

MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身算法

杨少委* 程婷 何子达

(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

摘要: 为提高 MIMO 雷达在电子战中的生存能力, 分析了雷达各参数与其搜索性能及射频隐身性能的关系, 建立了 MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身性能优化模型, 其中射频隐身性能综合考虑了 MIMO 雷达的截获因子及搜索帧周期。在此基础上, 给出了一种 MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身优化算法, 该算法通过自适应地控制雷达系统天线划分的子阵数、信号占空比、波束驻留时间以及搜索帧周期, 在满足雷达系统检测性能及搜索时间资源约束的要求下, 优化雷达系统的射频隐身性能。仿真结果表明, MIMO 雷达采用搜索模式下的射频隐身算法, 能在保证检测性能的前提下, 相比非射频隐身的搜索状态, 获得更好的射频隐身性能。

关键词: MIMO 雷达; 雷达搜索; 射频隐身; 截获因子; 截获概率

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)05-1017-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00994

Algorithm of Radio Frequency Stealth for MIMO Radar in Searching Mode

Yang Shao-wei Cheng Ting He Zi-shu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In order to improve the viability of MIMO radar in electronic warfare, the relationship between radar parameters and its searching performance as well as the Radio Frequency (RF) stealth performance is firstly analyzed. An RF stealth optimization model considering both the intercept factor and the searching frame period is formulated for MIMO radar in searching mode. Based on the above model, an optimization algorithm of RF stealth for MIMO radar in searching mode is introduced, where the sub-array number, signal duty cycle, dwell time and searching frame period are controlled adaptively to optimize the RF stealth performance under the constraints of detection performance and time resource of the system. Simulation results show that with RF stealth algorithm in searching mode, MIMO radar can achieve desired detection performance and obtain better RF stealth performance compared with traditional phased array radar.

Key words: MIMO radar; Radar searching; Radio Frequency (RF) stealth; Intercept factor; Probability of intercept

1 引言

近年来, 雷达电子对抗技术发展迅速, 特别是无源探测定位技术的进步, 对雷达构成了严重的威胁。为了提高雷达的生存能力并发挥其应有的效能, 除了利用诸如雷达横截面(Radar Cross Section, RCS)减缩^[1-3]等无源隐身技术外, 运用提高雷达射频隐身性能的技术也是一个重要途径。相参 MIMO 雷达是 MIMO 体制雷达的一种重要形式, 其发射相互正交的信号, 并且采用低增益的宽波束照射探测空域^[4,5], 具有更好地实现系统射频隐身的潜力。

雷达资源管理是提高系统射频隐身性能的重要途径之一。现有研究雷达资源管理的文献主要都着

眼于雷达的探测性能。有的在在一定探测性能约束下最优化雷达资源使用^[6,7]; 有的在雷达资源受限的情况下最优化雷达探测性能^[8,9]。虽然前者在一定程度上可以提高雷达的射频隐身性能, 但是总体上, 常规资源管理方法都未将雷达的射频隐身性能作为优化的目标。近年来, 陆续有一些考虑雷达射频隐身性能的研究文献发表。文献[10]提出了雷达跟踪时, 考虑射频隐身的采样间隔和基于目标距离及 RCS 变化的最低辐射功率的自适应设计方法。文献[11]以最小化能量消耗函数, 最小化估计检测概率与期望检测概率之差的 2 范数为目标, 利用带精英策略的非支配排序遗传算法对搜索目标函数进行了优化。文献[12]设计了一种功率分级准则, 以实现各级功率、最小化副瓣功率为目标, 通过改进的多目标优化的粒子群算法对阵元的开关设置进行了优化。

2013-07-08 收到, 2013-11-08 改回

国家自然科学基金(61101171)和中央高校基本业务费项目(ZYGX2013J021)资助课题

*通信作者: 杨少委 ysw_8@163.com

文献[13]建立了以检测概率为准则的探测优化模型,分析了驻留时间与检测概率之间的关系,并得出了两种辐射能量控制策略下的最优控制方案。文献[14]将射频隐身能力与发现目标能力综合考虑,建立雷达探测性能的多目标优化模型,以此为指标来优化配置相控阵雷达的工作参数。

上述考虑射频隐身的文献大都以相控阵雷达为研究对象,未针对 MIMO 雷达展开研究。本文建立了 MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身性能优化模型,并提出一种基于资源管理的射频隐身优化算法。该算法可自适应地控制 MIMO 雷达执行搜索任务时天线划分的子阵数、信号占空比、波束驻留时间和搜索帧周期,在满足搜索性能的条件下达到优化系统射频隐身性能的目的。

2 MIMO 雷达截获因子

假设 MIMO 雷达收发阵列共址,阵列共包含 M 个阵元,若其均匀分为 K 个子阵,各子阵包含 L 个阵元,则有 $M = KL$ 。MIMO 雷达信号收发过程可简要描述如下:各子阵发射相互正交的波形,子阵内各阵元发射相同波形, K 个子阵发射信号在空域形成合成信号,接收阵列接收到经目标散射后的回波信号后,将各阵元的接收信号与每个子阵的发射信号进行匹配滤波,再进行等效发射波束形成和接收波束形成^[5]。结合雷达方程,不难得出 MIMO 雷达最大探测距离满足:

$$R_{r,\max}^4 = \frac{G_t G_r M p_t \eta t_B \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 N_0 S_{r,\min}} \quad (1)$$

其中 G_t 和 G_r 分别为雷达发射与接收天线增益,满足 $G_t \propto L$, $G_r \propto M$, p_t 是单个阵元的峰值发射功率, η 为信号占空比, t_B 为波束驻留时间, σ 为目标的雷达截面积, λ 为信号波长, N_0 表示雷达接收机处的噪声功率谱密度, $S_{r,\min}$ 为雷达最小可检测信噪比。

截获接收机的最大探测距离满足:

$$R_{i,\max}^2 = \frac{G_i \Sigma(L, \varphi, \theta) G_i M p_t \lambda^2 G_{\text{IP}}}{(4\pi)^2 N_i B_i S_{i,\min}} \quad (2)$$

其中 $\Sigma(L, \varphi, \theta)$ 为雷达在截获接收机方向的归一化方向图因子,由于子阵阵元个数 K ,截获接收机所在位置的方位角 φ ,俯仰角 θ 以及当前波束指向决定,最大值为 1。 G_i 为截获接收机的接收天线增益, G_{IP} 为截获接收机的处理增益,与发射正交信号个数呈反比,与发射信号脉冲数 N_p 成正比,即 $G_{\text{IP}} \propto \gamma N_p / K$, $\gamma \in (0, 1)$ 为非相参积累损失。截获接收机处的噪声功率谱密度为 $N_i B_i$ 为截获接收机带宽, $S_{i,\min}$ 为截获接收机的最小可检测信噪比。

截获因子定义为截获接收机最大探测距离与雷达最大探测距离之间的比值。

$$\alpha = R_{i,\max} / R_{r,\max} \quad (3)$$

经过一系列公式的替代、运算,可获得 MIMO 雷达截获因子表达式:

$$\alpha^4 \propto \frac{M p_t \Sigma^2(L, \varphi, \theta) G_i^2 \lambda^2 N_0 S_{r,\min} \gamma^2 t_B}{4\pi K^3 \eta \sigma N_i^2 B_i^2 S_{i,\min}^2 T_p^2} \quad (4)$$

其中 T_p 为脉冲重复周期。

3 MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身性能优化模型

MIMO 雷达执行搜索任务时,可控参数包括子阵划分个数 K ,信号占空比 η ,波束驻留时间 t_B 和搜索帧周期 T_f 。下面建立可控参数与射频隐身和搜索性能之间的关系,构建射频隐身性能优化模型。

3.1 目标函数

假设整个搜索区域被分成 N 个子搜索区域,将第 n 个子区域搜索任务的参数记为 $(K_n, \eta_n, t_{B,n}, T_{f,n})$ 。其中, $K_n, \eta_n, t_{B,n}$ 和 $T_{f,n}$ 分别为第 n 个子区域搜索期间的雷达子阵划分个数,信号的占空比,波束驻留时间和搜索帧周期。

由于搜索帧周期描绘了系统在时域上的资源分布,截获因子则描述了每次搜索的能量消耗,而具有良好射频隐身性能的系统,在保证雷达任务执行效果的前提下,其时空域上的资源分布应最小。因此,综合考虑 MIMO 雷达截获因子及搜索帧周期,采用式(5)描述系统在执行搜索过程中的射频隐身性能。

$$P_I = 1 - \prod_{n=1}^N \left[\prod_{i=1}^{N_{B,n}} (1 - P_{n,i}) \right]^{T_{f,\max} / T_{f,n}} \quad (5)$$

其中 $T_{f,\max}$ 为定义的搜索帧周期的最大值, $N_{B,n}$ 表示搜索第 n 个子区域所需的波位数,其计算方法可参看文献[15]。 $P_{n,i}$ 为对第 n 个子区域第 i 个波位搜索的被截获概率,其为截获因子的增函数,函数值变化率随截获因子的增大而减小。例如 $P_{n,i} = 1 - \exp(-c\alpha_{n,i})$, $c > 0$, 就是一个合理的函数形式。

假设雷达扫描区域的范围为 $[\varphi_1, \varphi_2]$ 和 $[\theta_1, \theta_2]$,在该区域内存在一部截获接收机,考虑到缺乏截获接收机位置先验信息,假设单个截获接收机的位置在雷达扫描区域内服从均匀分布。于是,可获得如下统计平均累积被截获概率:

$$P_{I,s} = \frac{1}{\Delta\varphi \Delta\theta} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[1 - \prod_{n=1}^N \prod_{i=1}^{N_{B,n}} (1 - P_{n,i}) \right]^{T_{f,\max} / T_{f,n}} d\theta d\varphi \quad (6)$$

其中 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 。

3.2 约束条件

设目标径向逼近速度为 v , 搜索帧周期为 T_f , 则目标在两次被照到的过程中, 径向飞行距离为

$$\Delta r = vT_f \quad (7)$$

搜索模式下的射频隐身算法在保证系统正常搜索性能的前提下, 优化其射频隐身性能, 雷达搜索性能可由检测概率描述。假定雷达首次照射到目标时, 目标与雷达的距离在 R_s 到 $R_s - \Delta r$ 间均匀分布, 其中 R_s 为雷达作用距离, 于是, 以 R_t 作为跟踪起始距离, 雷达对目标的平均检测概率为

$$P_d(R_t) = \frac{1}{\Delta r} \int_{R_s - \Delta r}^{R_s} \left\{ 1 - \prod_{i=0}^{\lfloor \frac{R_s - R_t}{\Delta r} \rfloor} [1 - P_{dc} \cdot P_{di}(r - i\Delta r)] \right\} dr \quad (8)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整数, P_{dc} 是雷达能正确识别目标的概率, $P_{di}(r - i\Delta r)$ 表示雷达对距离 $r - i\Delta r$ 处目标的单次观测的检测概率, 与单次观测信噪比 SNR_i 有关:

$$\text{SNR}_i = \frac{G_t G_r M p_t \eta t_B \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 N_0 (r - ivT_f)^4} \quad (9)$$

其中 r 为雷达与目标的初始径向距离。可见, 累积检测概率与所有可配置参数有关。

另外, 对于上述搜索过程, 有如下时间约束关系式:

$$\sum_{n=1}^N \frac{N_{B,n} t_{B,n}}{T_{f,n}} \leq 1 \quad (10)$$

其含义为搜索过程中各子区域的时间利用率之和不超过 1。

综上所述, 本文提出的 MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身优化问题, 实质为一个带约束条件的最优化问题。具体地, 可表示为

$$\begin{aligned} & \min_{(K_n, \eta_n, t_{B,n}, T_{f,n})} P_I \\ & \text{s.t.} \begin{cases} P_{d,n}(R_{t,n}) \geq P_{D,n}(R_{t,n}), & n = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{n=1}^N \frac{N_{B,n} t_{B,n}}{T_{f,n}} \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $R_{t,n}$ 为给定的第 n 个子区域的跟踪起始距离, $P_{d,n}(R_{t,n})$ 为第 n 个子区域对应于 $R_{t,n}$ 的累积检测概率, $P_{D,n}(R_{t,n})$ 为对应于 $R_{t,n}$ 的累积检测概率门限。

4 MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身算法

式(11)所描述的优化问题为带约束的非线性优化问题, 同时, 子阵划分数取值的离散性使其进一步成为混合整数优化问题。遗传算法是当今应用

最为广泛的智能优化算法之一, 其具有较强的全局搜索能力, 适用范围广, 稳健性好^[16], 在此, 采用遗传算法对本文给出的优化模型进行求解。

根据具体求解过程, MIMO 雷达搜索模式下射频隐身算法的流程图如图 1 所示。其中, 采用二进制格雷码进行待优化参数编码。

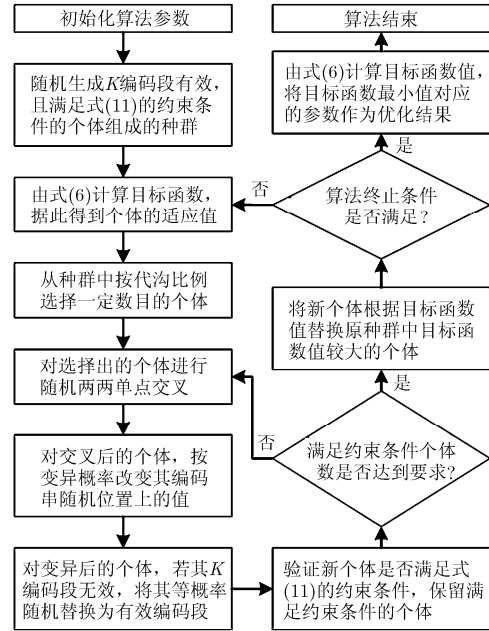


图 1 算法流程图

下面对图 1 中的一些操作进行说明。考虑到子阵数 K 为离散整数取值, 对于此类整数编码, 要求编码空间不小于整数解空间, 因此容易产生无效编码, 无效编码的存在将影响算法的收敛速度, 甚至使目标函数与约束条件无法求取。因此, 在初始化种群, 以及经交叉变异生成新个体时, 对于一个个体的编码串, 若其对应于子阵数 K 的编码段(以下简称 K 编码段)为无效编码, 则将此无效 K 编码段用有效编码段替换, 用于替换的有效编码段在相应有效编码空间中等概率随机选取。

考虑到不满足约束条件个体的产生, 出现在交叉和变异环节, 即出现在遗传算子中, 本算法中, 对于交叉、变异及 K 编码段修正后生成的新个体, 保留满足约束条件的个体, 并重复交叉、变异和 K 编码段修正操作, 直至满足约束条件的个体数目达到要求。此种策略相较惩罚函数的方法将得到更多满足约束条件的个体, 从而更有利于算法的收敛。

另外, 本算法中适应度将采用基于排序的适应度分配方法通过目标函数值求取, 采用随机遍历采样进行选择操作, 交叉操作时, 对被选择的个体, 进行随机两两单点交叉, 在重插入时, 前述生成的

新个体依其目标函数值替换原种群中目标函数值较大的个体。

终止条件为连续若干代遗传操作得到的目标函数值的波动不超过给定的门限, 或进化代数达到预设值。

5 仿真及结果分析

设雷达天线阵列为总阵元数 $M=64$ 的均匀线阵, 阵元间距为 $1/2$ 波长, 波长 $\lambda=5.45$ cm, 天线效率为 0.5, 噪声温度为 290 K, 噪声系数为 2, 并设雷达与截获接收机处具有相同的噪声功率谱密度, 假设子搜索区域个数为 1, 区域的角度范围为 $[-40^\circ, 40^\circ]$, 信号总峰值功率为 10^7 W, 雷达作用距离 R_s 设为 200 km, 目标的径向逼近速度为 510 m/s。子阵划分个数 K 的可选参数集为 $\{1, 2, 4, 8, 16, 32, 64\}$, 其余 3 个待优化参数的可行域分别为 $\eta \in (0, 0.25]$, $t_B \in (0, 0.026]$ s, $T_f \in (0, 20]$ s。本仿真将以 Swerling-I 型目标为例, 虚警概率 $P_{fa} = 10^{-6}$, 累积检测概率门限 $P_D=0.95$ 。

为了简化截获因子的计算公式, 参照文献[12], 当雷达子阵划分个数为 1, 信号占空比为 0.01, 驻留时间为 26 ms, 目标 RCS 为 1 m^2 时, 假设截获因子 $\alpha_0=1$, 并设 $T_{f,\max}=20$ s, 雷达能正确识别目标的概率 $P_{dc}=1$ 。另外, 取对第 n 个子区域的第 i 个波位搜索的被截获概率为 $P_{n,i} = 1 - \exp(-0.5\alpha_{n,i})$ 。

采用 MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身算法为上述雷达实施可控参数分配。算法中种群规模为 250, 遗传代数为 500, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.05, 代沟为 0.9, 终止条件为遗传代数达到预设值 500。

图 2 给出了跟踪起始距离要求从 120 km 变化至 180 km 时, 各约束条件满足的情况。从图 2 中可以看出, 对于各给定的跟踪起始距离, 累积检测概率满足检测门限要求, 且时间利用率远小于 1, 即优化所得的参数都可满足约束条件。

图 3 为子阵划分个数 K 的变化。从图 3 中可以

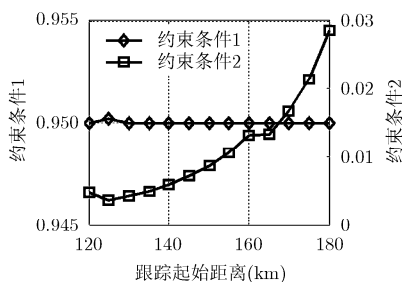


图2 约束条件与 R_t 的关系

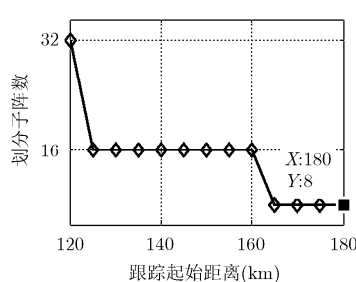


图3 子阵数 K 与 R_t 的关系

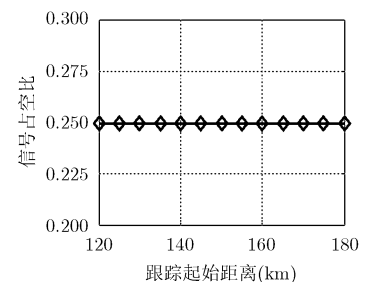


图4 占空比 η 与 R_t 的关系

看出, 子阵划分个数随跟踪起始距离的增大呈减小趋势, 这是由于当跟踪起始距离较小时, MIMO 雷达具有更多的积累次数, 相应地降低了对单次检测信噪比的要求, 因此允许划分成更多的子阵。子阵数目的增加有利于减小雷达被截获概率, 提高射频隐身性能。

图 4 为信号占空比 η 的变化。从图 4 中可以看出, 对于各给定的跟踪起始距离, 信号占空比及驻留时间两者均取其定义范围内的最大值。从式(6)和式(8)可以看出, 信号占空比 η 为 P_{I_s} 的单调减函数, 且为 P_d 的单调增函数, 因此, η 在其定义范围内取得最大值对目标函数的最小化及检测概率约束的满足均有利。

图 5 为驻留时间 t_B 的变化。从图 5 中可以看出, 为满足检测概率约束, 对于各给定的跟踪起始距离, 驻留时间趋于其定义范围内的最大值。

图 6 为搜索帧周期 T_f 的变化。从图 6 中可以看出, 对于相同的 K, T_f 随 R_t 的增大呈减小趋势; 当 R_t 变为 125 km, 165 km 时, K 分别下降为 16 及 8, 此时 T_f 有所增大。这是由于对于相同的 K , 随着 R_t 的增大, 将通过减小 T_f 增加雷达的积累次数以维持一定的检测概率; 当 K 减小时, 将提高单次检测信噪比, 因此, 允许更大的搜索帧周期 T_f , 即减小积累次数。MIMO 雷达采用正交发射-接收端合成波束的方式使得其可通过灵活的子阵划分获得更好的射频隐身性能。子阵划分个数 K 与搜索帧周期 T_f 的取值体现了累积被截获概率 P_{I_s} 与累积检测概率 P_d 的折衷。

图 7 给出了跟踪起始距离为 120 km, 150 km 和 180 km 时遗传算法的收敛曲线, 从图 7 中可以看出算法在遗传到第 50 代左右收敛, 其它跟踪起始距离情况下, 遗传算法具有类似的收敛特性。

图 8 给出了上述参数配置下, MIMO 雷达统计射频隐身性能的变化曲线。同时, 将该算法与雷达资源管理算法所获得的射频隐身性能进行了对比。其中雷达资源管理算法的优化函数为

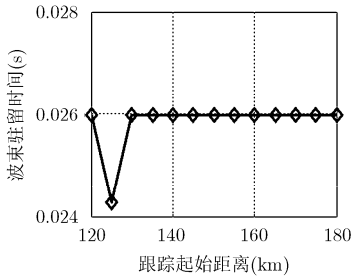


图 5 波束驻留时间 t_B 与 R_t 的关系

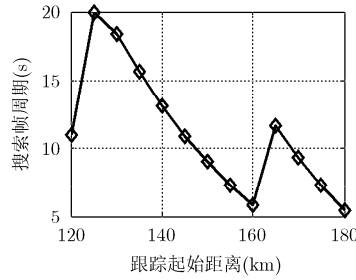


图 6 搜索帧周期 T_f 与 R_t 的关系

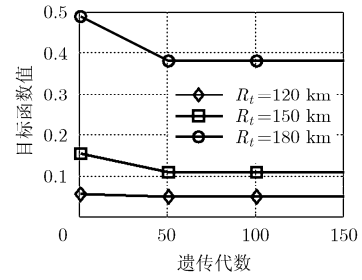


图 7 遗传算法收敛曲线

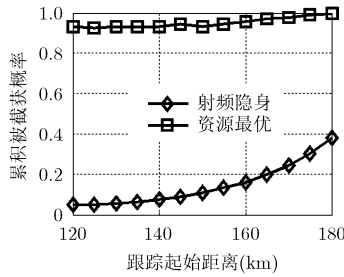


图 8 累积被截获概率 P_I 与 R_t 的关系

$$\begin{aligned} \min_{(K_n, \eta_n, t_{B,n}, T_{f,n})} & \sum_{n=1}^N (c_{n,1} t_{B,n} N_{B,n} / T_{f,n} + c_{n,2} \eta_n) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} P_{d,n}(R_{t,n}) \geq P_{D,n}(R_{t,n}), & n = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{n=1}^N \frac{N_{B,n} t_{B,n}}{T_{f,n}} \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

其中，取值 $c_{n,1} = c_{n,2} = 0.5$ 。

可以看出，MIMO 雷达的累积被截获概率随跟踪起始距离的增大有所增大，这是由于对于较大的跟踪起始距离，为满足约束条件，对参数取值的要求更苛刻，而这些参数取值将得到相对更大的累积被截获概率；对于各跟踪起始距离，雷达资源管理算法单纯以雷达资源最优为优化目标，在该场景下雷达的累积被截获概率稳定在一个相对较大的水平。可见，对于相同的阵列，采用本文的射频隐身优化算法可以得到更好的射频隐身性能，特别是跟踪起始距离相对较小的情况。

6 结论

针对 MIMO 雷达在搜索模式下的射频隐身问题，建立了隐身性能优化模型，该优化模型以 MIMO 雷达的累积被检测概率最小化为优化目标，以 MIMO 雷达的累积检测概率及时间资源条件为约束，通过求解优化问题，给出了一种基于遗传算法的射频隐身优化算法，对雷达天线子阵数 K ，信号占空比 η ，波束驻留时间 t_B 和搜索帧周期 T_f 进行优化。由优化结果可知，在给定跟踪起始距离 R_t 后，该优化算法可在满足搜索要求的情况下，使 MIMO

雷达的累积被截获概率尽可能地小，并且比相应的非射频隐身的搜索状态具有更好的射频隐身性能。

参考文献

- [1] 阮颖铮. 天线的散射机理和雷达截面减缩[J]. 宇航学报, 1990, (4): 94-100.
Ruan Ying-zheng. Scattering mechanism and RCS reduction of antennas[J]. *Journal of Astronautics*, 1990, (4): 94-100.
- [2] 冯林, 邓书辉, 阮颖铮, 等. 天线模式项散射分析与天线 RCS 减缩[J]. 电子与信息学报, 1996, 18(2): 189-193.
Feng Lin, Deng Shu-hui, Run Ying-zheng, et al. Antenna mode scattering component and RCS reduction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 1996, 18(2): 189-193.
- [3] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 一种超薄吸波材料及其在缝隙天线中的应用[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2790-2794.
Yang Huan-huan, Cao Xiang-yu, Gao Jun, et al. An ultra-thin metamaterial absorber and its application in reducing RCS of slot antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2790-2794.
- [4] Rabideau D J and Parker P. Ubiquitous MIMO multifunction digital array radar[C]. 2003 Conference Record of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2003, 1: 1057-1064.
- [5] 何子述, 韩春林, 刘波. MIMO 雷达概念及其技术特点分析[J]. 电子学报, 2005, 33(12A): 2441-2445.
He Zi-shu, Han Chun-lin, and Liu Bo. MIMO radar and its technical characteristic analyses[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12A): 2441-2445.
- [6] Billman E R. Parameter optimisation in phased array radar[C]. IEE International Conference on radar, Brighton, UK, 1992: 34-37.
- [7] Billman E R. Design and performance considerations in modern phased array radar[C]. IEE International Conference on radar, London, UK, 1982: 15-19.
- [8] Zatman M. Radar resource management for UESA[C]. IEEE Radar Conference, CA, USA, 2002: 73-76.
- [9] 卢建斌, 胡卫东, 郁文贤. 相控阵雷达资源受限时最优搜索性能研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(10): 1388-1390.
Lu Jian-bin, Hu Wei-dong, and Yu Wen-xian. Research on

- optimal search performance of phased array radars with limited resources[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(10): 1388-1390.
- [10] 张贞凯, 周建江, 田雨波, 等. 基于射频隐身的采样间隔和功率设计[J]. *现代雷达*, 2012, 34(4): 19-23.
Zhang Zhen-kai, Zhou Jian-jiang, Tian Yu-bo, *et al.* Design of sampling interval and power based on radio frequency stealth[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(4): 19-23.
- [11] 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 Zhen-kai, Zhou Jian-jiang, 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.
- [12] 张贞凯, 周建江, 汪飞, 等. 基于射频隐身的相控阵雷达功率控制算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(11): 2244-2248.
Zhang Zhen-kai, Zhou Jian-jiang, Wang Fei, *et al.* Novel algorithm of power control based on radio frequency stealth[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 34(11): 2244-2248.
- [13] 廖俊, 于雷, 俞利新, 等. 基于 LPI 的相控阵雷达辐射控制方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(12): 2638-2643.
Liao Jun, Yu Lei, Yu Li-xin, *et al.* Method of radiation control for phased array radar based on LPI[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(12): 2638-2643.
- [14] 廖俊, 于雷, 周中良, 等. 机载相控阵雷达探测参数优化[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(11): 2487-2493.
Liao Jun, Yu Lei, Zhou Zhong-liang, *et al.* Optimizing detection parameters of airborne PAR[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(11): 2487-2493.
- [15] Alexopoulos A. Radar systems considerations for phased array aperture design using conformal transformations on Riemannian manifolds[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(8): 2239-2246.
- [16] 杨淑莹, 张桦. 群体智能与仿生计算——Matlab 技术实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012, 第 2 章.
Yang Shu-ying and Zhang Hua. *Swarm Intelligence and Evolutionary Computation: Matlab Technology*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012, Ch2.
- 杨少委: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 雷达信号处理、雷达射频隐身。
程 婷: 女, 1982 年生, 副教授, 研究方向为雷达资源管理等。
何子述: 男, 1962 年生, 教授, 研究方向为雷达信号处理、自适应阵列技术等。