

DOI: 10.7652/xjtuxb201810015

多目标跟踪下的分布式 MIMO 雷达 资源联合优化算法

宋喜玉, 任修坤, 郑娜娥, 田英华
(战略支援部队信息工程大学, 450001, 郑州)

摘要: 针对现有分布式 MIMO 雷达资源联合分配多集中于发射端阵元与功率的分配,未同时考虑接收阵元的优化,且缺乏对任意雷达布阵形势下系统跟踪能力和资源需求量估算等问题,提出多目标跟踪下的分布式 MIMO 雷达资源联合优化算法。首先,计算多目标位置误差的最大值,以最小化该最大值为目标函数;其次,在发射和接收阵元总数量有限、发射总功率给定的条件下,建立收发阵元选取与功率分配联合的资源优化模型;然后,结合启发式搜索算法和连续参数凸近似算法,采用循环最小化的方式对该问题进行求解;最后,在给定大小的实验环境中,对目标运动轨迹确定和随机两种场景进行实验。实验结果表明,系统发射总功率一定时,选取的发射阵元个数要明显少于接收阵元个数。相比于现有 MIMO 雷达资源分配研究,所提算法能够估算出在任意雷达布阵形势下系统的最低目标跟踪精度、个数和相应的最少资源需求量,对雷达系统的结构设计和资源储备具有一定的参考价值。

关键词: MIMO 雷达;分布式;多目标跟踪;资源联合优化

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)10-0110-06

A Joint Resource Optimization Algorithm of Distributed MIMO Radar Systems for Multiple Targets Tracking

SONG Xiyu, REN Xiukun, ZHENG Na'e, TIAN Yinghua
(Information Engineering University, Strategic Support Force, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A joint resource optimization algorithm of distributed MIMO radar system for multiple targets tracking is proposed to solve the problems that existing researches on joint resource allocations for distributed MIMO radar systems focus on only transmitters and system power without optimization of receivers, and lack estimation of tracking capability and resource demands for random radar layouts. Firstly, the maximum of Cramer-Rao lower bound in multiple targets location is calculated and the objective is to minimize the maximum value. Next, an optimization model that considers transmitting power, transmitters and receivers is established under constraints of transmitting power and total number of selected transmitters and receivers. Then, a joint resource optimization algorithm based on cyclic minimization is proposed to solve the problem via combining the heuristic algorithm for antenna selection and the sequential parametric convex approximation algorithm for power allocation. Experimental results of static and random target trajectories in a given size of environment show that the number of selected transmitters is

收稿日期: 2018-02-07。 作者简介: 宋喜玉(1992—),女,硕士生;郑娜娥(通信作者),女,博士,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401469,41301481,61401513);国家科技重大专项资助项目(2013ZX03006003-006)。

网络出版时间: 2018-07-13 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180713.2122.010.html>

smaller than that of receivers when the total transmitting power is limited. Comparisons with existing resource allocation researches show that the proposed algorithm can evaluate the least target tracking accuracy, the number of targets, and the minimum corresponding resource demands of the system in any radar array situation. The algorithm may have some reference value for the structure design and resource reserve of distributed MIMO radar systems.

Keywords: MIMO radar; distributed; multiple targets tracking; joint resource optimization

分布式 MIMO 雷达宽分布的天线结构及空间多通道的特点使其具有强大的目标探测和识别能力,成为雷达领域的研究热点^[1-2]。雷达资源分配是发挥其系统优势的关键所在^[3-6]。因此,分布式 MIMO 雷达的资源优化问题值得研究。分布式 MIMO 雷达的资源优化可以分为两类:一类是基于系统结构的阵元选取与布置^[7-9];另一类是基于发射参数的功率、带宽和时长资源的分配^[10-12]。对于第一类资源而言,目前的研究一般是将阵元选取问题视为背包问题,采用启发式算法(heuristic algorithm, HA)和阵元分组的方法进行阵元选取^[7,13],在此基础上,宋喜玉等进一步研究了多目标不同跟踪优先级条件下的阵元选取问题^[8]。对于第二类资源优化的研究成果主要集中在功率分配方面。严俊坤等采用梯度投影法直接对功率分配问题进行求解^[14]。GARCIA 等采用连续参数凸近似(sequential parametric convex approximation, SPCA)算法进行多目标定位和速度估计^[15-16]。

基于此,本文对分布式 MIMO 雷达系统任意雷达布阵形势下的系统结构与发射参数联合优化问题进行了研究,提出了 HA 与 SPCA 算法相结合的优化算法,考虑了发射功率总量与阵元选取数量的影响。本文分别在目标运动轨迹确定与随机两种环境下实验,对算法性能进行了仿真验证和评估。与现有研究相比,本文的研究问题能够更加符合实际应用环境,且研究方法可以估算出雷达系统的跟踪能力和资源需求量,对实际应用具有重要参考意义。

1 数学模型

假设分布式 MIMO 雷达系统含有 M 部发射雷达, N 部接收雷达,每部雷达均为单天线雷达。在二维平面内,发射雷达的坐标为 $(x_{t,m}, y_{t,m})$, $m=1, \dots, M$,接收雷达的坐标为 $(x_{r,n}, y_{r,n})$, $n=1, \dots, N$ 。雷达发射正交信号,低通等效为 $s_m(t)$,满足

$$\int_{T_m} |s_m(t)|^2 dt = 1$$

其中, T_m 为第 m 部雷达发射信号持续时长。

1.1 目标运动模型

场景中存在 Q 个运动目标,定义对第 q 个目标第 k 次观测时的目标状态向量为 $\mathbf{x}_{q,k} = [x_{q,k}, y_{q,k}, v_{x,q,k}, v_{y,q,k}]^T$,目标运动模型表示为

$$\mathbf{x}_{q,k} = \mathbf{F}\mathbf{x}_{q,k-1} + \mathbf{v}_{q,k-1} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为目标的状态转移矩阵; $\mathbf{v}_{q,k}$ 表示零均值、白色高斯过程噪声序列,其协方差矩阵为 $\mathbf{Q}_k$ ^[14]。

1.2 目标观测模型

假设分布式 MIMO 雷达系统各接收端可以实现时间同步。在第 k 次观测时,第 n 部接收雷达接收到的低通等效信号可以表示为^[16]

$$\mathbf{r}_{n,k}(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{m=1}^M \sqrt{\alpha_{mqn,k} p_{m,k}} \zeta_{mqn,k} s_m(t - \tau_{mqn,k}) e^{-j\omega_{mqn,k} t} + \mathbf{w}_{n,k}(t) \quad (2)$$

式中: mqn 表示信号从第 m 部发射雷达发出,经第 q 个目标反射,被第 n 部雷达接收的整个路径; $\alpha_{mqn,k}$ 为路径损耗因子; $\zeta_{mqn,k}$ 表示雷达截面积的复散射系数; $\tau_{mqn,k}$ 表示信号时延; $\omega_{mqn,k}$ 为目标运动的多普勒频移; $\mathbf{w}_{n,k}(t)$ 为自相关函数为 $\sigma_w^2 \delta(\tau)$ 的白色高斯噪声, σ_w^2 为功率谱密度。

各时刻,融合中心根据数据的时延和多普勒信息对目标进行跟踪,非线性观测过程描述为

$$\mathbf{z}_{q,k} = f(\mathbf{x}_{q,k}) + \mathbf{n}_{q,k} \quad (3)$$

式中: $f(\cdot)$ 表示非线性的观测过程; $\mathbf{n}_{q,k}$ 为观测的高斯白噪声; $\mathbf{z}_{q,k} = [\tau_{q,k}, \omega_{q,k}]$ 为观测目标时延和多普勒。本文采用扩展卡尔曼滤波器对目标跟踪。

1.3 目标位置估计精度函数

在高信噪比时,参数估计的克拉美罗界与无偏估计量十分接近^[17]。对于运动目标,可以采用贝叶斯克 拉 美 罗 界 (Bayesian Cramer-Rao bound, BCRB) 作为目标参数估计的度量准则。根据文献^[17],第 q 个目标的状态估计的克拉美罗矩阵为 $\mathbf{C}_{q,k}$,其对角线元素依次为各个状态估计分量方差的下界,则目标的位置估计误差满足

$$\begin{aligned} \text{var} \hat{x}_{q,k} + \text{var} \hat{y}_{q,k} &\geq \\ \text{diag} \mathbf{C}_{q,k,1} + \text{diag} \mathbf{C}_{q,k,2} &= \mathbf{T}_{q,k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\hat{x}_{q,k}$ 和 $\hat{y}_{q,k}$ 分别为 $x_{q,k}$ 和 $y_{q,k}$ 的估计值; var 表

示求方差;diag 分别表示取对角线元素。根据文献[18],第 q 个目标位置估计精度的 BCRB 可以近似表示为

$$T_{q,k}(\mathbf{f}_{t,k}, \mathbf{f}_{r,k}, \mathbf{p}_k) \approx \frac{\sigma_w^2}{8\pi^2} \frac{\mathbf{V}_{q,k} \mathbf{p}_k}{\mathbf{p}_k^T \mathbf{H}_{q,k} \mathbf{p}_k} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{p}_k = [p_{1,k}, p_{2,k}, \dots, p_{M,k}]^T$ 为雷达发射功率向量; $\mathbf{f}_{t,k} = [f_{t_1,k}, f_{t_2,k}, \dots, f_{t_M,k}]^T$ 为发射阵元选取向量; $\mathbf{f}_{r,k} = [f_{r_1,k}, f_{r_2,k}, \dots, f_{r_N,k}]^T$ 为接收阵元选取向量,其中 $f_{t_m,k}, f_{r_n,k} \in \{0, 1\}$, 0 为舍弃, 1 为选取; $\mathbf{H}_{q,k} = \mathbf{A}_{q,k}^T \mathbf{f}_{r,k} \mathbf{f}_{r,k}^T \mathbf{B}_{q,k} - \mathbf{C}_{q,k}^T \mathbf{f}_{t,k} \mathbf{f}_{t,k}^T \mathbf{C}_{q,k}$; $\mathbf{V}_{q,k} = \mathbf{f}_{r,k}^T (\mathbf{A}_{q,k} + \mathbf{B}_{q,k})$; $\mathbf{A}_{q,k}$ 、 $\mathbf{B}_{q,k}$ 、 $\mathbf{C}_{q,k}$ 为与雷达和目标位置相关的参数。

雷达系统对各个目标的跟踪精度存在差异,考虑到系统的跟踪能力往往取决于跟踪精度最差的一个目标,为更好地掌握系统对多目标整体的跟踪精度,定义多目标位置估计 BCRB 的最大值为多目标整体位置估计精度,便于掌握系统对单个目标跟踪能力的下限。因此,文中多目标整体位置估计精度函数为

$$G(\mathbf{f}_{t,k}, \mathbf{f}_{r,k}, \mathbf{p}_k) = \max_{q=1, \dots, Q} \sqrt{T_q(\mathbf{f}_{t,k}, \mathbf{f}_{r,k}, \mathbf{p}_k)} \quad (6)$$

2 资源联合优化算法

2.1 资源优化模型的建立

对于 $M \times N$ 的分布式 MIMO 雷达系统,当系统用于目标跟踪的阵元子集数量和发射总功率给定时,合理地配置发射与接收阵元的数量关系和分配系统发射功率是提高系统性能的关键。以最小化多目标位置估计误差的最大值为目标函数的资源联合优化模型为

$$\begin{aligned} & \min_{(\mathbf{f}_{\text{topt},k}, \mathbf{f}_{\text{ropt},k}, \mathbf{p}_{\text{opt},k})} G(\mathbf{f}_{t,k}, \mathbf{f}_{r,k}, \mathbf{p}_k) \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{m=1}^M f_{t_m,k} + \sum_{n=1}^N f_{r_n,k} \leq K \\ \sum_{m=1}^M f_{t_m,k} \geq 1, \sum_{n=1}^N f_{r_n,k} \geq 1 \\ \mathbf{1}^T \mathbf{p}_k = P_{\text{total}} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: K 为选取的阵元子集数量; P_{total} 为系统总的发射功率; $\mathbf{f}_{\text{topt},k}$ 、 $\mathbf{f}_{\text{ropt},k}$ 、 $\mathbf{p}_{\text{opt},k}$ 分别为最优的发射阵元、接收阵元和发射功率的分配结果。

2.2 资源优化模型的求解

阵元选取与功率分配的联合优化问题为布尔型与连续型变量混合的优化问题,可以先对布尔型变量选取,再对连续型变量优化。由于系统只给定发射与接收阵元的总数,而未对二者子集大小具体分

配,因此本文需要考虑对发射与接收阵元子集的大小进行配置。针对该问题,本文的研究思路为:先采用启发式搜索(HA)方法^[13]选取阵元,使目标定位精度最高,再采用连续参数凸近似算法(SPCA)算法^[19]对功率分配的非凸优化问题进行求解,最后通过循环最小化的方式,将资源优化结果循环迭代,直到位置估计精度不再提高,此时得到最优的分配结果。

首先,初始化发射阵元个数为 K_1 ,接收阵元个数为 K_2 ;然后,采用 HA 算法分别计算得到发射和接收选取向量 $\mathbf{f}'_{t,k}$ 和 $\mathbf{f}'_{r,k}$;最后,对发射功率进行优化,当发射与接收阵元选取向量分别为 $\mathbf{f}'_{t,k}$ 和 $\mathbf{f}'_{r,k}$ 时,以发射功率 $\mathbf{p}_k$ 为优化变量的资源优化模型为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{p}_k} \lambda \\ & \text{s. t.} \begin{cases} G(\mathbf{p}_k) \leq \lambda \\ \mathbf{1}^T \mathbf{p}_k = P_{\text{total}} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

结合式(5),上述优化模型可以表示为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{p}_k} \lambda^2 \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \frac{1}{\eta} \frac{\mathbf{V}_{q,k} \mathbf{p}_k}{\mathbf{p}_k^T \mathbf{H}_{q,k} \mathbf{p}_k} \leq \lambda^2, q = 1, \dots, Q \\ \mathbf{1}^T \mathbf{p}_k = P_{\text{total}} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

根据 SPCA 算法^[19],将 $\mathbf{H}_{q,k}$ 分解为正定矩阵 $\mathbf{H}_{q,k}^+$ 和非正定矩阵 $\mathbf{H}_{q,k}^-$ 时,以 $\mathbf{p}_{l,k}$ 为线性化起点,将凹函数在 $\mathbf{p}_{l,k}$ 处泰勒展开为 $-\mathbf{p}_{l,k}^T \mathbf{H}_{q,k}^+ (2\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{l,k})$,则式(9)转化为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{p}_k^*} \lambda^2 \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \frac{\mathbf{V}_{q,k} \mathbf{p}_k}{\eta \lambda^2} - \mathbf{p}_{l,k}^T \mathbf{H}_{q,k}^+ (2\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{l,k}) \\ - \mathbf{p}_{l,k}^T \mathbf{H}_{q,k}^- \mathbf{p}_k \leq 1, q = 1, \dots, Q \\ \mathbf{1}^T \mathbf{p}_k = P_{\text{total}} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

将当前迭代的功率分配结果 $\mathbf{p}_{l,k}$ 作为 $l+1$ 次迭代的线性化起点,循环迭代,直到结果收敛到局部最优解。通过循环最小化的方式,根据当前的资源分配结果 $\mathbf{f}'_{t,k}$ 、 $\mathbf{f}'_{r,k}$ 和 $\mathbf{p}'_k$,进行下一次迭代,直到优化结果收敛稳定,得到发射和接收阵元个数最多为 K_1 和 K_2 时的分配结果。

最后,根据 $\mathbf{f}'_{t,k}$ 和 $\mathbf{f}'_{r,k}$ 的取值计算实际阵元选取个数 $N_{t,k}$ 、 $N_{r,k}$,进一步更新 K_1 和 K_2 的取值,得到 K_1 和 K_2 不同组合下的资源分配结果和目标状态估计精度,得到最优的资源分配结果 $\mathbf{f}_{\text{topt},k}$ 、 $\mathbf{f}_{\text{ropt},k}$ 、 $\mathbf{p}_{\text{opt},k}$ 和目标位置估计精度 G_{opt} 。

综上所述,本文基于循环最小化的资源联合优化算法框图如图 1 所示,其中 G_0 为估计精度初始值。

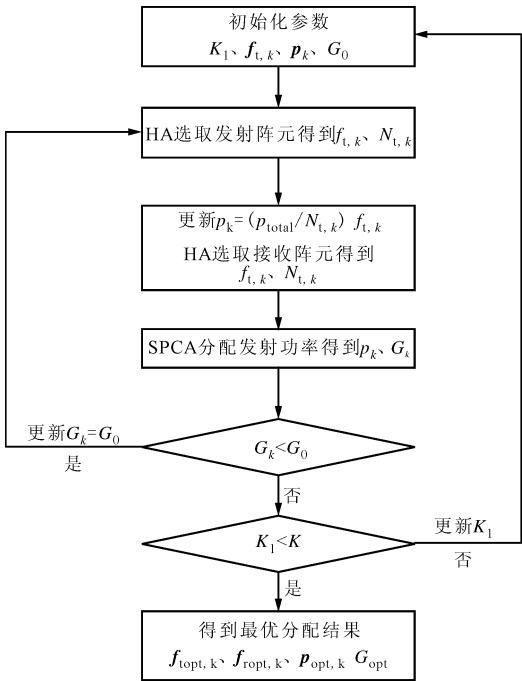


图 1 本文资源联合优化算法框图

2.3 算法复杂度分析

当阵元子集大小为 K 、发射子集大小为 K_1 、循环最小化次数为 γ 时,本文算法与遍历搜索方式所采用的阵元选取次数和发射功率分配次数如图 2 所示。假设循环最小化迭代次数 $\gamma=5$ (实际运算统计的平均值), $M=N=10$ 。

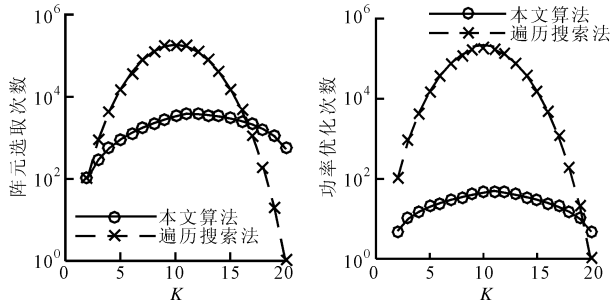


图 2 2 种算法的计算量比较

3 实验和结果分析

3.1 实验环境及参数配置

在 $20\text{ km}\times 20\text{ km}$ 的场景中, $M=N=10$ 的分布式 MIMO 雷达系统布阵如图 3 所示。系统发射总功率 $P_{\text{total}}=10\text{ kW}$,单部雷达的系统带宽为 $\beta=5\text{ MHz}$,雷达载波频率为 $f_c=1\text{ GHz}$,脉冲重复频率为 $f_r=5\text{ kHz}$ 。为简化模型,假设目标散射系数 $|\zeta|=1$ 。场景中 Q 个目标均以 100 m/s 的速度匀速直线运动,目标观测间隔为 $T=5\text{ s}$,跟踪 10 次。

为分析目标和阵元个数以及发射与接收阵元的个数关系对目标跟踪能力的影响,现分别从目标轨迹确定和随机分布两个方面对系统的性能进行评估。实验采用 500 次蒙特卡洛结果的平均值。

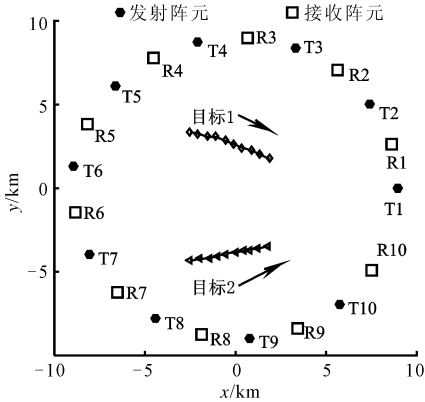


图 3 雷达阵元布阵形式图

3.2 目标运动轨迹确定下的资源分配

假设目标个数为 $Q=2$,其运动轨迹如图 3 所示。现分别对 $K=6,12,18$ 时 3 种不同阵元子集取值进行资源联合分配。图 4 给出了目标跟踪估计精度图。可以看出,阵元子集数是 K 越多,目标的位置估计精度越高,相比 K 从 6 增加到 12 时性能的提高量, K 从 12 增加到 18 时对性能的提升作用较弱。这是因为雷达系统总的发射功率有限,增加额外的阵元并不能继续分得更多的功率资源,从而导致阵元数量增加到一定程度时,阵元对系统性能的提升作用逐渐变弱。由此说明,在发射总功率有限的条件下,系统性能与阵元选取个数之间并不是简单的线性关系。目标运动模型中存在过程噪声的影响,所以目标的位置估计精度的均方根误差可以很小,但是不会随时间一直改善。

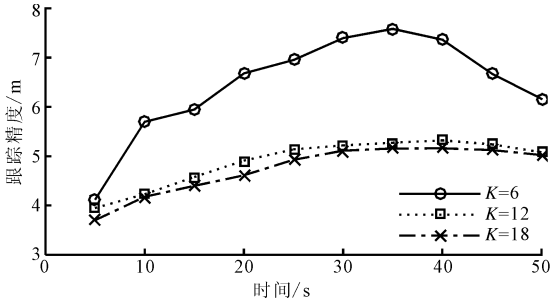


图 4 不同 K 取值下的目标跟踪估计精度

图 5 给出了与图 4 对应的阵元选取数量情况。由图 5a 可知,实际阵元选取数可以小于系统允许的最多的阵元数。因为对于系统总功率有限的雷达系统,当阵元个数增加到一定程度时,系统性能基本不再提升,过多的阵元反而会带来更大的数据传输和

处理困难。因此,在发射阵元选取较少的情况下,系统并未选取所有的接收阵元。此外,由图 5b 和图 5c 可以看出,系统选取发射阵元的个数要少于接收阵元的个数。这是因为选择更多的发射阵元并不意味着可以获得足够的发射功率,而增加一定的接收阵元则有利于从多角度观测目标发挥分布式 MI-MO 雷达空间分集的优势,从而提高目标的跟踪性能。

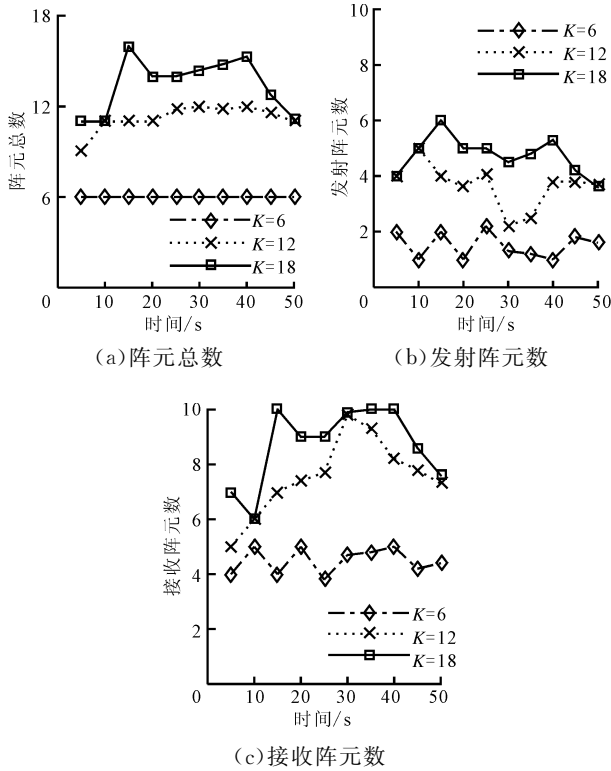


图 5 不同 K 取值下的阵元选取数量情况

3.3 目标运动轨迹随机下的资源分配

为更好地分析本文算法的性能,在图 3 的雷达布阵形式下,随机仿真目标运动轨迹。实验以多目标在整个运动过程中位置估计均方根误差的最大值

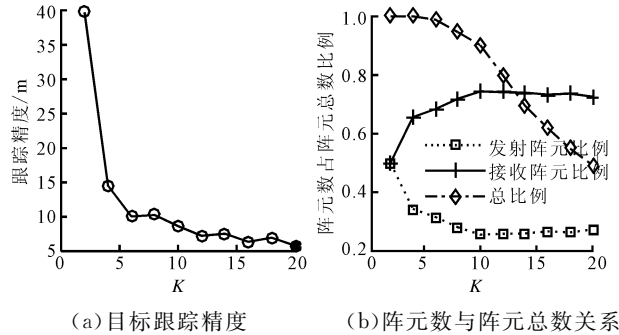


图 6 Q=2 时本文算法目标跟踪精度和资源分配结果

作为系统对目标的位置估计精度。

图 6 给出了 $Q=2$ 时本文算法在不同 K 取值下

的目标跟踪精度和资源分配结果。由图 6a 可以看出,阵元子集大小 K 越大,系统对目标的跟踪误差越小,跟踪能力越强。当 $K>10$ 时,系统跟踪能力基本不再提升,此时受发射总功率的限制,距离目标相对位置较差的阵元对目标跟踪性能提升作用很小。相对应地,图 6b 给出了相应的阵元选取数量关系。可以看出,在 $K\geq 10$ 时,实际选取阵元总数相对系统允许子集比例开始快速下降,尽管可选取的阵元子集大小 K 增大,但实际选取阵元个数并未增多,发射、接收阵元相对选取阵元的比例也基本趋于稳定。由此说明,当阵元允许子集大小 $K\geq 10$ 时,系统的跟踪能力基本达到该条件下的最优值,此时选取的发射阵元个数约为接收阵元个数的 1/3。该结果与图 5a 吻合。

雷达系统的跟踪能力不仅可以从系统对目标的位置估计精度来评价,还可以从系统跟踪的目标个数来分析。现定义目标跟踪精度 μ 表示系统对目标跟踪过程中的位置估计误差的最大值,即当系统总功率 P_{total} 、阵元子集大小 K,以及目标个数 Q 给定时,在实验场景中的任何一个目标在任意时刻的位置估计误差都不会超过 μ 。

图 7 计算了不同 K 取值和跟踪精度要求 μ 与系统跟踪的目标个数 Q 的关系图。可以看出,随阵元子集 K 和目标跟踪精度 μ 的增加,即系统总的资源增加,对每个目标的跟踪要求降低了,此时跟踪目标个数也逐渐增多。由图 7a 可知,当跟踪精度要求为 $\mu=10$ m 时,增大阵元子集大小 K,系统跟踪的目标数十分有限。因为系统总的功率资源有限,增大阵元子集大小 K,并不会带来跟踪能力的持续提升。图 7b 中阵元子集大小为 $K=10$ 时,目标跟踪精度 μ 越大,即跟踪精度要求越低,系统跟踪的目标个数增长越快。

为分析系统功率资源对系统性能的影响,图 8 分析了不同功率对系统目标跟踪精度和目标个数的

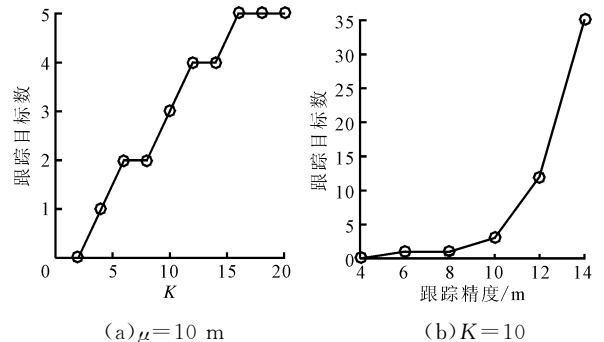


图 7 系统跟踪目标的能力

影响。可以看出,发射功率越大,目标的跟踪精度越高,跟踪目标的个数也越多。结合图 6a 和图 8a 可以看出,增加系统资源可以一定限度内提高对目标的跟踪精度,但是随系统资源的增加,性能提升地越来越缓慢。由于系统以多目标位置估计精度的最大值为整体位置估计精度,所以图 7b 和图 8b 中适当放宽跟踪精度要求或增加发射功率均可以带来跟踪目标个数的大幅提升。

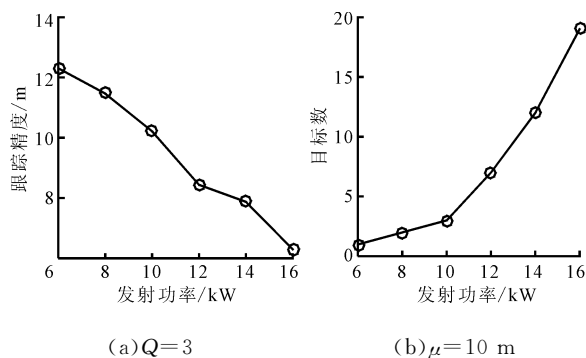


图 8 $K=10$ 时系统功率对跟踪性能的影响

4 结 论

本文研究了多目标跟踪下的分布式 MIMO 雷达资源联合优化问题,在选取阵元总数、发射功率总量有限条件下,建立收发阵元和发射功率联合的资源优化模型,采用 HA 算法、SPCA 算法和循环最小化方法对优化问题求解。仿真实验计算了给定实验场景下的雷达资源总量与跟踪目标能力的对应关系,能够在一定程度上估算出雷达系统的战场作战能力和相应的资源需求。实验具体结论如下。

(1) 给定的雷达布阵场景下,受系统发射功率总量的约束,选取阵元个数达到一定程度时,系统性能基本不再提高;系统选取的发射阵元个数要明显少于接收阵元的个数。本文算法不仅能够避免选取多余阵元带来额外计算量的问题,而且对雷达系统结构设计具有参考意义。

(2) 仿真分析了阵元子集大小和发射功率总量对系统跟踪目标精度与个数的影响,结果表明,增加功率资源比增加系统阵元对提升系统性能的作用更加明显。

参考文献:

[1] HAIMOVICH A, BLUM R, CIMINI L. MIMO radar with widely separated antennas [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(1): 116-129.

[2] DEB D, BHATTACHARJEE R, VENGADARAJAN A. Resource manager for MIMO radar [C]// Proceedings of the IEEE Radar Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 71-75.

[3] YAN J, LIU H, PU W, et al. Joint beam selection and power allocation for multiple target tracking in netted collocated MIMO radar system [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(24): 6417-6427.

[4] 严俊坤. 认知雷达中的资源分配算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 1-6.

[5] SUN Y, ZHENG N, LI Y, et al. Resource allocation approach for target localization in distributed MIMO radar sensor networks [J]. Systems Engineering & Electronics, 2017, 39(2): 304-309.

[6] CHEN Y J, ZHANG Q, LUO Y, et al. Multi-target radar imaging based on phased-MIMO technique: part II Adaptive resource allocation [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(19): 6198-6209.

[7] GODRICH H, PETROPULU A P, POOR H V, et al. Sensor selection in distributed multiple-radar architectures for localization: a knapsack problem formulation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(1): 247-260.

[8] SONG Xiyu, ZHENG Na'e, BAI Ting. Resource allocation schemes for multiple targets tracking in distributed MIMO radar systems [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2017(10): 1-12.

[9] GAO Yongchan, LI Hongbin, HIMED B. Knowledge-aided range-spread target detection for distributed MIMO radar in non-homogeneous environments [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(3): 617-627.

[10] GAO H, WANG J, ZHANG X, et al. Resource allocation in MIMO radar with widely separated antennas for multi-target detection [C]// 2014 International Radar Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 7060247.

[11] RADMARD M, CHITGARHA M M, MAJD M N, et al. Antenna placement and power allocation optimization in MIMO detection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(2): 1468-1478.

[12] CHAVALI P, NEHORAI A. Scheduling and power allocation in a cognitive radar network for multiple-target tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(2): 715-729.

(下转第 123 页)