

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415492

# 抗干扰场景下基于 LPI 的资源优化分配\*

李辉 武会斌 王伟东 侯庆华 张恺

(河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454003)

**摘要:** 为了使雷达能够应对干扰场景并提高信号的 LPI 性能,本文提出了一种新型资源分配方案,而所研究的具体干扰类型为欺骗性干扰。首先,推导出欺骗性距离在三维情况下的 CRLB。然后,依据 CRLB 建立抗干扰下的资源分配问题,具体来说,将总功率消耗量作为目标函数,并将 CRLB 作为性能约束,通过调配传感器资源、功率资源和带宽资源使雷达满足预定性能约束的前提下抑制总功率数值。为了求解所提出的优化问题,本文有针对性地先求解属于整数规划范畴的传感器资源分配问题,然后采用循环形式的 SQP 算法求解功率和带宽联合分配问题。最终的仿真结果显示,与仅优化功率的分配方案相比,新方案的功率消耗量低于该方案的 50.0%,验证了新方案在降低总功率方面的可行性。此外,仿真实验中又与非线性规划遗传算法作对比,简单说明本文算法的优势和不足。最后给出了截获接收机处的功率对比结果和分析,结果显示最大功率成分的有效下降,从而提高了信号的 LPI 特性。

**关键词:** 欺骗性干扰;低截获概率;雷达资源分配;CRLB;序列二次规划

**中图分类号:** TN973.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Optimization of resource allocation based on LPI in anti-interference scenario

Li Hui Wu Huibin Wang Weidong Hou Qinghua Zhang Kai

(School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** In order to enable radar to deal with interference scenario and improve LPI performance of signal, a novel resource allocation scheme is proposed in this paper, and the specific jamming type studied is deceptive jamming. Firstly, the CRLB for deceptive distance in three dimensions is derived. Then, the resource allocation problem under anti-interference is established according to the CRLB. Specifically, the total power consumption is taken as the objective function, and the CRLB is taken as the performance constraint. The total power value is suppressed under the premise that the radar meets the predetermined performance constraint by allocating sensor, power and bandwidth resources. In order to solve the proposed optimization problem, this paper firstly solves the sensor resource allocation problem belonging to integer programming, and then adopts the SQP algorithm in cyclic form to solve the joint power and bandwidth allocation problem. The final simulation results show that the power consumption of the new scheme is less than 50.0% compared with the optimal power allocation scheme, which verifies the feasibility of the new scheme in reducing the total power. In addition, the advantages and disadvantages of the proposed algorithm are explained by comparing with the nonlinear programming genetic algorithm in the simulation experiment. Finally, the power comparison results and analysis at the interception receiver are given, which show that the maximum power component effectively decreases, so as to improve the LPI performance of the signal.

**Keywords:** deception jamming; low probability of intercept; radar resource allocation; CRLB; sequential quadratic programming

## 0 引言

在战场场景下,移动作战平台通常为了获取性能上的

优势会采取一定的干扰措施,例如欺骗性干扰,具体来说,移动作战平台将所接收到的信号进行延时处理,并通过将延时信号重新辐射出去的手段来产生虚假目标。这种干扰

收稿日期:2024-02-06

\* 基金项目:河南省科技攻关项目(232102211005)资助

通常来说对定位雷达具有较大的干扰性。这是因为目标对信号进行的延时处理会使匹配滤波器得到一个比真实时延更大的数值,这会直接影响雷达系统的定位性能,并会间接影响雷达的跟踪和决策。因此,必须采取有效的抗干扰手段来抑制虚假目标所带来的性能负面影响。

在介绍抗干扰相关技术之前,简单介绍一下有源干扰的大致类型。有源干扰除了以上所提到的欺骗性干扰之外,还包括另外两种形式:噪声干扰和复合干扰。噪声干扰的实施方式包括:在特定方向、特定时间或特定频段向外辐射噪声,这种形式的干扰可以提高普通探测雷达的漏检概率和虚警率,具有很大的威胁性。复合干扰是将多个噪声干扰和多个欺骗性干扰交叉组合而成的新类型。

而与之相对应的抗干扰技术包含自适应滤波器<sup>[1-2]</sup>、频率捷变和旁瓣相消<sup>[3]</sup>等方式。另外,还存在着一种已经被广泛研究的抗干扰方法,即利用资源分配方案抑制干扰所带来的性能下降问题。例如,Hao 等<sup>[4]</sup>为了使传感器网络实现更好的抗干扰性能,提出了使用改进型粒子群优化算法求解功率控制和信道分配问题。此外,为了缓解通信物理层中恶意干扰所带来的信道质量下降问题,席兵等<sup>[5]</sup>相应提出了具有稳健性的资源分配算法,并获得了较好的改善效果。安宁等<sup>[6]</sup>将深度强化学习应用于通信抗干扰资源调度中,以此来提高通信系统在干扰场景下的信息传输能力。而叶培根<sup>[7]</sup>同样采用深度强化学习技术求解通信抗干扰场景下的资源分配问题,与安宁等人所研究内容<sup>[6]</sup>不同的是该研究还使用了贪婪算法。

在雷达抗干扰方面,Liu 等<sup>[8]</sup>根据目标的位置特点提出了传感器资源分配策略,并提出了快速收缩和全局收缩两种新型的求解方法。但是文章中并没有将其他资源引入到资源分配框架中。而 Zhang 等<sup>[9]</sup>将功率因素考虑进去,提出了传感器资源和功率资源联合分配策略,并采用基于循环的三步走算法求解资源分配问题,有效缓解了跟踪目标时干扰所带来的性能下降问题。另一方面,Li 等<sup>[10]</sup>针对目标定位时所遇到的干扰提出了发射传感器和功率资源联合分配的方案,并使用排序算法和粒子群优化算法对问题进行优化求解。

以上方案及算法都在抗干扰方面获得了较好的仿真结果,但是这些方案都是在二维平面内分析的,且没有考虑到带宽资源。因此为了在干扰场景下对雷达资源实现更好的综合调配,本文在前人的基础上将抗干扰模型推广到三维空间中,然后采取传感器、功率和带宽多种资源综合分配的方式建立资源节约型优化问题并求解,使其既满足辨别目标真假的抗干扰性能要求,又提高雷达的低截获概率(low probability of intercept, LPI)特性。

本文的主要贡献罗列如下:1)借助分布式多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)雷达体制建立三维场景下的抗干扰模型,并将欺骗性距离参数引入模型中。随后推导出欺骗性距离在三维空间下的克拉美罗下界

(cramér-rao lower bound, CRLB)。2)根据所推导出的 CRLB 制定资源优化分配问题,具体来说,将功率资源消耗量作为目标函数,然后将 CRLB 作为雷达系统辨别真假目标的性能指标,并对 CRLB 作出约束。通过对传感器资源、功率资源和带宽资源进行综合调配,使得 CRLB 小于性能阈值的情况下尽可能地降低雷达系统的功率消耗量。3)根据凸优化理论判断出所设计的资源优化分配问题是一个存在整数规划的非凸非线性优化问题,因此本文先求解整数规划问题,然后采用序列二次规划(sequential quadratic programming, SQP)算法求解优化问题的次优解。为了避免算法陷入较差的次优解,本文借鉴局部逃逸思想,并使用迭代的方式对优化问题进行多次求解,从中选择可以满足性能要求且功率消耗量最小的资源分配方案。

## 1 系统模型

在分布式 MIMO 雷达中,由于不同的发射节点和接收节点分布在不同的位置,所以 MIMO 雷达涉及到多种工作模式,例如聚焦发射散焦接收和散焦发射聚焦接收。本文接下来所展开的研究中,MIMO 雷达是采用聚焦发射散焦接收方式工作的,如图 1 所示,其中  $M$  代表发射节点的数量, $N$  代表接收节点的数量。具体来说,在发射端使用窄波束高增益天线,而在接收端使用宽波束天线,因此每个发射天线在同一时刻只能对一个目标进行有效观测,并假设接收端在同一观测周期内可以接收到所有目标的回波信号。当然,当所有目标过于分散时,接收端并不能接收所有目标的回波信号,而在本文中并不对这种情况展开研究。

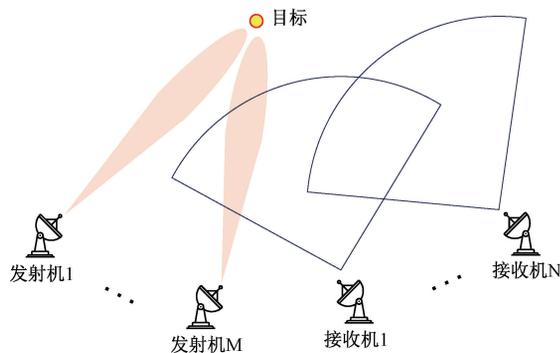


图 1 聚焦发射散焦接收下的 MIMO 雷达系统

首先,对接下来所研究的系统模型做一个简单的介绍。假设整个三维系统模型中存在  $Q$  个目标,其中第  $q$  个目标的位置表示为  $(x_q, y_q, z_q)$ ,  $q \in \{1, 2, \dots, Q\}$ ,且这些目标处于广泛分布的状态,即每两个目标之间的间距较大。针对本文所研究的抗干扰场景,假设每个目标还存在由电子射频存储器所产生的欺骗性距离,其中的欺骗性距离具体是通过增加时延来实现的,如图 2 所示。同时还有  $M$  个发射机和  $N$  个接收机分布在三维模型中,因此它们的位置分别表示为  $(x'_m, y'_m, z'_m)$  和  $(x'_n, y'_n, z'_n)$ 。且变量  $m$  和  $n$  分别属于集合  $\{1, 2, \dots, M\}$  和  $\{1, 2, \dots, N\}$ 。

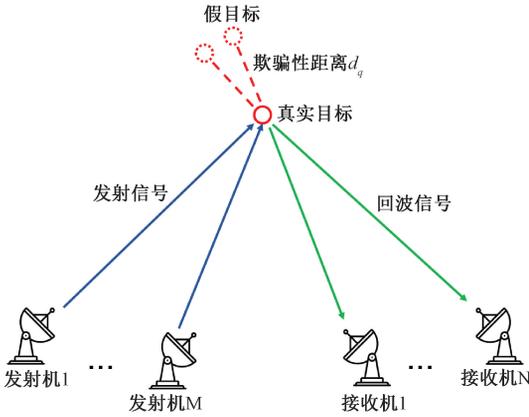


图 2 距离欺骗下的 MIMO 雷达

接下来作出一些适当的假设:1)机械扫描雷达可以大致获取目标的位置信息。2)不考虑目标的大小和形状,将目标视为点目标。3)所有的发射雷达节点和接收雷达节点已经实现时间同步。4)在一个观测周期内,每个接收端都可以接收到从所有目标反射回来的信号。5)不同的发射雷达所使用的信号满足准正交性,即第  $k$  个发射节点所发射信号的基带波形  $\tilde{s}_k(t)$  和第  $l$  个发射节点所发射信号的基带波形  $\tilde{s}_l(t)$  满足以下公式:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{s}_k(t) \tilde{s}_l^*(t) \approx \begin{cases} 1, & k = l \\ 0, & k \neq l \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $(\cdot)^*$  代表共轭运算符,且  $k, l \in \{1, 2, \dots, M\}$ ,  $\tilde{s}_k(t) \tilde{s}_l^*(t)$  代表信号  $\tilde{s}_k(t)$  和信号  $\tilde{s}_l^*(t)$  相乘得到的结果。由于  $\tilde{s}_k(t)$  和  $\tilde{s}_l^*(t)$  是连续信号,并不是向量,因此不使用粗体来表示它们。

假设由第  $m$  个发射天线所发射的信号  $\tilde{s}_m(t)$  被第  $q$  个目标反射,且被第  $n$  个接收节点接收,则该信号在接收机  $n$  处的基带形式为:

$$\tilde{r}_{m,q,n}(t) = \sqrt{u_{m,q} P_m G_{m,q,n} h_{m,q,n}} \tilde{s}_m(t - \tau_{m,q,n}) + \omega_{m,q,n} \quad (2)$$

其中,  $u_{m,q}$  被定义为如下形式:

$$u_{m,q} = \begin{cases} 1, & \text{第 } m \text{ 个发射节点对第 } q \text{ 个目标进行观测} \\ 0, & \text{第 } m \text{ 个发射节点不对第 } q \text{ 个目标进行观测} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中:  $P_m$  表示第  $m$  个发射信号的功率,  $G_{m,q,n}$  表示信号在空间传播过程中因路径损耗而产生的功率增益,因此  $G_{m,q,n} \propto 1/(R_{m,q}^t R_{q,n}^r)^2$ 。其中  $R_{m,q}^t$  代表第  $m$  个发射节点与第  $q$  个目标之间的距离,  $R_{q,n}^r$  代表第  $q$  个目标与第  $n$  个接收节点之间的距离,它们分别表示为:

$$R_{m,q}^t = \sqrt{(x_m^t - x_q)^2 + (y_m^t - y_q)^2 + (z_m^t - z_q)^2} \quad (4)$$

$$R_{q,n}^r = \sqrt{(x_n^r - x_q)^2 + (y_n^r - y_q)^2 + (z_n^r - z_q)^2} \quad (5)$$

$h_{m,q,n}$  表示复数形式的目标反射增益,  $\omega_{m,q,n}$  代表均值为 0、方差为  $\sigma_\omega^2$  的复高斯白噪声。 $\tau_{m,q,n}$  表示从第  $m$  个发射节点发射信号到第  $n$  个接收节点接收回波信号之间的时间

延迟,这具体可以表示为:

$$\tau_{m,q,n} = \frac{1}{c} (R_{m,q}^t + R_{q,n}^r + d_q) \quad (6)$$

其中,  $c$  表示光速,  $d_q$  表示第  $q$  个目标的欺骗性距离。

## 2 三维空间中欺骗性距离的 CRLB 推导

在本章节中,将简单说明一下欺骗性距离  $d_q$  的 CRLB 计算方式,并将 CRLB 用于下一章节中优化问题的建立。

在引入  $d_q$  的 CRLB 计算方式之前,需要采取特定算法去估计目标的欺骗性距离参数和位置坐标参数。在本文所研究的场景中,单个接收节点所接收到的信号中包含多个回波信号,例如接收机  $n$  的接收信号  $r_n$  可以表示为:

$$r_n(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^Q \tilde{r}_{m,q,n}(t) \quad (7)$$

因此参数估计的第一步是使用匹配滤波器将来自不同目标和不同发射机的信号区分开来,并通过最大似然估计获得对应于不同目标和不同路径的时延,具体的计算方式为:

$$\hat{\tau}_{m,q,n} = \arg \left\{ \max_{\tau_{m,q,n}} \left| \int_{-\infty}^{\infty} r_n(t) \tilde{s}_m^*(t - \tau_{m,q,n}) dt \right|^2 \right\} \quad (8)$$

然后借助所获得的一系列  $\hat{\tau}_{m,q,n}$ , 并通过 Zhao 和 Liu 提出的算法<sup>[11]</sup>去估计目标的坐标参数  $x_q, y_q, z_q$  和欺骗性距离参数  $d_q$ 。

接下来,为了表示出欺骗性距离在三维空间下的 CRLB,我们首先定义一个向量  $\boldsymbol{\varphi}_q = [x_q, y_q, z_q, d_q]$  来表示第  $q$  个目标在雷达某个观测周期内的扩展性位置参数,参数向量  $\boldsymbol{\varphi}_q$  的无偏估计表示为  $\hat{\boldsymbol{\varphi}}_q = [\hat{x}_q, \hat{y}_q, \hat{z}_q, \hat{d}_q]$ 。则第  $q$  个目标的 CRLB 可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$\mathbf{C}_q = [\mathbf{F}_q \mathbf{J}(\boldsymbol{\tau}_q) \mathbf{F}_q^T]^{-1} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{F}_q$  表示雅可比矩阵,且其中使用粗体字来表示字母的矩阵含义。在接下来的论述中,将继续使用这种形式表示矩阵或向量。而在本文所建立的场景中,  $\mathbf{F}_q$  的具体计算方式为:

$$\mathbf{F}_q = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tau_{1,q,1}}{\partial x_q} & \frac{\partial \tau_{1,q,2}}{\partial x_q} & \dots & \frac{\partial \tau_{M,q,N}}{\partial y_q} \\ \frac{\partial \tau_{1,q,1}}{\partial y_q} & \frac{\partial \tau_{1,q,2}}{\partial y_q} & \dots & \frac{\partial \tau_{M,q,N}}{\partial x_q} \\ \frac{\partial \tau_{1,q,1}}{\partial z_q} & \frac{\partial \tau_{1,q,2}}{\partial z_q} & \dots & \frac{\partial \tau_{M,q,N}}{\partial d_q} \\ \frac{\partial \tau_{1,q,1}}{\partial d_q} & \frac{\partial \tau_{1,q,2}}{\partial d_q} & \dots & \frac{\partial \tau_{M,q,N}}{\partial z_q} \end{bmatrix} = \frac{1}{c} \begin{bmatrix} u_{1,q}^t + u_{1,q}^r & u_{1,q}^t + u_{2,q}^r & \dots & v_{M,q}^t + v_{N,q}^r \\ v_{1,q}^t + v_{1,q}^r & v_{1,q}^t + v_{2,q}^r & \dots & u_{M,q}^t + u_{N,q}^r \\ \omega_{1,q}^t + \omega_{1,q}^r & \omega_{1,q}^t + \omega_{2,q}^r & \dots & \omega_{M,q}^t + \omega_{N,q}^r \\ -1 & -1 & \dots & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中,  $u_{1,q}^t, u_{N,q}^r, v_{M,q}^t, v_{N,q}^r, \omega_{M,q}^t$  和  $\omega_{N,q}^r$  分别表示为:

$$u_{m,q}^t = (x_m^t - x_q) / R_{m,q}^t \quad (11)$$

$$u_{n,q}^r = (x_n^r - x_q) / R_{q,n}^r \quad (12)$$

$$v_{m,q}^t = (y_m^t - y_q) / R_{m,q}^t \quad (13)$$

$$v_{n,q}^r = (y_n^r - y_q) / R_{q,n}^r \quad (14)$$

$$w_{m,q}^t = (z_m^t - z_q) / R_{m,q}^t \quad (15)$$

$$w_{n,q}^r = (z_n^r - z_q) / R_{q,n}^r \quad (16)$$

式(9)中:  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\tau}_q)$  可以表示为<sup>[11-12]</sup>:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\tau}_q) = \frac{8\pi^2}{\sigma_\omega^2} \text{diag}(\beta_1^2 |\alpha_{1,q,1}|^2, \beta_1^2 |\alpha_{1,q,2}|^2, \dots, \beta_m^2 |\alpha_{m,q,n}|^2, \dots, \beta_M^2 |\alpha_{M,q,N}|^2) \quad (17)$$

其中,  $\text{diag}(\cdot)$  表示将元素依次放置在对角矩阵的对角线上所得到的结果,  $\beta_m$  代表第  $m$  个发射节点中信号的带宽,  $\alpha_{m,q,n}$  可以表示为以下形式:

$$\alpha_{m,q,n} = \sqrt{u_{m,q} P_m G_{m,q,n} h_{m,q,n}} \quad (18)$$

然后,将式(10)~(18)代入式(9)中并化简,可以得到 CRLB 的具体计算方式为:

$$\mathbf{C}_q = \frac{c^2 \sigma_\omega^2}{8\pi^2 \beta_{av}^2} \mathbf{A}^{-1} \quad (19)$$

其中,  $\beta_{av}$  代表平均有效带宽,即  $\beta_{av} = \sqrt{\sum_{m=1}^M \beta_m^2 / M}$ 。

$\mathbf{A}$  是一个四行四列的对称矩阵,它的每个元素分别为:

$$A_{1,1} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \times (u_{m,q}^t + u_{n,q}^r)^2 \quad (20)$$

$$A_{2,2} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \times (v_{m,q}^t + v_{n,q}^r)^2 \quad (21)$$

$$A_{3,3} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \times (w_{m,q}^t + w_{n,q}^r)^2 \quad (22)$$

$$A_{4,4} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \quad (23)$$

$$A_{1,2} = A_{2,1} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \times (u_{m,q}^t + u_{n,q}^r)(v_{m,q}^t + v_{n,q}^r) \quad (24)$$

$$A_{1,3} = A_{3,1} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \times (u_{m,q}^t + u_{n,q}^r)(w_{m,q}^t + w_{n,q}^r) \quad (25)$$

$$A_{2,3} = A_{3,2} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \times (v_{m,q}^t + v_{n,q}^r)(w_{m,q}^t + w_{n,q}^r) \quad (26)$$

$$A_{1,4} = A_{4,1} = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \times (u_{m,q}^t + u_{n,q}^r) \quad (27)$$

$$A_{2,4} = A_{4,2} = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \times (v_{m,q}^t + v_{n,q}^r) \quad (28)$$

$$A_{3,4} = A_{4,3} = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\alpha_{m,q,n}|^2 \beta_m^2 \times (w_{m,q}^t + w_{n,q}^r) \quad (29)$$

其中,  $\bar{\beta}_m = \beta_m / \beta_{av}$ 。

在矩阵  $\mathbf{C}_q$  中,欺骗性距离  $d_q$  的 CRLB 为  $[\mathbf{C}_q]_{4,4}$ , 接下来将以  $[\mathbf{C}_q]_{4,4}$  为基础建立资源优化分配问题。

### 3 LPI 资源优化问题的建立

#### 3.1 功率分配问题

通过以上对于 CRLB 的分析,从中可以得知目标的 CRLB 与对应发射机的辐射功率成反比,即辐射功率越大,被观测目标的 CRLB 数值越小。考虑到功率资源对于局部作战区域的宝贵性,且为了提高信号的低截获概率性能,并保证雷达系统辨别真假目标的能力,提出了基于抗干扰技术的功率资源分配问题,具体如下:

$$\begin{aligned} & \min \mathbf{1}^T \mathbf{P} \\ & s. t. \quad [\mathbf{C}_q(\mathbf{P})]_{4,4} \leq \sigma_q^2, \forall q \in \{1, 2, \dots, Q\} \end{aligned} \quad (30)$$

$$P_{\min} \leq P_m \leq P_{\max}$$

其中,  $\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T$ , 这个向量的大小为  $M$  行 1 列,  $\mathbf{P}$  是所有发射信号中功率变量的集合,也就是说,  $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_M]^T$ 。而  $P_{\min}$  和  $P_{\max}$  分别表示单个节点的最小功率和最大功率。

#### 3.2 带宽分配问题

根据上一章节所得到的 CRLB 推导结果,可以发现带宽因素也和 CRLB 密切相关,且两者之间也存在反比关系。由于带宽资源的总量是有限的,且需要满足局部地区的通信需求,这也间接表明了带宽资源合理分配的重要性。在功率资源分配问题的基础上融入带宽分配变量,可以得到以下优化问题:

$$\begin{aligned} & \min \mathbf{1}^T \mathbf{P} \\ & s. t. \quad [\mathbf{C}_q(\mathbf{P}, \boldsymbol{\beta})]_{4,4} \leq \sigma_q^2, \forall q \in \{1, 2, \dots, Q\} \end{aligned} \quad (31)$$

$$P_{\min} \leq P_m \leq P_{\max}$$

$$\beta_{\min} \leq \beta_m \leq \beta_{\max}$$

$$\sum_{m=1}^M \beta_m = \beta_{\text{total}}$$

其中,  $\boldsymbol{\beta}$  是所有发射信号中带宽变量的集合,也就是说,  $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M]^T$ 。而  $\beta_{\min}$  和  $\beta_{\max}$  分别代表单个节点的最大带宽使用量和最小带宽使用量。此外,  $\beta_{\text{total}}$  代表雷达系统所使用的总带宽。

#### 3.3 发射节点的选择问题

在 CRLB 的计算公式中,除了功率变量和带宽变量的影响,还存在着另外一个不可忽视的重要因素,也就是发射节点的选择。这主要是由于本研究中所采用的发射天线是窄波束天线,单次只能观测一个目标。因此,这涉及到 MIMO 雷达系统中特定发射节点具体探测哪一目标的选择问题,也就是在  $m$  和  $q$  取不同数值的情况下,  $u_{m,q}$  是否设置为 1 的问题。为了便于以下的分析,使用一个  $M \times Q$  的矩阵  $\mathbf{U}$  来表示这种对应关系,而矩阵  $\mathbf{U}$  中的对应元素由  $u_{m,q}$  来表示,也就是说矩阵  $\mathbf{U}$  中第  $m$  行第  $q$  列的元素为  $u_{m,q}$ 。很明显,这是一个整数规划问题,即矩阵  $\mathbf{U}$  中的每个元素  $u_{m,q}$  都满足关系:  $u_{m,q} \in \{0, 1\}$ 。将发射节点选择问题考虑进去之后,则资源优化问题将变为以下形式:

$$\begin{aligned}
& \min \mathbf{1}^T \mathbf{P} \\
& s. t. \quad [\mathbf{C}_q(\mathbf{P}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{U})]_{4,4} \leq \sigma_q^2, \forall q \in \{1, 2, \dots, Q\} \\
& P_{\min} \leq P_m \leq P_{\max} \\
& \beta_{\min} \leq \beta_m \leq \beta_{\max} \\
& \sum_{m=1}^M \beta_m = \beta_{\text{total}} \\
& \sum_{q=1}^Q u_{m,q} = 1, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \\
& \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^Q u_{m,q} = M
\end{aligned} \quad (32)$$

## 4 优化问题的求解

在这一章节中,将针对上面所提出的优化问题进行求解。可以观察到这是一个存在整数规划的非凸非线性优化问题,这间接说明了寻找式(32)中优化问题最优解的困难性。为了保证算法的快速运行,将问题分解为两个子问题并分别求解。首先求解属于整数规划的发射节点选择问题,然后求解功率和带宽分配问题。

### 4.1 求解发射节点选择问题

由于发射节点选择问题属于整数规划领域的优化问题,因此将发射节点选择问题单独进行求解。另一方面,考虑到接收信号的信噪比与雷达节点和目标之间的距离存在较大的关系,因此将发射节点与目标之间的距离作为依据,提出了一种发射节点选择的分配算法。算法的主要思想是:为每个目标计算出距离最近的发射机  $T_{\text{nearest}}$ , 其次为了避免发射机选择的冲突,在所有被探测目标中优先为距离  $T_{\text{nearest}}$  最远的目标分配发射节点。算法的大概流程如下:

#### 算法一:发射节点选择算法

1. 将  $\mathbf{U}$  初始化为  $M \times Q$  的全零矩阵;计算每个发射节点和每个目标之间的距离并将其存放在  $M \times Q$  的矩阵  $\mathbf{D}_{\text{range}}$  中;
2.  $T_u = M$ ;
3. while  $T_u > 0$ 
  - $\mathbf{D}_{\text{rest}} = \mathbf{D}_{\text{range}}$ ;
  - $T_a = 0$ ;
  - while  $T_u > 0 \& \& T_a < Q$ 
    - 找出矩阵  $\mathbf{D}_{\text{rest}}$  中每列的最小值,并使用向量  $\mathbf{D}_{\min}$  来存储;然后找出向量  $\mathbf{D}_{\min}$  中的最大值  $d$ ;接下来找出数值  $d$  在矩阵  $\mathbf{D}_{\text{rest}}$  中所处的位置,使用向量  $(m, q)$  来表示它的位置;
    - $\mathbf{U}(m, q) = 1$ ;
    - $\mathbf{D}_{\text{rest}}(m, :) = [\infty, \dots, \infty]_{1 \times Q}$ ;
    - $\mathbf{D}_{\text{rest}}(:, q) = -[\infty, \dots, \infty]_{M \times 1}$ ;
    - $\mathbf{D}_{\text{range}}(m, :) = [\infty, \dots, \infty]_{1 \times Q}$ ;
    - $T_a = T_a + 1$ ;
    - $T_u = T_u - 1$ ;
  - end while
- end while
4. 将矩阵  $\mathbf{U}$  输出并作为发射节点选择问题的最终解。

### 4.2 功率资源和带宽资源的分配问题

当发射节点分配结束之后,将被探测目标所分配到的发射节点固定下来,然后还要求解剩下的功率和带宽分配问题。从原问题的约束中可以发现,带宽约束集属于非凸集合,因此功率和带宽联合分配问题属于非凸非线性优化问题。这类问题存在非常多的局部解,这导致很难快速有效地求解出该问题的全局最优解,因此求解功率和带宽分配问题的次优解。由于本章节中资源优化问题存在非线性因素,且式(31)中优化问题的目标函数和约束都是可导的,因此采取 SQP 算法。为了避免算法运行中过早陷入次优解,本文借鉴局部逃逸思想<sup>[13]</sup>,具体操作方式为循环使用 SQP 算法,并从中找出可以使目标函数达到最小的一组解作为最终结果,也就是可以使总功率资源最小化的资源分配方案,算法的具体细节如算法二所示。

#### 算法二:循环 SQP 算法

1. 将循环次数  $cycle\_num$  初始化;
  2.  $cycle = 1$ ;
  3.  $\mathbf{P}^0 = 0.9 \times [P_{\max}, \dots, P_{\max}]^T$ ,  $\boldsymbol{\beta}^0 = \beta_{\text{total}}/M \times [1, \dots, 1]^T$ , 且  $\mathbf{P}^0$  和  $\boldsymbol{\beta}^0$  都是  $M \times 1$  的向量;
  4.  $P_{\text{sum}} = \text{sum}(\mathbf{P}^0)$ ;
  5. While  $cycle \leq cycle\_num$ 
    - While true
      - 将  $\mathbf{RA}_1$  和  $\mathbf{RA}_2$  都初始化为平均值为 0 的随机数向量,且随机数的范围分别是  $[0, 0.1 \times \text{sum}(\mathbf{P}^{cycle-1})]$  和  $[0, 0.1 \times \text{sum}(\boldsymbol{\beta}^{cycle-1})]$ , 且向量大小为  $M \times 1$ ;
      - $\mathbf{P}^{\text{temp}} = \mathbf{P}^{cycle-1} + \mathbf{RA}_1$ ;
      - $\boldsymbol{\beta}^{\text{temp}} = \boldsymbol{\beta}^{cycle-1} + \mathbf{RA}_2$ ;
      - 若  $\mathbf{P}^{\text{temp}}$  和  $\boldsymbol{\beta}^{\text{temp}}$  都满足式(31)中优化问题的约束 2、约束 3
      - Break;
    - End
  - End
  - $[\mathbf{P}^{cycle}, \boldsymbol{\beta}^{cycle}] = \text{SQP}(\text{function}, \text{constraint}, \mathbf{P}^{\text{temp}}, \boldsymbol{\beta}^{\text{temp}})$ ;
  - If  $\text{sum}(\mathbf{P}^{cycle}) < P_{\text{sum}}$ 
    - $P_{\text{sum}} = \text{sum}(\mathbf{P}^{cycle})$ ;
  - Else
    - $\mathbf{P}^{cycle} = \mathbf{P}^{cycle-1}$ ;
    - $\boldsymbol{\beta}^{cycle} = \boldsymbol{\beta}^{cycle-1}$ ;
  - End
  - $cycle = cycle + 1$ ;
  - End while
6. 输出  $\mathbf{P}^{cycle}$  和  $\boldsymbol{\beta}^{cycle}$  作为问题的最终解。

## 5 仿 真

### 5.1 参数的设置

接下来,本章节将对本文所提出的节点选择策略和功率带宽联合资源分配策略以及相对应的求解算法进行仿真实验,验证两种策略和算法在降低 CRLB 数值方面的有效性。首先,需要将参数的具体数值设置完毕,具体来说,整个雷达系统由 8 个发射节点和 6 个接收节点组成,且所有雷达节点的位置都是固定的,与此同时,在三维空间中还存在 3 个目标。发射雷达节点、接收雷达节点和目标的三维位置坐标如表 1 和图 3 所示,在图 3 中,T1~T8 表示发射节点,R1~R6 表示接收节点。单个雷达节点所分配功率的上界和下界分别是 2 500 W 和 200 W,带宽资源总量是 100 MHz,单个雷达节点可以被分配到的最大带宽是 50 MHz,最小带宽是 3 MHz,雷达系统探测 3 个目标的性能要求分别为  $\sigma_1^2 = 1\ 600, \sigma_2^2 = 1\ 000, \sigma_3^2 = 1\ 000$ 。此外,本文中所有的仿真实验都是在 MATLAB 2020b 平台上进行的。

表 1 目标的三维位置坐标和欺骗性距离

场景编号	目标编号	位置坐标/ m	欺骗性距离/ m
1	1	(1 150, -2 600, 1 100)	850
	2	(3 520, -3 700, 940)	700
	3	(1 430, 1 560, 1 090)	900
2	1	(0, 3 000, 1 500)	750
	2	(1 200, -2 000, 950)	900
	3	(6 000, 1 000, 1 200)	1 000

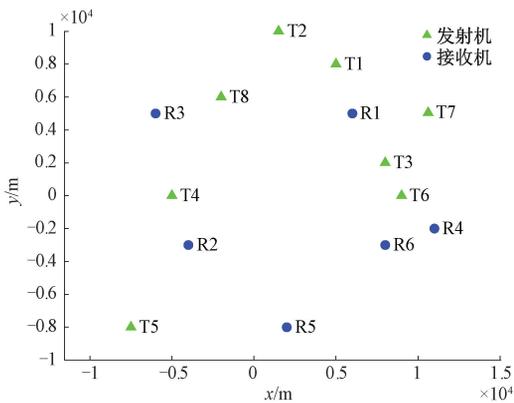


图 3 所有雷达节点的俯视图

需要注意的是,对于本研究中目标位置的设置,需要保证每个接收节点都可以捕获到所有目标的回波信号,否则就不符合本研究中所设置的前提条件。

### 5.2 资源分配的结果以及不同方案的比较

根据以上所设置的参数,并按照本文所提出的资源分

配策略以及解决方案,可以获得以下资源分配结果。其中,图 4 和 5 是场景一的资源分配结果,同时包含发射节点分配结果。图 6 和图 7 是场景二的资源分配结果。

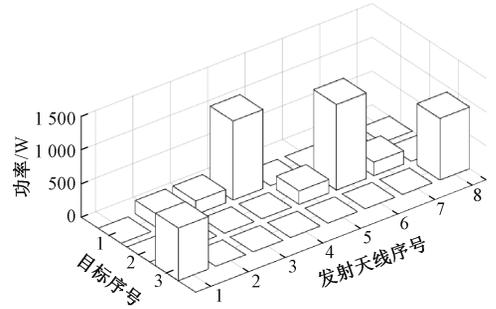


图 4 场景一的功率资源分配结果

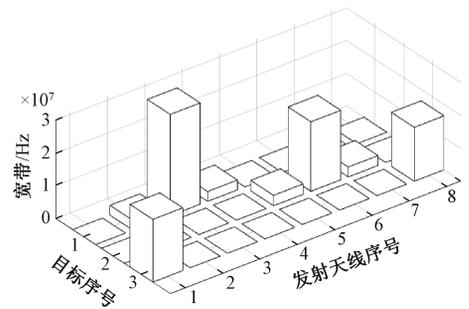


图 5 场景一的带宽资源分配结果

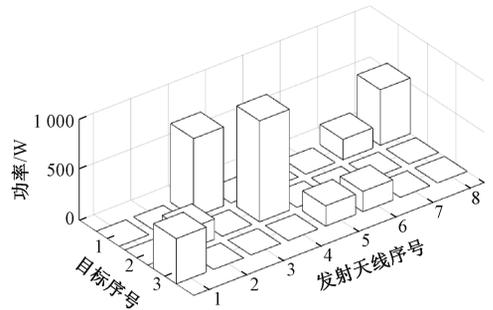


图 6 场景二的功率资源分配结果

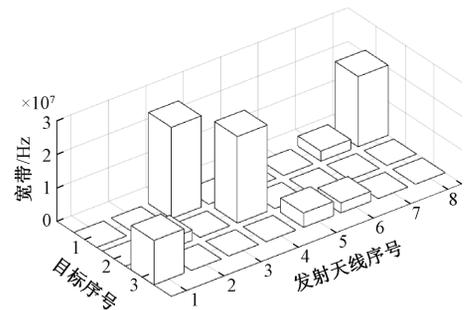


图 7 场景二的带宽资源分配结果

为了显示出本文所提出的节点优化分配和功率带宽联合优化分配策略的优势,本文引入 4 种不同的资源分配方案作为对比,这些分配方案分别是

1) 发射节点优化分配, 并使用非线性规划遗传算法求解功率带宽联合优化问题<sup>[14]</sup>;

2) 发射节点随机分配, 并求解功率带宽联合优化问题<sup>[15]</sup>;

3) 带宽资源平均分配, 而采取发射节点优化分配和功率资源优化分配<sup>[16]</sup>;

4) 发射节点随机分配且带宽资源平均分配, 仅采用功率资源分配策略<sup>[17]</sup>;

同时为了便于比较, 方案 2)、方案 3) 和方案 4) 的求解均使用本文所提出的发射节点选择算法和循环 SQP 算法。其次, 将算法二中的  $cycle\_num$  设置为 100, 并将不同的资源分配方案运行 100 次, 然后求取平均值, 所得到的总功率消耗量如图 8 所示。

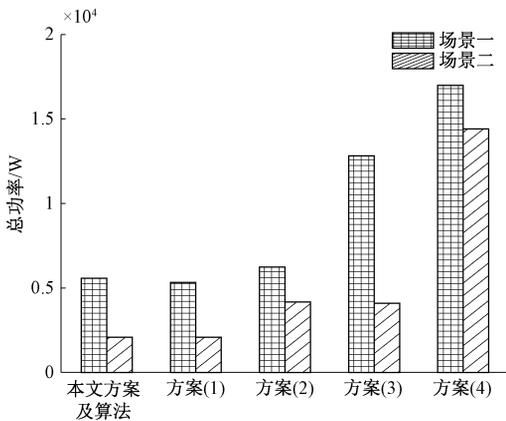


图 8 不同资源分配方案的总功率数值

从图 8 中可以发现, 本文所提出的方案在抑制总功率方面受到客观环境的影响, 也就是雷达节点和目标的相对位置。例如, 在场景一中, 本文方案的功率消耗量为方案 4) 的 32.83%, 而在场景二中, 本文方案的功率消耗量为方案 4) 的 14.48%。

此外, 与方案 2)、方案 3) 和方案 4) 相比较, 本文所提出的联合方案在功率资源消耗量方面更具优势, 尤其是与方案 4) 相比。这主要是由于方案 4) 未将带宽资源合理分配给发射信号, 间接导致功率资源需要提高才能满足问题中的约束。并且方案 2) 和方案 3) 也是由于资源的不合理分配所造成的功率资源增多。

另一方面, 较为经典的方案 1) 与其他方案的重要区别在于求解算法的不同, 从图 8 中可以看出本文方案略差于方案 1), 这是因为方案 1) 中同时使用了遗传算法和非线性规划算法, 使得方案 1) 的求解既具有较强的全局搜索能力, 又具有较强的局部搜索能力。而本文算法中并没有交叉和变异等运算步骤, 仅使用了非线性规划领域中的 SQP 算法, 因此在调用非线性规划算法相同次数的情况下, 本文算法比方案 1) 的运算速度略快一些。

### 5.3 循环次数对算法的影响

由于本文所采用的算法是循环算法和 SQP 算法相结

合的方式, 其中引入了迭代和局部逃逸的思想, 因此循环 SQP 算法的性能受到循环次数的影响。接下来, 为了分析循环次数在算法二性能方面的影响, 本研究在以上仿真实验的基础上, 将算法二中的  $cycle\_num$  设置为 150, 并将算法二运行 100 次。然后将运算结果放置在大小为 100 行 150 列的矩阵  $S$  中, 并计算矩阵  $S$  中每列的平均值, 可以得到图 9。为了方便对比, 又给出了算法二单次运行的目标函数值变化曲线, 也就是图 10。从图 9 中可以发现, 随着循环次数的增加, 目标函数值逐渐降低。并且当循环次数达到 100 次左右时, 目标函数值基本趋于平稳。

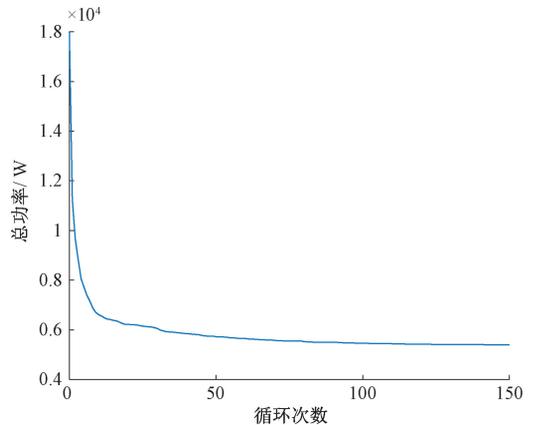


图 9 算法二运行 100 次并取平均的目标函数值变化曲线

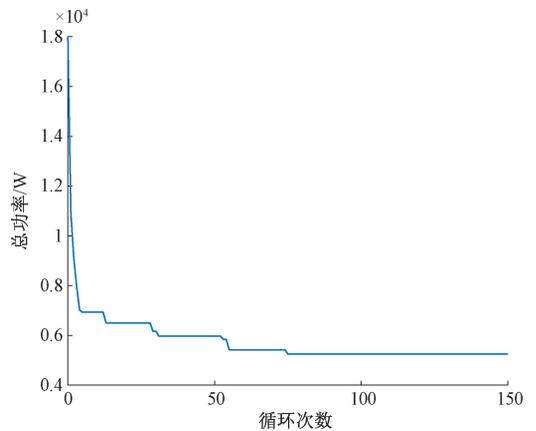


图 10 算法二单次运行的目标函数值变化曲线

### 5.4 雷达信号在截获机处的功率

假设截获接收机在截获过程中接收到的是波束旁瓣, 且截获接收机的位置坐标是  $(10\ 000, -10\ 000, 1\ 200)$ , 则可以得知发射雷达辐射功率和截获接收机所接收到的信号功率存在以下关系:

$$P_{IR} = \frac{P_{CW} G'_1 L_1}{4\pi R^2 L_{RT} L_{IR}} \left( \frac{G_1 \lambda^2}{4\pi} \right) \quad (33)$$

在这个公式中, 本文针对截获接收机的研究引入了一些新的参数, 例如截获接收机的天线增益  $G'_1$  等, 这些参数具体的解释说明和数值设置被列举在表 2 中。

表 2 发射机和截获机中有关参数的解释说明和设置

参数符号	参数含义	参数的数值设置
$P_{IR}$	截获接收机所得到的信号功率	由其他参数计算得出
$P_{CW}$	发射信号的功率	由本文所设计方案提供
$G'_i$	发射天线旁瓣增益	-15 dB
$L_1$	大气传播因子	1
$R_I$	截获接收机到发射天线之间的距离	由 5.1 章节和本章节数据计算得出
$L_{RT}$	雷达发射机与天线之间的损耗	1
$L_{IR}$	天线到接收机的损耗	1
$G_I$	截获接收机的天线增益	20 dB
$\lambda$	信号波长	0.015 m

将式(33)与本文所研究的 MIMO 雷达系统结合考虑, 则  $\mathbf{R}_I$ 、 $\mathbf{P}_{CW}$  和  $\mathbf{P}_{IR}$  都将为向量, 其中向量  $\mathbf{R}_I$  可以通过表 1 中的数据和截获机的位置参数来计算得出, 而  $\mathbf{P}_{CW}$  的数值可以由本文所提出的资源分配方案所给出。与此同时, 截获接收机对多个信号中功率最大的成分最为敏感, 即:

$$P_{IRmax} = \max \{ \mathbf{P}_{IR} \} \quad (34)$$

接下来, 将  $cycle\_num$  设置为 100 并继续进行仿真实验。通过式(33)和式(34)计算不同资源分配方案的  $P_{IRmax}$  数值, 具体结果如图 11 所示。需要注意的是, 本章节的仿真实验与 5.2 章节中不同的是, 5.2 章节中比较的是总功率资源消耗量, 而本章节中比较的是截获机处功率最大的信号成分。从图 11 中可以看出本文所提出的综合资源分配方案可以使雷达系统具有更优良的低截获概率性能, 且和方案(1)具有非常接近的效果。

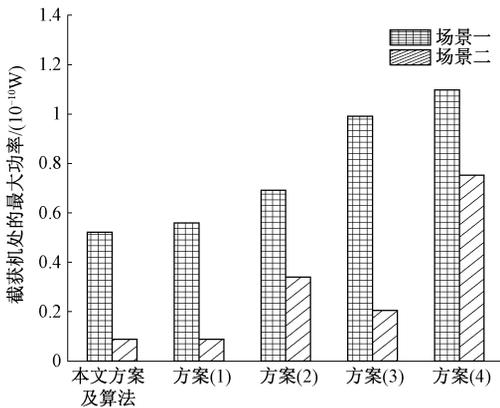


图 11 不同资源分配方案所获得的  $P_{IRmax}$  数值

## 6 结 论

在本文中, 针对抗干扰情况下的资源分配问题展开研

究。首先, 在三维空间中建立抗干扰模型, 并引入欺骗性距离参数。然后推导出欺骗性距离在三维空间中的 CRLB, 并以 CRLB 作为辨别真假目标的性能指标。其次, 提出了基于低截获概率的资源分配方案, 而且可以避免资源的浪费。由于所提出的资源分配方案中包含 3 个需要求解的变量, 且存在整数规划问题, 因此首先求解发射节点选择问题, 然后使用循环 SQP 算法求解功率和带宽联合资源分配问题。

仿真实验结果也显示出在满足给定辨识性能的条件下, 新方案以及循环 SQP 算法在降低总功率消耗方面的有效性, 并且比仅优化功率变量的方案(4)节省了超过 50% 的功率资源量。并采用多次仿真实验给出了循环 SQP 算法大致可以满足收敛性的循环次数为 100。

## 参 考 文 献

- [1] 刘天康, 刘海文. 高温超导滤波器在电磁抗干扰中的技术和应用[J]. 空间电子技术, 2023, 20(6): 131-137.
- [2] 梁颖, 张艳娇. 基于 FPGA 的窄带抗干扰关键技术研究[J]. 科技传播, 2023, 15(24): 131-133.
- [3] 苏欣桐, 余海鸣, 赵会娟, 等. 基于组合赋权-TOPSIS 的相控阵雷达抗干扰能力评估[J]. 空天防御, 2023, 6(4): 80-85.
- [4] HAO X, YAO N, WANG J, et al. Distributed resource allocation optimisation algorithm based on particle swarm optimisation in wireless sensor network [J]. IET Communications, 2020, 14(17): 2990-2999.
- [5] 席兵, 冯彦博, 邓炳光, 等. 智能反射面辅助的抗干扰安全通信系统鲁棒资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(1): 1-11.
- [6] 安宁, 张之栋. 基于深度强化学习的 D2D 通信网络抗干扰资源调度方法[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(9): 108-114.
- [7] 叶培根. 基于深度强化学习的无线通信抗干扰和通信资源分配技术[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [8] LIU J, GONG M, NIE Z, et al. Subset selection strategies based on target positioning characteristics for anti-jamming technology[J]. Remote Sensing, 2022, 14(24): 6230.
- [9] ZHANG H, LIU W, ZHANG Q, et al. Joint resource optimization for a distributed MIMO radar when tracking multiple targets in the presence of deception

- jamming[J]. *Signal Processing*, 2022, 200: 108641.
- [10] LI Z, XIE J, LIU W, et al. Transmit antenna selection and power allocation for joint multi-target localization and discrimination in MIMO radar with distributed antennas under deception jamming [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3904.
- [11] ZHAO S, LIU Z. Deception parameter estimation and discrimination in distributed multiple-radar architectures[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(19): 6322-6330.
- [12] ZWIRELLO L, SCHIPPER T, JALILVAND M, et al. Realization limits of impulse-based localization system for large-scale indoor applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(1): 39-51.
- [13] AHMADIANFAR I, HEIDARI A A, NOSHADIAN S, et al. INFO: An efficient optimization algorithm based on weighted mean of vectors[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 195: 116516.
- [14] SHI C, DING L, WANG F, et al. Low probability of intercept-based collaborative power and bandwidth allocation strategy for multi-target tracking in distributed radar network system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6367-6377.
- [15] 肖悦, 张贞凯, 杜聪. 基于改进麻雀搜索算法的雷达功率与带宽联合分配算法[J]. *战术导弹技术*, 2022, (5): 38-43, 92.
- [16] 蒋世文. 面向共频带系统的室分节点布局和功率分配算法研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2022.
- [17] 刘栋. 基于 OTFS 的通信感知一体化功率分配研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.

### 作者简介

李辉,教授,主要研究方向为无线通信和智能信号处理。

E-mail:li20022004@hpu.edu.cn

武会斌(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理、雷达资源分配。

E-mail:a1838043374@163.com