

异构双基地雷达带状栅栏覆盖布站方法

李海鹏^{1,2}, 冯大政¹

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 西安电子工程研究所总体一部, 陕西西安 710100)

摘要: 针对带状栅栏覆盖中位置受限情况下的布站问题, 本文提出了一种基于异构双基地雷达的优化布站方法. 该方法以异构双基地雷达布站模式及布站序列的性质为基础建立问题的优化模型. 为了求解该模型, 本文将优化模型分解为三层. 内层固定异构发射器的位置, 以该位置为界将栅栏覆盖区域分为两段, 联合采用整数线性规划和贪婪方法确定单条栅栏的最小布站成本及布站序列; 中间层在栅栏宽度固定的情况下, 对所有可能的异构发射器位置计算最小布站成本, 并确定单条栅栏的最小布站成本; 外层引入两种布站策略确定栅栏宽度: 一种是非等分策略布站方法, 另一种是等分策略优化方法, 并相应给出两种算法分别确定最小布站成本, 子栅栏的布站序列和数量. 最后通过仿真实验验证了这两种算法的可行性与有效性, 实验结果表明非等分策略与等分策略相比, 布站成本可降低6%, 使用的发射器数量可减少10%.

关键词: 非等分策略; 等分策略; 带状栅栏覆盖; 最小布站成本; 双基地雷达

基金项目: 国家自然科学基金(No.61971470)

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)09-2341-14

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220012

Heterogeneous Bistatic Radar Belt Barrier Coverage Deployment Method

LI Hai-peng^{1,2}, FENG Da-zheng¹

(1. National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shannxi 710071, China;

2. Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an, Shannxi 710100, China)

Abstract: For the deployment problem with constrained locations in belt barrier coverage, this paper proposes an optimal deployment method based on heterogeneous bistatic radars. The method proves the properties of deployment pattern and sequence for the heterogeneous bistatic radar. Then based on these properties, an optimization model of the problem is proposed. This paper divides the optimization model into three layers to solve this model. In the inner layer, the position of the heterogeneous transmitter is fixed, and the barrier coverage is separated into two segments by this position. An algorithm that integrates the integer linear programming and greedy methods is exploited to determine the minimum deployment cost and deployment sequence for a barrier; In the middle layer, with a given width of the barrier, the minimum deployment cost is calculated for all possible heterogeneous transmitter positions, then the minimum deployment cost of a barrier is determined; In the outer layer, two deployment strategies are introduced to determine the barrier widths, one is barrier width non-equalization strategy; the other is the barrier width equalization strategy, correspondingly, two algorithms are given to determine the minimum deployment cost for the entire area, the deployment sequences and their numbers of the sub-barriers. Finally, the feasibility and effectiveness of these two algorithms are verified by simulations. The simulation results reveal that the non-equalization strategy is superior to the equalization strategy, leading the deployment cost can be reduced by 6% and the number of transmitters can be reduced by 10%.

Key words: unequal division strategy; equal division strategy; belt barrier coverage; minimum deployment cost; bistatic radar

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61971470)

1 引言

随着电子技术的进步,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)已被大量应用于健康监护、环境检测、区域安防等领域^[1-4]. 其中栅栏覆盖问题是 WSN 中的研究重点之一.

依据是否主动发射信号,传感器可分为被动传感器和主动传感器^[5-8]. 被动传感器覆盖区域的模型主要有圆盘模型、概率感知模型等;主动传感器覆盖区域的模型主要有双基地雷达(Bistatic Radar, BR)模型和单基地雷达模型^[9,10]. 在基于被动传感器模型的栅栏覆盖问题中,被动传感器只能通过接收目标发出的信号来获取相关信息,其覆盖能力受目标特性和环境影响严重^[11,12]. 近年来,基于主动传感器的栅栏覆盖问题引起了研究人员的兴趣^[13-15]. 雷达作为一种常见的主动传感器,其向空间发射电磁波,通过接收物体反射的回波信号获取信息. 由于 BR 具有显著的“四抗”优势,因此受到了广泛关注^[16-22]. 文献[16]为了构建带状栅栏覆盖,提出了一种基于最小布站成本的等分布站策略,该方法利用若干条宽度相同的子带状栅栏覆盖感兴趣区域(Field of Interesting, FoI). 每条子栅栏都由若干相同的布站模式构成,且栅栏的末端根据剩余长度部署发射器或者接收器,因此子栅栏的端点至少有一个是发射器. 从部署成本上来讲,将发射器作为布站端点会降低其成本效率. 针对文献[16]的不足,文献[17,18]改进了子栅栏的布站模式,利用多种模式构建子栅栏,以此提高发射器的使用效率,降低布站成本;文献[19,20]提出了非等分策略下带状栅栏的布站方法,进一步提升了布站成本的优化结果. 针对 FoI 内无法布站的情况,文献[21]讨论了如何在 FoI 的最小外接圆上构建圆周栅栏的问题,提出采用一种布站模式构建圆周栅栏,仅在最后剩余未覆盖部分使用 1 个其它布站模式. 文献[22]同时采用多种布站模式构建圆周栅栏,进一步降低了布站成本;在文献[23,24]中,作者限制了栅栏覆盖的最小宽度,研究在等宽策略下的圆环栅栏布站方法,即使用若干的宽度相等的子圆环覆盖 FoI,并要求布站总成本最小;文献[25]关注双基地雷达传感器模型的容错问题,考虑了相邻栅栏内节点的协同工作,并以此构建带状栅栏覆盖. 值得注意的是,以上文献均是基于同构双基地雷达(Homogeneous Bistatic Radar, HOBR),即要求所有发射器的性能参数相同. 但在实际应用中需要考虑使用异构双基地雷达(Heterogeneous Bistatic Radar, HEBR),即构建栅栏覆盖时至少采用了两种不同性能的发射器. 当存在不适宜雷达工作的布站限制区域(Deployment Restricted Area, DRA)时,若用 HOBR 网则雷达会部署在 DRA 中,如图 1(a)所示,此时发射器 T_2 和接收器 R_3 处于限制区内. 而使用

HEBR 网可以避免 DRA,如图 1(b)表明发射器 T_2 和接收器 R_4 组成的双基地雷达可以覆盖限制区. 图 1 中 \square 与 \circ 分别代表同构发射器与接收器,红色 \square 表示异构发射器. 黑色实直线代表雷达部署线,所有雷达都部署在该线上. 黑色曲线代表 DRA 的边界.

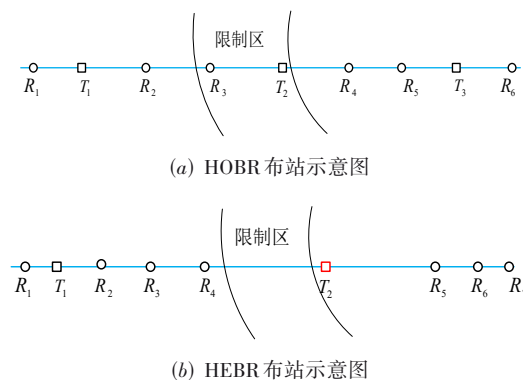


图1 雷达布站位置示意图

文献[26]提出了一种基于异构传感器网络的增强栅栏覆盖模型,它确保入侵目标可以至少被一个传感器监测到. 同时,作者给出了如何最大化异构增强性栅栏工作寿命的方法. 在文献[27]中,作者讨论了异构传感器网络中点覆盖和栅栏覆盖混合的问题,用于保护 FoI 内的关键设施以及防止非法越境. 文献[28]研究了利用 HEBR 构建直线栅栏覆盖的布站问题. 作者认为最优布站依赖于不同发射器的布站次序,从理论上确定这一次序是十分困难的,但通过仿真实验表明不同次序对优化结果的影响不大,因此该文献提出一种近似最优的布站方法. 文献[29]研究了当雷达数量以及栅栏长度给定时,如何部署 HEBR 使得栅栏的检测能力最大;以及当直线栅栏的脆弱性不小于给定阈值时,利用贪婪算法确定异构雷达的布站位置,使得栅栏覆盖的长度最长. 文中限制一个接收器只能与一个发射器匹配,没有充分发挥雷达发射器的使用效率,当发射器成本远大于接收器时,布站结果往往不是最优的. 文献[30]在雷达部署位置受限时,基于异构多基地雷达构建直线栅栏覆盖,但是没有限制栅栏最小宽度.

针对当前的不足和需求,本文研究在 DRA 约束下,利用 HEBR 构建带状栅栏覆盖的问题. 考虑了发射器和接收器的成本差异,优化布站使得带状栅栏宽度不小于给定阈值且总布站成本最小.

2 理论基础与概念

2.1 双基地雷达覆盖区域理论基础

BR 由一组发射器 T 和接收器 R 组成,记为 (T, R) ,两者之间的连线称为基线. 空间任一点 z 到 T 和 R 的距离

分别记为 $d(T, z)$ 和 $d(R, z)$. 目标在点 z 时接收机输出端的信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 记为 $\text{SNR}(z)$, 并由式(1)计算^[31]:

$$\text{SNR}(z) = K / (d(T, z)d(R, z))^2 \quad (1)$$

其中 K 是由双基地雷达的设计参数决定的常数. 假设 γ 是接收器检测目标所需的最小 SNR, 当 $\text{SNR}(z) \geq \gamma$ 时, 目标在 z 点可以被雷达以满足要求的检测概率检测到, 即目标被雷达覆盖; 反之, 当 $\text{SNR}(z) < \gamma$ 时, 目标不能被雷达覆盖. 因此, 由满足 $\text{SNR}(z) \geq \gamma$ 的 z 点所构成的区域是 (T, R) 的覆盖区域. 记 $l_{\max}^2 = \sqrt{K/\gamma}$ 为 BR 的探测阈值, 因此 l_{\max} 反映了 BR 性能, 性能越好探测能力越大.

由式(1)可知, BR 覆盖区域由卡西尼卵形线所围成. 卡西尼卵形线的焦点分别位于 T 和 R 的位置. 覆盖区域的形状由基线长度 $d_1 = d(T, R)$ 与 l_{\max} 之间的关系决定^[32].

当 FoI 内布置多个 BR 时, 为了保证接收器不接收其他发射器的信号, 假设所有发射器均在不同的正交频率上工作^[33]. 多个接收器可以采用相同的工作频率以此共用一个发射器, 此时位于 z 点的目标可能同时处于多个 BR 的覆盖区域内, 记所有 SNR 中的最大值为 $\text{SNR}_{\max}(z)$, 即有:

$$\text{SNR}_{\max}(z) = \max_{T_i \in \bar{T}, R_k \in \bar{R}} \frac{K_i}{(d(T_i, z)d(R_k, z))^2} \quad (2)$$

其中, \bar{T}, \bar{R} 分别表示栅栏中接收器与发射器集合, K_i 为 BR 对 (T_i, R_k) 的性能参数. 由此可知, 在 FoI 内目标能被覆盖的充要条件是 $\text{SNR}_{\max}(z) \geq \gamma$.

2.2 双基地雷达布站模式

图 2 描绘了 1 个 BR 的覆盖区域, 红色虚线表示 BR 覆盖区域的最大内接矩形, $2h$ 表示矩形的宽度, 它决定了一条栅栏覆盖区域的最大宽度, x_1 是该矩形边界到 T 和 R 的距离. 为了保证检测效果, 要求栅栏覆盖区域必须连续且具有一定宽度, 因此应满足 $x_1 \geq 0$ 且 $2h > 0$. 进一步由文献[16]可知, $\sqrt{2} l_{\max} \leq d_1 < 2l_{\max}, \beta = l_{\max}/h \geq \sqrt{3}, N_{\max} = \lfloor (\beta^2 - 1)/2 \rfloor$. N_{\max} 是一个发射器最多可以匹配的有效接收器数量. 更一般的, 令 $l_{\max}^{(i)}$ 表示发射器 T_i 的探测阈值, 则有 $\beta_i = l_{\max}^{(i)}/h, N_{\max}^{(i)} = \lfloor 0.5(\beta_i^2 - 1) \rfloor$.

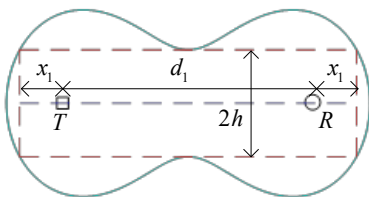


图 2 BR 覆盖区域示意图

由于单个双基地雷达的覆盖区域不能满足实际需求, 且发射器成本高, 易被侦测和打击. 因此, 本文将多个接收器和 1 个发射器配合使用, 构成“一发多收”的双基地雷达布站模式 $P_i^m = (T_i, R_1, \dots, R_m), m \leq \lfloor 0.5(\beta_i^2 - 1) \rfloor$, 简称为 P 模式. 如图 3(a) 所示, 其构成矩形栅栏覆盖的长度记为 $\sigma_p(h, m)$ (不考虑发射器以外的部分); 此外, 如图 3(b) 所示, 在相邻发射器 T_i, T_j 之间布置若干个接收器 (不失一般性, 令 T_j 位于 T_i 的右边), 记为 $F_{ij}^n = (T_i, R_1, \dots, R_n, T_j)$, 简称为 F_{ij} 模式. 其中 $n \leq \lfloor \beta_i^2 - 1 \rfloor + \lfloor \beta_j^2 - 1 \rfloor / 2$. 这两个发射器之间的覆盖长度记为 $\sigma_{F_{ij}}(h, n)$. 若 T_i, T_j 性能不一致, 称其为异构雷达模式; 否则, 称其为同构雷达模式. 对同构雷达模式 $F_{ii}^n = (T_i, R_1, \dots, R_n, T_i)$, 简记为模式 F , 其覆盖长度为 $\sigma_F(h, n)$.

如图 3(a) 所示, 记 $d_k, k=1, \dots, m$ 为 P_i^m 中相邻两个传感器节点之间的最大部署间距 (Maximum Deployment Spacing, MDS), 它反映了 P_i^m 中两个节点之间矩形栅栏覆盖的欧式距离. 类似地, 记 $\tilde{d}_k, k=1, \dots, n+1$ 为布站模式 F_{ij}^n 中相邻节点的 MDS, 且从较好性能的发射器开始排列. 如图 3(b) 所示, 假设 T_j 的性能优于 T_i , 记为 $T_j > T_i$, 则 \tilde{d}_1 表示 $d(T_j, R_1)$, \tilde{d}_2 表示 $d(R_1, R_2)$, 以此类推.

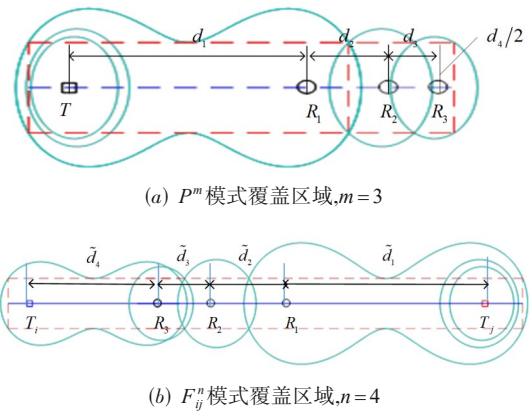


图 3 布站模式覆盖区域及 MDS 示意图

MDS 的计算公式为^[16]:

$$d_k = 2\{h\sqrt{k(\beta^2 - k)} - h\sqrt{(k-1)(\beta^2 - k + 1)}\}$$

因此 P 模式覆盖长度计算公式为:

$$\sigma_p(h, m) = h\sqrt{(m+1)(\beta^2 - (m+1))} + h\sqrt{m(\beta^2 - m)} \quad (3)$$

覆盖长度不包括发射器到矩形边的长度, 定义这部分长度为 $\sigma_p(h, 0) = d_2/2$. 类似的, 同构模式 F 中 MDS 与 $\sigma_F(h, n)$ 计算公式为: 若 n 为奇数, $\tilde{d}_k = \tilde{d}_{n+2-k} = d_k, k=1, \dots, (n+2)/2$; 若 n 为偶数, $\tilde{d}_k = \tilde{d}_{n+2-k} = d_k, k=1, \dots, (n+2)/2$, 整理可得:

$$\sigma_{F_y}(h, n) = \begin{cases} h\sqrt{(n+2)(2\beta^2 - (n+2))} \\ +h\sqrt{n(2\beta^2 - n)}, & n \text{ 为偶数} \\ 2h\sqrt{(n+1)(2\beta^2 - (n+1))}, & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (4)$$

特别地,在异构布站模式 F_{ij}^n 中不同发射器对应的 MDS 不同. 模式 P_i^n 和 P_j^n 中 MDS 分别记为 $d_k^{(i)}, k=1, \dots, n+1$ 和 $d_l^{(j)}, l=1, \dots, n+1$. 由定理 1 介绍模式 F_{ij}^n 内 MDS 及 $\sigma_{F_y}(h, n)$ 的计算方法. 在以下定理中均假设栅栏宽度 h 给定, 因此 $\sigma_{F_y}(h, n)$ 与 $\sigma_p(h, m)$ 分别简写为 $\sigma_{F_y}(n)$ 和 $\sigma_p(m)$.

定理 1 若 $T_j > T_i$, 则 F_{ij}^n 中 MDS 和 $\sigma_{F_y}(n)$ 的计算公式分别为:

$$(1) \quad \text{当 } d_{n+1}^{(j)} \leq d_1^{(i)} \text{ 时, } \tilde{d}_k = \max(d_k^{(i)}, d_{n+2-k}^{(j)}); \text{ 当 } d_{n+1}^{(j)} > d_1^{(i)} \text{ 时, } \tilde{d}_k = d_k^{(j)}, k=1, \dots, n, \tilde{d}_{n+1} = d_{n+1}^{(j)}/2 + \sqrt{\frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{h^2 + (d_{n+1}^{(j)}/2)^2} - h^2}; \text{ 或者 } \tilde{d}_{n+1} = d_{n+1}^{(j)}/2 + \sqrt{\frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{(l_{\max}^{(j)})^4} (h^2 + (\sigma_{P_j}(h, n))^2) - h^2}.$$

$$(2) \quad \sigma_{F_y}(n) =$$

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{n+1} \max(d_k^{(i)}, d_{n+2-k}^{(j)}, d_{n+1}^{(j)} \leq d_1^{(i)} \\ \sum_{k=1}^n d_k^{(j)} + d_{n+1}^{(j)}/2 + \sqrt{\frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{h^2 + (d_{n+1}^{(j)}/2)^2} - h^2} \\ d_{n+1}^{(j)} > d_1^{(i)} \end{cases} \quad (5)$$

证明

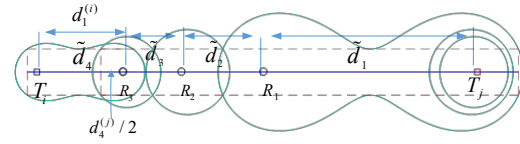
(1) 由于 $T_j > T_i$, 当 $d_{n+1}^{(j)} \leq d_1^{(i)}$ 时, 异构模式 F_{ij}^n 的 MDS 从右向左依次记为 $\tilde{d}_k, k=1, \dots, n+1$. 如图 4(a) 所示, 易证从略.

当 $d_{n+1}^{(j)} > d_1^{(i)}$ 时, 有 $\tilde{d}_k = d_k^{(j)}, k=1, \dots, n$. \tilde{d}_{n+1} 的计算公式证明如下: 如图 4(b) 所示, 设 A 点为 (T_i, R_n) 与 (T_j, R_n) 卡西尼曲线的交点, B 为 P_j^n 所覆盖矩形区域左边界与部署线的交点, 则 $\sqrt{h^2 + (d_{n+1}^{(j)}/2)^2} \sqrt{h^2 + x^2} = (l_{\max}^{(j)})^2, x = d(T_i, B)$, 整理可得 $x = \sqrt{\frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{h^2 + (d_{n+1}^{(j)}/2)^2} - h^2}$, 于是有 $\tilde{d}_{n+1} = d_{n+1}^{(j)}/2 + \sqrt{\frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{h^2 + (d_{n+1}^{(j)}/2)^2} - h^2}$. 另一方面, 在 (T_j, R_n) 中点 A 也在其卡西尼曲线上, 因此有 $d(T_j, A)d(R_n, A) = (l_{\max}^{(j)})^2$, 整理可得:

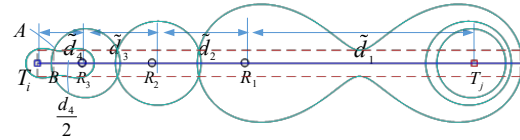
$$\tilde{d}_{n+1} = d_{n+1}^{(j)}/2 + \sqrt{\frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{(l_{\max}^{(j)})^4} \{h^2 + (\sigma_{P_j}(h, n))^2\} - h^2}$$

(2) 由模式覆盖长度的含义可知, 当 $d_{n+1}^{(j)} \leq d_1^{(i)}$ 时,

$$\sigma_{F_y}(h, n) = \sum_{k=1}^{n+1} \max(d_k^{(i)}, d_{n+2-k}^{(j)}); \text{ 当 } d_{n+1}^{(j)} > d_1^{(i)} \text{ 时, } \sigma_{F_y}(h, n) = \sum_{k=1}^n d_k^{(j)} + \tilde{d}_{n+1}. \text{ 证毕.}$$



(a) $d_{n+1}^{(j)} \leq d_1^{(i)}, n=3$ 时异构模式的 MDS



(b) $d_{n+1}^{(j)} > d_1^{(i)}, n=3$ 时异构模式的 MDS

图 4 异构模式 MDS 计算证明示意图

2.3 问题描述

令 Q 代表长为 L 和宽为 D 的矩形 FoI, 且 FoI 内存在一个 DRA (Deployment Restricted Area). 为了表述方便, 以下文中以河流为例代表 DRA. 需要在 Q 上以最小的布站成本构建栅栏覆盖, 即 $\text{SNR}_{\max}(z) \geq \gamma, \forall z \in Q$. 由于一个栅栏覆盖矩形的最大宽度为 $\sqrt{2} l_{\max}$, 当 $D > \sqrt{2} l_{\max}$ 时, 单条栅栏不足以覆盖整个区域, 需要用多条平行于矩形长边的栅栏来共同覆盖整个区域. 若每条栅栏宽度相同、布站方式相同, 称为等分布站策略. 图 5(a) 为等分布站策略示意图, 红色虚线表示栅栏的覆盖宽度, 蓝色实线表示部署线, 所有雷达都布置在部署线上. 每条栅栏的雷达布站位置都一样, 且均采用了 5 个 HOBR (黑色 \square 与 \circ 分别代表同构发射器与接收器) 和 1 个 HEBR (红色 \square 代表异构发射器); 若栅栏宽度不完全相同, 称为非等分布站策略, 如图 5(b) 所示, 第一条栅栏 (从上往下) 与其他两条的布站方式不一样, 形成的栅栏宽度也有所变化. 从安全和经济的角度考虑, 应尽可能少用发射器, 且在每条部署线的两端均部署接收器. 另外, 由于性能更好的发射器成本更高, 同时为了组成简单以便维护, 本文在构建一条栅栏覆盖时, 只采用 1 个异构发射器,

不失一般性, 记异构发射器为 T_j , 其余发射器均同构, 记为 T_i . 令 c_T, c_R, c_{T_j} 分别表示同构发射器, 接收器和异构发射器的成本.

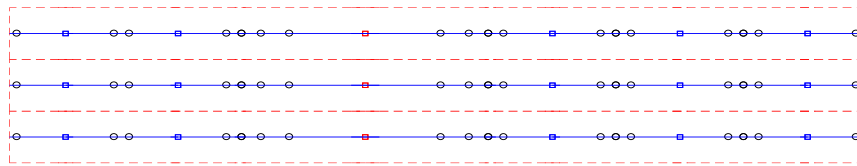
综上, 基于 HEBR 构建的子栅栏由 3 种模式构成: 2 个异构模式 $F_{ij}^{n_i}$ 与 $F_{ji}^{n_j}$, 若干个同构模式 F 以及 2 个 P 模式. 特别地, P 模式均布置在部署线两端, 异构模式 $F_{ij}^{n_i}$ 与 $F_{ji}^{n_j}$ 相邻, 且共用 T_j . 为了保证 (T_j, R) 的覆盖区域可以

覆盖DRA, T_j 的布站位置范围受到约束. 构建一个栅栏覆盖所需的布站模式称为布站序列, 按从左到右的布站顺序可记为

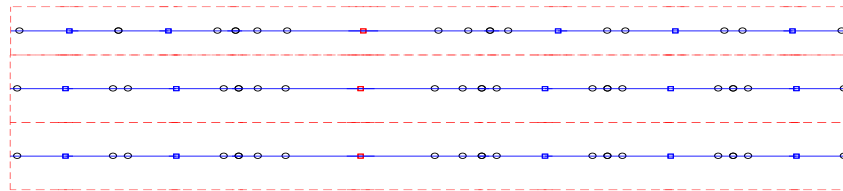
$S = \{P^{m_1}, F^{n_1}, \dots, F^{n_s}, F_{ij}^{n'_1}, F_{ji}^{n'_2}, F^{n_{s+1}}, \dots, F^{n_{s+l}}, P^{m_2}\}$ 如图 5 (c) 所示为一条栅栏覆盖的布站序列, $S = \{P^1, F^2, F_{ij}^4, F_{ji}^4, F^3, F^3, P^1\}$. 满足覆盖要求的布站序列很多, 需要优化布站方式以使得布站总成本最小, 因此本文问题可表示为:

$$\begin{aligned} \min \quad & c_T M + c_R N + q c_{T_j} \\ \text{s.t.} \quad & \text{SNR}_{\max}(z) \geq \gamma, \forall z \in Q \\ & R_k, T_j, T_i \notin (a, b), a = L_1, b = L_1 + L_0 \end{aligned} \quad (6)$$

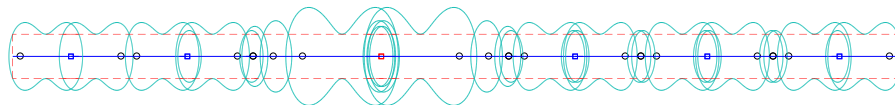
其中, M, N 分别表示同构发射器与接收器的总数量, q 为子栅栏数量. 不失一般性, 记 L_1 是栅栏左端到河岸的长度, L_0 是河流的宽度. R_k 表示第 k 个同构接收器, T_i 表示第 i 个同构发射器 (从左到右排序). 因为区间 (a, b) 属于 DRA, 因此 $R_k, T_j, T_i \notin (a, b)$.



(a) 等分布站策略示意图



(b) 非等分布站策略示意图



(c) 一条栅栏覆盖布站序列示意图

图 5 HEBR 栅栏覆盖布站示意图

3 最优布站序列的特性与优化模型

式(6)是一个 NP-hard 问题, 为了便于求解, 本文通过定理 2~7 将该问题转化为 3 个子模型求解.

3.1 基本布站模式的性质

由于采用若干子栅栏来构成宽度为 D 的栅栏覆盖. 因此, 如何确定单条子带状栅栏的最优布站序列就尤为重要. 本节假设单条子带状栅栏的宽度给定且为 $2h$. 由于布站序列是由 3 种不同的布站模式组成, 首先研究布站模式之间的关系与特性.

由式(4)和式(5)分别可知不论是同构布站模式 F^n 还是异构布站模式 F_{ij}^n , 其覆盖长度都随着有效接收器数量 n 的增加而增加. 但是定理 2 说明这样增加覆盖长度的方法不是最优的, 因为随着 n 增加, 覆盖长度的增加量在减小.

定理 2 序列 $\{y_n | y_n = \sigma_F(h, n+1) - \sigma_F(h, n)\}$ 和

$\{x_n | x_n = \sigma_{F_y}(h, n+1) - \sigma_{F_y}(h, n)\}$ 均单调递减.

证明

设 $T_j \geq T_i$, 首先证明序列 $\{x_n\}$ 是单调递减的. 为了便于分析, 记 $\tilde{n}_0 = \max\{n | d_{n+1}^{(j)} > d_1^{(i)}\}$, 对给定的 n , 分别记 $k_n = \max\{k | d_k^{(i)} \geq d_{n+2-k}^{(j)}\}$ 和 $k_{n+1} = \max\{k | d_k^{(i)} \geq d_{n+2+l-k}^{(j)}\}$, 容易看到 $k_{n+l} \geq k_n, l = 1, 2, \dots$, 结合式(5)可知:

①当 $n > \tilde{n}_0$ 时, 有:

$$\begin{aligned} x_n &= \sigma_{F_y}(h, n+1) - \sigma_{F_y}(h, n) = \begin{cases} d_{k_{n+1}}^{(i)}, k_{n+1} > k_n \\ d_{n+2-k_n}^{(j)}, k_{n+1} = k_n \end{cases} \\ x_{n+1} &= \begin{cases} d_{k_{n+2}}^{(i)}, k_{n+2} > k_{n+1} \\ d_{n+3-k_{n+1}}^{(j)}, k_{n+2} = k_{n+1} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

由序列 $d_k^{(i)}, d_k^{(j)}$ 单调递减性可得结论成立.

②当 $n = \tilde{n}_0$ 时, 有:

$$\begin{aligned} x_n &= \sum_{k=1}^{n+2} \max \{d_k^{(j)}, d_{n+3-k}^{(j)}\} - \sum_{k=1}^n d_k^{(j)} - \tilde{d}_{n+1} \\ &= \max \{d_1^{(j)}, d_{n+2}^{(j)}\} + \max \{d_2^{(j)}, d_{n+1}^{(j)}\} - \tilde{d}_{n+1} \\ &= d_1^{(j)} + d_{n+1}^{(j)} / 2 - \sqrt{(l_{\max}^{(j)})^4 / (h^2 + (d_{n+1}^{(j)} / 2)^2) - h^2} \end{aligned}$$

注意到此时 $k_{n+1} = 1$, 因此, 由式(7)可得:

$$x_{n+1} = \begin{cases} d_2^{(j)}, k_{n+2} > k_{n+1} \\ d_{n+2}^{(j)}, k_{n+2} = k_{n+1} \end{cases}$$

注意到不等式 $d_{n+2}^{(j)} \leq d_1^{(j)}, d_{n+1}^{(j)} > d_1^{(j)}$ 以及等式 $(d_1^{(j)} / 2)^2 + h^2 = (l_{\max}^{(j)})^2$ 成立, 由此可得 $(d_{n+1}^{(j)} / 2)^2 + h^2 > (l_{\max}^{(j)})^2$ 成立, 进一步可得 $d_{n+1}^{(j)} / 2 - \sqrt{(l_{\max}^{(j)})^4 / (h^2 + (d_{n+1}^{(j)} / 2)^2) - h^2} > 0$ 成立, 因此 $x_n \geq x_{n+1}$.

③当 $n+1 = \tilde{n}_0$ 时, $d_{n+2}^{(j)} > d_1^{(j)}, d_{n+3}^{(j)} \leq d_1^{(j)}$ 成立, 由此可知, $d_{n+2}^{(j)} / 2 + \sqrt{(l_{\max}^{(j)})^4 / (h^2 + (d_{n+2}^{(j)} / 2)^2) - h^2} \geq d_1^{(j)}$, 于是有:

$$\begin{aligned} x_n &= d_{n+1}^{(j)} / 2 + d_{n+2}^{(j)} / 2 + \sqrt{\frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{h^2 + (d_{n+2}^{(j)} / 2)^2} - h^2} \\ &\quad - \sqrt{(l_{\max}^{(j)})^4 / (h^2 + (d_{n+1}^{(j)} / 2)^2) - h^2} \end{aligned}$$

$$x_{n+1} = d_1^{(j)} + d_{n+2}^{(j)} / 2 - \sqrt{(l_{\max}^{(j)})^4 / (h^2 + (d_{n+2}^{(j)} / 2)^2) - h^2}$$

再由序列 $\{d_n^{(j)}\}$ 单调递减可得 $x_n \geq x_{n+1}$.

④当 $n+1 < \tilde{n}_0$ 时, $\sigma_{P_j}(h, n+1) > \xi_n > \sigma_{P_j}(h, n)$, 则有:

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{d_{n+1}^{(j)} + d_{n+2}^{(j)}}{2} + \frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{(l_{\max}^{(j)})^4} \frac{\sigma_{P_j}(h, n+1) - \sigma_{P_j}(h, n)}{\sqrt{\frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{(l_{\max}^{(j)})^4} (h^2 + (\xi_n)^2) - h^2}} \\ &= \frac{d_{n+1}^{(j)} + d_{n+2}^{(j)}}{2} + \frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{(l_{\max}^{(j)})^4} \frac{d_{n+1}^{(j)} + d_{n+2}^{(j)}}{2 \sqrt{\frac{(l_{\max}^{(j)})^4}{(l_{\max}^{(j)})^4} (h^2 + (\xi_n)^2) - h^2}} \end{aligned}$$

由序列 $\{d_n^{(j)}\}$ 单调递减和序列 $\{\sigma_{P_j}(h, n)\}$ 单调递增可得 $x_n \geq x_{n+1}$. 综上序列 $\{x_n\}$ 是单调递减的.

类似可证序列 $\{y_n\}$ 为单调递减序列. 证毕.

利用定理2可以证明定理3, 该定理用于说明当接收器数量给定时, 如何把接收器分配到2个异构布站模式 F_{ij} 中, 使得2个模式的栅栏覆盖长度之和最大.

定理3 设 $T_j > T_i, n_1, n_2 \leq N_{\max}^{(j)} + N_{\max}^{(i)}$ 为自然数, 那么以下结论为真:

(1) 若 $n_1 + n_2$ 为偶数, 则当 $n_1 = n_2$ 时, $\sigma_{F_{ij}}(n_1) + \sigma_{F_{ij}}(n_2)$ 取得最大值.

(2) 若 $n_1 + n_2$ 为奇数, 则当 $|n_1 - n_2| = 1$ 时, $\sigma_{F_{ij}}(n_1) + \sigma_{F_{ij}}(n_2)$ 取得最大值.

证明

(1) 不妨设 $n_1 = v - k, n_2 = v + k$, 即 $n_1 + n_2 = 2v, k$ 为非负整数. 以下证明此时最大值为 $2\sigma_{F_{ij}}(v)$. 由定理2

可知:

$$\begin{aligned} &2\sigma_{F_{ij}}(v) - \sigma_{F_{ij}}(n_1) - \sigma_{F_{ij}}(n_2) \\ &= \sum_{s=1}^k \{[\sigma_{F_{ij}}(v+s-1) - \sigma_{F_{ij}}(v+s)] - \sigma_{F_{ij}}(v-s) + \sigma_{F_{ij}}(v-s+1)\} \\ &= \sum_{s=1}^k \{x_{v-s} - x_{v+s-1}\} \geq 0 \end{aligned}$$

上式表明 $2\sigma_{F_{ij}}(v) \geq \sigma_{F_{ij}}(n_1) + \sigma_{F_{ij}}(n_2)$, 且当 $k=0$ 时等号成立, $\sigma_{F_{ij}}(n_1) + \sigma_{F_{ij}}(n_2)$ 取得最大值 $2\sigma_{F_{ij}}(v)$.

(2) 不妨设 $n_1 = v + k, n_2 = v + 1 - k$, 即 $n_1 + n_2 = 2v + 1$, 以下证明 $\sigma_{F_{ij}}(v) + \sigma_{F_{ij}}(v+1)$ 为最大值, 由定理2可得:

$$\begin{aligned} &\sigma_{F_{ij}}(v) + \sigma_{F_{ij}}(v+1) - \sigma_{F_{ij}}(n_1) - \sigma_{F_{ij}}(n_2) \\ &= \sum_{s=1}^k \{x_{v+1-s} - x_{v+s-1}\} \geq 0 \end{aligned}$$

由此可得 $\sigma_{F_{ij}}(v) + \sigma_{F_{ij}}(v+1) \geq \sigma_{F_{ij}}(n_1) + \sigma_{F_{ij}}(n_2)$, 当且仅当 $k=0, 1$ 时等号成立. 因此在 $n_1 = n_2 - 1$ 或 $n_1 = n_2 + 1$ 时, $\sigma_{F_{ij}}(n_1) + \sigma_{F_{ij}}(n_2)$ 的最大值等于 $\sigma_{F_{ij}}(v) + \sigma_{F_{ij}}(v+1)$. 证毕.

由定理3可得定理4成立.

定理4 对于2个同构布站模式 F^{n_1} 和 F^{n_2} , 若 $n_1, n_2 \leq 2N_{\max}$, 则有如下结果:

(1) 若 $n_1 + n_2 = 2v$, 则当 $n_1 = n_2$ 时 $\sigma_F(n_1) + \sigma_F(n_2)$ 取得最大值 $2\sigma_F(v)$.

(2) 若 $n_1 + n_2 = 2v + 1$, 则当 $|n_1 - n_2| = 1$ 时 $\sigma_F(n_1) + \sigma_F(n_2)$ 取得最大值 $\sigma_F(v) + \sigma_F(v+1)$.

定理4说明了最优布站序列中同构布站模式的性质, 阐明了当接收器数量相差不大于1时, 2个同构模式的栅栏覆盖长度之和最大. 因此在一个栅栏上, 最多只存在两个类型同构布站模式 F^{n_1} 和 F^{n_1+1} .

定理5 设 $n \leq 2N_{\max}, m \leq N_{\max}$ 为自然数, 若 $n+m$ 为定值, 那么, 当且仅当 $|n-2m| \leq 1$ 时, $\sigma_F(n) + \sigma_F(m)$ 的值最大. 进一步有, 当 n 为奇数时, $m = (n-1)/2$ 或 $m = (n+1)/2$; 当 n 为偶数时, $m = n/2$ ^[17].

定理5表明了最优布站序列中同构布站模式 F 与布站模式 P 之间的关系, 即给定给模式 F 中接收器数量, 那么为了实现覆盖长度最大, 则相邻模式 P 中接收器的数量是可以直接确定的.

此外, 定理6描述了同构布站模式与相邻异构布站模式之间的性质, 即当同构布站模式中接收器数量给定时, 为了实现覆盖长度最大, 如何确定相邻异构布站模式中接收器的数量.

定理6 设发射器 $T_j \geq T_i$, 对异构模式 $F_{ij}^{n_2}$ 与同构模式 F^{n_1} , 设 n_1 给定, 对 $n_2 (n_2 \geq n_1)$, 若 n_2', n_1' 满足 $n_2' + n_1' = n_1 + n_2$, 且:

$$\begin{aligned} \tilde{n}_2 = \max \{n_2 | \sigma_{F_y}(n'_2) + \sigma_F(n'_1) \leq \sigma_{F_y}(n_2) + \sigma_F(n_1), \\ n'_1 + n'_2 = n_1 + n_2\} \end{aligned} \quad (8)$$

那么, $\tilde{n}_2 (\tilde{n}_2 > n_1)$ 满足式(8)的充分必要条件是 $\eta_{\tilde{n}_2}^{(0)} \leq \xi_{n_1} \leq \eta_{\tilde{n}_2}^{(2)}$; $\eta_{\tilde{n}_2}^{(1)} = \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2 + 1) - \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2)$; $\eta_{\tilde{n}_2}^{(2)} = \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2) - \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2 - 1)$; $\xi_{n_1} = \sigma_F(n_1 + 1) - \sigma_F(n_1)$.

证明

下面证明若 $\eta_{\tilde{n}_2}^{(0)} \leq \xi_{n_1} \leq \eta_{\tilde{n}_2}^{(2)}$ 成立, 那么 $\tilde{n}_2 (\tilde{n}_2 \geq n_1)$ 满足条件式(8), 即对满足 $n'_2 + n'_1 = n_1 + \tilde{n}_2$ 的 n'_2, n'_1 有:

$$\sigma_{F_y}(n'_2) + \sigma_F(n'_1) \leq \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2) + \sigma_F(n_1)$$

显然当 $n'_1 = n_1$ 时不等式成立; 若 $n'_1 < n_1$, 不妨设 $n'_1 = n_1 - k, n'_2 = \tilde{n}_2 + k$, 那么有:

$$\begin{aligned} & \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2) - \sigma_{F_y}(n'_2) + \sigma_F(n_1) - \sigma_F(n'_1) \\ &= \sum_{s=1}^k \{[\sigma_{F_y}(\tilde{n}_2 + s - 1) - \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2 + s)] \\ & \quad + [\sigma_F(n_1 - s + 1) - \sigma_F(n_1 - s)]\} \\ &= \sum_{s=1}^k \{y_{n_1-s} - x_{\tilde{n}_2+s-1}\} \geq k(\xi_{n_1} - \eta_{\tilde{n}_2}^{(0)}) \geq 0 \end{aligned}$$

若 $n'_1 > n_1$, 设 $n'_1 = n_1 + k, n'_2 = \tilde{n}_2 - k$, 那么有:

$$\begin{aligned} & \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2) - \sigma_{F_y}(n'_2) + \sigma_F(n_1) - \sigma_F(n'_1) \\ &= \sum_{s=1}^k \{[\sigma_{F_y}(\tilde{n}_2 - s + 1) - \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2 - s)] \\ & \quad + [\sigma_F(n_1 + s - 1) - \sigma_F(n_1 + s)]\} \\ &= \sum_{s=1}^k \{x_{\tilde{n}_2-s} - y_{n_1+s-1}\} > k(\eta_{\tilde{n}_2}^{(2)} - \xi_{n_1}) \geq 0 \end{aligned}$$

由 $\eta_{\tilde{n}_2}^{(0)} \leq \xi_{n_1} \leq \eta_{\tilde{n}_2}^{(2)}$ 易得 $\tilde{n}_2 (\tilde{n}_2 > n_1)$ 满足条件式(8). 必要性易证从略. 证毕.

定理 7 进一步对定理 6 进行了扩展, 即确定 $F_{ij}^{n_2}$ 与相邻同构模式的关系.

定理 7 对给定的 n_1 , 设 $\tilde{n}_2 (\tilde{n}_2 > n_1)$ 如定理 6 所述, 若 n'_2, n'_1 满足 $n'_2 + n'_1 = n_1 + \tilde{n}_2 + 1$, 那么

$$\sigma_{F_y}(n'_2) + \sigma_F(n'_1) \leq \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2) + \sigma_F(n_1 + 1).$$

证明

由于 n_1, \tilde{n}_2 满足 $\eta_{\tilde{n}_2}^{(0)} \leq \xi_{n_1} \leq \eta_{\tilde{n}_2}^{(2)}$, 若 $n'_1 < n_1 + 1$, 不妨设 $n'_1 = n_1 + 1 - k, n'_2 = \tilde{n}_2 + k$, 类似定理 6 的证明可得:

$$\begin{aligned} & \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2) - \sigma_{F_y}(n'_2) + \sigma_F(n_1 + 1) - \sigma_F(n'_1) \\ &= \sum_{s=1}^k \{y_{n_1+1-s} - x_{\tilde{n}_2+s-1}\} > k(\xi_{n_1} - \eta_{\tilde{n}_2}^{(0)}) \geq 0 \end{aligned}$$

若 $n'_1 > n_1 + 1$, 设 $n'_1 = n_1 + 1 + k$, 此时 $n'_2 = \tilde{n}_2 - k$, 类似定理 6 的推导有:

$$\begin{aligned} & \sigma_{F_y}(\tilde{n}_2) - \sigma_{F_y}(n'_2) + \sigma_F(n_1 + 1) - \sigma_F(n'_1) \\ &= \sum_{s=1}^k \{x_{\tilde{n}_2-s} - y_{n_1+s}\} > k(\eta_{\tilde{n}_2}^{(2)} - \xi_{n_1}) \geq 0 \end{aligned}$$

证毕.

定理 6 及定理 7 说明, 若 n_1 给定, 布站序列

$\{F^{n_1}, F_{ij}^{\tilde{n}_2}\}$ 是最优的布站序列, 那么布站序列 $\{F^{n_1}, F^{n_1+1}, F_{ij}^{\tilde{n}_2}\}$ 也是最优布站序列.

综上, 定理 3 和定理 4 分别提出了最优的布站序列中两个异构基本模式 F_{ij} 和同构基本模式 F 应满足的条件; 定理 5 描述了同构模式 F 与 P 模式之间的关系; 而定理 6 与定理 7 阐述了异构模式 F_{ij} 与同构模式 F 之间的关系.

3.2 最优布站序列的性质

如 2.3 节所述, 单条栅栏上仅使用一个异构发射器. 为了便于描述, 记异构发射器为 T_0 , 其他同构发射器为 T_1 , 且 $T_0 > T_1$. 在不产生歧义时将 T_1 简记为 T , 且 T_0, T 对应的探测阈值分别记为 $l_{\max}^{(0)}, l_{\max}$. 为了保证栅栏能够跨越河流, 需要约束 T_0 的布站位置. 如图 6 所示, T_0 不能部署在区间 (a, b) 内, 且 (T_0, R_1) 的 MDS 满足 $d_1^{(0)} \geq L_0$, 进一步可得 $h \leq \sqrt{(l_{\max}^{(0)})^2 - 0.25L_0^2}$. 因此 T_0 只能部署在区间 $[b - d_1^{(0)}, a] \cup [b, a + d_1^{(0)}]$ 上, 并记 T_0 到最近的河岸距离记为 $\Delta l, \Delta l \in [0, d_1^{(0)} - L_0]$.

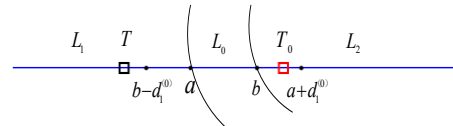


图 6 异构发射器 T_0 部署位置示意图

由 3.1 节分析可知, 整个栅栏的最优布站序列 S 是由 $t_1^{(k)}(t_2^{(k)})$ 个模式 $F^{n_k}(F^{n_k+1}), k=1, 2$ 个模式 $F_{10}^{n'_1}$ 与 $F_{01}^{n'_2}$ 以及 2 个模式 P^{m_1}, P^{m_2} 构成. 进一步, 1 个栅栏被 T_0 分为 2 段, 即有 $S = S_1 \cup S_2$, 其中 $S_1 = \{P^{m_1}, t_1^{(0)}, F^{n_1}, t_2^{(0)}, F^{n_1+1}, F_{10}^{n'_1}\}$ 和 $S_2 = \{F_{01}^{n'_2}, t_1^{(2)}, F^{n_2}, t_2^{(2)}, F^{n_2+1}, P^{m_2}\}$. n'_k 与 $n_k, n_k + 1$ 之间的关系由定理 6、定理 7 描述, m_k 与 n_k 之间关系由定理 5 确定.

实际应用中往往需要构建多条子栅栏共同满足覆盖需求, 因此需要确定子栅栏的数量及每条栅栏的布站序列.

3.3 问题模型

本文栅栏覆盖的优化问题有两个关键步骤: (1) 确定子栅栏的数量及宽度; (2) 每条子栅栏的最优布站序列. 因此, 首先建立单条子栅栏的优化数学模型. 由于单条子带状栅栏是由左右 2 段栅栏组成, 其长度分别记为 l_1, l_2 , 故有 2 种可能情况: (1) 异构发射器 T_0 部署在距左岸 Δl 处, 此时, 两段栅栏的长度分别为 $l_1 = L_1 - \Delta l, l_2 = L_2 + L_0 + \Delta l$; (2) 异构发射器 T_0 部署在距右岸 Δl 处, 此时两段栅栏的长度分别为 $l_1 = L_1 + L_0 + \Delta l, l_2 = L_2 - \Delta l$. 因此, 对于宽度为 $2h$ 的 1 个子带状栅栏, 我们有优化模型 M_0 :

$$\begin{aligned}
& \min_{\{t_1^{(k)}, t_2^{(k)}, n_k, n'_k, w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \Delta l\}} c_{\text{tot}}^h = t_1^{(0)}(n_1 + \alpha) + w_1^{(0)} \lfloor n_1/2 \rfloor \\
& + t_2^{(0)}(n_1 + 1 + \alpha) + w_2^{(0)} \lfloor (n_1 + 1)/2 \rfloor + w_1^{(2)} \lfloor n_2/2 \rfloor \\
& + n'_1 + t_2^{(2)}(n_2 + 1 + \alpha) + n'_2 + w_2^{(2)} \lfloor (n_2 + 1)/2 \rfloor + \alpha_0 \\
& + 2\alpha + t_1^{(2)}(n_2 + \alpha) \\
& \text{s.t.} \\
& \sigma_{F_{10}}(h, n'_1) + t_1^{(1)}\sigma_F(h, n_1) + t_2^{(1)}\sigma_F(h, n_1 + 1) \\
& + w_1^{(1)}\sigma_P(h, \lfloor n_1/2 \rfloor) + w_2^{(1)}\sigma_P(h, \lfloor (n_1 + 1)/2 \rfloor) \geq l_1, \\
& \sigma_{F_{01}}(h, n'_2) + t_1^{(2)}\sigma_F(h, n_2) + t_2^{(2)}\sigma_F(h, n_2 + 1) \\
& + w_1^{(2)}\sigma_P(h, \lfloor n_2/2 \rfloor) + w_2^{(2)}\sigma_P(h, \lfloor (n_2 + 1)/2 \rfloor) \geq l_2, \\
& l_1 = L_1 - \Delta l, l_2 = L_2 + L_0 + \Delta l, \text{ or } l_1 = L_1 + L_0 + \Delta l, \\
& l_2 = L_2 - \Delta l, 0 \leq \Delta l \leq d_1^{(0)} - L_0, w_1^{(1)} + w_2^{(1)} = 1, \\
& w_1^{(2)} + w_2^{(2)} = 1, \mu \leq h \leq h_{\max}, n_i < 2N_{\max}, i = 1, 2
\end{aligned} \quad (9)$$

其中, $t_k^{(1)}, t_k^{(2)}, w_k^{(1)}, w_k^{(2)} \in N^0, n_k, n'_k, m_k \in N, k = 1, 2$. N^0, N 分别为非负整数集与自然数集, c_{tot}^h 是栅栏宽度为 $2h$ 时的布站成本. 为了保证系统有足够的检测时间, 要求单条栅栏最小宽度为 $\mu > 0$, $w_1^{(k)}, w_2^{(k)}$ 是模式 P 的数量, n_k 是同构模式里接收器的数量, n'_k 是异构模式里接收器的数量, α, α_0 分别为同构发射器, 异构发射器与接收器的成本比. 通常发射器成本大于接收器, 因此 $\alpha, \alpha_0 > 1$. 单条栅栏的半宽度最大值为:

$$h_{\max} = \min \{ \sqrt{3} l_{\max} / 3, \sqrt{(l_{\max}^{(0)})^2 - 0.25L_0^2} \}$$

其次设整个 FoI 由 q 个子栅栏覆盖, 有 2 种策略, 一种采用等分策略, 即用 q 个宽度相同的子栅栏覆盖 FoI, 且每个子栅栏的布站方式相同, 每个子栅栏的宽度为 $2h$, 最小布站成本为 c_{tot}^h . 因此有模型 M_1 :

$$\begin{aligned}
& \min_q qc_{\text{tot}}^h \\
& \text{s.t. } \mu \leq h \leq h_{\max}, 2qh \geq D
\end{aligned}$$

另一种采用非等分策略, 即用若干宽度不完全相同的子栅栏覆盖 FoI, 不同宽度栅栏的布站方式不相同. 假设不同栅栏宽度为 $2h_k$, ($h_k \leq h_{\max}$), 其对应数量是 $q_k, k = 1, \dots, q_0, \sum_{k=1}^{q_0} q_k = q$, 所有栅栏宽度的和应满足覆盖宽度 D , 即 $2 \sum_{k=1}^{q_0} q_k h_k \geq D$. 综上可得非等分模型 M_2 :

$$\begin{aligned}
& \min_{\{q_k, h_k\}} \sum_{k=1}^{q_0} q_k c_{\text{tot}}^h \\
& \text{s.t. } \mu \leq h_k \leq h_{\max}, k = 1, \dots, q_0 \\
& \sum_{k=1}^{q_0} 2q_k h_k \geq D, q_k \in N^0
\end{aligned}$$

模型 M_1 与模型 M_2 中的目标函数均依赖于单条子栅栏的成本 c_{tot}^h , 而且 M_0 的目标函数与异构发射站 T_0 的位置有关, 因此隐含变量 Δl , 导致不易直接求解. 为此, 将模型 M_0 分为两层: 先固定 Δl ($0 \leq \Delta l \leq d_1 - L_0$), 得到 2

个优化模型. 再计算所有 Δl 对应的布站成本, 利用第 3 个模型确定最小布站成本. 具体来说, 当 Δl 固定, 对于 l_1 段优化对应的布站成本 $c_k^{(0)}$, 可得优化模型 M_0-1 :

$$\begin{aligned}
& \min_{\{t_1^{(0)}, t_2^{(0)}, w_1^{(0)}, w_2^{(0)}, n_1, n'_1\}} c_k^{(0)} = t_1^{(0)}(n_1 + \alpha) + t_2^{(0)}(n_1 + 1 + \alpha) \\
& + n'_1 + w_1^{(0)} \lfloor n_1/2 \rfloor + w_2^{(0)} \lfloor (n_1 + 1)/2 \rfloor + \alpha \\
& \text{s.t. } \sigma_{F_{10}}(h, n'_1) + t_1^{(0)}\sigma_F(h, n_1) + t_2^{(0)}\sigma_F(h, n_1 + 1) \\
& + w_1^{(0)}\sigma_P(h, \lfloor n_1/2 \rfloor) + w_2^{(0)}\sigma_P(h, \lfloor (n_1 + 1)/2 \rfloor) \geq l_1^k \\
& w_1^{(0)} + w_2^{(0)} = 1
\end{aligned} \quad (10)$$

其中, $l_1^k = L_1 - \Delta l, k = 1$, 此时 T_0 布置在左岸; 当 $l_1^k = L_1 + L_0 + \Delta l, k = 2$ 时, T_0 布置在右岸. 优化 l_2 段对应的布站成本 $c_k^{(2)}$, 可得优化模型 M_0-2 :

$$\begin{aligned}
& \min_{\{t_1^{(2)}, t_2^{(2)}, w_1^{(2)}, w_2^{(2)}, n_2, n'_2\}} c_k^{(2)} = t_1^{(2)}(n_2 + \alpha) + t_2^{(2)}(n_2 + 1 + \alpha) \\
& + n'_2 + w_1^{(2)} \lfloor n_2/2 \rfloor + w_2^{(2)} \lfloor (n_2 + 1)/2 \rfloor + \alpha \\
& \text{s.t. } \sigma_{F_{10}}(h, n'_2) + t_1^{(2)}\sigma_F(h, n_2) + t_2^{(2)}\sigma_F(h, n_2 + 1) \\
& + w_1^{(2)}\sigma_P(h, \lfloor n_2/2 \rfloor) + w_2^{(2)}\sigma_P(h, \lfloor (n_2 + 1)/2 \rfloor) \geq l_2^k \\
& w_1^{(2)} + w_2^{(2)} = 1
\end{aligned} \quad (11)$$

其中, $l_2^k = L_2 + L_0 + \Delta l, k = 1$, 此时 T_0 布置在左岸; 当 $l_2^k = L_2 - \Delta l, k = 2$ 时, T_0 布置在右岸. 对所有 Δl 对应的布站成本, 利用模型 M_0-3 确定单条栅栏的最小布站成本 c_{tot} :

$$\begin{aligned}
& c_{\text{tot}} = \min_{\Delta l, k} (c_k^{(0)} + c_k^{(2)} + \alpha_0) \\
& \text{s.t. } 0 \leq \Delta l \leq d_1^{(0)} - L_0, k = 1, 2
\end{aligned} \quad (12)$$

至此可得模型 M_0 最优解. 进一步以模型 M_0-1 为例介绍求解算法, 模型 M_0-2 的求解算法类似.

首先对给定的 n_1 考虑如下子优化问题:

$$\begin{aligned}
& \min_{\{w_1^{(0)}, w_2^{(0)}, n'_1, t_1^{(0)}, t_2^{(0)}\}} c_{n_1} = t_1^{(0)}(n_1 + \alpha) + t_2^{(0)}(n_1 + 1 + \alpha) \\
& + n'_1 + w_1^{(0)} \lfloor n_1/2 \rfloor + w_2^{(0)} \lfloor (n_1 + 1)/2 \rfloor + \alpha \\
& \text{s.t. } t_1^{(0)}\sigma_F(h, n_1) + t_2^{(0)}\sigma_F(h, n_1 + 1) + \sigma_{F_{10}}(h, n'_1) + \\
& w_1^{(0)}\sigma_P(h, \lfloor n_1/2 \rfloor) + w_2^{(0)}\sigma_P(h, \lfloor (n_1 + 1)/2 \rfloor) \geq l_1^k \\
& w_1^{(0)} + w_2^{(0)} = 1
\end{aligned} \quad (13)$$

其中, $mw_1^{(0)}, w_2^{(0)}, t_1^{(0)}, t_2^{(0)} \in N^0, n'_1 \in N$, 式 (13) 为具有约束条件的整数线性规划^[34], 直接可求其解. 其次, 求

$\min_{n_1 \leq 2N_{\max}} \{c_{n_1}\}$ 可得模型 M_0-1 的最优解.

有了单条栅栏的求解方法后, 下面分别给出等分策略与非等分策略的求解算法.

4 模型求解算法及复杂度分析

由上节的讨论可知, 等分策略与非等分策略的主要区别是子栅栏的宽度要求不同, 因此, 建立的模型分别记为模型 M_1 与模型 M_2 ; 根据等分策略的特点, 采用贪婪算法求解模型 M_1 .

模型 M_2 的求解有两种情况: (1) 当 $h_{\max} - \mu$ 不太大时, 比如小于 1, 采用贪婪算法求解. 具体地说, 等分区

间 $[\mu, h_{\max}]$, 得到 q 个等分点 $h_k, k=1, \dots, q$; (2) 当 $h_{\max} - \mu$ 较大时, 可用混沌映射^[35]找到区间 $[\mu, h_{\max}]$ 上的 q 个 $h_k, k=1, \dots, q$, 然后再求解有约束条件的整数线性规划.

4.1 模型的求解算法及其伪代码

由上面的分析可知, 无论等分策略还是非等分策略的布站方法, 其关键是子栅栏如何部署雷达发射器与接收器. 而对于子栅栏而言, 所采用的模型都是 M_0 . 因此, 算法步骤如下:

- (1) 整个带状栅栏分割为若干个子栅栏.
- (2) 对每个子栅栏采用算法 1 求解模型 M_0 , 为此分别求解模型 M_0-1 、模型 M_0-2 及模型 M_0-3 .
- (3) 根据不同策略, 分别采用算法 2 解模型 M_1 或采用算法 3 解模型 M_2 .

以下介绍优化算法的伪代码. 首先令 C_{tot} 为单条栅栏布站成本集合, c_{tot} 为单栅栏最小布站成本, C_l 为 Δl 给定时栅栏的布站成本集合, c_{tot}^l 为集合 C_l 的最小值, c_h 为 T_0 的位置给定时栅栏的布站成本. T_0 将整个栅栏分为

算法 1 模型 M_0 的算法

输入: $\alpha, \alpha_0, l_{\max}^{(0)}, l_{\max}, h, L_1, L_2, L_0$
 输出: 子带状栅栏的布站成本
 1: 初始化集合 $C_{\text{tot}} = \emptyset, c_h = 0, \emptyset$ 是空集. 输入参数 $\alpha, \alpha_0, l_{\max}^{(0)}, l_{\max}, h, L_1, L_2, L_0$, 计算同构模式 F^n 中有效接收器数量上限阈值 $2N_{\max} = \lfloor l_{\max}^2/h^2 - 1 \rfloor, v_1, v_2$ 以及异构模式中 $d_1^{(0)} = 2\sqrt{(l_{\max}^{(0)})^2 - h^2}$
 2: for1 $\Delta l = 0: \varepsilon: (d_1^{(0)} - L_0)$
 3: 初始化集合 $C_l = \emptyset$
 4: for2 $k=1:2$ 针对 T_0 在左岸和右岸分别求解模型 M_0-1 与 M_0-2 , 初始化集合 $C_{\text{ha}} = \emptyset$
 5: $l_1^k = v_k + \Delta l, l_2^k = L_1 + L_0 + L_2 - l_1^k$
 6: for3 $i=1:2$ 分别针对左段栅栏和右段栅栏确定布站序列
 7: for4 $n=1:2N_{\max}$
 8: 对 n 求解含有 4 个变量的整数线性规划子优化问题式 (13), 得到同构雷达模式 F^n 中接收器数量 n_i 、异构雷达模式中的接收器个数 n'_i 及最优覆盖序列 $\{F_{10}^{n_i}, q_1^{(0)}, F^n, q_2^{(0)}, F^{n+1}, P^{m_i}\}$
 9: 更新 $C_{\text{ha}} = C_{\text{ha}} \cup \{c_{n_i}\}$, 其中 $c_{n_i} = n'_i + \sum_{k=1}^2 q_k^{(0)}(n_i + a) + q_2^{(0)} + m_i + a$
 10: end for4
 11: $\{q_1^{(0)}, q_2^{(0)}, n'_i, n_i, m_i\} = \arg \min C_{\text{ha}}$
 12: $c_h = c_h + \min C_{\text{ha}}$
 13: end for3
 14: $C_l = C_l \cup \{c_h\}$
 15: end for2
 16: $c_{\text{tot}}^l = \min C_l$
 17: $C_{\text{tot}} = C_{\text{tot}} \cup \{c_{\text{tot}}^l\}$
 18: end for1
 19: $c_{\text{tot}} = \min C_{\text{tot}}$

两段, C_{ha} 为分段栅栏的布站成本集合, T_0 在左岸时其部署位置的左界为 $v_1 = L_1 + L_0 - d_1^{(0)}$, T_0 在右岸时布站位置的左界为 $v_2 = L_1 + L_0$, T_0 位置的步进步长 ε . C_T 是整个栅栏的总布站成本集合.

4.2 算法复杂度分析

算法 1 的复杂度: 首先, 算法 1 中要求解整数规划模型式 (13), 而该整数规划模型含有 4 个变量, 且其中 2 个变量的取值范围为 $\{0, 1\}$, 于是求解整数规划式 (13) 的复杂度为 $O(n^2)$; 其次, 算法 1 中共有 4 层循环, 其中 2 个循环变量取值为 $\{1, 2\}$, 因而复杂度为 $O(n^2)$, 且在循环中嵌套了求解整数规划模型式 (13), 因此算法 1 的整体复杂度为 $O(n^4)$.

算法 2 的复杂度: 算法 2 中有 1 个循环, 且调用算法 1, 因此算法 2 的复杂度为 $O(n^5)$.

算法 2 等分策略模型 M_1 的求解算法

输入: $\alpha, \alpha_0, l_{\max}^{(0)}, l_{\max}, \mu, L_1, L_2, L_0, D, h_{\min} = \mu, q_{\min} = \lceil D/2h_{\max} \rceil, q_{\max} = \lfloor D/2\mu \rfloor$
 输出: 最优布站成本
 1: 初始化集合 $C_T = \emptyset$. 输入参数 $L_1, L_2, L_0, D, \alpha, \alpha_0, l_{\max}^{(0)}, l_{\max}, \mu, h_{\min} = \mu, q_{\max} = \lfloor D/2\mu \rfloor, q_{\min} = \lceil D/2h_{\max} \rceil$
 2: for $q = q_{\min}: q_{\max}$
 3: 计算 $h = D/2q$, 调用算法 1 计算宽度为 $2h$ 的子栅栏最优布站序列及其成本 c_{tot}^h . 整个栅栏成本 qc_{tot}^h
 4: $C_T = C_T \cup \{qc_{\text{tot}}^h\}$
 5: endfor
 6: 最优布站成本 $c_{\text{tot}}^{\text{opt}} = \min C_T$

算法 3 的复杂度: 设 n 个变量的整数线性规划的计算复杂度为 $c(n)$, 算法 3 中 1 个循环, 并嵌套调用算法 1, 但不嵌套线性整数规划 (14), 因此算法 3 的复杂度为 $O(n^4 + c(n))$.

算法 3 非等分策略模型 M_2 的求解算法

输入: $\alpha, \alpha_0, l_{\max}^{(0)}, l_{\max}, \mu, L_1, L_2, L_0, D$
 输出: 输出子栅栏的个数及其相应的布站序列, 最小总布站成本
 1: 初始化集合 $C_T = \emptyset$, 并令 $h_{\min} = \mu$
 2: 用等分的方法或混沌映射^[35]分割区间 $[h_{\min}, h_{\max}]$ 得到 n 个分点 $h_k, k=1, \dots, n$
 3: for $k=1:n$
 4: 调用算法 1 计算宽度为 $2h_k$ 子栅栏最优布站序列及最优成本 $c_{\text{tot}}^{h_k}$
 5: endfor
 6: 求解具有约束条件的线性整数规划

$$\min_{q_k} \sum_{k=1}^n q_k c_{\text{tot}}^{h_k} \tag{14}$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^n 2q_k h_k \geq D, q_k \in N^0$$

7: 输出子栅栏的个数及其相应的布站序列, 最小总布站成本.

5 仿真实验与结果分析

本节通过仿真实验来验证所提优化方法的有效性与可行性. 假设带状栅栏的总宽度 D 以步长1 km从5 km增加到20 km, 总覆盖长度 L 为100 km. 栅栏需跨越宽度为3 km的河流(假设栅栏跨越的河流部分宽度相同, 且与河流垂直), 河流左右两边陆地上的栅栏长度分别为67 km与30 km. 不失一般性, 设接收器布站成本为单位1, 且 $\alpha_0 = 60$, $\alpha = 40$, $l_{\max}^{(0)} = 3$ km, $l_{\max} = 2$ km. 采用栅栏宽度等分策略(Barrier Width Equal-division Strategy, BWES)与非等分策略分别进行仿真实验. 此外非等分策略可进一步分为基于定步长分割的非等分策略(fixed Step based Segmentation for Unequal Division Strategy, SSUDS)与基于混沌映射 Tent 分割的非等分策略(Segmentation based on Chaotic map Tent for Unequal Division Strategy, SCTUDS).

5.1 总成本与单位面积成本的比较

图7和图8分别给出三种方法的总成本及单位面积的成本示意图. 从图7可以看到随着带状栅栏的宽度由小到大增加, 布站总成本呈现出近似线性的增长态势; 而且不管带状栅栏的宽度如何, 非等分策略的总成本总是小于等分策略的成本. 而非等分策略下的SSUDS方法与SCTUDS方法总成本几乎相同, 相差无几.

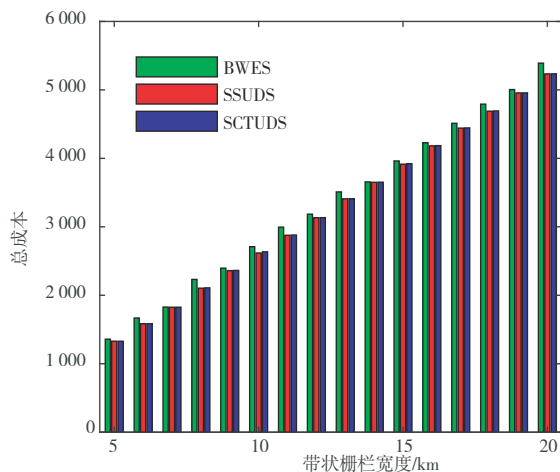


图7 三种方法的总成本示意图

如图8所示, 从单位面积成本的角度来看, 非等分策略的优化结果优于等分策略, 这说明非等分策略更优, 只有在栅栏宽度 $D=7$ km和14 km时, 单位面积成本较为接近. 而非等分策略下SSUDS方法与SCTUDS方法的单位面积成本在绝大部分情况下几乎完全相同, 差距一般小于0.1%; 只有在带状栅栏宽度 $D=10$ km时, SCTUDS比SSUDS大近0.8%.

为了说明非等分布站策略需要更少的布站成本, 如图9所示, 用BWES优化的布站成本分别减去SSUDS

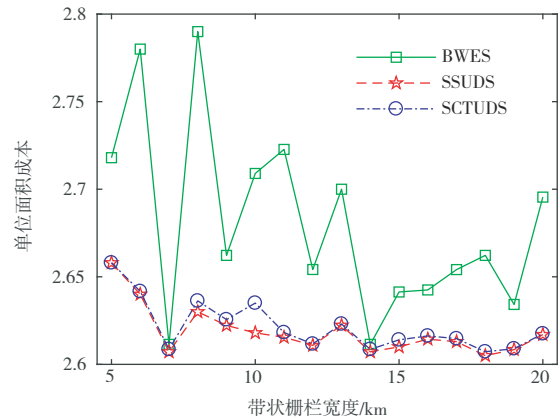


图8 单位面积成本与栅栏宽度关系

和SCTUDS优化的布站成本. 可以看到, 不论是SSUDS还是SCTUDS, 其布站成本均小于BWES, 且节约幅度最多可达6%.

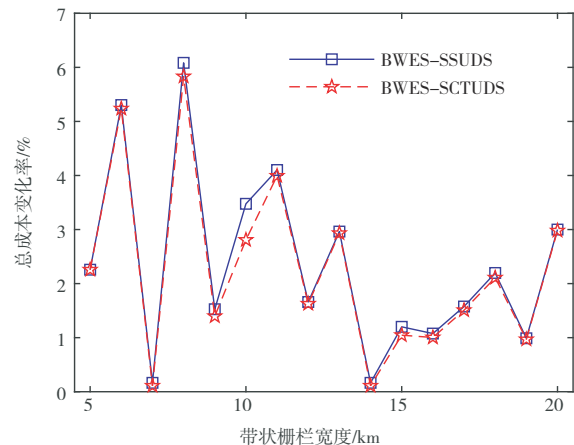


图9 等分策略与非等分策略总成本变化率

5.2 发射器、接收器及部署线数量比较

除了布站成本, 发射器、接收器及部署线的使用数量也是布站时需要关注的重点.

图10(a)说明非等分策略使用的发射器数量一般要少于等分策略. 进一步, 图11比较了发射器减少的具体情况: 相比于BWES, SSUDS与SCTUDS均可以有效减少发射器的使用数量, 且减少幅度一般在3%~10%之间. 同时, 图11也说明两种非等分策略使用的发射器数量基本相同.

从电子战角度来看, 由于发射器属于有源设备, 使用较少的发射器可以减少被侦察和定位的危险, 因此, 非等分策略的安全性更优.

图10(b)表明非等分与等分策略使用的接收器数量互有增减, 结合图11可发现接收器增减的趋势: 当BWES使用的发射器更多时, 接收器使用的数量就减少, 比如 $D=11$ km; 反之, 当BWES使用的发射器更少

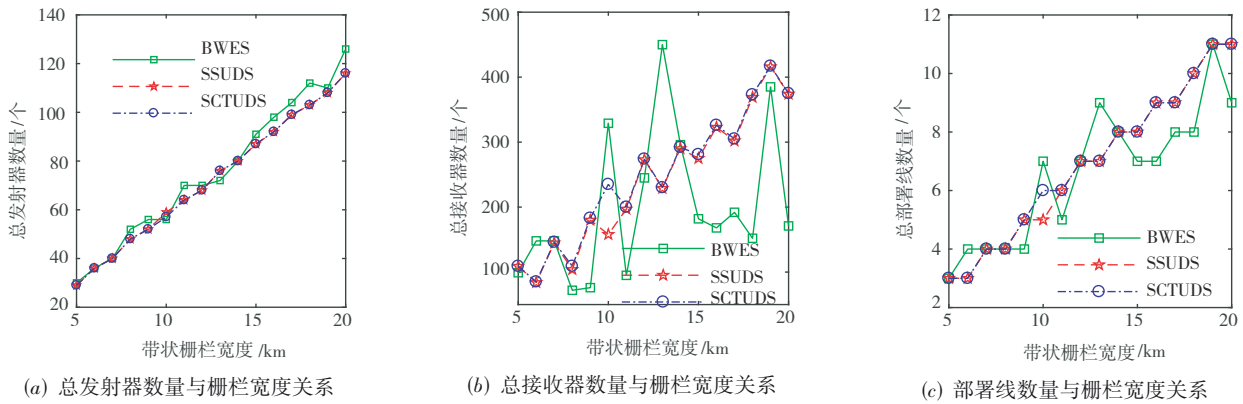


图 10 三种方法的发射器、接收器及部署线示意图

时,接收器使用的数量就更多,比如 $D=13\text{ km}$;可以说,发射器数量与接收器数量呈现出此消彼长的规律. 仅就非等分策略而言,SSUDS和SCTUDS使用的接收器数量基本相同,仅在个别情况下有差异,比如 $D=10\text{ km}$ 时. 从图10(c)可知部署线数量总体上随着宽度 D 的增加而增加. 同时结合图10(b)可知等分策略下部署线数量与接收器数量的变化趋势大体一致. 非等分策略下两种方法的部署线数量基本一致,仅在 $D=10\text{ km}$ 时,SCTUDS比SSUDS多1条. 此时SCTUDS使用的子栅栏更窄,接收器数量更多,相应减少了发射器的使用.

另外,从图8、图10(a)和图10(b)中可以看出,较其他两种方法,BWES方法随带状栅栏宽度变化较为剧烈. 这是因为模型 M_1 (BWES算法)将FoI等分成若干个宽度相同的子带状栅栏,模型 M_2 中当 $q_k=q$ 时得到模型 M_1 ,即模型 M_1 是模型 M_2 的特例. 所以从理论上说BWES的布站结果不是最优的. 试验结果也表明,如图7所示,BWES的优化成本往往大于非等分的优化成本,在有些栅栏宽度下二者差距较小,有些情况下差距较大,反映到单位面积成本上就出现了剧烈的变化. 同时由于优化结果的偏差,BWES部署线的个数随带状栅栏宽度的增加呈现波动增加的趋势,而且每条部署线上都布置了大量接收器和发射器,因此

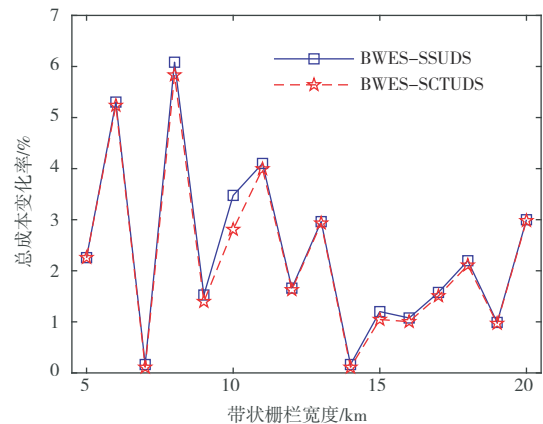


图 11 等分策略与非等分策略发射器数量变化率

部署线数量波动时,会造成发射器和接收器数量的显著变化.

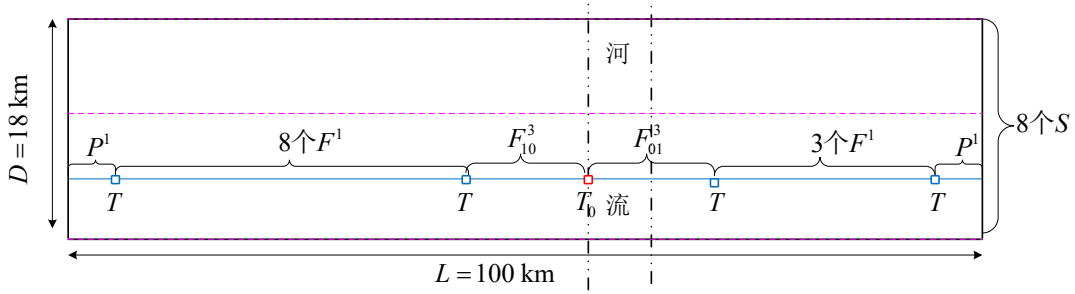
5.3 布站结果说明

以栅栏总宽度 $D=18\text{ km}$,长度 $L=100\text{ km}$ 为例说明本文所提优化方法的布站结果:(1)BWES方法布站总成本为4792,布站方式如图12(a)所示;(2)SSUDS方法布站总成本为4689,布站结果如图12(b)所示;(3)SCTUDS方法总布站成本为4693,布站结果如图12(c)所示. 三种方法的具体部署参数如表1.

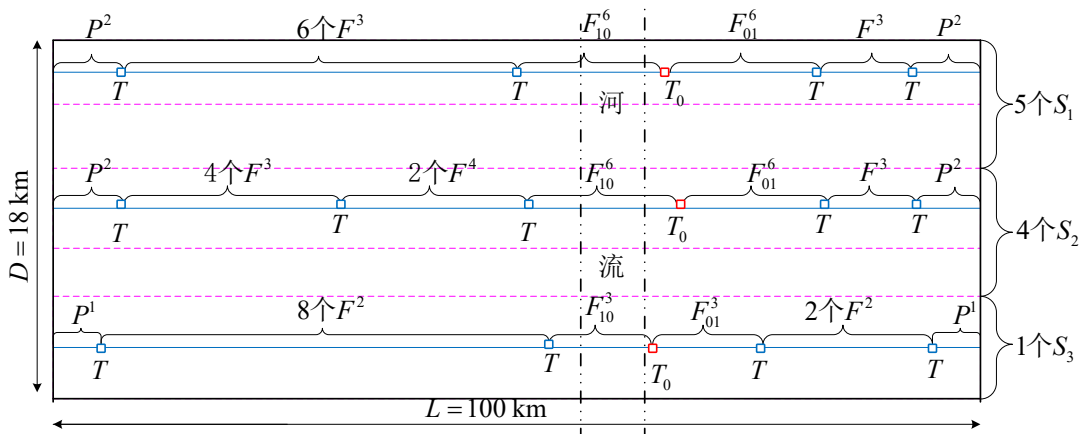
表 1 三种方法具体部署参数

布站方法	子栅栏		左、右布站序列		T_0 位置/km	左、右栅栏的覆盖长度/km
	数量	宽/km				
BWES	8	2.25	$S_1 = \{P^1, 8, F^1, F_{10}^3\}$	$S_2 = \{F_{01}^3, 3, F^1, P^1\}$	0	67.491, 34.42+3
SSUDS	5	1.758	$S_1^1 = \{P^2, 6, F^3, F_{10}^6\}$	$S_2^1 = \{F_{01}^6, 1, F^3, P^2\}$	+2.11	72.207+3, 27.892
	4	1.762	$S_1^2 = \{P^2, 4, F^3, 2, F^4, F_{10}^6\}$	$S_2^2 = \{F_{01}^6, 1, F^3, P^2\}$	+2.2	72.204+3, 27.864
SCTUDS	1	2.162	$S_1^3 = \{P^1, 8, F^2, F_{10}^3\}$	$S_2^3 = \{F_{01}^3, 2, F^2, P^1\}$	+1	71.093+3, 29.017
	8	1.761	$\hat{S}_1^1 = \{P^2, 6, F^3, F_{10}^6\}$	$\hat{S}_2^1 = \{F_{01}^6, 1, F^4, P^2\}$	+2.1	72.131+3, 27.916
	1	1.764	$\hat{S}_1^2 = \{P^2, 1, F^3, 5, F^4, F_{10}^6\}$	$\hat{S}_2^2 = \{F_{01}^6, 1, F^3, P^2\}$	+2.2	72.239+3, 27.806
	1	2.149	$\hat{S}_1^3 = \{P^1, 7, F^2, F_{10}^3\}$	$\hat{S}_2^3 = \{F_{01}^3, 1, F^1, 2, F^2, P^1\}$	-2.6	64.402, 35.896+3

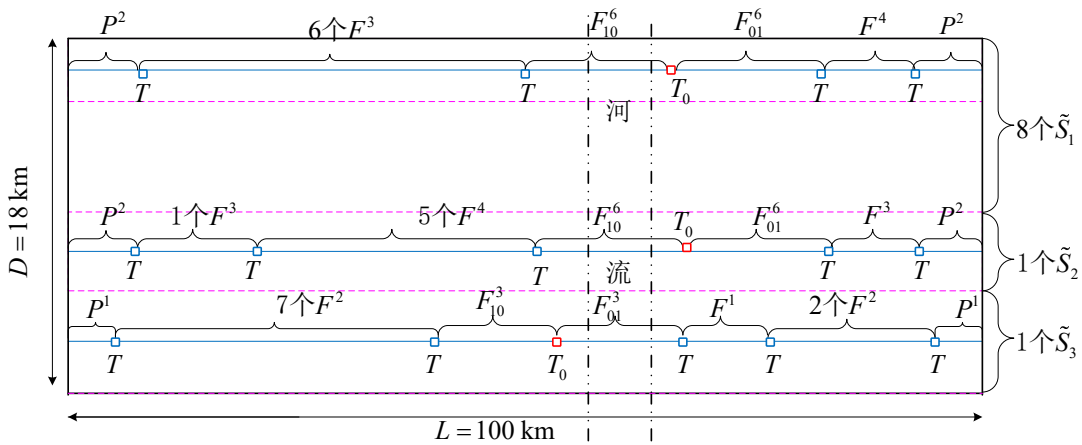
说明:-2.6表示异构发射器 T_0 部署在离左河沿2.6 km处;+2.2表示 T_0 部署在离右河沿2.2 km处;34.42+3表示该栅栏覆盖3 km宽的河流.



(a) BWES方法布站示意图



(b) SSUDS方法的布站示意图



(c) SCTUDS方法布站示意图

图 12 异构双基地雷达栅栏覆盖示意图

通过仿真结果可知本文所提算法有以下结论：

(1)非等分策略的布站方法可以取得更低的布站成本,同时使用的发射器数量更少,具有成本低、安全性高的优势。

(2)非等分策略中SSUDS比SCTUDS的优化结果稍好,本例中成本最多可少0.8%。

(3)SCTUDS方法的计算开销更小.尤其是当子栅栏的宽度取值范围较大时,采用SCTUDS方法虽然总成本略高,但可以有效减少计算开销。

6 结束语

本文针对雷达布站位置受限的情况,对带状栅栏

覆盖的最优布站方法进行了研究. 本文在构建单条栅栏时, 考虑只有一个异构发射器的布站位置有限制的情形. 此外, 所构建的优化模型与布站方法可以进一步推广到多个发射器位置受限的情形, 但此时优化模型更复杂, 若仍采用贪婪算法计算复杂度及计算开销很大. 因此可以考虑采用群智能优化方法或者其他优化方法求解优化问题, 比如布谷鸟搜索算法^[36]、鲸鱼优化算法^[37]、哈里斯鹰优化算法^[38]、蝴蝶优化算法^[39]等.

参考文献

- [1] SAIPULLA A, WESTPHAL C, LIU B Y, et al. Barrier coverage with line-based deployed mobile sensors[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(4): 1381-1391.
- [2] KWON D K, YU S J, LEE J Y, et al. WSN-SLAP: Secure and lightweight mutual authentication protocol for wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2021, 21(3): 936.
- [3] WANG B, XU H, LIU W Y, et al. A novel node placement for long belt coverage in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2013, 62(12): 2341-2353.
- [4] GAN X Y, ZHANG Z S, FU L Y, et al. Unraveling impact of critical sensing range on mobile camera sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2020, 19(4): 982-996.
- [5] AMMARI H M, DAS S K. Centralized and clustered k-coverage protocols for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2012, 61(1): 118-133.
- [6] LU Z X, LI W W, PAN M. Maximum lifetime scheduling for target coverage and data collection in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(2): 714-727.
- [7] TAO D, TANG S J, ZHANG H T, et al. Strong barrier coverage in directional sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2012, 35(8): 895-905.
- [8] ZORBAS D, RAZAFINDRALAMBO T. Prolonging network lifetime under probabilistic target coverage in wireless mobile sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2013, 36(9): 1039-1053.
- [9] GONG X W, ZHANG J S, COCHRAN D. When target motion matters: Doppler coverage in radar sensor networks[C]//2013 Proceedings IEEE INFOCOM. Piscataway: IEEE, 2013: 1169-1177.
- [10] GONG X W, ZHANG J S, COCHRAN D, et al. Barrier coverage in bistatic radar sensor networks: Cassini oval sensing and optimal placement[C]//Proceedings of the fourteenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing. New York: ACM, 2013: 49-58.
- [11] RAHMAN M O, RAZZAQUE M A, HONG C S. Probabilistic sensor deployment in wireless sensor network: A new approach[C]//The 9th International Conference on Advanced Communication Technology. Piscataway: IEEE, 2007: 1419-1422.
- [12] LIU L, ZHANG X, MA H. Exposure-path prevention in directional sensor networks using sector model based percolation[C]//2009 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2009: 1-5.
- [13] CHEN J Y, YANG L T, DENG X J, et al. Optimal receiver placement for K -barrier coverage in passive bistatic radar sensor networks[J]. *ACM Transactions on Internet Technology*, 2020, 20(3): 1-23.
- [14] GONG X W, ZHANG J S, COCHRAN D, et al. Optimal placement for barrier coverage in bistatic radar sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(1): 259-271.
- [15] TANG L, GONG X W, WU J H, et al. Target detection in bistatic radar networks: Node placement and repeated security game[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(3): 1279-1289.
- [16] WANG B, CHEN J Y, LIU W Y, et al. Minimum cost placement of bistatic radar sensors for belt barrier coverage[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2016, 65(2): 577-588.
- [17] 李海鹏, 冯大政, 周永伟, 等. 多基地雷达组网布站优化方法[J]. *兵工学报*, 2021, 42(3): 563-571.
LI H P, FENG D Z, ZHOU Y W, et al. Optimization approach of the deployment network for multistatic radar[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(3): 563-571. (in Chinese)
- [18] 李海鹏, 冯大政. 多基地雷达传感器栅栏覆盖矩形区域的优化方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(10): 2207-2213.
LI H P, FENG D Z. Optimal method of multistatic radar sensors for barrier coverage on rectangular zone[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(10): 2207-2213. (in Chinese)
- [19] 李海鹏, 冯大政, 周永伟. 多基地雷达栅栏覆盖的优化布站方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2021, 48(2): 147-155, 172.
LI H P, FENG D Z, ZHOU Y W. Optimum placement method of multistatic radar barrier coverage[J]. *Journal of Xidian University*, 2021, 48(2): 147-155, 172. (in Chinese)
- [20] LI H P, FENG D Z, LIU C, et al. Optimal deployment of multistatic radar for belt barrier coverage[J]. *Wireless Networks*, 2022, 28(5): 2213-2235.
- [21] CHEN J Y, WANG B, LIU W Y. Constructing perimeter barrier coverage with bistatic radar sensors[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 57: 129-141.

- [22] 李海鹏, 冯大政, 周永伟, 等. 收发分置雷达圆周栅栏覆盖的优化布站方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(3): 786-794.
LI H P, FENG D Z, ZHOU Y W, et al. Optimal placement method for bistatic radar on perimeter barrier coverage[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(3): 786-794. (in Chinese)
- [23] XU X H, ZHAO C W, YE T C, et al. Minimum cost deployment of bistatic radar sensor for perimeter barrier coverage[J]. Sensors, 2019, 19(2): 225.
- [24] LI H P, FENG D Z, CHEN S F, et al. Deployment optimization method of multistatic radar for constructing circular barrier coverage[J]. Sensors, 2021, 21(19): 6573.
- [25] CHANG H Y, KAO L, CHANG K P, et al. Fault-tolerance and minimum cost placement of bistatic radar sensors for belt barrier coverage[C]//2016 International Conference on Network and Information Systems for Computers (IC-NISC). Piscataway: IEEE, 2017: 1-7.
- [26] KIM H, BEN-OTHTMAN J. HeteRBar: Construction of heterogeneous reinforced barrier in wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(8): 1859-1862.
- [27] KARATAS M. Optimal deployment of heterogeneous sensor networks for a hybrid point and barrier coverage application[J]. Computer Networks, 2018, 132: 129-144.
- [28] XU X H, ZHAO C W, CHENG Z M, et al. Approximate optimal deployment of barrier coverage on heterogeneous bistatic radar sensors[J]. Sensors, 2019, 19(10): 2403.
- [29] XU X H, ZHAO C W, JIANG Z C, et al. Optimal placement of barrier coverage in heterogeneous bistatic radar sensor networks[J]. World Wide Web, 2020, 23(2): 1361-1380.
- [30] 李海鹏, 冯大政, 陈少锋. 异构多基地雷达直线栅栏覆盖的布站优化方法[J]. 兵工学报, 2022, 43(8): 1858-1867.
LI H P, FENG D Z, CHEN S F. An optimal deployment method of heterogeneous multistatic radar for linear barrier coverage[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(8): 1858-1867. (in Chinese)
- [31] BARTON D K. 现代雷达的雷达方程[M]. 俞静一, 张宏伟, 金雪, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [32] CHIARI M, GIORGETTI A, PAOLINI E. Sensor radar for object tracking[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(6): 1022-1041.
- [33] LIANG J, LIANG Q L. Design and analysis of distributed radar sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(11): 1926-1933.
- [34] ZAMANI M, REZAEI A, FARZINVASH L. Two-phase node deployment for target coverage in rechargeable WSNs using genetic algorithm and integer linear programming[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77(4): 4172-4200.
- [35] 郝晓弘, 宋吉祥, 周强, 等. 混合策略改进的鲸鱼优化算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(12): 3622-3626, 3655.
HAO X H, SONG J X, ZHOU Q, et al. Improved whale optimization algorithm based on hybrid strategy[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(12): 3622-3626, 3655. (in Chinese)
- [36] 傅文渊. 均衡单进化布谷鸟算法[J]. 电子学报, 2019, 47(2): 282-288.
FU W Y. Equilibrium single evolution based cuckoo search algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(2): 282-288. (in Chinese)
- [37] 褚鼎立, 陈红, 王旭光. 基于自适应权重和模拟退火的鲸鱼优化算法[J]. 电子学报, 2019, 47(5): 992-999.
CHU D L, CHEN H, WANG X G. Whale optimization algorithm based on adaptive weight and simulated annealing[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(5): 992-999. (in Chinese)
- [38] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, et al. Harris Hawks optimization: Algorithm and applications[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97: 849-872.
- [39] 刘景森, 马义想, 李煜. 改进蝴蝶算法求解多维复杂函数优化问题[J]. 电子学报, 2021, 49(6): 1068-1076.
LIU J S, MA Y X, LI Y. Improved butterfly algorithm for multi-dimensional complex function optimization problem[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(6): 1068-1076. (in Chinese)

作者简介



李海鹏 男, 1985年12月出生于陕西省西安市. 现为西安电子工程研究所高级工程师, 博士, 主要的研究方向有雷达组网协同探测与定位、机器学习与数据挖掘、雷达系统设计.
E-mail: uparadise_leo@sina.com



冯大政 (通讯作者) 男, 1959年1月出生于陕西省安康市. 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 研究方向为多基地雷达优化布站、无源定位、盲信号处理、神经网络.
E-mail: dzfeng@xidian.edu.cn