

有源压制干扰下的相控阵雷达多目标跟踪时间资源优化配置算法

陶庭宝, 张弓, 张劲东

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 211106)

摘要: 针对有源压制干扰下的相控阵雷达(Phased array radar, PAR)多目标跟踪时间资源优化配置问题, 提出了一种基于互信息(Mutual information, MI)的配置算法。采用MI准则作为目标跟踪性能量化指标, 推导了包含时间变量的雷达回波与路径增益矩阵MI表达式, 建立了时间资源优化配置模型, 并采用改进的遗传算法实现了模型求解。仿真结果表明, 该算法能在有源压制干扰条件下最大化有效跟踪目标数, 并提高有效跟踪目标的整体跟踪性能。

关键词: 相控阵雷达; 有源压制干扰; 互信息; 时间资源优化; 遗传算法

中图分类号: TN911

文献标志码: A

Optimal Algorithm of Time Resource Allocation for Multiple Target Tracking of Phased Array Radar Under Active Oppressive Jamming

TAO Tingbao, ZHANG Gong, ZHANG Jindong

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: An algorithm based on mutual information (MI) is proposed for the time resource optimal allocation of phased array radar (PAR), which focuses on multi-target tracking under active suppression jamming. The MI criterion is used as the quantitative indicator of target tracking, and the MI expression of the radar echo and the path gain matrix which contains the time variable is derived. Then the time resource optimal allocation model is established, and the improved genetic algorithm is used to solve the model. The simulation results show that the algorithm can maximize the number of effectively tracked targets under active suppression jamming, and the overall tracking performance of the effective tracking targets is improved.

Key words: phased array radar; active oppressive jamming; mutual information; optimal allocation of time resource; genetic algorithm

引 言

相控阵雷达(Phased array radar, PAR)使用电子转向阵列天线, 拥有极端的波束灵活性, 可以根据

基金项目: 国家自然科学基金(61871218, 61801211, 61471191, 61501233, 61671241, 61701046, 61501228, 61071163)资助项目; 国家航空科学基金(2017052015, 20182007001)资助项目; 中央高校基本科研业务费基金(3082017NP2017421)资助项目; 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室(南京航空航天大学)基金资助项目。

收稿日期: 2019-06-06; **修订日期:** 2020-08-12

任务需要快速调整波束指向和驻留时间,这种特性使得PAR能够快速、自适应地定位目标和调整各目标的照射时间^[1],因此非常适用于针对不同应用背景的多目标跟踪任务,例如空中交通管制和反导弹防御等。然而雷达资源有限,如何合理、有效地分配这些资源成为能否充分发挥PAR优越性的关键。

目前,针对PAR多目标跟踪资源优化问题已经有许多优秀的研究成果。文献[2]提出了基于灰色关联度的自适应多目标跟踪时间资源调度算法,该方法以灰色关联度为度量函数建立资源管理模型;文献[3]针对波束和驻留时间联合优化问题,提出了一种先确立波束指向再分配驻留时间的两步优化算法;韩清华等考虑了环境和目标特性的不确定性因素,提出了一种基于机会约束规划的阵列雷达功率资源管理算法^[4],并在此基础上提出基于机会约束规划的能量和波束资源联合优化算法^[5];Peter等提出一种基于雷达组网的资源优化方法^[1],多部PAR通过通信链路进行数据交换,实现了雷达组网的资源最优调度;此外,严峻坤等从单部雷达跟踪多目标和多部雷达跟踪多目标等多个角度对雷达波束、时间和功率等资源优化问题进行了系统的研究^[6-9]。

复杂电磁环境下的电子对抗(Electronic counter measurement, ECM)使得雷达生存环境越发恶劣,同时给雷达资源优化配置带来新的巨大挑战。电磁干扰方式主要分为压制干扰和欺骗干扰^[10],其中有源压制干扰是目前最为常见的干扰方式,由远距离支援干扰机或目标自携干扰机向雷达发射干扰信号,掩盖目标回波,致使雷达无法有效探测。然而针对干扰条件下的雷达资源优化问题的研究并不多,文献[11]从任务调配的角度给出了相控阵雷达应对多假目标欺骗干扰的有效策略;文献[12]针对远距离支援干扰和距离门拖引干扰同时存在的情况,从目标探测角度提出了一种能量优化算法;文献[13-14]则从相反的角度研究了干扰资源优化配置问题,提出了基于最小均方误差(Minimum mean square error, MMSE)和互信息(Mutual information, MI)准则的优化算法。

MI准则常被用在多输入多输出(Multiple input multiple output, MIMO)雷达波形设计^[15-18]和功率资源优化配置^[19]等问题中,用于定量表示雷达探测性能,但目前将MI准则应用在雷达时间资源优化配置中的相关研究成果较少。本文针对有源压制干扰下的相控阵雷达时间资源优化配置问题,采用MI准则作为目标跟踪性能的量化指标,推导了含有时间变量的雷达回波和路径增益矩阵MI表达式,建立了时间资源优化配置模型,在最大化有效跟踪目标数的同时提高了有效目标的整体跟踪性能。仿真结果证明了本文算法的有效性。

1 系统模型

本文针对单部相控阵雷达多目标跟踪问题进行研究,且不考虑同时多波束情况。假设雷达位于 (x_0, y_0) 处且位置不变,空域中离散分布 Q 个目标且数量保持不变,每一时刻雷达波束仅能照射一个目标;每个目标以初始速度 $(v_{0,x}^q, v_{0,y}^q)$ 从起始位置 (x_0^q, y_0^q) 开始匀速直线运动。

1.1 运动模型

目标的状态转移方程可描述为

$$\mathbf{X}_k^q = \mathbf{F}\mathbf{X}_{k-1}^q + \mathbf{W}^q \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}_k^q = [x_k^q, v_{x,k}^q, y_k^q, v_{y,k}^q]^T$ 表示目标 q 在 k 时刻状态向量, \mathbf{F} 为目标的状态转移矩阵,表达式为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 T 为目标照射间隔,即目标被雷达两次照射之间的时间间隔。式(1)中 $\mathbf{W}^q \sim CN(0, \mathbf{Q}^q)$ 表示 $k-1$

时刻目标 q 状态转移的过程噪声,体现状态转移过程的不确定性,其中 CN 指正态分布。 \mathbf{Q}^q 可表示为

$$\mathbf{Q}^q = \sigma_{q,w}^2 \begin{bmatrix} \frac{T^3}{3} & \frac{T^2}{2} & 0 & 0 \\ \frac{T^2}{2} & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^3}{3} & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 0 & \frac{T^2}{2} & T \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\sigma_{q,w}^2$ 表示目标 q 的状态转移过程噪声强度。

1.2 观测模型

在跟踪过程中,雷达可从回波信号中提取相应目标距离、角度、多普勒和雷达散射截面(Radar cross section, RCS)等信息,本文考虑目标距离和角度信息。假设 k 时刻雷达照射目标 q ,则此时刻目标量测方程为

$$\mathbf{z}_k^q = \mathbf{h}(\mathbf{X}_k^q) + \mathbf{u}_k^q \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{h}(\mathbf{X}_k^q) = \begin{bmatrix} R_k^q \\ \theta_k^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_k^q - x_0^q)^2 + (y_k^q - y_0^q)^2} \\ \arctan\left(\frac{y_k^q - y_0^q}{x_k^q - x_0^q}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: R_k^q 和 θ_k^q 分别表示目标 q 在 k 时刻的距离和角度信息; (x_0, y_0) 表示雷达的位置坐标。式(4)中 $\mathbf{u}_k^q \sim CN(0, \mathbf{G}_k^q)$ 表示观测噪声,包含距离量测误差和角度量测误差。观测噪声协方差在距离和角度两个维度上相互独立,其中

$$\mathbf{G}_k^q = \begin{bmatrix} \sigma_{R_k^q}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta_k^q}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $\sigma_{R_k^q}^2$ 和 $\sigma_{\theta_k^q}^2$ 分别表示 k 时刻目标 q 的距离和角度量测均方误差,可计算为^[20]

$$\begin{cases} \sigma_{R_k^q}^2 = \frac{c^2}{16\pi^2 \times \beta^2 \times \text{SNR}_k^q} \\ \sigma_{\theta_k^q}^2 = \frac{3\lambda}{\pi^2 \gamma^2 \times \text{SNR}_k^q} \end{cases} \quad (7)$$

式中: c 表示光速; β 为雷达发射信号有效带宽; λ 为雷达工作波长; γ 表示天线孔径; SNR_k^q 表示 k 时刻雷达照射目标 q 的回波信噪比(Signal to noise ratio, SNR)。

1.3 信号模型

在背景噪声及有源压制干扰存在时,雷达发射单个脉冲信号的回波信噪比通常无法满足目标检测和跟踪的要求,为提高回波信噪比,相干脉冲积累技术被应用到回波信号处理过程中。对于第 i 个发射脉冲,雷达回波信号可表示为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{s}_i \mathbf{h}_i + \mathbf{w}_i + \mathbf{j}_i \quad (8)$$

式中: \mathbf{s}_i 为 $l \times 1$ 的向量,表示发射脉冲采样; l 指采样长度; \mathbf{h}_i 为路径增益系数; \mathbf{w}_i 为 $l \times 1$ 的接收噪声向量; \mathbf{j}_i 表示 $l \times 1$ 的干扰信号。

假设雷达向目标连续发射 n 个脉冲,即该次探测过程的相干积累脉冲个数为 n ,此时回波信号为

$$\begin{aligned} Y &= (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_n) = \\ & (s_1 h_1 + \mathbf{w}_1 + \mathbf{j}_1, s_2 h_2 + \mathbf{w}_2 + \mathbf{j}_2, \dots, s_n h_n + \mathbf{w}_n + \mathbf{j}_n) = \\ & SH + W + J \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$\begin{cases} \mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n) \\ \mathbf{H} = \text{diag}(h_1, h_2, \dots, h_n) \\ \mathbf{W} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n) \\ \mathbf{J} = (\mathbf{j}_1, \mathbf{j}_2, \dots, \mathbf{j}_n) \end{cases} \quad (10)$$

且 $s_1 = s_2 = \dots = s_n = s$, 表示发射脉冲波形完全相同。对于以上信号模型做如下假设:

(1) 雷达照射目标期间,信号传输环境保持稳定,即各脉冲间,路径增益 h_i 独立同分布,且 h_i 包含两个部分:目标散射系数 g_i 和传播损耗因子 p_i ^[19]。

(2) 目标由大量小散射点组成,根据中心极限定理^[21],对于 $1 \leq i \leq n$,所有 g_i 均为独立同分布的复高斯随机变量,且满足 $g_i \sim CN(0, \sigma_g^2)$ 。

(3) 传播损耗因子 p_i 是雷达天线增益和传播距离的函数,可表示为

$$p_i = \frac{\kappa}{R_i^i R_r^i \sqrt{G_t G_r}} \quad (11)$$

式中: R_i^i 和 R_r^i 分别表示目标距收发天线的距离; G_t 和 G_r 分别表示收发天线增益, κ 为常数。

由于本文针对相控阵雷达单波束情况进行研究,收发同天线,因此有

$$\begin{cases} R_i^i = R_r^i = R_i \\ G_t = G_r = G \end{cases} \quad (12)$$

因而传播损耗因子 p_i 可表示为

$$p_i = \frac{\kappa}{R_i^2 G} \quad (13)$$

(4) 噪声矩阵 \mathbf{W} 所有列向量是独立同分布的复高斯随机向量,且满足 $\mathbf{w}_i \sim CN(0, \sigma_w^2 \mathbf{I}_l)$, 其中 σ_w^2 为环境噪声强度。

(5) 干扰矩阵 \mathbf{J} 所有列向量是独立同分布的复高斯随机向量,且满足 $\mathbf{j}_i \sim CN(0, \sigma_b^2 \mathbf{I}_l)$, 其中 σ_b^2 指目标对雷达的干扰强度。

(6) 发射信号矩阵 \mathbf{S} 、路径增益矩阵 \mathbf{H} 、噪声矩阵 \mathbf{W} 和干扰矩阵 \mathbf{J} 均相互独立。

由假设(2)和(3)可得

$$h_i \sim N\left(0, \frac{\kappa^2 \sigma_g^2}{R_i^4 G^2}\right) \quad (14)$$

为表述方便,取

$$\sigma_h^2 = \frac{\kappa^2 \sigma_g^2}{R_i^4 G^2} \quad (15)$$

式中 σ_h^2 表示随机变量 h_i 的方差。

2 互信息计算

若发射信号 \mathbf{S} 已知,即发射脉冲波形 s 已知,接收信号 \mathbf{Y} 与路径增益矩阵 \mathbf{H} 间的 MI 可计算为^[17-19]

$$I(\mathbf{Y}; \mathbf{H} | \mathbf{S}) = h(\mathbf{Y} | \mathbf{S}) - h(\mathbf{Y} | \mathbf{H}, \mathbf{S}) = h(\mathbf{Y} | \mathbf{S}) - h(\mathbf{J} + \mathbf{W}) \quad (16)$$

式中 $h(\cdot)$ 表示随机变量的微分熵。要计算 $I(Y; H | S)$, 需要计算 $h(Y | S)$ 和 $h(J + W)$ 。已知发射信号 S 条件下的接收信号 Y 的概率密度函数为

$$p(Y | S) = \prod_{i=1}^n p(y_i | S) = \prod_{i=1}^n p(y_i | s_i) = \prod_{i=1}^n p(y_i | s) \quad (17)$$

式中

$$p(y_i | s) = \frac{\exp[-\mathbf{y}_i^* (\mathbf{s} \sigma_h^2 \mathbf{s}^H + \sigma_w^2 \mathbf{I}_l + \sigma_b^2 \mathbf{I}_l)^{-1} \mathbf{y}_i^H]}{\pi^l \det(\mathbf{s} \sigma_h^2 \mathbf{s}^H + \sigma_w^2 \mathbf{I}_l + \sigma_b^2 \mathbf{I}_l)} \quad (18)$$

因此有

$$\begin{aligned} p(Y | S) &= \prod_{i=1}^n p(y_i | s) = \\ &= \prod_{i=1}^n \frac{\exp[-\mathbf{y}_i^* (\mathbf{s} \sigma_h^2 \mathbf{s}^H + \sigma_w^2 \mathbf{I}_l + \sigma_b^2 \mathbf{I}_l)^{-1} \mathbf{y}_i^H]}{\pi^l \det(\mathbf{s} \sigma_h^2 \mathbf{s}^H + \sigma_w^2 \mathbf{I}_l + \sigma_b^2 \mathbf{I}_l)} = \\ &= \frac{\exp\{-\text{tr}[(\sigma_h^2 \mathbf{s} \mathbf{s}^H + (\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^H]\}}{\pi^{ln} \det^n(\sigma_h^2 \mathbf{s} \mathbf{s}^H + (\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)} \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)可得条件微分熵 $h(Y | S)$ 计算如下

$$\begin{aligned} h(Y | S) &= - \int p(Y | S) \log p(Y | S) dY dS = \\ &= - \int p(Y | S) \log p(Y | S) dY = \\ &= -E\{\log p(Y | S)\} = \\ &= E(\ln \log \pi) + E\{n \log[\det(\sigma_h^2 \mathbf{s} \mathbf{s}^H + (\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)]\} + \\ &= E\{\text{tr}[(\sigma_h^2 \mathbf{s} \mathbf{s}^H + (\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^H]\} = \\ &= \ln \log \pi + nl + n \log[\det(\sigma_h^2 \mathbf{s} \mathbf{s}^H + (\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)] \end{aligned} \quad (20)$$

同理

$$p(J + W) = \frac{\exp\{-\text{tr}[(\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l]^{-1} (\mathbf{W} + \mathbf{J})(\mathbf{W} + \mathbf{J})^H\}}{\pi^{ln} \det^n[(\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l]} \quad (21)$$

进而得

$$h(J + W) = \ln \log \pi + nl + n \log[\det((\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)] \quad (22)$$

将式(20)–(22)代入式(16)中可得

$$\begin{aligned} MI &\triangleq I(Y; H | S) = h(Y | S) - h(J + W) = \\ &= \ln \log \pi + nl + n \log[\det(\sigma_h^2 \mathbf{s} \mathbf{s}^H + (\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)] - \\ &= \{\ln \log \pi + nl + n \log[\det((\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)]\} = \\ &= n \log \frac{\det(\sigma_h^2 \mathbf{s} \mathbf{s}^H + (\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)}{\det((\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)} = \\ &= n \log \frac{\det(\sigma_h^2 \mathbf{s} \mathbf{s}^H + (\sigma_w^2 + \sigma_b^2) \mathbf{I}_l)}{(\sigma_w^2 + \sigma_b^2)^l} \end{aligned} \quad (23)$$

式中 MI 表示互信息量 $I(Y; H | S)$, 是雷达发射脉冲数 n 和干扰强度 σ_b^2 的函数表达式。

3 时间资源优化配置算法

3.1 跟踪性能指标

雷达回波信号与路径增益矩阵的 MI 越大, 目标参数估计的精度越高^[15], 并且在 MIMO 雷达波形设

计中,最大化互信息与最小化均方误差(Mean square error, MSE)是等价的^[16],即使用MI准则和MMSE优化得到的波形是一致的。基于上述研究成果,本文采用发射信号与路径增益矩阵MI作为目标跟踪性能指标。根据式(23), k 时刻雷达回波与雷达和目标 q 间路径增益矩阵互信息为

$$MI_k^q = n_k^q \log \frac{\det(\sigma_{h,k,q}^2 \mathbf{ss}^H + (\sigma_{w,k,q}^2 + \sigma_{b,k,q}^2) \mathbf{I}_l)}{(\sigma_{w,k,q}^2 + \sigma_{b,k,q}^2)^l} \quad (24)$$

式中 l 为发射脉冲采样长度。

3.2 有效跟踪目标数最大化算法

对于相控阵雷达防空应用,有效跟踪目标数是首要追求的性能指标。本文设定跟踪有效性判定准则:若不等式 $MI_k^q \geq MI_0$ 成立,则判定目标 q 在 k 时刻被有效跟踪,其中 MI_0 表示雷达回波与路径增益矩阵MI的门限值。本节所提算法的功能是最大化有效跟踪目标数,该问题可用模型表示如下

$$\begin{aligned} & \max \sum_{q=1}^Q a_k^q \\ & \begin{cases} a_k^q = 1 & MI_k^q \geq MI_0 \\ a_k^q = 0 & MI_k^q < MI_0 \end{cases} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} n_{\min} \leq n_k^q \leq n_{\max} & q = 1, 2, \dots, Q \\ \sum_{q=1}^Q n_k^q = n_{\text{total}} \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

由式(24)可知,在其他条件一定情况下, MI_k^q 是由波束驻留脉冲数 n_k^q 唯一确定的变量。等式 $MI_k^q = MI_0$ 成立时可计算得到波束驻留脉冲数 $n_{k,\min}^q$ (不足一个脉冲时向上取整),该脉冲数表示目标 q 在 k 时刻被雷达有效跟踪所需的最少波束驻留脉冲数。因此,在每个跟踪周期开始前可求得所有目标在下一周期被有效跟踪所需的最少脉冲数 $n_{k,\min}^q, q = 1, 2, \dots, Q$,之后对 $n_{k,\min}^q$ 由小到大进行排序,求得常数 m 使得 $\sum_{q=1}^m n_{k,\min}^q \leq n_{\text{total}}$ 且 $n_{\text{total}} < \sum_{q=1}^{m+1} n_{k,\min}^q$,则 m 表示有源压制干扰下的最大有效跟踪目标数。其中 n_{total} 表示各

跟踪周期包含脉冲个数(时间跨度),算法步骤如下:

步骤1 设 k 时刻目标 q 被有效跟踪所需的最小时间为 $n_{k,\min}^q$,令 $q=1$;

步骤2 计算目标状态一步预测值 $\mathbf{X}_{k,k-1}^q = \mathbf{F}\mathbf{X}_{k-1}^q$,求得目标距雷达距离预测值 R_k^q ,代入式(15)得到此时目标 q 的冲击响应统计方差 $\sigma_{h,k,q}^2$,进而代入式(24)得到此时刻雷达回波与该路径增益矩阵互信息 $MI_k^q(n_k^q)$;

步骤3 令 $MI_k^q(n_k^q) = MI_0$,求解方程得到 $n_{k,\min}^q = \text{ceil}(n_k^q)$;

步骤4 判断 q 是否等于 Q 。若 $q < Q$,则令 $q = q + 1$,返回步骤2;若 $q = Q$,进入步骤5;

步骤5 对 $n_{k,\min}^q$ 由小到大进行排序,得 $n_{k,\min}^q, q = 1, 2, \dots, Q$,若 $\sum_{q=1}^Q n_{k,\min}^q \leq n_{\text{total}}$,则有效跟踪目标数

$M = Q$,若 $n_{k,\min}^1 > n_{\text{total}}$,则 $M = 0$,否则,令 $m = 1, 2, \dots$,验证 $\sum_{q=1}^m n_{k,\min}^q \leq n_{\text{total}}$ 且 $n_{\text{total}} < \sum_{q=1}^{m+1} n_{k,\min}^q$,直到条

件成立,有效跟踪目标数 $M = m$;

步骤6 保存 $n_{k,\min}^q, q = 1, 2, \dots, M$,以及各时间量对应目标状态信息, M 即为下一跟踪周期雷达系统所能跟踪的最大目标数。

3.3 系统跟踪性能优化算法

由3.2节所提算法可得到最大有效跟踪目标数以及此时各有效目标所需最小脉冲数 $n_{k,\min}^q, q = 1, 2, \dots, M$, 各时间量对应目标即为下一跟踪周期将要分配资源进行跟踪的目标, 记为“有效目标”, 其余目标由于系统资源有限, 放弃跟踪。由此可计算得到脉冲余量 $n_{\text{rest}} = n_{\text{total}} - \sum_{p=1}^M n_{k,\min}^p$, 可知 $n_{\text{rest}} < n_{k,\min}^{M+1}$, 若 $n_{\text{rest}} > 0$, 即脉冲余量不足以跟踪剩余目标中的任意一个, 此时可将其分配给有效目标, 以减小跟踪误差, 实现有效目标的更精确跟踪。

本节建立资源优化分配模型, 将有限的脉冲余量合理分配给各有效目标, 实现系统跟踪性能优化, 优化模型如下

$$\begin{aligned} & \max \{ \min [MI_k^q(n_q)] \} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} n_q = n_{k,\min}^q + n_{\text{rest}}^q \\ n_{\min} \leq n_q \leq n_{\max} \\ 0 \leq n_{\text{rest}}^q \leq n_{\text{total}} - \sum_{q=1}^M n_{k,\min}^q \quad q = 1, 2, \dots, M \\ \sum_{q=1}^M n_{\text{rest}}^q = n_{\text{rest}} = n_{\text{total}} - \sum_{q=1}^M n_{k,\min}^q \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

在各有效跟踪目标 MI 满足门限条件下最大化最小互信息, 即最优化最差跟踪目标的跟踪性能, 以提高系统整体跟踪性能。其中 n_q 为下一跟踪周期各目标分配脉冲数, $MI_k^q(n_q)$ 表示 k 时刻雷达回波与路径增益矩阵 MI , 计算方法如式(24)。约束条件1表示各目标分配时间资源量是在其所需最少脉冲数的基础上开始计算的, 这就保证了对于每一个被跟踪目标, $MI_k^q(n_q) \geq MI_0, q = 1, 2, 3, \dots, M$ 成立, 即各被跟踪目标分配时间资源足以保证该目标的有效跟踪; n_{\min} 和 n_{\max} 分别为雷达照射目标驻留脉冲数的下限和上限; n_{rest}^q 表示目标 q 分配所得脉冲余量, 约束3,4对其进行了限制和说明, 进而保证了 $\sum_{q=1}^M n_q = n_{\text{total}}$ 。

针对式(26)中的优化模型, 由于优化变量是脉冲个数, 为离散变量, 因此该优化问题是非凸的。针对该问题, 本文选用改进的遗传算法进行求解, 算法流程如下:

步骤1 初始化种群。若下一跟踪周期有效跟踪目标数 M , 则每个个体的染色体长度为 $(M-1) \times N_s$, 随机产生 N_p 条染色体, 其中 N_s 表示个体基因长度, 满足精度要求, N_p 表示种群大小, 记代数 $g = 1$;

步骤2 交叉、变异。根据预定的交叉概率和变异概率进行交叉、变异操作, 更新染色体;

步骤3 计算每条染色体对应的目标函数值, 此处为有效目标最小互信息;

步骤4 使用轮盘赌方法对种群中个体进行选择;

步骤5 令 $g = g + 1$, 判断 $g > N_g$ 是否成立, 若是, 进入步骤6, 否则, 返回步骤2;

步骤6 计算种群中各条染色体对应的目标函数值, 选择目标函数值最大的个体输出, 并返回下一跟踪周期各有效目标时间分配方案 $n_k^q, q = 1, 2, \dots, M$ 。

3.4 多目标跟踪策略

对于本文研究的多目标跟踪问题, 由于各目标在空间中离散分布, 因此可将其简化为多个单目标跟踪问题。扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filtering, EKF)是解决非线性滤波问题的常用方法, 性能可靠。由于式(5)所示的观测模型具有非线性特征, 因此本文选取该方法对目标状态进行估计。

结合本文所提资源优化配置算法,目标跟踪策略可简述为:首先,结合 k 时刻探测到的各目标干扰强度和当前各目标状态信息,采用有效跟踪目标数最大化算法获得下一跟踪周期待跟踪目标和各目标有效跟踪所需最小脉冲数 $n_{k, \min}^q$,然后在此基础上调用系统跟踪性能优化算法得到有效目标时间资源分配方案 n_k^q ,指导雷达对各目标进行照射跟踪,之后采用EKF算法对各目标回波进行滤波,获得目标状态估计值。多目标跟踪策略流程如图1所示。

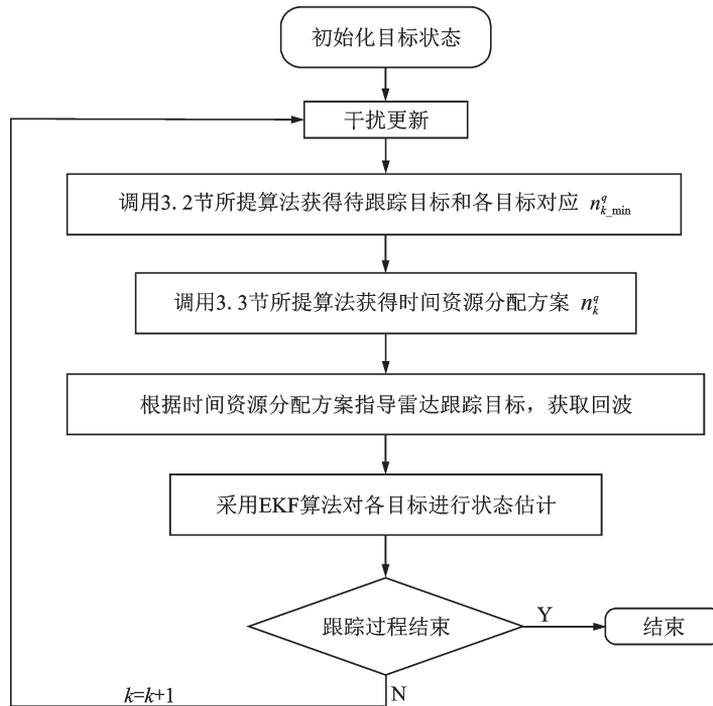


图1 多目标跟踪策略流程图

Fig.1 Multi-target tracking strategy flowchart

4 仿真结果与分析

4.1 仿真参数

为验证本文所提算法的有效性,本节设计了仿真实验进行验证。实验场景下空域离散分布 $Q=8$ 个目标,各目标携带干扰机,如图2所示。干扰强度变化情况如图3所示,一部相控阵雷达分时对各目标进行跟踪。为简化计算,取噪声强度 $\sigma_w^2=1$,目标散射特性 $\sigma_g^2=1$,发射信号码长 $l=5$;实验中一个跟踪周期总时间跨度 $T_{\text{total}}=3.2\text{ s}$,发射脉冲周期 $\text{PRI}=10^{-3}\text{ s}$,因此一个跟踪周期包含 $n_{\text{total}}=3200$ 个脉冲;采样间隔 $T=5\text{ s}$,雷达照射目标驻留时间的下限和上限分别为: $n_{\min}=0.005n_{\text{total}}$ 和 $n_{\max}=0.8n_{\text{total}}$;雷达增益 $G_t=G_r=33.5\text{ dB}$;遗传算法迭代次数 $N_g=100$,种群大小为 $N_p=100$,交叉和变异概率分别为0.6和0.005;互信息门限 $MI_0=0.8\text{ b}$ 。实验参数如表1所示。

为更直观体现目标跟踪性能,本文计算了各目标跟踪均方根误差(Root mean square error, RMSE),计算方法为

$$\text{RMSE}_k^q = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{mc}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{mc}}} [(x_k^q - \hat{x}_{k,i}^q)^2 + (y_k^q - \hat{y}_{k,i}^q)^2]} \quad (27)$$

式中 N_{mc} 为蒙特卡洛仿真次数, 实验中取 $N_{\text{mc}} = 500$; (x_k^q, y_k^q) 为目标的真实坐标, $(\hat{x}_{k,i}^q, \hat{y}_{k,i}^q)$ 为第 i 次蒙特卡洛仿真中得到的目标坐标估计。

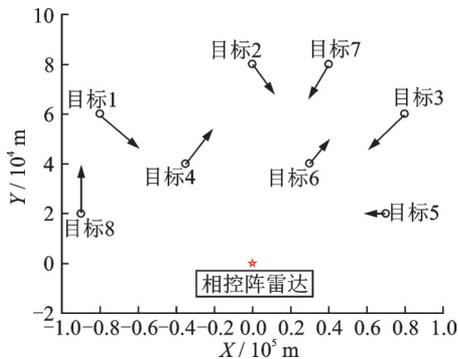


图2 雷达及目标分布图

Fig.2 Radar and target distribution map

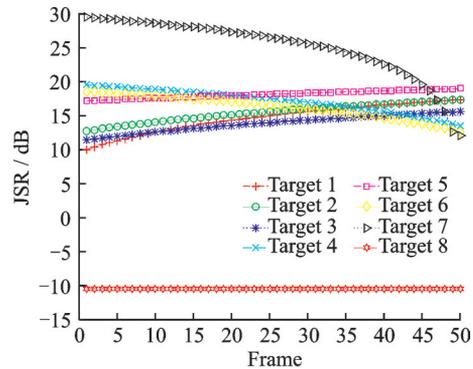


图3 目标干扰强度

Fig.3 Target jamming intensity

表1 目标参数

Table 1 Parameters of targets

目标编号	1	2	3	4	5	6	7	8
起始点/km	(-80, 60)	(0, 80)	(80, 60)	(-35, 40)	(70, 20)	(30, 40)	(40, 80)	(-90, 20)
距离/km	100	80	100	53.15	72.8	50	89.44	92.2
速度/(m·s ⁻¹)	(200, -150)	(100, -100)	(-200, -150)	(150, 150)	(-100, 0)	(100, 100)	(-100, -150)	(0, 200)

为体现本文所提资源分配算法的有效性, 采用平均分配方案进行对比, 即每一帧对各目标平均分配时间资源, 各目标分配脉冲数均为 $n_{\text{average}} = n_{\text{total}}/Q = 400$ 个; 与此同时, 在相同条件下以目标跟踪距离误差贝叶斯克拉美罗下界 (Bayesian Cramer-Rao lower bound, BCRLB) 作为目标跟踪性能量化指标 (以下称为 BCRLB 指标), 进行了实验验证, 进一步证明以 MI 作为目标跟踪性能量化指标的有效性。仿真共进行 50 帧。

4.2 结果与分析

干扰条件下, 尽可能多地有效跟踪目标是雷达系统的首要 and 基础任务。如图 4 所示, 平均分配方案跟踪过程中, 在第 15 帧附近出现了有效目标数减少的情况, 这是由于 4 号和 6 号目标远离雷达飞行, 超出一定范围后目标失踪; 跟踪过程出现有效目标数增加的情况则是由于多数目标靠近雷达飞行, 并且本文所提优化方案总是能够提前于平均分配方案对靠近目标进行稳定有效的跟踪; 相比于平均分配方案, 本文所提算法在相同时间资源的条件下总是可以有效跟踪更多的目标。

图 5 所示为相同条件下 BCRLB 指标有效跟踪目标数随时间的变化情况, 相比平均分配方案, 其提高幅度并没有整体超过 30%, MI 指标有效跟踪目标数提高 50% 以上。

为进一步体现对剩余脉冲优化分配的效果, 本文建立了一步优化方案进行对比。所谓一步优化方案, 即对剩余脉冲数进行平均分配。图 6 给出各方案下有效目标最小互信息变化情况, 相比于平均分配

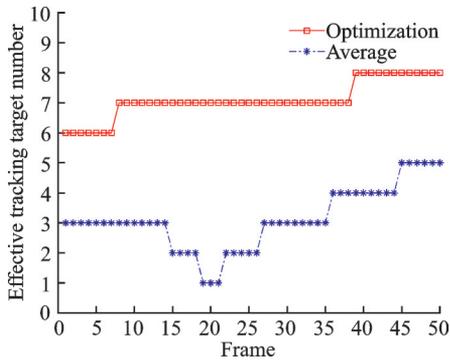


图4 有效跟踪目标数(MI指标)

Fig.4 Effective tracking target number (MI)

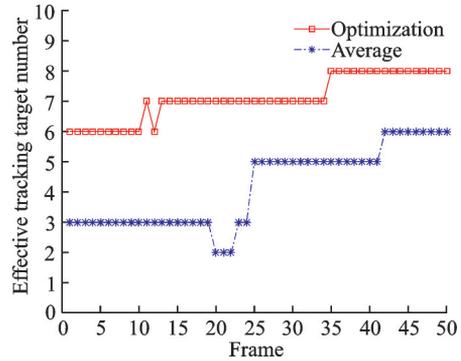


图5 有效跟踪目标数(BCRLB指标)

Fig.5 Minimum MI of effective targets (BCRLB)

方案,优化方案最小互信息始终保持在门限 $MI_0 = 0.8b$ 以上,这保证了有效目标的跟踪有效性。相比于一步优化方案,最终优化结果有效提高了最小互信息量。图中第8帧和38帧出现最小互信息大幅下降,这是由于8帧和38帧处有新目标被纳入有效目标范围,绝大部分剩余脉冲被新的有效目标占用,因而最小互信息回到门限值附近,有效目标数的增加可从图4中得到证实。对于平均方案最小互信息在38帧附近出现陡降,这也是由于38帧附近有新目标被纳入有效目标,该目标是7号目标,由于其干扰强度在40帧附近开始快速下降,因而40帧附近3种方案下最小互信息都出现快速上升。

图7显示了各方案下有效目标最大RMSE变化情况,相比于平均方案,优化方案有效目标最大RMSE明显降低。对比图7与图6,可以判定MI与RMSE反相关,即对于一个给定目标,MI越小则RMSE越大,这与直观判断也是一致的:回波中包含目标的信息越少,跟踪精度自然越低。对于MI与RMSE的定量关系,本文暂不能给出,这将是作者接下来试图解决的问题。

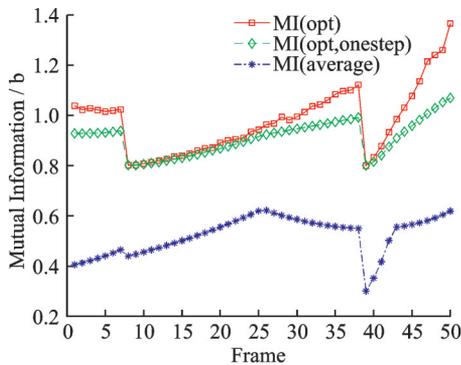


图6 有效目标最小互信息

Fig.6 Minimum MI of effective targets

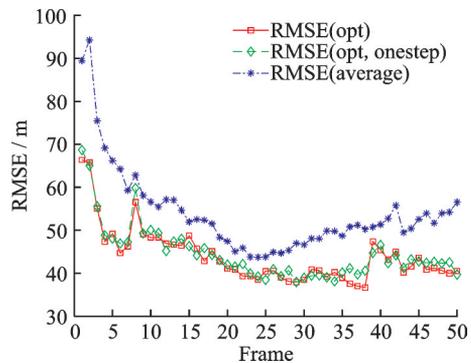


图7 有效目标最大RMSE

Fig.7 Maximum RMSE for effective targets

图8中,对于有效目标平均RMSE,MI指标下3种方案中一步优化方案性能最优,而最终优化方案与平均方案性能基本一致,这是由于最终优化方案将大部分剩余脉冲分配给跟踪性能最差的有效目标,而该目标由于干扰较大或距离较远的原因,跟踪精度随脉冲数提高缓慢。最终优化方案提高了跟踪性能最差目标的跟踪精度,对有效目标的跟踪性能起到整体提升的效果。

图9所示是相同条件下BCRLB指标有效目标平均RMSE随时间的变化情况,可以看到与MI指标一样,BCRLB指标下的有效目标平均RMSE也随时间逐步降低,证明了该指标的有效性。但与MI指标相比,图9中35帧之前各方案下有效目标平均RMSE都在40 m以上,而图8中对应时间段的有效目标平均RMSE基本小于40 m,MI指标下的方案对有效目标的跟踪性能的整体提升效果更为明显。

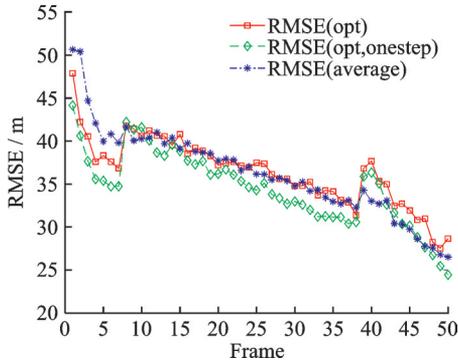


图8 有效目标平均RMSE(MI指标)

Fig.8 Average RMSE of effective targets (MI)

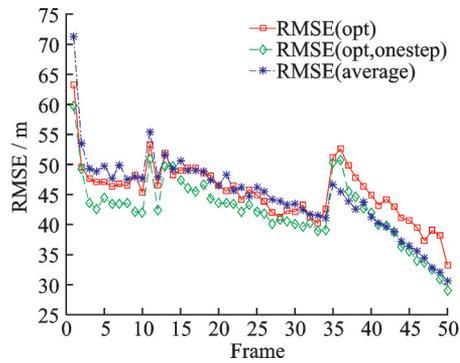


图9 有效目标平均RMSE(BCRLB指标)

Fig.9 Average RMSE of effective targets (BCRLB)

图10和图11分别显示了最终优化方案和一步优化方案时间资源分配结果,可以看到相比于一步优化方案,最终优化方案各目标被分配时间资源差距更明显。具体而言,6号目标互信息在多数帧下最小,因而更多的剩余时间资源被分配给6号目标,实现最小互信息最大化。

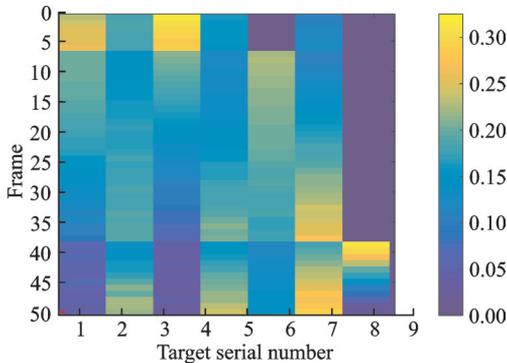


图10 时间分配方案

Fig.10 Time allocation scheme

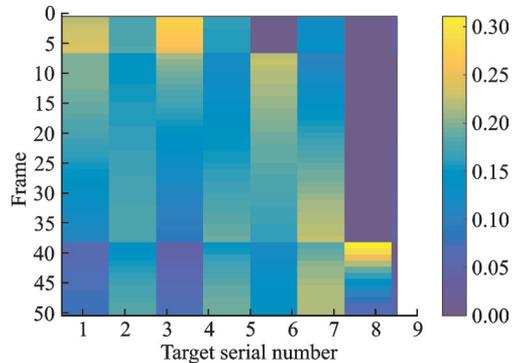


图11 时间分配方案(一步优化)

Fig.11 Time allocation scheme (onestep opt)

5 结束语

本文针对有源压制干扰下的相控阵雷达多目标跟踪时间资源优化配置问题,将MI准则引入并用作为目标跟踪性能的量化指标,推导了包含驻留脉冲数的雷达回波与路径增益矩阵的互信息表达式,针对时间资源分配问题建立优化模型,并采用改进的遗传算法进行求解。仿真结果证明,本文所提时间资源优化配置算法可在实现有效跟踪目标数最大化的同时,显著提高有效目标中跟踪性能最差目标的跟踪精度,从而提高了有效跟踪目标的整体跟踪效果。

参考文献:

- [1] PETER W M, ZHEN D. Coordinated radar resource management for networked phased array radars[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(8): 1009-1020.
- [2] 张贞凯,汪飞,周建江,等.多目标跟踪中自适应时间资源调度[J].航空学报,2011,32(3):522-530.
ZHANG Zhenkai, WANG Fei, ZHOU Jianjiang, et al. Adaptive time resource scheduling for multiple target tracking[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 32(3): 522-530.
- [3] 王祥丽,易伟,孔令讲.基于多目标跟踪的相控阵雷达波束和驻留时间联合分配方法[J].雷达学报,2017,6(6):602-610.
WANG Xiangli, YI Wei, KONG Lingjiang. Joint beam selection and dwell time allocation for multi-target tracking in phased array radar system[J]. Journal of Radars, 2017, 6(6): 602-610.
- [4] 韩清华,潘明海,龙伟军.基于机会约束规划的机会阵雷达功率资源管理算法[J].系统工程与电子技术,2017,39(3):506-513.
HAN Qinghua, PAN Minghai, LONG Weijun. Power resource management algorithm of opportunistic array radar based on chance-constraint programming[J]. Chinese Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(3): 506-513.
- [5] HAN Q H, PAN M H, LIANG Z H. Joint power and beam allocation of opportunistic array radar for multiple target tracking in clutter[J]. Digital Signal Processing, 2018, 78: 136-151.
- [6] 严俊坤,纠博,刘宏伟,等.一种针对多目标跟踪的多基雷达系统聚类与功率联合分配算法[J].电子与信息学报,2013,35(8):1875-1881.
YAN Junkun, JIU Bo, LIU Hongwei, et al. Joint cluster and power allocation algorithm for multiple targets tracking in multi-static radar systems[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2013, 35(8): 1875-1881.
- [7] YAN J K, PU W Q, LIU H W, et al. Cooperative target assignment and dwell allocation for multiple target tracking in phased array radar network[J]. Signal Processing, 2017, 141: 74-83.
- [8] YAN J K, LIU H W, JIU B, et al. Simultaneous multibeam resource allocation scheme for multiple target tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(12): 3110-3122.
- [9] YAN J K, JIU B, LIU H W, et al. Prior knowledge-based simultaneous multibeam power allocation algorithm for cognitive multiple targets tracking in clutter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(2): 512-527.
- [10] 唐斌,赵源,蔡天一,等.雷达抗有源干扰技术现状与展望[J].数据采集与处理,2016,31(4):623-639.
TANG Bin, ZHAO Yuan, CAI Tianyi, et al. Advances and perspectives in radar ECCM techniques of active jamming[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(4): 623-639.
- [11] 周颖,施龙飞,陈明辉,等.密集干扰环境下相控阵雷达资源管理优化研究[J].电子学报,2005(6):999-1003.
ZHOU Ying, SHI Longfei, CHEN Minghui, et al. Optimized resource management for phased array radar in dense jamming [J]. Acta Electronica Sinica, 2005(6): 999-1003.
- [12] BEHAR V, KABAKCHIEV C, LI X R. Signal processing for a benchmark for radar resource allocation in the presence of ECM[J]. Signal Processing, 2005, 85(4): 767-780.
- [13] WANG L L, WANG L D, ZENG Y H, et al. Jamming power allocation strategy for MIMO radar based on MMSE and mutual information[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(7): 1081-1089.
- [14] 罗金亮,金家才,王雷,等.战役性联合压制作战远程支援干扰部署优化[J].系统工程与电子技术,2017,39(5):1042-1050.
LUO Jinliang, JIN Jiakai, WANG Lei, et al. Optimal deployment of distant support jamming formation in campaign joint suppress enemy air defense systems operation[J]. Chinese Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(5): 1042-1050.
- [15] BELL M R. Information theory and radar waveform design[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1993, 39: 1578-1597.
- [16] YANG Y, RICK S B. MIMO radar waveform design based on mutual information and minimum mean-square error estimation

- [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 330-343.
- [17] TANG B, TANG J, PENG Y N. MIMO radar waveform design in colored noise based on information theory[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(9): 4684-4697.
- [18] TANG B, LI J. Spectrally constrained MIMO radar waveform design based on mutual information[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(3): 821-834.
- [19] SONG X F, WILLETT P, ZHOU S L. Optimal power allocation for MIMO radars with heterogeneous propagation losses [C]//*Proceeding of 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Kyoto, Japan: [s.n.], 2012: 2465-2468.
- [20] SUN H L, XU H F, WANG Y. Asymptotic analysis of sample average approximation for stochastic optimization problems with joint chance constraints via conditional value at risk and difference of convex functions[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2014, 161(1): 257-284.
- [21] FISHLER E, HAIMOVICH A, RICK S B, et al. Spatial diversity in radars—Models and detection performance[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823-838.

作者简介:

陶庭宝(1994-):男,硕士研究生,研究方向:相控阵雷达资源优化调度,E-mail: 2649056634@qq.com。



张弓(1964-),通信作者,男,教授,研究方向:雷达信号处理、目标探测与识别,E-mail: gzhang@nuaa.edu.cn。



张劲东(1981-):男,副教授,研究方向:认知雷达与雷达信号处理,E-mail: zjdjs@126.com。

(编辑:刘彦东)