.4 射频隐身性能优化算法

从对抗角度看,射频隐身技术的目的是在保证己方机载雷达、数据链等机载有源辐射系统正常使用的前提下,最大限度地降低截获接收机对飞机的截获概率,以对抗敌方截获接收机。因此,机载雷达的射频隐身性能可以通过截获接收机对飞机的截获概率来反映。本文假设截获接收机搭载于被探测目标上。截获接收机要实现对方雷达信号的有效截获,必须满足功率、空域、频率和时域 4 个方面的条件。截获接收机输入端雷达信号辐射功率为

$$P_{rt} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \gamma_t}{(4\pi)^2 R_{rt}^2 L_{rt}} \quad (11)$$

式中:  $\gamma_t$  为雷达信号对截获接收机天线的极化损失,一般取  $0.5$ 。根据文献[7],雷达成射频信号与环境中的噪声信号一起进入截获接收机,则雷达信号的截获概率为

$$p_1 = 0.5 \times \operatorname{erfc} \left( \sqrt{-\ln p_{fa}} - \sqrt{\frac{P_{rt}}{N_0 F_i} + 0.5} \right) \frac{T_{OT}}{T_1} \quad (12)$$

式中:  $p_{fa}$  为截获接收机虚警概率,  $N_0 = k T_0 B_i$  为截获接收机内部固有噪声功率,  $T_{OT}$  为雷达波束驻留时间,  $T_1$  为截获接收机扫描时间。

在噪声干扰作用下,截获接收机端的等效输入噪声功率由  $N_0$  上升到  $N_0 + P_{jt}$ ,则在协同噪声干扰情况下,截获接收机对己方飞机的截获概率为

$$p'_i = 0.5 \times \operatorname{erfc} \left( \sqrt{-\ln p_{ia}} - \sqrt{\frac{P_{\pi}}{(N_0 + P_{jt}) F_i} + 0.5} \right) \frac{T_{OT}}{T_1} \quad (13)$$

从式(5,13)中可以看出,在协同噪声干扰作用下的截获概率与噪声干扰信号功率、截获接收机内部固有噪声功率以及协同干扰机相对于机载雷达和目标的空间位置关系等因素有关。

为了在满足机载雷达探测性能需求的前提下,使得协同噪声干扰能够有效降低敌方无源探测系统的截获性能,同时又能确保噪声干扰信号不影响机载雷达的正常工作,综合上述模型,可以得到基于协同噪声干扰的机载雷达射频隐身性能优化算法

$$\begin{cases} \min_{P_i, P_j} & p'_i \\ \text{s. t.} & \frac{(4\pi)^3 R_{rt}^4 L_{rt}}{G_t G_r \lambda^2 \sigma} S_{r\min} \leq P_t \leq \overline{P_t^{\max}} \\ & \frac{(4\pi)^2 R_{jt}^2 L_{jt}}{G_j G_i \lambda^2 \gamma_j} S_{i\min} \leq P_j \leq C \\ & C = \min \left\{ \frac{(4\pi)^3 R_{rt}^2 R_{jt}^2 L_{jtr}}{G_t G_j \lambda^2 \sigma} S_{r\min}, \frac{(4\pi)^2 R_{jr}^2 L_{jr}}{G'_t G'_j(\alpha) \lambda^2} S_{r\min}, \overline{P_j^{\max}} \right\} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\overline{P_t^{\max}}$  为机载雷达最大发射功率;  $\overline{P_j^{\max}}$  为协同干扰机最大干扰功率。根据式(14)可以看出,基于协同噪声干扰的射频隐身优化算法是在保证机载雷达目标探测性能的条件下,考虑机载雷达相对于协同干扰机和目标的空间位置关系以及目标 RCS 特性时,通过自适应地调整机载雷达的发射功率和协同噪声干扰功率,最小化截获概率,以提升机载雷达的射频隐身性能。机载雷达的射频隐身性能与噪声干扰信号功率、机载雷达相对于协同干扰机和目标的空间位置关系以及目标 RCS 特性等因素密切相关。

## 2 仿真结果及分析

为了验证基于协同噪声干扰的机载雷达射频隐身性能优化算法的可行性和有效性,并进一步分析系统参数对机载雷达射频隐身性能的影响,本文进行了如下仿真。仿真参数设置如下:机载雷达最大发射功率  $\overline{P_t^{\max}} = 50$  kW,雷达天线增益  $G_t = G_r = 30$  dB,旁瓣增益  $G'_t = -50$  dB,信号波长  $\lambda = 0.03$  m,系统传播损耗  $L_{rt} = 5$  dB,接收机灵敏度  $S_{r\min} = 10^{-18}$  W,噪声系数  $F_r = 3$  dB,接收机最小输出信噪比  $\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\min} = 13$  dB,雷达波束驻留时间  $T_{OT} = 0.2$  s,距离截获接收机距离  $R_{rt} = 150$  km。协同干扰机最大干扰功率  $\overline{P_j^{\max}} = 50$  MW,干扰天线增益  $G_j = 20$  dB,协同干扰机天线主瓣与机载雷达天线主瓣之间的夹角  $\theta = 30^\circ$ ,系统传播损耗分别为  $L_{jt} = 5$  dB,  $L_{jr} = 5$  dB,  $L_{jtr} = 10$  dB,干扰信号对截获接收机天线的极化损失  $\gamma_j = 0.5$ ,距离截获接收机距离  $R_{jt} = 100$  km。截获接收机天线增益  $G_i = 0$  dB,截获接收机灵敏度  $S_{i\min} = 10^{-11}$  W,噪声系数  $F_i = 3$  dB,接收机最小输出信噪比  $\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\min} = 13$  dB,截获接收机虚警概率  $p_{ia} = 10^{-6}$ ,截获接收机扫描时间  $T_1 = 5$  s,雷达信号对截获接收机天线的极化损失  $\gamma_i = 0.5$ 。

图 2~4 分别给出了不同目标 RCS 下机载雷达发射功率、协同噪声干扰功率和截获概率随协同干扰机到目标距离的变化曲线。图 2 表明在一定的目标探测性能条件下,机载雷达发射功率与协同干扰机到目标的距离无关,而与目标 RCS 有关,目标自身 RCS 越大,所需的机载雷达发射功率就越小。

从图 3,4 可以看出,随着协同干扰机到目标距离的减小,协同干扰机与机载雷达之间的距离逐渐增大,使得干扰机旁瓣或主瓣增益较低处对机载雷达造成的直射干扰影响逐渐减弱,因此,协同噪声干扰功率随之增大,截获概率值由于干扰功率的增大而逐渐减小。当协同干扰机到达与目标相距 130 km 处

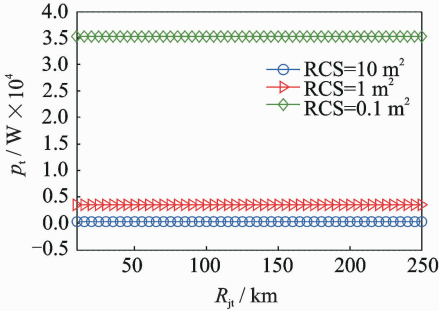


图2 不同目标 RCS 下机载雷达发射功率随  $R_{jt}$  的变化曲线

Fig. 2 Airborne radar transmitting power versus  $R_{jt}$  with different RCS

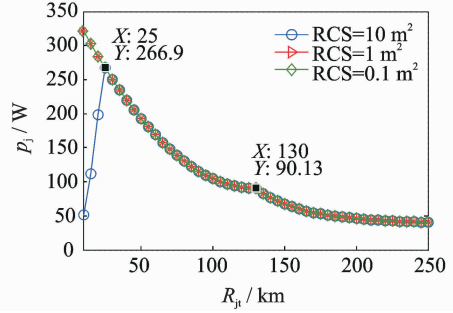


图3 不同目标 RCS 下协同噪声干扰功率随  $R_{jt}$  的变化曲线

Fig. 3 Cooperative noise jamming power versus  $R_{jt}$  with different RCS

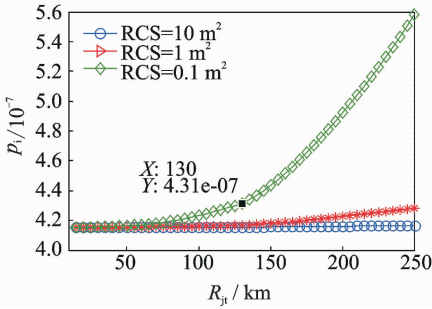


图4 不同目标 RCS 下截获概率随  $R_{jt}$  的变化曲线

Fig. 4 Probability of intercept versus  $R_{jt}$  with different RCS

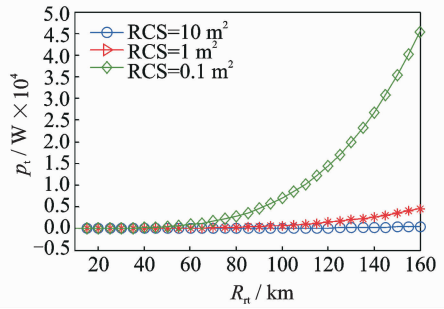


图5 不同目标 RCS 下机载雷达发射功率随  $R_{jt}$  的变化曲线

Fig. 5 Airborne radar transmitting power versus  $R_{jt}$  with different RCS

时,根据式(a)可知,协同干扰机天线主瓣在机载雷达旁瓣方向的增益发生了变化,使得协同噪声干扰功率和截获概率的变化趋势更加平缓。当目标 RCS 为  $10 \text{ m}^2$  时,随着协同干扰机到目标距离的进一步减小,经目标反射的干扰信号对机载雷达的影响逐渐大于干扰机旁瓣或主瓣增益较低处的直射干扰对机载雷达的影响,使得在协同干扰机到达与目标相距 25 km 处时,干扰信号功率急剧减小。图 4 中,目标 RCS 越小,截获概率反而越大,这说明了机载雷达的射频隐身性能与噪声干扰信号功率、机载雷达相对于协同干扰机和目标的空间位置关系以及目标 RCS 特性等因素密切相关。

图 5~7 分别给出了不同目标 RCS 下机载雷达发射功率、协同噪声干扰功率和截获概率随机载雷达到目标距离的变化曲线。从图 5 可以看出,机载雷达发射功率随着与目标距离的增大而逐渐增加,而且在机载雷达与目标距离一定的情况下,目标 RCS 越大,所需的机载雷达发射功率就越小。

图 6,7 表明随着机载雷达与目标距离的增大,协同干扰机对机载雷达造成的干扰影响逐渐减弱,因此,协同噪声干扰功率随之增大,截获概率值逐渐减小。从图 6,7 中还可以看出,在机载雷达到达与截获接收机相距 115 km 处时,如前文所述,协同干扰机天线主瓣在机载雷达旁瓣方向的增益发生了变化,使得协同噪声干扰功率和截获概率的变化趋势更加平缓,从而进一步说明了机载雷达的射频隐身性能与噪声干扰信号功率、机载雷达相对于协同干扰机和目标的空间位置关系等因素密切相关。

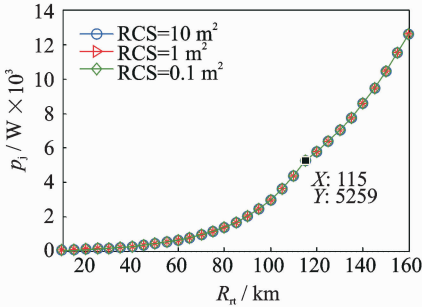


图 6 不同目标 RCS 下协同噪声干扰功率随  $R_n$  的变化曲线

Fig. 6 Cooperative noise jamming power versus  $R_n$  with different RCS

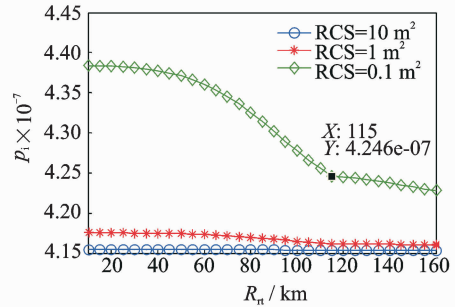


图 7 不同目标 RCS 下载获概率随  $R_n$  的变化曲线

Fig. 7 Probability of intercept versus  $R_n$  with different RCS

### 3 结束语

作为一种主动对抗措施,有源噪声干扰能够有效地降低敌方无源探测系统的截获能力,从而提升机载雷达的射频隐身性能。本文研究了协同噪声干扰对机载雷达射频隐身性能的影响,推导了在协同噪声干扰情况下雷达信号截获概率的计算方法,并建立了一种基于协同噪声干扰的机载雷达射频隐身性能优化模型,通过自适应地调整机载雷达的发射功率和协同噪声干扰功率,在满足系统资源和性能要求的前提下,最小化截获概率,从而达到提升机载雷达射频隐身性能的目的。仿真结果表明,协同噪声干扰可以有效地降低无源探测系统的截获性能,显著提升机载雷达的射频隐身性能。值得注意的是,本文算法只考虑了协同噪声干扰在单机机载雷达情况下的射频隐身性能优化模型,下一步的研究重点是将本文的射频隐身优化算法进行扩展,实现其在机载雷达组网系统中的应用。

### 参考文献:

- [1] Schleher D C. LPI radar: Fact or fiction [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(5):3-6.
- [2] Phillip E P. Detecting and classifying low probability of intercept radar [M]. Boston: Artech House, 2009: 342-352.
- [3] Lynch D Jr. Introduction to RF stealth [M]. Raleigh, NC, USA: Sci Tech Publishing, 2004:1-9.
- [4] 张贞凯, 周建江, 汪飞, 等. 机载相控阵雷达射频隐身时最优搜索性能研究 [J]. 宇航学报, 2011, 32(9):2023-2028. Zhang Zhenkai, Zhou Jianjiang, Wang Fei, et al. Research on optimal search performance of airborne phased array radar for radio frequency stealth [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(9):2023-2028.
- [5] 张贞凯, 周建江, 汪飞. 基于射频隐身的雷达发射波束形成方法 [J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(2):203-208. Zhang Zhenkai, Zhou Jianjiang, Wang Fei. A novel method of radar transmit beamforming based radio frequency stealth [J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(2):203-208.
- [6] 张杰, 汪飞, 阮淑芬. 基于射频隐身的相控阵雷达搜索控制参量优化设计 [J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4):636-641. Zhang Jie, Wang Fei, Ruan Shufen. Optimization design for search control parameter of phased array radar based on rf stealth [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(4):636-641.
- [7] 刘宏强, 魏贤智, 李飞, 等. 基于射频隐身的雷达跟踪状态下单次辐射能量实施控制方法 [J]. 电子学报, 2015, 43(10):2047-2052. Liu Hongqiang, Wei Xianzhi, Li Fei, et al. The real time control method of radar single radiation power based on RF stealth at the tracking [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10):2047-2052.
- [8] Godrich H, Petropulu A P, Poor H V. Power allocation strategies for target localization in distributed multiple-radar architectures [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2011, 59(7): 3226-3240.
- [9] 廖雯雯, 程婷, 何子述. MIMO 雷达射频隐身性能优化的目标跟踪算法 [J]. 航空学报, 2014, 35(4):1134-1141. Liao Wenwen, Cheng Ting, He Zishu. A target tracking algorithm for RF stealth performance optimization of MIMO radar [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(4):1134-1141.
- [10] 杨少委, 程婷, 何子述. MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5):1017-1022. Yang Shaowei, Cheng Ting, He Zishu. Algorithm of radio frequency stealth for MIMO radar in searching mode [J]. Journal



of Electronics & Information Technology, 2014, 36(5):1017-1022.

- [11] Narykov A S, Krasnov O A, Yarovoy A. Algorithm for resource management of multiple phased array radars for target tracking[C]// The 16th International Conference on Information Fusion. Istanbul, Turkey:[s. n.], 2013: 1258-1264.
- [12] Narykov A S, Yarovoy A. Sensor selection algorithm for optimal management of the tracking capability in multisensor radar system[C]// Proceedings of the 43rd European Microwave Conference. Nuremberg, Germany:[s. n.], 2013: 1811-1814.
- [13] Shi Chenguang, Wang Fei, Zhou Jianjiang, et al. Optimal power allocation algorithm for radar network systems based on low probability of intercept optimization [J]. Journal of Radars, 2014, 3(4):465-473.
- [14] Shi Chenguang, Wang Fei, Sellathurai M, et al. Robust transmission waveform design for distributed multiple-radar systems based on low probability of intercept [J]. ETRI Journal, 2016, 38(1):70-80.
- [15] 王一川, 单甘霖. 基于协方差控制与辐射控制的多传感器管理方法[C]//第七届中国信息融合大会. 青岛:[s. n.], 2015: 1106-1110.  
Wang Yichuan, Shan Ganlin. Method of multi-sensor management based on covariance control and radiation control [C]// The Seventh Chinese Information Fusion Conference. Qingdao, China:[s. n.], 2015:1106-1110.
- [16] 吴巍, 于洪波. 基于市场理论的多机载平台多传感器协同搜索研究 [C]//第七届中国信息融合大会. 青岛:[s. n.], 2015: 923-927.  
Wu Wei, Yu Hongbo. Research on multi-airborne-platform sensors collaboration search based on market theory[C]// The Seventh Chinese Information Fusion Conference. Qingdao, China:[s. n.], 2015:923-927.
- [17] 杨军佳, 吴琼, 孙正鑫. 基于侦察系统定位模糊区的噪声干扰效果分析 [J]. 雷达与对抗, 2012, 32(1):8-11.  
Yang Junjia, Wu Qiong, Sun Zhengxin. The analysis of noise jamming effect based on ambiguous location area of reconnaissance system [J]. Radar & ECM, 2012, 32(1):8-11.
- [18] 杨军佳, 毕大平, 张国利. 有源噪声对雷达对抗侦察系统的干扰分析 [J]. 电子信息对抗技术, 2012, 27(5):41-45.  
Yang Junjia, Bi Daping, Zhang Guoli. Analysis of active noise interference on radar counter-reconnaissance system [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2012, 27(5):41-45.
- [19] 杨军佳, 毕大平, 沈爱国. 空间无源侦察系统电子主动对抗有效部署区分析 [J]. 电子信息对抗技术, 2013, 28(1):63-68.  
Yang Junjia, Bi Daping, Shen Aiguo. Effective disposition area analysis of active electronic countermeasure on space passive reconnaissance system [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2013, 28(1):63-68.
- [20] 张国利, 毕大平, 李磊. 噪声干扰对雷抗侦察系统截获能力影响分析 [J]. 航天电子对抗, 2013, 29(3):51-53, 64.  
Zhang Guoli, Bi Daping, Li Lei. Analysis of active noise jamming effect to radar counter-reconnaissance system [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2013, 29(3):51-53, 64.
- [21] Wang Fei, Sellathurai M, Liu Weigang, et al. Security information factor based airborne radar RF stealth [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(2):258-266.
- [22] Shi Chenguang, Wang Fei, Zhou Jianjiang, et al. Fuzzy chance-constrained programming based security information optimization for low probability of identification enhancement in radar network system [J]. Radio Engineering, 2015, 24(1):199-207.
- [23] Shi Chenguang, Wang Fei, Zhou Jianjiang, et al. Security information factor based low probability of identification in distributed multiple-radar system [C]// 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Brisbane, Australia:[s. n.], 2015: 3716-3720.
- [24] 姜秋喜. 网络雷达对抗系统导论 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010:11-30.  
Jiang Qiuxi. Introduction to network radar countermeasures system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 11-30.

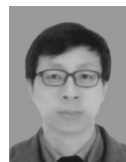
#### 作者简介:



**时晨光**(1989-),男,博士研究生,研究方向:飞机射频隐身技术,分布式信息融合及多传感器协同,E-mail: scg\_space@163.com.



**汪飞**(1976-),男,副教授,研究方向:飞机射频隐身技术、微弱信号检测和阵列信号处理等。



**周建江**(1962-),男,教授、博士生导师,研究方向:飞机射频隐身技术、雷达目标特性分析和阵列信号处理等。



**李海林**(1976-),男,讲师,研究方向:飞机射频隐身技术、雷达目标特性分析和机会阵理论等。

