

面向网络化通信感知一体化的立体覆盖方法



Three-Dimensional Coverage Method for Networked Integrated Sensing and Communication

杨文彬/YANG Wenbin, 邱裕鹤/QIU Yuhe, 苏郁/SU Yu

(中国移动(成都)产业研究院, 中国 成都 610200)
(China Mobile Chengdu R&D Institute, Chengdu 610200, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501006

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250312.1759.002.html>

网络出版日期: 2025-03-13

收稿日期: 2024-12-08

摘要: 提出了一种基于有向图(DG)模型的综合通信感知一体化(ISAC)系统分析方法。通过构建考虑环境约束和ISAC节点间协作/干扰特性的收发(T-R)模型,将基站主动天线单元(AAU)间的T-R关系抽象为与节点资源相关的有向边,从而有效表征基站间的协作与干扰特征。在此基础上,提出了资源分配(RA)优化方法,旨在满足感知能力和干扰水平等性能约束的同时,最小化ISAC立体覆盖系统成本。仿真实验和实际部署案例验证了所提方法在立体覆盖分析和资源优化方面的有效性,为大规模网络化ISAC系统的实现提供了理论依据和实践指导。

关键词: 通信感知一体化; 立体覆盖; 协作感知; 资源分配

Abstract: A novel analytical method for integrated sensing and communication (ISAC) systems based on a directed graph (DG) model is presented. By constructing a Transmit-Receive (T-R) model that accounts for environmental constraints and the cooperative/interference characteristics among ISAC nodes, the T-R relationships between active antenna units (AAUs) of base stations are abstracted as directed edges related to node resources, effectively characterizing the cooperation and interference features between base stations. A resource allocation (RA) optimization method is then proposed, aiming to minimize the cost of ISAC three-dimensional coverage systems while satisfying performance constraints such as sensing capability and interference levels. Simulation experiments and practical deployment cases validate the effectiveness of the proposed method in three-dimensional coverage analysis and resource optimization, providing theoretical foundations and practical guidance for the realization of large-scale networked ISAC systems.

Keywords: ISAC; three-dimensional coverage; cooperative sensing; resource allocation

引用格式: 杨文彬, 邱裕鹤, 苏郁. 面向网络化通信感知一体化的立体覆盖方法 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 28-38. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501006

Citation: YANG W B, QIU Y H, SU Y. Three-dimensional coverage method for networked integrated communication and sensing [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 28-38. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501006

随着5G和6G的发展,包括通信、感知、计算、人工智能、安全和大数据在内的多种能力和技术将得到全面整合^[1]。其中,通信感知一体化(ISAC)是移动通信网络发展的一个关键技术方向^[2]。该技术通过利用相同的硬件、频谱和波形,在移动蜂窝网络中融合感知与通信功能。感知服务将成为扩展移动网络能力的重要推动力,在智能交通系统、智能制造设施、环境监测和低空智联网(LAE)等新型应用方面发挥重要作用^[3]。此外,ISAC技术还能实现感知和通信功能的互惠互利,在信道估计、干扰避让等领域发挥重要作用,将显著提高移动通信网络的性能和效率^[4]。

目前,ISAC的研究主要集中在单个基站(BS)性能上。

单个BS通过主动收发电磁波,解算目标回波中所包含的目标到达角(AoA)、出发角(AoD)、传播时延以及多普勒频率等多维度的信息,据此来估计环境中目标的位置和速度,从而实现目标的高精度定位^[1]。为了与现有的通信业务更好地融合,基于移动蜂窝网的ISAC框架的感知功能一般会复用通信中的正交频分复用(OFDM)波形^[5-6]。然而,OFDM波形虽然确保了稳健的通信性能,但未经优化的OFDM波形感知性能有限。为提升感知性能,需对ISAC波形进行优化设计。其中,基于峰值旁瓣比(PSLR)等特定感知约束的波形设计方法备受关注^[7]。进一步地,考虑到感知功能与通信信号中的多用户干扰(MUI)问题,一些学者还创新性地

提出了一系列感知和通信联合设计的方案^[5,8]。

尽管目前的研究在提升单基站的感知能力方面取得了显著进展,但单BS在全域立体覆盖、目标分辨能力等方面仍存在较大的局限性^[1]。因此,为了最大化基站广泛部署的优势,用好移动通信蜂窝网络这张“大网”,综合利用多个BS来进行协作感知至关重要。针对多站点分布式感知,目前最成熟的领域为多基地雷达(MR)。MR是一种利用多站增益进行协作探测的系统。通过协调多个节点,MR可以对目标进行协同探测,显著增强了目标检测和跟踪能力,从而克服单个雷达系统的固有瓶颈^[9-10]。尽管组网雷达在波束控制、多站协作、节点资源分配等领域已经取得了一定的理论成果^[10-13],但这些研究都是基于理想的状态,并未考虑现实蜂窝通信系统资源有限、BS相互干扰(MI)等复杂约束情况,因此其模型和方法不能直接用于网络化通信感知一体化的分析。另一种使用多站增益来实现广域覆盖的系统是无线传感器网络(WSNs)。目前,针对MSN的协作式感知,业界已经开发了一系列的方法。这些方法考虑了诸如传感器电池寿命、通信带宽等限制因素^[14-16]。然而,与WSNs中广泛采用被动传感器不同的是,ISAC系统中BS主动地传输和接收电磁波,因此站点之间会发生相互干扰。因此适用于WSNs的性能指标和约束条件等也不能直接用于ISAC系统的建模和优化。

近年来,为了提升ISAC系统的感知性能,有学者提出一种使用多个BSs进行网络化协作感知的架构^[1,4]。该架构采用多基站协同处理感知数据,并提出了基于超分辨率的参数估计算法,显著提升了位置和速度估计的精度。当前研究中,协作感知领域仍存在诸多亟待深入探讨的问题。特别是在低空智联网应用场景下,以下关键问题尚未得到充分解决:首先,在感知功能的立体覆盖实现方面缺乏系统性研究;其次,对于站点间干扰的定性描述与定量分析尚未建立完善的评估体系;再次,在优化资源分配等关键领域的研究深度不足。尤为重要的是,目前仍缺乏能够普适性地描述和刻画协作感知节点间复杂协作关系的数学模型,这极大地制约了该领域的理论发展和实践应用。

针对现有研究的局限性,本研究提出了一种面向通信感知一体化的网络立体覆盖模型与方法。首先,以主动天线单元(AAU)作为感知的最小调控单元(即感知节点),给出了其覆盖空间、合作和干扰的数学描述。其次,构建了一个有向图(DG)模型,将多个节点之间的收发(T-R)关系表示为图中的有向边,从而有效地描绘了随资源分配(RA)变化而变化的节点间的协作与干扰关系。再次,基于DG模型,提出了一个RA优化问题,通过求解该问题,可以在满

足立体式覆盖需求和感知BS间干扰约束的情况下,最小化ISAC系统的成本。通过理论分析和实验证据,证实了本文方法的可行性和有效性,为网络化通信感知一体化的应用提供了理论参考。

1 单/双节点模型

1.1 单节点单程覆盖模型

考虑到在通信系统中,每个AAU可以独立配置其使用的资源和功率,因此本文中我们将每个AAU视为独立的ISAC节点。定义三维空间中的点集为 \mathcal{P} ,其每个点 $\mathbf{p} \in \mathcal{P}$ 具有坐标 $[x, y, z]^T$ 。在此空间中,有 N 个节点,它们分别位于 $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_N$ 。为了描述复杂的地物环境对感知信号的影响,定义一个环境密度函数 $\Omega(\mathbf{p})$,以表示位于 \mathbf{p} 处的光线损耗率,函数取值在 $0 \sim 1$ 。这样,从第 n 个感知节点到 \mathbf{p} 处的能量可由公式(1)计算:

$$A_n(\mathbf{p}) = \beta_n(\mathbf{p}) \prod_{\kappa \in \vartheta(\mathbf{p}, \mathbf{q}_n)} \Omega(\mathbf{p}) \quad (1)$$

其中, $\vartheta(\mathbf{p}, \mathbf{q}_n)$ 是从 \mathbf{p} 到 \mathbf{q}_n 的直线, $\beta_n(\cdot)$ 是由于路径损耗导致的信号强度变化的比例系数:

$$\beta_n(\mathbf{p}) \propto \frac{\beta_n^0}{\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_n\|_2^2} \quad (2)$$

其中, $\beta_n^0 > 0$ 是第 n 个天线的最大发射增益, $\|\cdot\|_2$ 是向量的 l_2 范数。在公式(1)中当 $A_n(\mathbf{p}) > 0$ 时,表示点 \mathbf{p} 和第 n 个节点之间存在视距(LOS)路径。一般地,环境中的建筑物等物体的透射率几乎为0,如此,处于站点和建筑物连线后的区域将成为阴影区,无法被单个基站的感知信号照射到。

目前,ISAC系统一般使用全双工的AAU,其波束覆盖范围限制在其主瓣范围内,AAU感知范围的空间函数为:

$$B_n(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{p} \in \text{主瓣内} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

综上所述,考虑到传播损耗特性和感知范围的空间特性,第 n 个节点的单程感知覆盖区域可用集合的形式描述为:

$$\mathcal{J}_n = \left\{ \begin{array}{l} r_{\min} \leq \|\mathbf{p} - \mathbf{q}_n\|_2 \leq r_{\max} \\ A_n(\mathbf{p}) \cdot B_n(\mathbf{p}) > 0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

其中, r_{\min} 代表系统的近场盲区,与双工ISAC的抗自干扰能力有关^[4]; r_{\max} 代表最大预定义距离,与需要感知的能力有

关, 例如, 在低空监视场景中, 若需要监管的无人机雷达散射截面 (RCS) 为 0.01 m^2 , r_{\max} 可设置为 $900\sim 1\ 000 \text{ m}$ 。

1.2 双节点作用模型

本文中, 我们考虑的是一个协作感知系统, 其中的节点存在相互合作或相互干扰的一些情况。对于空间中的一个点 p , 如果其同时受到任意两个节点的影响, 那么该节点必须同时位于这两个站点的覆盖区域内, 并且到它们的距离之和必须小于 $2r_{\max}$ 。这样的话, 第 n 个基站和第 n' 个节点 (n 和 n' 可以是相同的) 的协作/干扰空间, 可用集合的数学形式描述为:

$$\mathcal{H}_n = \left\{ \begin{array}{l} 2r_{\min} \leq \|p - q_n\|_2 + \|p - q_{n'}\|_2 \leq 2r_{\max} \\ A_n(p) \cdot B_{n'}(p) > 0; A_{n'}(p) \cdot B_n(p) > 0 \end{array} \right\} \quad (5)$$

1.3 通感基站的工作模式

目前, 为了实现 ISAC 系统的组网, 我们需要设计多种候选感知资源。这些资源可复用移动信号处理中常用的技术, 如频率分集、时间分集、多普勒分集, 以及最近业界提出的波形分集。利用现有的信号处理方法对这些感知信号进行处理时, 我们可认为这些候选感知资源之间的干扰是忽略不计的, 且通信与感知之间的干扰可有效地消除^[5,17]。进一步地, 在网络化协作感知的系统中, ISAC 节点存在如下 3 种工作模式:

1) 发射, 节点从候选资源池中选择一种感知信号, 并将其发射出去。

2) 接收, 节点接收感知信号并对其覆盖区域内目标的位置进行解算。

3) 离线, 节点不参与协作感知。

图 1 是多个节点之间的协作/干扰关系示意图, 同一站点下的 ISAC 感知节点可以独立地在上述 3 种模式下运行。在图 1 中, 节点 1 和节点 5 分别发送资源 1 和资源 2, 而节点 8 接收并处理来自节点 1 和节点 5 的感知信号。此时, 如果节点 1 和节点 5 使用相同的资源, 节点 8 可能会遇到干扰, 因此无法准确地解算出目标的位置。从上述的例子可知, 为了优化 ISAC 系统性能, 节点的工作模式、所发射/接收的资源, 以及发射节点的功率必须进行联合优化。

2 ISAC 节点关系的图模型

为了有效地描述网络化协作感知的复杂干扰和合作关系, 本节中我们提出一种 DG 模型及一种资源优化的方法。

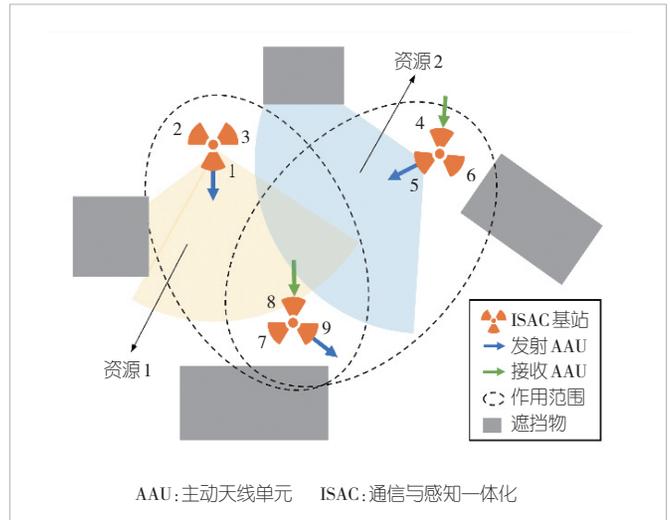


图1 多节点间的协作/干扰关系

2.1 DG 模型

对于一个协作感知 ISAC 网络, 令 \mathcal{V} 代表其所有节点构成的集合。考虑到所有节点将在 3 种工作模式之间切换, 按照二分图的思想, \mathcal{V} 可以进一步复制成两个虚拟集, 即发射集 (\mathcal{V}_p) 和接收集 (\mathcal{V}_q)。此时, \mathcal{V}_p 中的顶点仅连接到 \mathcal{V}_q 中的顶点, 而同一虚拟集中的顶点之间没有连接。这描述了信号只能由发射节点到接收节点这一物理限制。这样的话, 若两个节点之间存在 T-R 关系, 则它们将相连; 否则, 则不存在连接。这种 ISAC 系统中存在的收发关系, 可以使用有向图来描述。在本文中, 用于描述图中连接关系的连接矩阵 $G \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 定义为:

$$G_{n,n'} = \begin{cases} 1 & n \text{ 发射, } n' \text{ 节点接收} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

图 2 为有向图的构建和资源优化的过程。虚拟节点集抽象地描述了 T-R 协作的特征, 即对于协作的 T-R 节点, 感知信号从发射节点发出, 由接收节点来接收和处理。这一有向的关系, 可利用非对称性的有向图邻接矩阵 G 来描述。 G 的每一行代表节点作为发射节点时与协作节点的 T-R 关系, 而每一列代表节点作为接收节点时与协作节点的 T-R 关系。如此, 协作式 ISAC 资源分配的问题就转化为一个有向图的构建问题。该有向图会进一步转化为 ISAC 系统中的多节点资源分配方案。

此外, 如果一个节点仅作为接收节点, 它必不会作为发射节点。此时, 该节点所在行元素的和为 0。此外, 接收节点所能连接的发射节点数必小于资源池中资源的数量 M ; 否则, 接收端将会受到多站信号的干扰, 无法从信号中解算目标的位置。因此, 可进一步引入对 G 的一组约束:

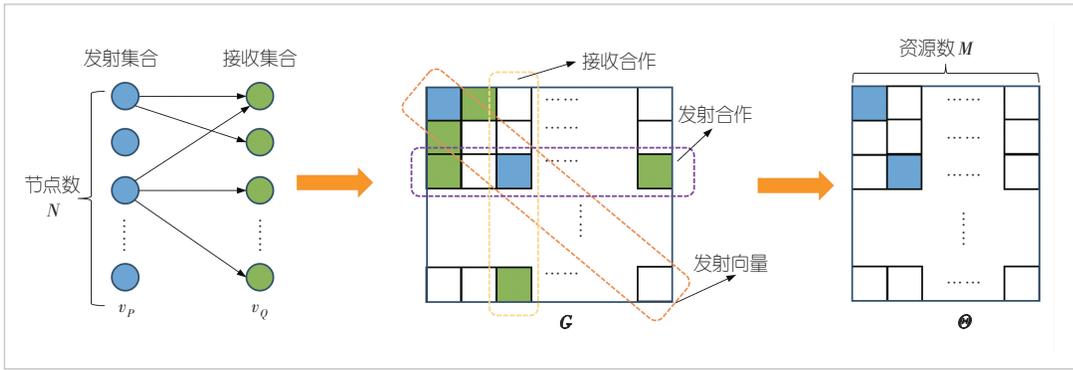


图2 有向图的构建和对应的资源优化过程

考虑到在目标的探测过程中，信号传播是一个双程过程，即感知信号先照射到目标，随后目标又将感知信号反射回接收端^[1]。因此，最终目标接收到的信号损耗应为发射损耗和接收信号损耗的乘积。令场景中所需检测的目标

$$\begin{aligned} \sum_{n'=1}^N G_{n,n'} &\leq NG_{n,n} \\ \sum_{n=1}^N G_{n,n'} &\leq M \end{aligned} \quad (7)$$

进一步地，基站一般采用离散形式来控制站点的发射功率。因此本文中，我们假设所有节点具有 L 级功率控制，并定义一个额外的功率向量 $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ ，其元素 $w_n = \{1, 2, \dots, L\}$ 代表第 n 个节点的发射功率的级别。

2.2 网络化协同感知的关键指标

为了优化资源分配，我们需要在上述图模型的基础上，进一步定义 ISAC 系统的性能指标。第一个性能度量是系统的成本。一般地，现有的通信系统中，ISAC 节点的覆盖范围、服务用户数量等相互独立，因此我们可假设不同节点的资源成本是相互独立的，那么感知系统的总成本可以表示为：

$$\Lambda(\mathbf{G}, \mathbf{w}) = \sum_{n=1}^N w_n \sum_{n'=1}^N C_{n,n'} \cdot G_{n,n'} = \langle \mathbf{C}, [\mathbf{G} \odot (\mathbf{w} \circ \mathbf{1}_N^T)] \rangle \quad (8)$$

其中， $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 是资源的成本矩阵，运算符 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示矩阵/张量的爱因斯坦积，运算符 \circ 和 \odot 分别代表向量的外积和矩阵/张量的按元素点积； $\mathbf{1}_N$ 表示大小为 $N \times 1$ 的全1向量。 \mathbf{C} 对角线上的值明显大于非对角线上的值，这是因为发射感知信号涉及能量消耗、空中接口资源开销、对通信业务的影响等问题。公式 (8) 表明，发射能量越大，对能量的消耗和对系统的影响越大，因此成本也越高。

接下来，为了描述通感网络的性能，我们引入描述感知性能的度量。为了减少计算负荷，我们将空间离散化为 I 个离散空间网格。令第 n 个节点的覆盖向量为 $\mathbf{j}_n \in \mathbb{R}^{I \times 1}$ ，其中第 i 个元素可以表示为：

$$j_{n,i} = \begin{cases} 1 & p_i \in \mathcal{J}_n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

RCS 归一化为 1，并对发射的能量进行归一化。那么，令第 n 和 n' 节点相互合作/干扰区域内接收到的能量的向量为 $\mathbf{h}_{n,n'}$ ，其第 i 个元素则为：

$$h_{n,n',i} = \begin{cases} \frac{\beta_n(\mathbf{p}_i) \cdot \beta_{n'}(\mathbf{p}_i)}{L^2} & p_i \in \mathcal{H}_{n,n'} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

在实际应用中，ISAC 服务的使用方更重视其在关键空间 (KS) 中对目标的检测和定位能力。这些 KS 包括但不限于办公楼宇、园区仓库等，对感知和覆盖有着硬性要求。参考公式 (9) 中基站覆盖向量的定义，我们可定义关键区域 (KA) 向量：

$$k_{n,i} = \begin{cases} 1 & p_i \in \text{KS} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

每一对 T-R 对都独立地对数据进行处理，并由此解算目标的位置。多个节点之间相互独立，因此多个节点对于空间中某处的感知能力，是多个 T-R 对的叠加。例如，在空间中的某处，若一个 T-R 能达到目标检测、定位的需求，则只需要一个节点进行协同覆盖；反之，则需要多个节点。由上述分析可知，ISAC 系统在全空间的总覆盖能力就是多个 T-R 对的组合，这样覆盖能力的向量 $\xi \in \mathbb{R}^{I \times 1}$ 可以描述为：

$$\xi = \sum_{n=1}^N w_n \sum_{n'=1}^N \mathbf{h}_{n,n'} \cdot G_{n,n'} \quad (12)$$

ISAC 多站协同组网感知系统与传统组网雷达的核心区别在于：在基站数量庞大且感知资源有限的情况下，系统需要规避 T-R 对之间的干扰。这种干扰会显著降低 ISAC 系统的服务性能，导致虚警、误报和漏检等问题。由图 1 可知，当两个发射节点的覆盖区域存在重叠且使用相同的资源时，就会产生干扰。因此，两站之间的干扰可定义为站点重叠区域干扰的总和。在干扰矩阵 $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 中，描述第 n 和 n' 节点

之间可能存在的干扰元素可表示为:

$$D_{n,n'} = \begin{cases} 1 & \text{if } 1_l^T(\mathbf{h}_{n,n'} \odot \mathbf{k}) > \gamma L^2 \ \& \ n \neq n' \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13),$$

其中, $\gamma > 0$ 是干扰水平的阈值。基于上述干扰矩阵, ISAC 系统的干扰水平 (IL) 可定义为, 整个 ISAC 系统中所有发射节点的干扰的和, 其计算方式为:

$$Y(\mathbf{G}) = \sum_{n=1}^N \sum_{n' \neq n}^N G_{n,n} D_{n,n'} G_{n',n'} \quad (14).$$

考虑这样一种情况, 当两个发射站存在覆盖区域 (即合作/互扰集合非空时) 时, 就必须采用不同的资源来避让干扰。由第 1.3 节中的分析可知, 基于现有感知资源分集理论设计的资源池中, 不同资源之间的影响可以完全消除。然而, 资源池中资源的数量是有限的, 因此发射站点的冲突最多可以避让 M 次。因此, 整个 ISAC 系统的 IL 的值必小于 M , 即:

$$Y(\mathbf{G}) \leq M \quad (15).$$

ISAC 系统的性能受有向图结构的影响而动态变化。因此, ISAC 资源优化的目标在于联合优化有向图邻接矩阵 \mathbf{G} 和发射权重 \mathbf{w} , 在确保系统满足 KS 覆盖要求和干扰水平约束的前提下, 实现系统构建成本的最小化。这样, 资源分配的优化问题可以表述为:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{G}, \mathbf{w}} \quad & \Lambda(\mathbf{G}, \mathbf{w}) + \lambda \mathbf{1}_l^T \boldsymbol{\sigma} \\ \text{s.t.} \quad & \xi \geq \tilde{\boldsymbol{\mu}} - \boldsymbol{\sigma} \\ & Y(\mathbf{G}) \leq M \\ & \mathbf{G} \mathbf{1}_N \leq N \cdot \text{diag}(\mathbf{G}) \\ & \mathbf{1}_N^T \mathbf{G} \leq M \\ & \sigma_i > 0 \quad i \in [1, l] \\ & w_n \in \{1, 2, \dots, L\} \quad n \in [1, N] \\ & G_{n,n'} \in \{0, 1\} \quad n \in [1, N] \quad n' \in [1, N] \end{aligned} \quad (16),$$

其中, $\tilde{\boldsymbol{\mu}} \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ 表示空间覆盖水平 (CL) 的向量, 例如, 在 KS 区域内, 覆盖能力需求可设为一个常数 μ_0 , 而在 KS 区域外, 覆盖能力需求值为 0。diag(\cdot) 表示取矩阵的对角线元素的操作。 $\boldsymbol{\sigma} \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ 表示的是一个辅助松弛变量, $\lambda > 0$ 表示权重。引入该变量是为了应对实际场景中多站区域普遍存在的遮挡问题, 从而增强优化模型的鲁棒性。对于那些现有 ISAC 基站无法覆盖的部分, 可考虑引入新的 ISAC 站点或是其他低空监测手段进行补盲。

2.3 资源配置策略

值得注意的是, 公式 (16) 主要针对有向图中 T-R 的配

置关系进行优化, 并未直接涉及资源分配结果的优化。根据图 2 所示的流程图, 需将邻接矩阵 \mathbf{G} 转换为系统可直接使用的资源分配结果。假设 $\boldsymbol{\Theta} = [\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dots, \boldsymbol{\theta}_M] \in \mathbb{R}^{N \times M}$ 代表发射节点资源分配的矩阵, $\boldsymbol{\theta}_m \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 是第 m 个资源的分配状况。若 $\Theta_{n,m}$ 为 1, 则表示第 n 个节点正在使用第 m 个资源; 否则, 意味着节点没有使用该资源。感知资源分配的原则是: 让每种资源下的干扰都为 0, 且期望 ISAC 中所使用的资源的种类最少。这样可以通过引入辅助变量 $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{M \times 1}$, 将最终的资源分配问题表述为:

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\Theta}} \quad & \mathbf{1}_M^T \mathbf{z} \\ \text{s.t.} \quad & \boldsymbol{\theta}_m^T \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_m = 0 \\ & \mathbf{1}_N^T \boldsymbol{\theta}_m \leq Nz \\ & z_m \in \{0, 1\}, \quad m \in [1, M] \\ & \Theta_{n,m} \in \{0, 1\}, \quad m \in [1, M] \quad n \in [1, N] \end{aligned} \quad (17).$$

除了直接优化上述问题外, 还可以使用迭代的方法进行资源分配, 如算法 1 所示。由于公式 (7) 中的 IL 约束, 无论是基于优化的方法还是基于上述方法, 都能确保存在可行解。

算法 1 基于迭代的 DG 图资源配给算法

输入: 资源数 M , 有向邻接矩阵 \mathbf{G}

输出: 资源分配矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$

初始化 $\boldsymbol{\Theta} = \mathbf{0}_{N \times M}$

For $n = 1 : N$ do

 If $G_{n,n'} = 1$ Then

 For $m = 1 : M$ Do

$\hat{\boldsymbol{\Theta}} \leftarrow \boldsymbol{\Theta}$

$\hat{\Theta}_{n,m} = 1$

 If $\hat{\boldsymbol{\theta}}_m^T \mathbf{D} \hat{\boldsymbol{\theta}}_m = 0$ Then

$\boldsymbol{\Theta} \leftarrow \hat{\boldsymbol{\Theta}}$

 Break

 End

 End

 End

3 数值仿真与产业落地

本节通过仿真实验, 验证了所提方法可有效解决低空智能网络应用中的协作通信感知立体覆盖问题。为了便于描述参数设置, 除非另有说明, 否则所有网格点在 KS 中都遵循相同的 CL 要求。本文中我们所建立仿真环境的配置如下:

1) 城市环境: 基于文献[18]中城市仿真方法, 构建随

机生成的三维城市环境模型。区域大小为1 500 m × 1 500 m，区域高度在30 m ~ 100 m，网格点大小为1。建筑物占用率 α 设为0.25，高度因子为25。

2) 基站配置：根据实际通信系统的配置，一个通信站将3个AAU作为一组，固定安装在同一根机械抱杆上，每个AAU在方位角上彼此相隔120°。这些抱杆会随机分布在建筑物顶部，为降低通信系统中的干扰，抱杆之间的距离不会小于最小距离 d_0 。其余参数如表1所示。

3) KS设置：本文定义KS由若干个不重叠的立方体组成，且立方体的高度与整个仿真区域相同。KS在地面区域的投影为KA。

本文所提的仿真忽略了树木、路灯等较小尺寸遮挡物可能带来的额外效应。

3.1 方法验证

图3 (a) 是随机生成建筑物的三维视图；图3 (b) 显示了所产生的地面环境的俯视图、BS的分布和KA位置。其中绿色点表示BS的位置，红色矩形区域表示关键区域的子

表1 仿真参数

参数	值
资源数 M	6
抱杆间最小距离 d_0/m	350
主瓣俯仰角范围/(°)	-10~45
主瓣方位角范围/(°)	-60~60
r_{min}/m	30
r_{max}/m	800
抱杆高度/m	5
干扰阈值 γ	10^{-2}
最大单位幅度	2.5×10^5
功率等级数	5

区域；图3 (c) 展示了描述ISAC节点之间干扰关系的矩阵。

为了直观显示KS区域的覆盖性能，对于KA中的2D点 (x, y) ，其投影值可表示为：

$$\text{Proj}(x, y) = \frac{\int \rho(x, y, z) dz}{\int [1 - \Omega(x, y, z)] dz} \quad (18),$$

其中， $\rho(\cdot)$ 是将点的覆盖状态转换的函数。如果点的CL大于或等于其覆盖要求，则其值为1，否则为0。在上述基础上，可将覆盖比率(CR)定义为：

$$\text{CR} = \frac{1}{I} \sum_{[x,y] \in KA} \text{Proj}(x, y) \quad (19).$$

作为对比，我们还考虑了3种基线方案：

1) 随机方案(Random) 执行发射和接收节点随机的选择，然后对这些发射节点进行随机资源分配。

2) 贪婪方案(Greedy) 根据KS的覆盖进行贪婪的资源分配，确保每种资源下的干扰均为0，系统的 $IL \leq M$ 。

3) 纯粹自发自收(PS) 方案，该方案仅考虑所有节点均为自发自收的情况，随后运用本文所提出的方法，对其进行优化与资源分配。

图4 (a) —图4 (d) 依次呈现了随机算法、贪婪算法、PS模式以及本文所提出DG算法的空间覆盖能力的二维映射。在面向低空智能网的无人机监视场景仿真设定中，KS内的CL要求 $\mu_0=2$ ，在关键区域之外，CL等级要求设定为0。节点成本从区间为[1,10]的均匀分布中随机采样。为确保对比的公平性，上述各算法在运行过程中均采用了相同的成本矩阵。从图4 (a) 可以看出，虽然随机方案的CR较高，但其无法满足KS中的IL性能约束，导致感知能力无法得到有效保障。贪婪算法的优化仿真结果如图4 (b) 所示。经观

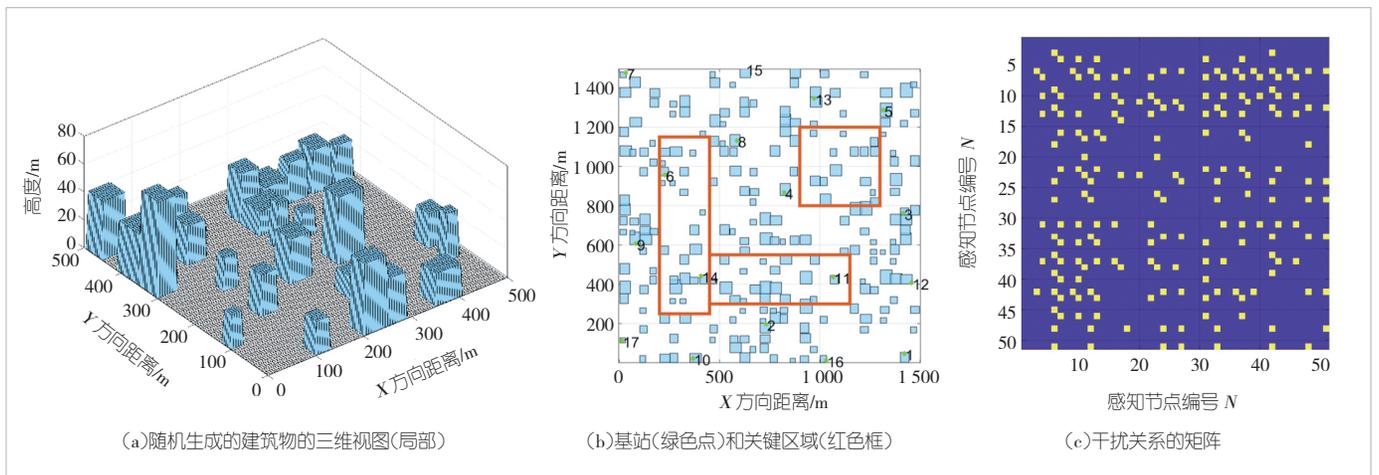


图3 仿真环境

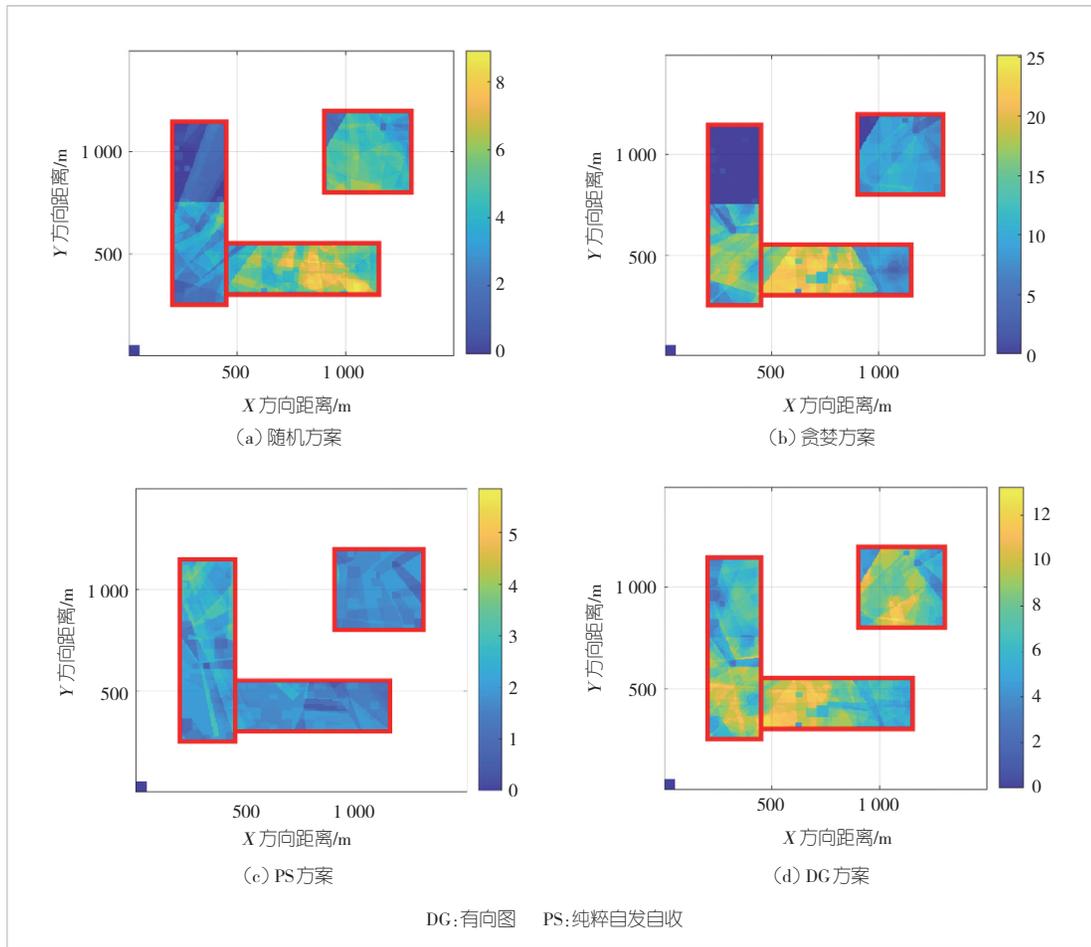


图4 不同方法的覆盖率结果比较

察发现，贪婪算法能够很好地满足IL约束条件，然而其CR却处于较低水平。

图4 (c) 展示了PS模式下的覆盖情况。该模式未采用收发节点间的协作机制，在给定的IL约束条件下，难以实现较高的覆盖水平。从物理机制来看，由于只有部分目标的反射能量能够被发射节点接收，因此在远离发射基站的区域，难以在满足发射功率约束的同时实现有效覆盖。图4 (d) 为所提出的DG方法得到的结果。可以看到，所提出的优化方法在满足KS区域干扰约束的同时，以最小成本实现了较高的覆盖率。这一优势主要得益于DG方法能够有效整合ISAC系统中的接收节点资源，从而显著提升了协同感知系统的性能。表2详细对比了在不同CL要求下，各类方法的覆盖率、干扰水平等关键指标。实验结果表明，与其他方法相比，所提出的DG方法在满足多样化覆盖需求方面展现出最优的成本效益和部署效率。

在图5中，我们清晰地看到了PS和DG方案下资源分配的具体结果。可以发现，PS模式想要达到所需的覆盖水平，

需要动用更多的发射BS。不仅如此，它还将所有可用资源消耗殆尽，这无疑极大地限制了在更大应用区域进行灵活资源调度的可能性。与之形成鲜明对比的是，本文所提出的方法，即便在资源有限的情况下，依然能够出色地实现高质量的立体式覆盖。

3.2 参数影响

在本小节，我们深入探讨了不同资源数量 M 与CL要求 μ_0 所产生的影响。为了检验这些参数的影响，我们执行了蒙特卡洛仿真。在此次仿真过程中，KA区域是随机生成的，且每个区域都包含3个子

区域，但总的面积维持在预设水平。针对每一个独特的参数组合，执行100次蒙特卡洛仿真，同时确保性能要求与系统参数和第3.1节中的设定保持一致。图6展示了在不同KA比例（即KA区域的面积和整个仿真区域面积的比值）下，CR与CL要求之间的关系。由图6可知，在所有情形下，随着

表2 不同覆盖需求下的仿真结果

$\mu_0=1$			
	随机方案	贪婪方案	纯粹有向图
CR	0.93	0.50	0.95
IL	253.46	0	0
Cost	453	150	35
$\mu_0=2$			
	随机方案	贪婪方案	纯粹有向图
CR	0.92	0.71	0.93
IL	314.23	0	0
Cost	807	288	72

CR: 覆盖比 IL: 干扰水平 μ : 覆盖能力需求

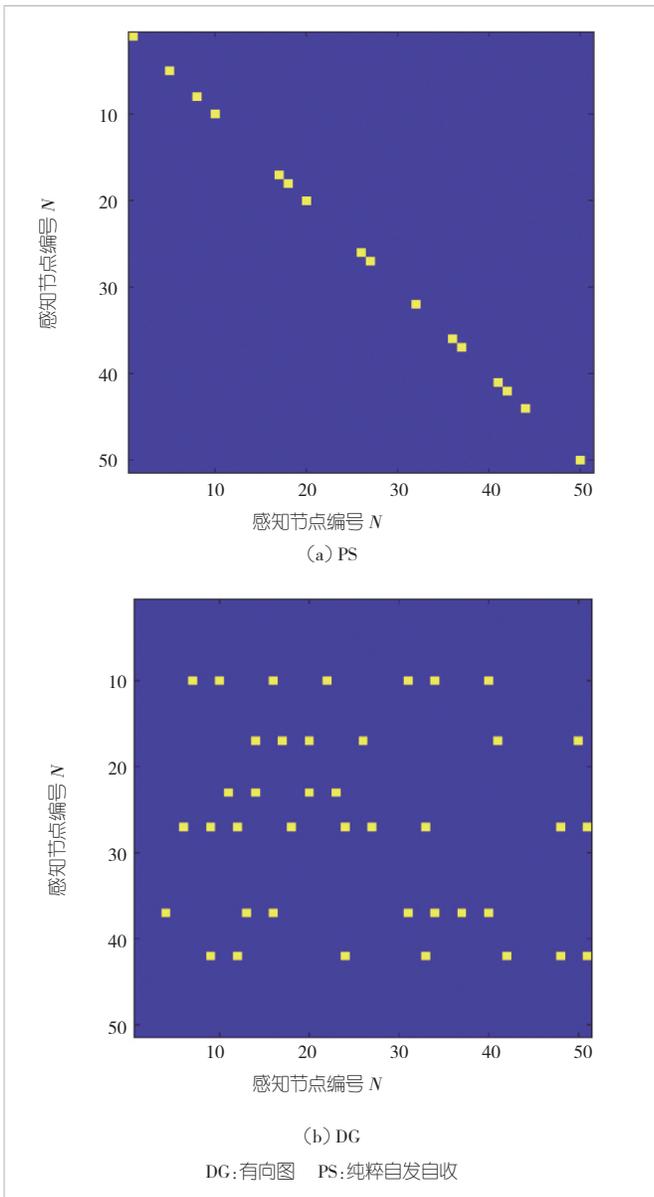


图5 不同方法邻接矩阵的比较

资源数量 M 逐渐增加, CR 也随之改善。然而, 当 M 超过特定阈值后, CR 的增益极为有限。这意味着, 尽管增加可用资源是满足 CL 要求的必要条件, 但由于环境因素的制约, 过量投入资源所带来的回报存在上限。此外, 对不同 KA 比率的结果进行比较后发现, 随着 KA 面积的扩大, 性能会出现一定程度的下滑。这是因为要满足在更大覆盖区域内的覆盖要求, 面临的挑战更为艰巨。

3.3 环境作用

广泛且多元的应用场景对感知能力有着不同的需求。为了全面满足这些需求, ISAC 系统将部署在各类环境中, 包括城市区域、水面监测场景以及低空交通环境。这些环境的

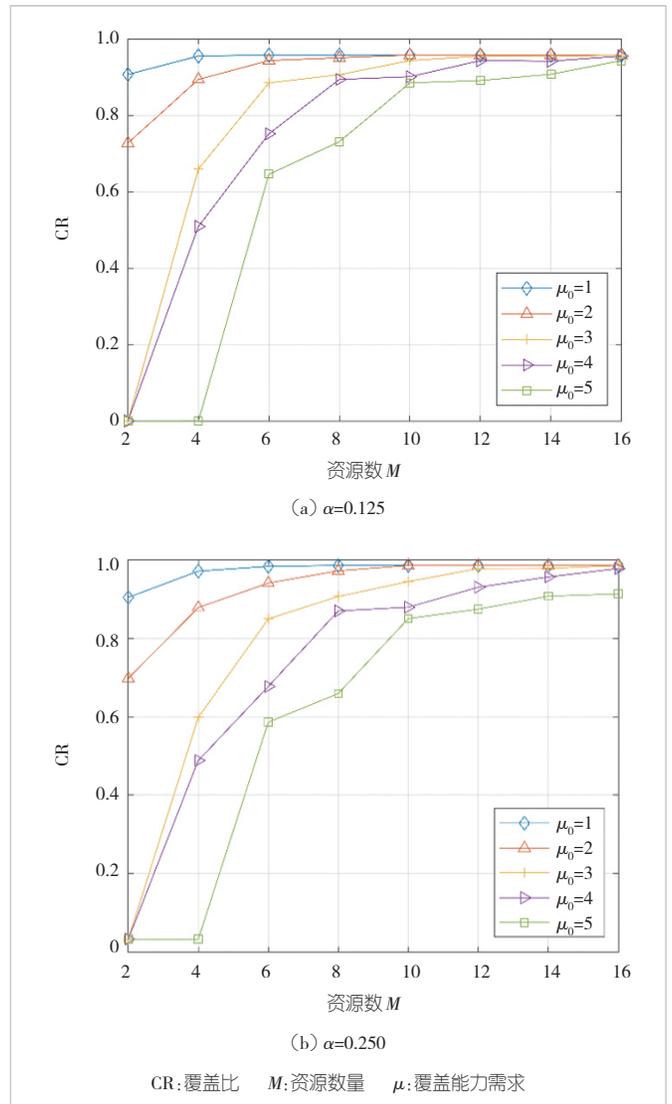


图6 不同建筑覆盖率下, 资源和覆盖率的关系

建筑密度各有不同, 从而导致不同的 LOS 覆盖条件。在本章节中, 为深入探究所提出的 DG 方法在多元环境下的适应能力, 参照过往研究思路, 我们选取了 3 种具有代表性的仿真设置, 分别为郊区、城市以及高密度城市环境^[18]。针对这 3 种设置所选用的各项参数, 已详细罗列于表 3 中。在本小节的研究里, 我们设定 $M=6$ 且 KS 内的 $\mu_0=2$ 。需要着重指出的是, 不同环境参数致使基站密度存在差异, 进而造成基站数量各不相同。因此, 为确保比较过程的公平性与客观性, 假定所有基站的成本均统一设定为 1。

图 7 清晰地展示了在不同的环境配置下、各异的环境条件下, 随着 r_{\max} 取值的不同, CR 相应的变化趋势。 r_{\max} 与节点的发射功率紧密相关, 在本实验中, 其计算方式依据表 1 所提供的数值, 通过对节点最大发射功率进行线性缩放得以

表3 城市环境参数

环境	郊区	城市	密集城区
占用比率	0.15	0.25	0.45
高度参数 γ	15	20	25
BS距离 d_0/m	500	350	250

BS:基站

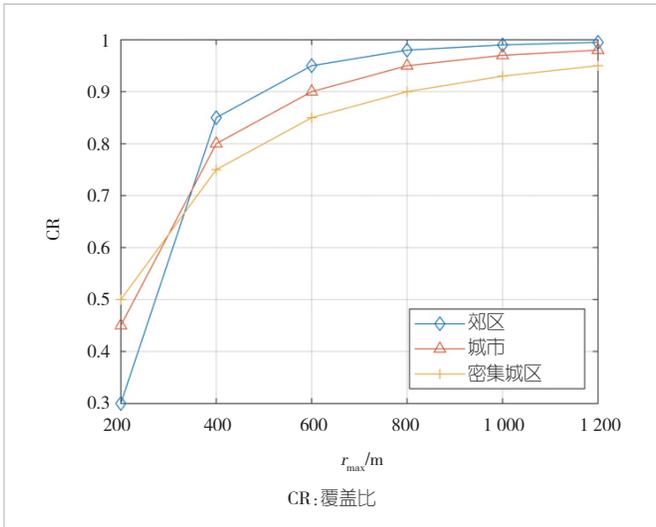


图7 不同距离下覆盖率的变化

确定。通过观察我们发现，在所有实验场景中，CR的覆盖性能均呈现出随着 r_{max} 增大而逐步改善的趋势。这背后的原理在于，单个节点的覆盖能力越强，对节点间合作的依赖程度就越低，进而更易于满足IL约束。然而，需要注意的是，由于受到实际硬件性能以及环境辐射条件的限制，单节点的覆盖范围无法无限制地扩展。

3.4 产业应用

本文提出的算法，已成功应用于本单位低空5G-A通感

一体监管的产业实践。在这一实际案例中，运用本文算法对节点资源分配进行优化，实现了园区上空关键区域的立体式全面覆盖，有效提升了监管效能与覆盖质量。

图8为本单位园区及其周边环境。本研究区域为典型的半城市环境，地势平坦，空间结构复杂多样。所研究区域周边分布着高层居民住宅区、湿地公园、教育机构及高速公路等多种土地利用类型，形成了独特的半城市化景观特征。为打造应用标杆试点，前期本单位开展了详尽的勘测工作，为园区及其周边环境构建了三维地图。该地图以网格数据的形式，存储于单位自主研发的平台数据库中，以便后续更高效地利用与分析。

基于园区整体规划和供电等要素考量，拟在楼顶设置3个不同站址的4.9 GHz通信感知一体化基站。每个基站配备3个4.9 GHz大张角通感一体化AAU，其基本性能参数如表1所示。在构建标杆应用时，需根据相关规范对反射截面积为 0.01 m^2 的无人机（如大疆御3）进行探测与稳定跟踪。因此，本文将发现概率为0.8时的能量值作为归一化的单位覆盖数值。

如图9 (a) 所示，在园区附近的站点分布中，1—3号

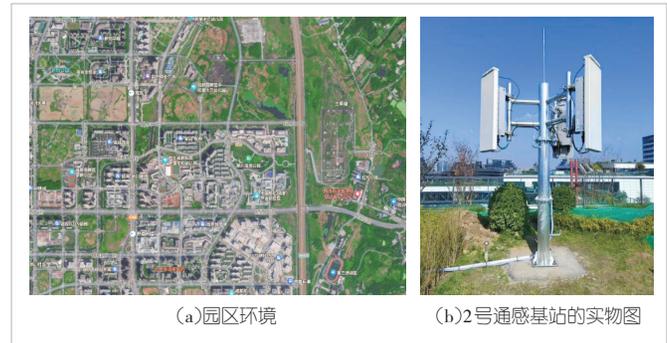


图8 园区环境和主动天线单元的实际部署图

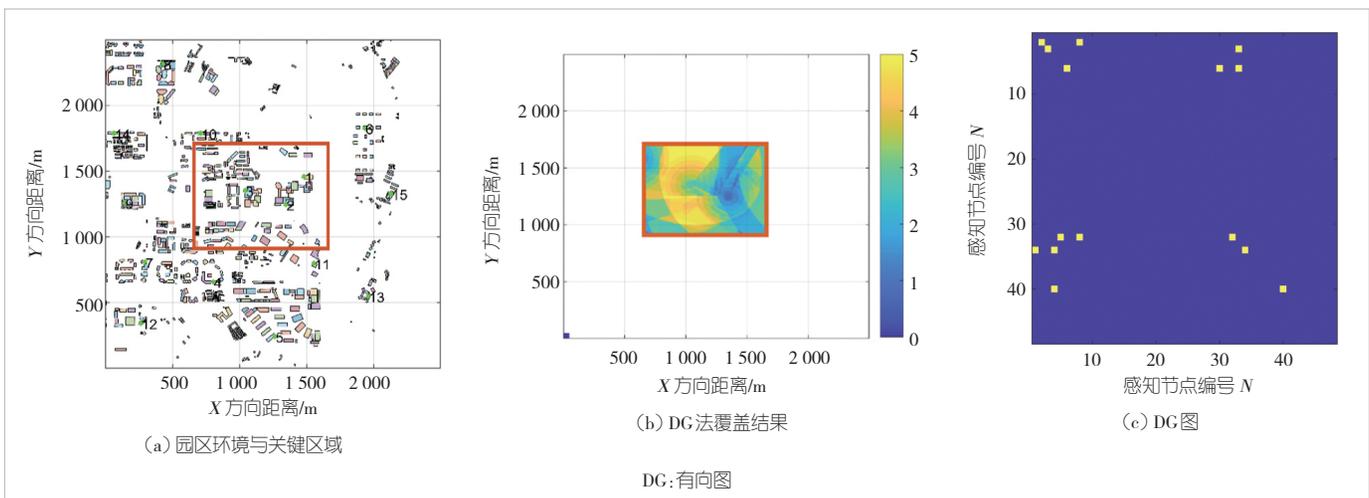


图9 园区单层防区通信感知一体化(ISAC)立体化覆盖的设计结果

基站为新建抱杆，其余的抱杆为仿真生成，最小的间距为400 m，其他设置与实验3.1一致。在低空监视场景中，仿真的CL要求 $\mu_0=1$ ，节点成本在[1,10]范围内均匀分布。由于本文算法在建模阶段对ISAC节点进行了高度抽象，实际应用时仅需根据3D地图、站点部署位置及天线安装方位，重新计算单站覆盖范围即可。

图9 (b) 展示了本文提出的DG法的二维映射结果。该方法实现了对目标区域的高效覆盖，覆盖率达0.98，且无任何干扰（干扰水平为0）。图9 (c) 呈现了算法有向图邻接矩阵的分布情况。基于优化后的有向图，采用2.4节所述方法即可完成资源分配。如图10所示，该图为部署完成后某次飞行测试中5G-A通感一体设备的测试结果，从图中可以清晰地观察到园区上空目标被稳定地探测和追踪。

未来园区周边将规划多层防护体系。如图11所示，除KS外，外围将设置警戒区域（即图中红蓝框之间的环形区域）。KS区域的CL需求值 $\mu_0=2$ ，警戒区域 $\mu_0=1$ ，其他区域 $\mu_0=0$ 。

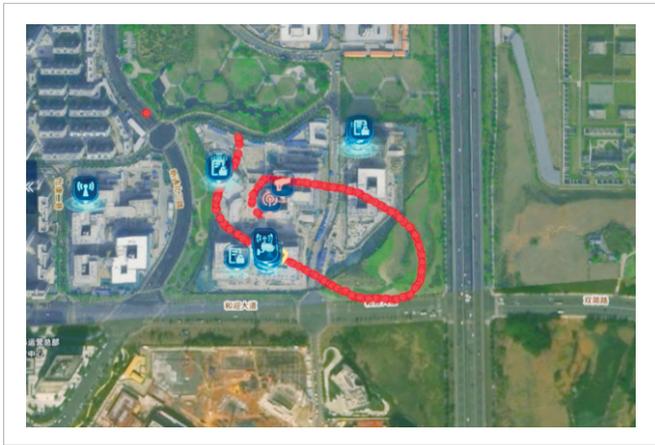


图10 园区无人机探测能力实测示意图

基于本文提出的资源优化方法，图11 (a) 展示了优化后的覆盖效果，图11 (b) 则呈现了相应的有向图结果。

研究表明，本文提出的方法能够有效支持大规模多层防区设计。该方法不仅在仿真测试中表现优异，在实际产业应用中也展现出良好的通信感知一体化性能，可实现立体式全覆盖，为低空经济的安全发展提供可靠的技术保障。

4 结束语

在低空经济这一新兴领域，通信感知一体化技术展现出巨大的应用潜力。然而，当前研究仍存在显著空白，特别是在网络化通信感知一体化系统的协同感知方面，其立体覆盖分析、性能评估及资源分配等关键问题尚未得到充分探索和解决。针对上述问题，本文提出了一种新型的DG模型，用于分析和优化ISAC系统中的资源分配。首先，我们引入了一种考虑环境约束和协作特性的感知节点覆盖描述方法。基于这一描述，我们将多个节点间的T-R关系建模为图中随资源分配动态变化的有向边。最终，基于该模型，我们构建了一个RA优化问题。通过求解该问题，能够在满足立体覆盖需求和干扰约束的条件下，以最小成本实现ISAC的立体覆盖。仿真结果表明，该方法在网络化通信感知一体化的立体覆盖分析与系统资源优化方面具有显著效果，为相关实践提供了理论依据。后续研究可着重考察本方法在复杂动态场景下的泛化能力与适应性，以进一步提升模型的实用价值与鲁棒性。

参考文献

- [1] LIU G Y, XI R Y, HAN Z X, et al. Cooperative sensing for 6G mobile cellular networks: Feasibility, performance, and field trial [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2024, 42 (10): 2863 - 2876. DOI: 10.1109/jsac.2024.3414596

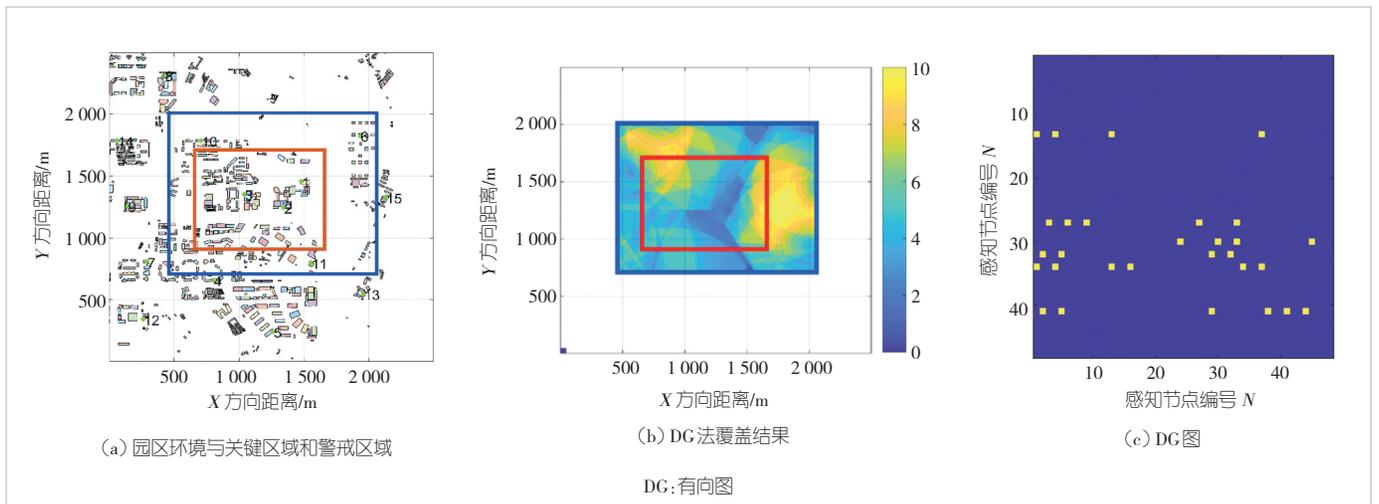


图11 园区多层防区通信感知一体化(ISAC)立体化覆盖的设计结果

- [2] HAN L, JIN J, WANG Q, et al. Trade-off for a novel integrated localization and communication system [EB/OL]. (2023-08-14) [2025-01-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10200308>
- [3] PUCCI L, PAOLINI E, GIORGETTI A. System-level analysis of joint sensing and communication based on 5G new radio [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(7): 2043 - 2055. DOI: 10.1109/jsac.2022.3155522
- [4] LIU F, CUI Y H, MASOUROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728 - 1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [5] 吕明, 陈昊, 丰光银, 等. 面向通信感知一体化的信号波形设计综述 [J]. 无线电通信技术, 2024, 50(3): 469-483. DOI:10.3969/j.issn.1003-3114.2024.03.008
- [6] WANG S X, DAI W, WANG H W, et al. Robust waveform design for integrated sensing and communication [J]. IEEE transactions on signal processing, 2024, 72: 3122 - 3138. DOI: 10.1109/TSP.2024.3410142
- [7] WU J L, LI L X, LIN W S, et al. ADMM-based low-PAPR OFDM waveform design for dual-functional radar-communication systems [C]//Proceedings of ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2024: 305 - 310. DOI: 10.1109/icc51166.2024.10622752
- [8] WANG X Y, FEI Z S, ZHANG J A, et al. Sensing-assisted secure uplink communications with full-duplex base station [J]. IEEE communications letters, 2021, 26(2): 249 - 253. DOI: 10.1109/lcomm.2021.3134258
- [9] JIN B, KUANG X F, PENG Y, et al. Distributed power allocation for cognitive tracking based on non-cooperative game in decentralized netted radar [J]. Digital signal processing, 2022, 126: 103499. DOI: 10.1016/j.dsp.2022.103499
- [10] HUANG J Y, XIE J W, YANG Z Q, et al. Joint resource allocation strategy for multiple target tracking in networked collocated MIMO radar system [EB/OL]. (2025-01-06) [2025-01-16]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10824973>
- [11] WANG Y, ZHOU T, YI W. Geometric optimization of distributed MIMO radar system for accurate localization in multiple key subareas [J]. Signal processing, 2022, 201: 108689. DOI: 10.1016/j.sigpro.2022.108689
- [12] YAN J K, LIU H W, PU W Q, et al. Joint beam selection and power allocation for multiple target tracking in netted colocated MIMO radar system [J]. IEEE transactions on signal processing, 64(24): 6417 - 6427. DOI: 10.1109/tsp.2016.2607147
- [13] LIU X H, XU Z H, DONG W, et al. Cognitive resource allocation for target tracking in location-aware radar networks [J]. IEEE signal processing letters, 2020, 27: 650 - 654. DOI: 10.1109/lsp.2020.2987208
- [14] ELHABYAN R, SHI W, ST-HILAIRE M. Coverage protocols for wireless sensor networks: review and future directions [J]. Journal of communications and networks, 2019, 21(1): 45 - 60. DOI: 10.1109/jcn.2019.000005
- [15] MA C, LIANG W, ZHENG M. Delay constrained relay node placement in wireless sensor networks: a subtree-and-mergence-based approach [J]. Mobile Networks and Applications, 2018, 23: 1220-1232
- [16] CHAUDHARY M, GOYAL N, BENSLIMANE A, et al. Underwater wireless sensor networks: enabling technologies for node deployment and data collection challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 10(4): 3500-3524. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3218766
- [17] XIE L, SONG S, ELDAR Y C, et al. Collaborative sensing in perceptive mobile networks: opportunities and challenges [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(1): 16-23. DOI: 10.1109/MWC.005.2200214
- [18] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments [EB/OL]. (2015-02-12) [2025-01-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7037248>
- [19] ZHANG Y D, LU J, ZHANG H T, et al. Experimental study on low-altitude UAV-to-ground propagation characteristics in campus environment [EB/OL]. (2013-12-01) [2025-01-10]. <https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.comnet.2023.110055>

作者简介



杨文彬, 中国移动(成都)产业研究院低空经济技术研发运营中心云平台系统主任设计师; 主要研究领域为现代信号处理及应用、统计机器学习等; 已发表论文10余篇。



邱裕鹤, 中国移动(成都)产业研究院低空经济技术研发运营中心云平台系统总设计师; 主要研究领域为网联无人机、低空运营监管和服务等; 拥有发明专利10余项。



苏郁, 中国移动(成都)产业研究院院长、低空经济技术研发运营中心总设计师, 并担任GSMA无人机工作组主席; 主要研究领域为低空智联技术体系及应用等; 获得2024年中国通信学会科学技术奖一等奖。