

一种用于多目标定位的 MIMO 雷达快速功率分配算法

冯涵哲 严俊坤* 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 为了满足实际需求, 该文提出一种用于多目标定位的功率分配算法, 实现 MIMO 雷达有限功率的快速优化分配。该文首先给出了多目标定位误差的克拉美罗下界, 并将其作为代价函数进行功率分配。而后, 设计了一种可应用于多目标定位功率分配的交替全局优化算法, 通过搜索 Pareto 解集来实现功率的快速分配。最后, 仿真结果表明, 所提的算法能快速实现 MIMO 雷达有限功率的优化分配, 明显提升多目标定位精度。

关键词: MIMO 雷达系统; 克拉美罗下界; Pareto 解集; 交替全局优化算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)12-3219-05

DOI: 10.11999/JEIT160981

Fast Power Allocation Algorithm for Multiple Target Localization in MIMO Radar System

FENG Hanzhe YAN Junkun LIU Hongwei

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To meet the need of the real application, this paper proposes a power allocation algorithm for multiple target localization, which tries to get the quick optimal allocation of the limited power resources in the MIMO radar. Firstly, Cramér-Rao Lower Bound (CRLB) of the Mean Square Error (MSE) of the multi-target localization is given, and CRLB is used as a cost function to allocate the power resource. Then, an Alternating Global Optimal Algorithm (AGOA) is designed which can be used in power allocation of multi-target localization, the related Pareto sets to achieve the fast allocation of the power resources. Finally, the simulation results show that the AGOA can quickly achieve the optimal allocation of the limited power allocation in MIMO radar, and can significantly enhance the precision of the multiple target localization.

Key words: MIMO radar; Cramér-Rao Lower Bound (CRLB); Pareto optimal set; Alternating Global Optimal Algorithm (AGOA)

1 引言

由于实际雷达的载荷和能源总是有限的, MIMO 雷达系统在对目标进行定位时发射总功率也会受到限制。因此, 如何使 MIMO 雷达系统在有限功率约束下得到更好的目标定位性能已经成为现代研究的一个热点问题。目前, 已经有越来越多的学者开始对这个问题进行研究^[1-8]。

从目前的现状来看, 现有研究大致可分为两种框架: 第 1 种是在 MIMO 雷达发射总功率恒定的前提下, 调整各站的功率分布, 以达到提升目标定位精度的目的^[4]; 第 2 种框架则是在保证定位精度的条

件下, 通过优化调整 MIMO 内分配方式, 使得系统消耗总功率最小^[5]。第 1 种框架为目前较常见处理框架, 可通过多种优化算法^[1,4,5,9-12]来快速获取其优化结果。文献[4]在 MIMO 雷达背景下, 研究了针对目标定位的功率分配算法^[1,4,5]。为了保证系统能在各个时刻选择适当的雷达以适当的发射参数对各个目标进行正确定位, 文献[6,9-12]将文献[4]的工作进行了扩展, 考虑了雷达选取和功率的联合优化分配算法。但是, 第 1 种框架缺点在于无法满足低截获的需求^[8,13]。因此, 按需分配的第 2 种框架更加贴合实际。在此框架下, 普林斯顿大学学者 Godrich^[8-13]提出了两种优化求解方法^[5]。方法 1 是对目标函数先做凸松弛^[5]后再快速求解, 但松弛过程可能会引入额外误差, 从而导致优化结果与最优解存在间隙; 方法 2 是域分解方法(Domain Decomposition Methods, DDM), 该方法属于一种简化的贪婪算法, 虽然可获取原问题的最优解, 但庞大的计算量无法满足实时性的需求。此外, 现有功率分配算法主要针对单

收稿日期: 2016-09-29; 改回日期: 2016-11-23; 网络出版: 2016-12-14

*通信作者: 严俊坤 jkyan@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61601340), 国家杰出青年科学基金(61525105), 中国博士后基金(2015M580817, 2016T90890)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61601340), The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (61525105), The Postdoctoral Science Foundation of China (2015M580817, 2016T90890)

目标的背景,在推广到多目标背景下无法使用。

针对上述问题,本文结合两种框架优势,以框架1的优化模型为主体,引入框架2的约束理念,构建了一种新的资源分配数学优化模型。具体地说,本文首先构造了一个以总功率和定位精度为优化目标的双目标函数规划(Double Objective-functions Programming, DOP)模型,实现了上文两种框架的有机结合。然后,本文结合坐标轮换和序列二次规划的思想,采用了一种交替全局优化算法(Alternating Global Search Algorithm, AGOA)对DOP模型求解。继而,结合Pareto解集理论,拟合出该DOP模型的Pareto最优曲线^[14-16]。进一步将本文算法通过流程的调整推广至多目标背景。最后,对提出的算法进行了有针对性的仿真,验证了本文算法在多目标背景下的有效以及单目标背景下的快速与准确性。

2 数学模型

假设空间平面上有 M 部发射雷达和 N 部接收雷达组成的MIMO雷达系统。收发雷达的坐标可以表示为 $(\hat{x}_m, \hat{y}_m, \bar{x}_n, \bar{y}_n), m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N$ 。每部雷达都能根据自己的回波数据测量目标的距离信息 R_k^i 和方位信息 θ_k^i 。根据各站获取的量测信息,我们希望实现目标的精确定位,即获取 $\mathbf{u}=[x, y]$ 的估计。

2.1 现有的两种功率分配模型

本文中,待优化变量为MIMO雷达各个发射站的发射功率 p_m ,矢量形式为 $\mathbf{p}=[p_1, p_2, \dots, p_M]$ 。由于克拉美罗界给目标定位精度提供了一个衡量尺度,因此现有工作大多将其用作功率分配的指标函数^[4,5]。在单目标情况下定位误差的克拉美罗下界(Cramér-Rao Lower Bound, CRLB)可写为^[5]

$$\text{CRLB}(\mathbf{p}) = \text{Tr}(\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{u})) = \frac{\mathbf{b}^T \mathbf{p}}{\mathbf{p}^T \mathbf{A} \mathbf{p}} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{J}(\mathbf{u})$ 是待估计变量 \mathbf{u} 的Fisher信息矩阵, $\text{Tr}(\cdot)$ 是矩阵的求迹运算。式(1)中, $\mathbf{b}=(\mathbf{d}+\mathbf{e})$,而 $\mathbf{A}=\mathbf{d}\mathbf{e}^T-\mathbf{q}\mathbf{q}^T$ 。其中, $\mathbf{d}=[d_1, d_2, \dots, d_M]^T$, $\mathbf{e}=[e_1, e_2, \dots, e_M]^T$ 和 $\mathbf{q}=[q_1, q_2, \dots, q_M]^T$ ^[5]。

$$d_m = \xi_m \sum_{n=1}^N \alpha_{m,n} |h_{m,n}|^2 \left(\frac{\hat{x}_m - x}{\bar{R}_m} + \frac{\bar{x}_n - x}{\bar{R}_n} \right)^2 \quad (2)$$

$$e_m = \xi_m \sum_{n=1}^N \alpha_{m,n} |h_{m,n}|^2 \left(\frac{\hat{y}_m - y}{\bar{R}_m} + \frac{\bar{y}_n - y}{\bar{R}_n} \right)^2 \quad (3)$$

$$q_m = \xi_m \sum_{n=1}^N \alpha_{m,n} |h_{m,n}|^2 \left(\frac{\hat{x}_m - x}{\bar{R}_m} + \frac{\bar{x}_n - x}{\bar{R}_n} \right) \cdot \left(\frac{\hat{y}_m - y}{\bar{R}_m} + \frac{\bar{y}_n - y}{\bar{R}_n} \right) \quad (4)$$

式(2)-式(4)中, $h_{m,n}$ 是不同收发雷达观测目标的雷达散射截面(RCS), $\alpha_{m,n} \propto \bar{R}_m^{-2} \bar{R}_n^{-2}$ 为衰减因子。为了方便计算,本文利用等价变换 $\mathbf{p}^T \mathbf{A} \mathbf{p} = \mathbf{p}^T \bar{\mathbf{A}} \mathbf{p}$,将矩阵 \mathbf{A} 通过转换为对称二次型 $\bar{\mathbf{A}} = (\mathbf{d}\mathbf{e}^T + \mathbf{e}\mathbf{d}^T)/2 - \mathbf{q}\mathbf{q}^T$ 。

传统针对目标定位的功率分配方法大部分按目标函数的种类,可分为如下两种:

(1)给定MIMO雷达系统内可分配总功率 P_{to} 的情况下,通过调整MIMO内各发射站的资源分布,最终获取更好的目标定位精度:

$$\left. \begin{aligned} \min \text{CRLB}(\mathbf{p}) \\ \text{s.t. } \mathbf{1}_M^T \mathbf{p} \leq P_{\text{to}} \\ P_{\min} \leq p_m \leq P_{\max}, \quad m=1, 2, \dots, M \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{1}_M=[1, 1, \dots, 1]^T$ 是 $M \times 1$ 矢量, P_{\max} , P_{\min} 分别为每部发射雷达工作时的最大额定功率和最小待机功率。

(2)在达到给定定位精度 η_{\max} 的条件下,通过优化调整功率分配方式,使得系统消耗总功率最小:

$$\left. \begin{aligned} \min P_{\text{to}} = \mathbf{1}_M^T \mathbf{p} \\ \text{s.t. } \text{CRLB}(\mathbf{p}) \leq \eta_{\max} \\ P_{\min} \leq p_m \leq P_{\max}, \quad m=1, 2, \dots, M \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

框架1中,由于约束为线性方程,且目标函数是分式多项式,可采用多种优化方法对该框架进行求解。但在实际工程应用中,定位精度只需达到一定指标即可。采用第1种框架最终优化结果定位精度高度依赖于最初给定的 P_{to} ,取值过小可能导致无法满足工作中的最低需求;取值过大则会造成功率浪费且与低截获的期望相矛盾。框架2则建立在按需分配的基础上,更贴近实际应用。但因为考虑到该框架中约束的复杂性,目前可以采用的优化算法较为单一,且计算时间较慢。

2.2 针对多目标定位的DOP优化模型

假设MIMO雷达采用全向发射的工作模式来实现多目标定位,此时待优化功率变量仍可表示为 $\mathbf{p}=[p_1, p_2, \dots, p_M]$ 。同时,我们假设各个目标的观测相互独立,再将上述两种优化模型结合,可获取以总功率和定位精度为优化目标的DOP模型:

$$\left. \begin{aligned} \min f(\mathbf{p}) = \{ \text{CRLB}(\mathbf{p}), \mathbf{1}_M^T \mathbf{p} \} \\ \text{s.t. } \mathbf{1}_M^T \mathbf{p} \leq P_{\text{to}} \\ \text{CRLB}(\mathbf{p}) \leq \eta_{\max} \\ P_{\min} \leq p_m \leq P_{\max}, \quad m=1, 2, \dots, M \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, $\text{CRLB}_k(\mathbf{p})$ 表示第 k 个目标的定位误差, $\sum_{k=1}^K \text{CRLB}_k(\mathbf{p})$ 则表示多个目标的定位精度之和,

$\text{CRLB}(\mathbf{p}) = \sum_{k=1}^K \text{CRLB}_k(\mathbf{p})$ 。通过求解此模型，可以在满足限定功率和定位精度的条件下，MIMO 雷达各个发射站之间所有可以存在的最优分配方式。式(7)属于一种 DOP 问题，记自变量的定义域为 S 。如果存在一个点 $\mathbf{p}^* \in S$ ，对于 $\forall \mathbf{p} \in S$ ，都满足 $f(\mathbf{p}^*) \leq f(\mathbf{p})$ ，则称 \mathbf{p}^* 为式(7)的折中解。通常，DOP 问题的全部折中解称为其 Pareto 最优曲线^[14-17]，可通过多次求解子问题来获取部分折中解，从而实现 Pareto 最优曲线的拟合。利用这个性质，本文通过设计一种 AGOA 算法对式(5)进行多次快速求解，从而将获取的多个折中解拟合成式(7)Pareto 曲线。此时，Pareto 曲线上的任意一点都为式(5)的折中解，可通过使用者的实际需求在该曲线上选取合适的分配结果。

3 AGOA 算法

从物理意义来讲，AGOA 算法就是在固定系统发射功率将现有资源一对一注入更有优势的雷达。本文将 CRLB 用作 AGOA 算法的代价函数，采用最小可行变量集(Minimal Viable Sets, MVS)¹⁾ 轮换算法对此问题进行优化。

AGOA 算法的求解过程：

从式(2)-式(4)可发现，系统定位目标的精度与雷达的发射功率、距离方位信息以及目标的 RCS 等都有关系。式(7)是一个双目标函数的优化问题，现有的求解方法可概述为：先对原问题的子问题进行凸松弛，再通过 CVX 优化包对该问题求解^[5]。该算法的优点是求解过程简单，但凸松弛会引入额外误差。且对于有 n ($n > 1$) 个目标的功率分配问题，目标函数的分子多项式是 $2n - 1$ 阶的，分母多项式是 $2n$ 阶的。如果采用单目标的松弛方法得到松弛后目标函数依然是非凸的。DDM 把整个问题分成多个子问题，然后求解这些子问题的解析解；然而，当存在多目标时，我们无法找到这些子问题的解析解。

本文中，AGOA 算法采用了一种新的策略进行快速计算，具体算法如下：

(1) 将所有发射雷达站的功率矢量定义为 $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_M]$ 。考虑到仅有单个等式约束，按照两两组合抽取其中两个发射功率作为 MVS，固定其它发射站的发射功率，仅调整这两个雷达站的功率。

(2) 这两个雷达站的功率的更新值记为

$$p_i^+ = p_i + \rho, \quad p_j^+ = p_j - \rho \quad (8)$$

可得 $\mathbf{p}^+ = [p_1, p_2, \dots, p_i^+, \dots, p_j^+, \dots, p_M]$ 。因为等式约束的关系，这两个变量只有一个自由度。将式(8)代入

式(1)中，经过详细整理，得到目标 1 的定位误差代价函数 $\text{CRLB}_1(\mathbf{p}^+)$ 关于 ρ 的分式(将分子分母分别记作 u_1 和 v_1)：

$$\text{CRLB}_1(\mathbf{p}^+) = \frac{b_2\rho + c_2}{a_1\rho^2 + b_1\rho + c_1} = \frac{u_1}{v_1} \quad (9)$$

类似地，可以得到其他目标的定位误差函数 $\text{CRLB}_2(\mathbf{p}^+), \dots, \text{CRLB}_K(\mathbf{p}^+)$ 的关于 ρ 的分式。

为简化公式推导且不失一般性，暂且考虑 2 个目标情况。将这 2 个目标的误差代价函数分式记作 $\text{CRLB}_1(\mathbf{p}^+)$ 和 $\text{CRLB}_2(\mathbf{p}^+)$ ，分别关于 ρ 求导可得

$$\partial(\text{CRLB}_1(\mathbf{p}^+))/\partial\rho = (u_1'v_1 - u_1v_1')/v_1^2$$

$$\partial(\text{CRLB}_2(\mathbf{p}^+))/\partial\rho = (u_2'v_2 - u_2v_2')/v_2^2$$

将其相加后通分可得

$$\partial(\text{CRLB}(\mathbf{p}^+))/\partial\rho = \left[(u_1'v_1 - u_1v_1')v_2^2 + (u_2'v_2 - u_2v_2')v_1^2 \right] / v_1^2v_2^2 \quad (10)$$

令 $\partial(\text{CRLB}(\mathbf{p}^+))/\partial\rho = 0$ ，可得

$$(u_1'v_1 - u_1v_1')v_2^2 + (u_2'v_2 - u_2v_2')v_1^2 = 0 \quad (11)$$

式(11)为关于 ρ 的一元四次多项式方程，对其求解最多可得 4 个根。考虑到一元多项式函数的极值点必出现在驻点或者边界上。该算法使用求得的 4 个根再加上 ρ 的最大最小值两个端点，从这 6 个点中找到可以使 $\text{CRLB}(\mathbf{p}^+)$ 取最小值的点。注意，以上方法对两个变量集实现了解析搜索。有了最优的 ρ ，根据式(10)更新这两个雷达功率的当前值并继续交替搜索。

与上述推导类似，当有 K 个目标时，我们只需从 $2K + 2$ 个点中筛选出令代价函数最小的点，并用于更新当前两个雷达的功率值。重复上述步骤，继续进行交替搜索，可最终获得优化结果。具体的算法流程，如表 1 所示。

表 1 交替全局优化算法

-
- (1) 给定初始均匀分配 $\mathbf{p}_0 = (P_{\text{tot}}/M)[1, 1, \dots, 1]^T$ ；
 - (2) 根据两两组合，选取其中两部雷达，其功率为 p_i, p_j ($i < j$)，其他雷达的功率在这个子步假设是不变的，令 $p_i^+ = p_i + \rho$ 和 $p_j^+ = p_j - \rho$ ；
 - (3) 求解一元多项式方程 $\partial(\text{CRLB}(\mathbf{p}^+))/\partial\rho = 0$ ，得到 $2K$ 个根 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{2K}$ ；
 - (4) 若 $\rho_i < \rho_{\min}$ 或 $\rho > \rho_{\max}$ ，去掉该根；
 - (5) 在剩余根和边界点 ρ_{\min}, ρ_{\max} 中，找出 $\hat{\rho} = \arg \min_{\rho} (\text{CRLB}(\mathbf{p}^+))$ ，令 $p_i^+ = p_i + \hat{\rho}$ 和 $p_j^+ = p_j - \hat{\rho}$ ；
 - (6) 将 \mathbf{p} 用 $[p_1, p_2, \dots, p_i^+, \dots, p_j^+, \dots, p_M]$ 替代；
 - (7) 搜索所有 i, j ($i < j$) 的组合，完成一个扫描，令 $\mathbf{p}_1 = \mathbf{p}$ ；
 - (8) 若 $\|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0\| \leq \epsilon$ (收敛条件取 $\epsilon = 10^{-8}$)，停止迭代。否则令 $\mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_1$ ，返回步骤(2)，进行下一次的搜索循环。
-

¹⁾ 本文的最小可行变量集是指这些变量一起可以满足所有等式约束。

总的来说,由上述算法可以快速获取 MIMO 雷达系统的资源分配的一个折中解,继而拟合 MIMO 雷达的功率分配问题的 Pareto 集。实际应用时可以根据用户需求(定位误差、系统总功率)在得到的 Pareto 集曲线上选取最合适的折中解。

4 实验结果分析

为了验证了本文算法在单目标定位背景下的快速、准确性以及多目标定位背景下的有效性。本文进行了如下仿真。4.1 节实验针对 MIMO 雷达平台设计了一种单目标定位场景,通过对比不同算法来验证本文算法的快速、准确性。4.2 节实验则针对多目标定位场景进行了仿真,并验证了算法在多目标背景下的有效性。为简化仿真,假设各部发射雷达参数相同,如表 2 所示。

表 2 发射雷达与发射信号参数

参数名称	数值
信号有效带宽 β (MHz)	1
波长 λ (m)	0.3
发射雷达最大工作功率 P_{\max} (kW)	100
发射雷达最小待机功率 P_{\min} (kW)	1

4.1 单目标背景下不同算法优化性能比较

现有功率分配优化方法,如凸松弛方法和 DDM,大多仅适用单目标情况,很难推广到多目标定位情况(凸松弛方法和 DDM 不适合处理多目标问题)。为了能够与这些算法进行性能对比,这里设计一种单目标背景的实验,通过该仿真来验证 AGOA 算法的优越性。图 1 给出了目标与雷达的空间位置示意图。

图 2 在不同发射功率条件下,给出了不同优化算法得到的定位精度。结果显示,与理论分析一致,AGOA 和 DDM 算法能够获得最优的定位精度,而松弛方法因额外误差的引入只能得到较差的定位精度。值得注意的是,当 MIMO 雷达系统平均的功率在 15~40 kW 范围内时,AGOA 和 DDM 算法能明

显提升定位性能,因为此时发射功率的可调空间较大。当功率过载或不足时(曲线两端),两种算法的优越性不太明显。

图 3 给出了 AGOA, DDM 和凸松弛算法的优化时间。当系统总功率过载或者不足时, MIMO 雷达的功率接近其发射功率的上下界,导致各站发射功率的可调空间减小,因此几种算法的优化时间都比较接近。在系统平均功率适中情况下, MIMO 雷达发射功率可调整空间较大,导致 DDM 计算时间激增。此时,凸松弛方法具有最快的优化速度,因为该算法将代价函数松弛为线性表达式,降低了算法复杂度。结合图 2 的结果可以发现, AGOA 算法则可以快速分配 MIMO 雷达的发射功率,并获取更好的定位性能。

4.2 验证算法在多目标定位背景下的有效性

为了验证算法在多目标背景下的有效性,我们设计了如下场景, MIMO 雷达系统包含了 4 个发射雷达, 3 个接收雷达,目的是对 4 个目标进行定位,空间位置关系如图 4 所示。各部发射雷达信号参数如表 2 所示。

假设发射总功率 P_o 小于等于 200 kW, 4 个目标定位均方误差之和 η_{\max} 小于等于 80 m^2 。图 5 在不同发射功率条件下给出了功率分配前后的多目标定位精度。子图中实线段就是本仿真中的 Pareto 最优解集曲线。曲线上的点都是满足功率和定位误差限制的最优解,曲线靠左端的点倾向于节约功率(式(6)中按需分配所需要的结果),曲线右端的点倾向于定位精度最高。仿真结果显示, AGOA 算法能有效提高对目标定位时的精度。在实际应用中,可以根据实际需求和倾向性在该曲线上选择期望的最优分配方式。通过这个实验,可以证明本文提出的 AGOA 在多目标条件下的有效性。

5 结束语

本文在分布式 MIMO 雷达系统下,提出了一种可应用于多目标定位的 AGOA 功率分配算法,将多次求解得到的结果拟合合成 Pareto 曲线,进而使

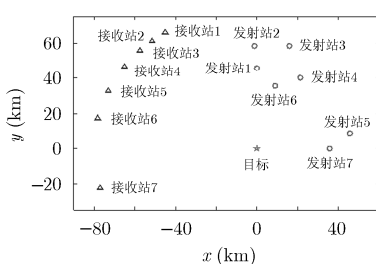


图 1 雷达与单目标的空间位置关系

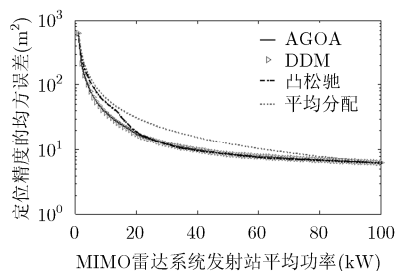


图 2 多种算法对模型优化结果比较

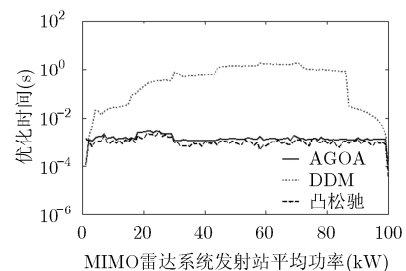


图 3 AGOA 和 DDM 优化目标函数的优化时间

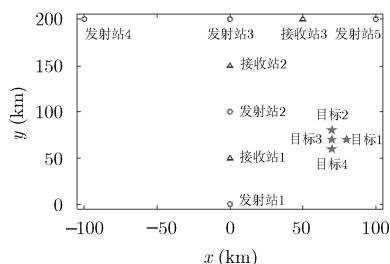


图4 MIMO雷达与4个目标的空间位置关系

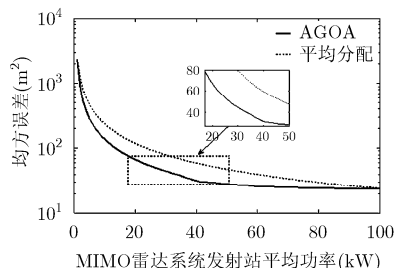


图5 非起伏 RCS 条件下系统对多目标定位的最优解集

MIMO 雷达系统能实时地根据各部雷达的发射参数, 在功率有限等约束下达到更好的性能。具体工作方式是在各个时刻, 将功率尽可能分配给优势雷达来对现有目标进行更好的定位。与传统的功率分配算法相比, 本文的算法优势有如下几点: (1)直接对原函数进行优化, 避免了松弛可能带来的偏差; (2)本文算法大大减少了运算时间; (3)本文算法可直接应用于多目标同时定位, 更符合实际应用中可能遇到的情况。未来, 推广 AGOA 算法, 并用于解决跟踪定位一体化问题。

参考文献

- [1] GODRICH H, HAIMOVICH A M, and BLUM R S. Target localization accuracy gain in MIMO radar based system [J], *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(6): 2783-2803.
- [2] VAN TREES H L and BELL K L. Bayesian Cramer-Rao bounds for multistatic radar[C]. Proceedings of Waveform Diversity Design, Orlando, FL, USA, 2007: 856-859.
- [3] GODRICH H, PETROPULU A P, and POOR H V. Cluster allocation schemes for target tracking in multiple radar architectures[C]. Proceeding of Signals, Systems and Computers, Princeton, NJ, USA, 2011, 863-867.
- [4] GODRICH H, PETROPULU A P, and POOR H V. Resource allocation schemes for target localization in distributed multiple radar architectures[C]. Proceedings of Signal Processing, Aalborg, Denmark, 2010: 23-27.
- [5] GODRICH H, PETROPULU A, and POOR H V. Power allocation strategies for target localization in distributed multiple-radar architecture[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(7): 3226-3240.
- [6] 严俊坤, 刘宏伟, 戴奉周, 等. 基于非线性机会约束规划的多基雷达系统稳健功率分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(3): 509-515. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01189. YAN Junkun, LIU Hongwei, and DAI Fengzhou, *et al.* Nonlinear chance constrained programming based robust power allocation algorithm for multistatic radar systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3): 509-515. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01189.
- [7] 时晨光, 汪飞, 周建江, 等. 基于低截获概率优化的组网雷达系统最优功率分配算法[J]. *雷达学报*, 2014, 3(4): 465-473. SHI Chenguang, WANG Fei, and 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.
- [8] GARCIA N, HAIMOVICH A M, COULON M, *et al.* Resource allocation in MIMO radar with multiple targets for non-coherent localization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(10): 2656-2666.
- [9] HERO A O and COCHRAN D. Sensor management: Past, present, and future[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(12): 3064-3075.
- [10] VAN TREESH L. Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part III[M]. New York, NY: John Wiley and Sons, 1971: 275-352.
- [11] STOICA P and SELÉN Y. Cyclic minimizers, majorization techniques, and expectation-maximization algorithm: A refresher[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2004, 21(1): 112-114.
- [12] GODRICH H, PETROPULU A, and POOR H V. A combinatorial optimization framework for subset selection in distributed multiple-radar architecture[C]. Proceedings of Acoustics, Speech and Signal Processing, Piscataway, NJ, USA, 2011: 2796-2799.
- [13] 张娟, 赵永红, 张林让, 等. 网络化雷达协同抗干扰发射功率分配方法[P]. CN103941238A. 2014.
- [14] LIN Jiguan. Multiple-objective problems: Pareto-optimal solutions by method of proper equality constraints[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1976, 21(5): 641-650.
- [15] KIM I Y and DE WECK O L. Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2005, 29(2): 149-158.
- [16] KAO H Y, CHAN C Y, and WU D J. A multi-objective programming method for solving network DEA[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 24: 406-413.
- [17] EHRGOTT M and WIECEK M M. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys[M]. New York, NY: Springer 2005: 667-708.

冯涵哲: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为认知雷达定位、协同探测。

严俊坤: 男, 1987 年生, 博士后, 讲师, 研究方向为认知雷达、目标跟踪与定位、协同探测。

刘宏伟: 男, 1971 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达自动目标识别等。