

# 异构视频传感器网络目标全视角覆盖估计模型

刘志敏<sup>1</sup>, 欧阳章东<sup>1</sup>, 王田<sup>2</sup>, 刘树昆<sup>3</sup>

(1. 湖南第一师范学院数学与计算科学学院, 湖南长沙 410205; 2. 华侨大学计算机科学与技术学院, 福建厦门 361021;  
3. 湖南女子学院信息科学与工程学院, 湖南长沙 410004)

**摘要:** 覆盖是评价视频传感器网络对监测区域感知质量的重要指标. 与传统的覆盖问题不同, 随着目标的移动, 全视角覆盖需要从任意方向捕捉到目标的有效正面, 其覆盖估计问题也更加复杂. 目前, 大量的研究工作主要假设同构节点随机部署在监测区域内以实现全视角覆盖, 本文研究异构视频传感器网络全视角覆盖估计问题, 为消除边界效应, 提出了扩展监测区域及最大探测区域的概论, 并推导出目标全视角覆盖估计模型, 通过实验对场景仿真值及模型理论值进行比较分析, 结果表明它们之间的平均绝对覆盖误差基本保持在 6.5% 以内.

**关键词:** 视频传感器网络; 覆盖估计; 全视角覆盖; 节点预测

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)01-0077-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20191339

## Full-View Coverage Estimation in Heterogeneous Visual Sensor Networks

LIU Zhi-min<sup>1</sup>, OUYANG Zhang-dong<sup>1</sup>, WANG Tian<sup>2</sup>, LIU Shu-kun<sup>3</sup>

(1. College of Mathematics and Computational Science, Hunan First Normal University, Changsha, Hunan 410205, China;  
2. College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;  
3. College of Information Science and Enigneering, Hunan Women's University, Changsha, Hunan 410004, China)

**Abstract:** Coverage is an important metric for evaluating the sensing quality of visual sensor networks (VSNs). Unlike traditional coverage issues, full-view coverage requires to capture target's effective face from any direction, and its coverage estimation issue is more complicated. At present, most of literatures assume that a great number of homogeneous visual sensors are randomly scattered in the monitoring area to achieve full-view. This paper studies the full-view estimation problem in heterogeneous VSNs. In order to eliminate the boundary effect, the concepts of extended monitoring area and maximum detection area are introduced. To evaluate the performance of the proposed full-view estimation expression, several simulation experiments are conducted to validate the theoretical results. The results show that the mean absolute coverage error between the theoretical values and the experimental values is controlled less than 6.5%.

**Key words:** heterogeneous visual sensor network; coverage estimation; full view coverage; node prediction

## 1 引言

目前, 视频传感器网络在下一代智能医疗监控、智慧交通、智能室内监控、反恐监测及智能灾害预警等方面的应用越来越广泛<sup>[1-3]</sup>. 与传统的全向感知传感器网络不同, 视频传感器网络具有实时智能处理、自适应调整感知方向(旋转改变感知方向)、识别及跟踪目标等特点<sup>[4]</sup>. 在某些特定的应用环境中(如智慧城市安全、反恐监控等), 如何实现目标的有效正面图像被实时有效地

捕捉显得十分重要. 由于目标的移动方向具有随机可变性, 其正面朝向也是动态变化的, 视频传感器节点(本文简称节点)需从任意可能方向捕捉目标的有效正面图像. 与传统的覆盖不同, 不管目标往任何方向移动, 全视角(全视域)覆盖可确保节点捕捉目标的有效正面以便于目标识别及跟踪, 如图 1 所示.

近年来, 视频传感器网络全视角覆盖问题引起了研究者的广泛关注. Wang 等人<sup>[5,6]</sup>首次提出了视频传感器网络全视角覆盖的概念, 并推导了目标及区域被全视角

覆盖的充要条件;同时,研究了基于等边三角形部署的同构视频传感器网络全视角覆盖估计问题,但并未考虑边界效应及网络异构性. Wang 等人<sup>[7]</sup>分析了同构视频传感器网络全视角栅栏覆盖问题,将目标区域划分为不同的子区域,每个子区域由相同的节点覆盖,利用子区域及其相邻子区域构造带权图,将问题抽象成最短路径问题;此外,还研究了最少节点全视角栅栏覆盖的确定性部署策略. 马华东等人<sup>[8]</sup>研究了同构视频传感器网络的最少节点全视角覆盖栅栏覆盖问题,提出将目标区域划分为全视角及非全视角区域以构造带权图;最后,利用 Dijkstra 算法求出最小全视角栅栏覆盖集. Yang 等人<sup>[9]</sup>提出了一种调整节点感知方向的分布式算法以构造全视角栅栏覆盖. Hu 等人<sup>[10]</sup>研究了移动异构视频传感器网络全区域全视角覆盖的临界感知半径模型,但无法适用于特定初始全视角覆盖率下的节点估计,且未考虑边界效应. 文献<sup>[11]</sup>提出一种新的分布式算法来增强同构视频传感器网络的全视角覆盖率. He 等人<sup>[12]</sup>研究了视频传感器网络的最少节点全视角覆盖问题,并将区域全视角问题简化为目标全视角问题,分别提出了集中式和分布式贪心算法构造最小覆盖集以确保区域的全视角覆盖. 文献<sup>[13]</sup>研究了视频传感器网络全视角覆盖生命周期最大化问题. Li 等人<sup>[14]</sup>研究了视频传感器网络 k 全视角覆盖问题,提出了一种基于等边三角形的 k 全视角覆盖集构造算法. Yu 等人<sup>[15]</sup>提出了局部面视角栅栏覆盖问题,并推导了确定性部署下的面视角覆盖估计模型.

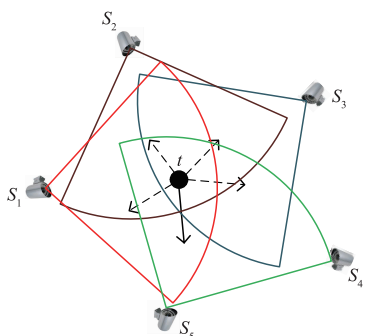


图1 全视角覆盖应用场景模型(实线箭头代表目标 $t$ 当前正面朝向,虚线箭头代表目标正面的其它可能朝向)

本文首次研究异构视频传感器网络目标全视角覆盖估计问题,主要贡献如下:(1)提出了扩展监测区域及最大探测区域的概念;(2)推导出异构视频传感器网络全视角覆盖模型;(3)详细分析了目标全视角覆盖估计模型的准确性.

## 2 场景模型与相关定义定理

### 2.1 感知模型

用四元组  $\langle s, r, \alpha, f \rangle$  表示节点的感知模型,如图2所示,其中  $s$  表示节点位置坐标信息,  $r$  表示节点感知

半径,  $f$  为节点感知方向(即扇形感知区域的角平分线向量),  $\alpha$  为感知视角. 扇形区域为节点的感知区域.

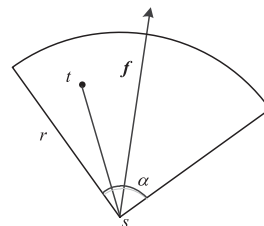


图2 节点感知模型

### 2.2 场景模型

大量异构节点随机均匀部署在监测区域  $R$  以对其中的目标实现全视角覆盖,如图3所示,  $|R| = L \times L$  表示监测区域大小,  $L$  为监测区域边长. 当大量目标随机分布在  $R$  内时,部分目标会位于监测区域的边界,从而导致无法对所有目标实现全视角覆盖(即存在边界效应). 为简化问题及消除边界效应,现对监测区域进行扩展(称之为扩展监测区域  $eR$ ),用  $|eR| = (L + 2 \sum_i^u r_i/u)^2$  表示. 因此,本文假设所有异构节点随机部署在扩展监测区域  $eR$  内以对监测区域  $R$  中的目标实现全视角覆盖.

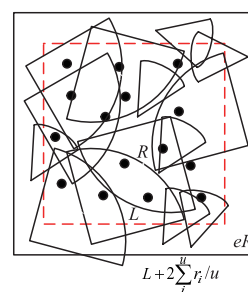


图3 场景模型

本文用集合  $T = \{t_1, \dots, t_M\}$  表示监测区域  $R$  内的随机目标,  $M$  表示所有目标的数目;用集合  $S = \{G_1, \dots, G_U\}$  表示所有类型异构节点,其中,  $G_i = \{s_{i1}, \dots, s_{iN_i}\}$ ,  $N_i = \omega_i N$  为  $G_i$  类节点数目,  $N$  为所有异构节点总数,可知  $0 < \omega_i < 1$ , 且  $\sum_i^u \omega_i = 1$ ;用  $r_i$  和  $\alpha_i$  分别表示  $G_i$  类节点的感知半径及感知视角,可知  $r_i \neq r_j, \alpha_i \neq \alpha_j, i \neq j$ .

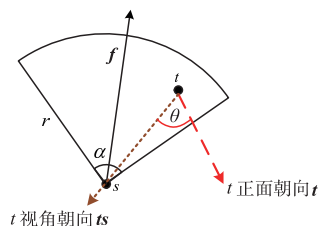
### 2.3 相关定义定理

#### 定义1 $\theta$ -覆盖

如图4所示,当目标  $t$  被节点所覆盖,且其正面朝向  $t$  与其视角朝向  $ts$  之间的夹角不大于  $\theta$ , 其中,  $\theta \in (0, \pi/2]$  为有效角,则称目标  $t$  被节点  $s$  实现了  $\theta$ -覆盖,即满足以下条件:

(1)  $|st| < r$ , 其中  $|st|$  表示目标  $t$  到节点的距离.

(2)  $\partial(ts, f) < \alpha/2$ , 表示向量  $ts$  与向量  $f$  之间的夹角不大于  $\alpha/2$ .

图4  $\theta$ -覆盖

(3)  $\partial(\mathbf{ts}, \mathbf{t}) \leq \theta$ , 表示向量  $\mathbf{ts}$  与正面朝向向量  $\mathbf{t}$  之间的夹角不大于  $\theta$ .

### 定义 2 目标全视角覆盖

目标  $t$  被全视角覆盖, 当且仅当对于  $t$  的任意正面朝向  $\mathbf{t}$  (随着目标移动方向的改变, 其正面朝向也随之改变), 都至少存在一个节点  $s$ , 使得  $t$  被  $s$  所覆盖且  $\partial(\mathbf{ts}, \mathbf{t}) \leq \theta$ , 即对于目标  $t$  的任意正面朝向, 均至少存在一个节点  $s$  对其实现了  $\theta$ -覆盖. 如果监测区域内的任意目标  $t \in T$  均被全视角覆盖, 则称监测区域被全视角覆盖.

### 定义 3 探测区域

目标  $t$  的探测区域  $D(t)$  定义为以  $t$  为圆心, 以节点感知半径  $r$  为半径的圆, 即  $|D(t)| = \pi r^2$ , 如图 5 所示. 针对不同类型节点, 目标探测区域也不相同.

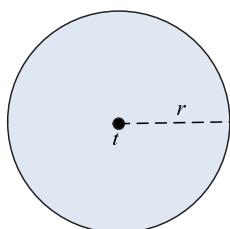


图5 探测区域

### 定义 4 最大探测区域

目标  $t$  的最大探测区域定义为以  $t$  为圆心, 最大节点半径为半径的圆, 即  $D(t)_{\max} = \max \{D(t)_i\}$ , 其中,  $D(t)_i$  为目标  $t$  相对于第  $G_i$  类节点的探测区域.

### 定义 5 圆序列向量组

对于监测区域  $R$  内的任意目标  $t$ , 圆序列  $CL(t)$  定义为最大探测区域  $D(t)_{\max}$  内所有覆盖目标  $t$  的节点沿着以  $t$  为中心点按顺时针或者逆时针的方向向量序列. 如图 6 所示, 目标  $t$  的一个逆时针圆序列向量组  $CL(t) = \{\mathbf{ts}_1, \mathbf{ts}_3, \mathbf{ts}_6, \mathbf{ts}_7, \mathbf{ts}_5, \mathbf{ts}_4, \mathbf{ts}_2\}$ .

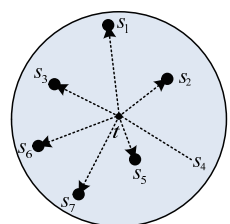


图6 圆序列向量组

### 定理 1 全视角判断定理

目标  $t$  被全视角覆盖, 当且仅当目标  $t$  的圆序列向量  $CL(t) = \{\mathbf{ts}_{v_1}, \mathbf{ts}_{v_2}, \dots, \mathbf{ts}_{v_k}\}$  中的任意相邻向量之间的夹角小于或者等于 2 倍有效角  $\theta$ , 即  $\partial(\mathbf{ts}_{v_i}, \mathbf{ts}_{v_{i+1}}) \leq 2\theta$ ,  $1 \leq i \leq k, v_{k+1} = v_1$ .

### 2.3 主要变量

为了更好地描述问题, 以下为本文所用的主要符号说明, 见表 1.

表 1 符号说明

符号	符号说明
$R$	监测区域
$eR$	扩展监测区域
$T = \{t_1, \dots, t_M\}$	目标集合, $M$ 为目标数目
$N$	所有节点的数目
$U$	异构节点类型数
$N_i = \omega_i N$	$G_i$ 类节点的数目
$G_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iN_i}\}$	$G_i$ 类节点集合
$S = \{G_1, G_2, \dots, G_U\}$	所有节点集合
$D(t)_i$	目标 $t$ 相对于 $G_i$ 类节点的探测区域
$CL(t)$	目标 $t$ 的 $D(t)_{\max}$ 中的圆序列向量
$r_i$	$G_i$ 类节点感知半径
$\alpha_i$	$G_i$ 类节点感知视角
$\theta$	有效角
$L$	监测区域边长

## 3 异构视频传感器网络目标全视角覆盖估计模型

虽然文献[5,10]对全视角覆盖模型进行了相关研究, 但其并未考虑边界效应、且无法直接用于特定初始全视角覆盖率下的节点估计. 本小节将对异构传感器网络目标全视角覆盖估计模型进行详细推导.

用  $e_i$  表示监测区域内的目标  $t \in T$  被  $G_i$  类节点覆盖的事件, 即目标  $t$  位于  $G_i$  类节点感知区域内的概率, 此类事件的概率可表示为:

$$\begin{aligned} p(e_i) &= p(G_i \text{ 类节点位于 } D(t)_i \text{ 内}) \\ &\quad \times p(G_i \text{ 类节点感知区域朝向 } t) \\ &= \frac{\pi r_i^2}{|eR|} \times \frac{\alpha_i}{2\pi} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\frac{\pi r_i^2}{|eR|}$  表示  $G_i$  类节点位于目标  $t$  的探测区域内的概率,  $|eR| = (L + 2 \sum_i r_i/u)^2$  为  $eR$  的面积;  $\frac{\alpha_i}{2\pi}$  表示  $G_i$  类节点的感知区域朝向目标  $t$  的概率.

用  $c_i^j$  表示监测区域内的目标  $t \in T$  正好被  $j$  个  $G_i$  类节点覆盖的事件, 此事件服从二项分布  $j \sim B(N_i,$

$p(e_i)$ ), 可知此类事件的概率可表示为:

$$p(c_i^j) = \binom{N_i}{j} (p(e_i))^j (1-p(e_i))^{N_i-j} \quad (2)$$

**推论 1** 当大量节点随机部署在扩展监测区域  $eR$  时,  $p(c_i^j)$  近似服从强度为  $\lambda_i |D(t)_i| q_i$  的泊松分布  $P(j, \lambda_i | D(t)_i | q_i)$ .

$$\text{其中 } \lambda_i = \frac{N_i}{eR}, |D(t)_i| = \pi r_i^2, q_i = \frac{\alpha_i}{2\pi}; \text{ 即 } \lim_{N_i \rightarrow \infty} p(c_i^j) \\ \cong e^{-\lambda_i |D(t)_i| q_i} \frac{(\lambda_i |D(t)_i| q_i)^j}{j!}.$$

用  $B_i^k$  表示监测区域内的目标  $t$  正好被  $k = \sum_{i=1}^u N_i = \sum_{i=1}^u \omega_i N$  个异构节点共同覆盖的事件, 根据式(1)及式(2), 可知此事件的概率可表示为:

$$p(B_i^k) = \sum_{j_1+\dots+j_u=k} p(c_1^{j_1}) p(c_2^{j_2}) \dots p(c_u^{j_u}) \quad (3)$$

**推论 2** 假设  $P(j, q) = e^{-q} \times \frac{(q)^j}{j!}$ , 其中  $j$  为正整数, 则可知: 对于正整数  $k = j_1 + \dots + j_u$ , 均有  $\sum_{j_1+\dots+j_u=k} P(j_1, q_1) \dots P(j_u, q_u) = P(k, q_1 + \dots + q_u)$ .

**推论 3** 当随机部署在扩展监测区域  $eR$  内的所有类型的节点数量均较大时,  $p(B_i^k)$  近似服务泊松分布  $P(k, \sum_{i=1}^u \lambda_i | D(t)_i | q_i)$ .

**结论** 针对本文所研究的场景, 大量异构节点随机部署在扩展监测区域  $eR$  中, 用  $E_i$  表示任意目标  $t \in T$  被全视角覆盖的事件, 根据定理 1 及以上推论可知, 此事件的概率(即目标全视角覆盖率模型)为:

$$P_f = p(E_i) = \sum_{k=\lceil \pi/\theta \rceil}^N p(B_i^k) p(C_k) \quad (4)$$

其中,  $\lceil \pi/\theta \rceil$  表示目标  $t \in T$  的最大探测区域  $D(t)_{\max}$  中至少包含的异构节点数目.  $C_h$  表示  $h$  个节点所形成的圆序列向量  $CL(t)$  中任意两个相邻向量之间的夹角小于或者等于  $2\theta$  的事件, 根据文献[5]可知此事件的概率为:

$$p(C_h) = \sum_{j=0}^{\lceil \pi/\theta \rceil} \binom{h}{j} (-1)^j \left(1 - \frac{j\theta}{\pi}\right)^{h-1} \quad (5)$$

根据推论 3 及式(4)对式(5)进行展开可得:

$$p(E_i) = \sum_{k=\lceil \pi/\theta \rceil}^N p(B_i^k) p(C_k) \\ \cong \sum_{k=\lceil \pi/\theta \rceil}^N \left( P(k, \sum_{i=1}^u \lambda_i | D(t)_i | q_i) \right) p(C_k) \\ = \sum_{k=\lceil \pi/\theta \rceil}^N \left\{ e^{-\sum_{i=1}^u \lambda_i |D(t)_i| q_i} \frac{(\sum_{i=1}^u \lambda_i |D(t)_i| q_i)^k}{k!} \right. \\ \left. \sum_{j=0}^{\lceil \pi/\theta \rceil} \binom{h}{j} (-1)^j \left(1 - \frac{j\theta}{\pi}\right)^{h-1} \right\}$$

其中,  $N = \sum_{i=1}^u N_i = \sum_{i=1}^u \omega_i N$  表示异构节点的总数目. 此模型被称之为异构视频传感器网络目标全视角覆盖估计模型(Heterogeneous Full-view Coverage Control Model, HFCM)

**例 1** 假设大量数量相等的  $G_1$  和  $G_2$  节点随机部署在扩展监测区域以对监测区域内的 40 个目标实现全视角覆盖. 假设监测区域大小为  $R = 100\text{m} \times 100\text{m}$ , 有效角  $\theta = \pi/3$ ,  $G_1$  和  $G_2$  节点的相关参数分别为  $r_1 = 15\text{m}$ ,  $\alpha_1 = 2\pi/3$  和  $r_2 = 7.5\text{m}$ ,  $\alpha_2 = \pi/3$ , 则可知扩展监测区域为  $eR = 122.5\text{m} \times 122.5\text{m}$ . 为保证初始部署时, 监测区域  $R$  内的目标以较高的概率(0.99)被全视角覆盖, 根据结论 1 可计算得出大概需要至少部署 1023 个  $G_1$  类节点及 1023 个  $G_2$  类节点.

## 4 仿真与性能评价

本节运用 Matlab7.0 对实际场景进行仿真, 利用定理 1 及定义 5 计算场景目标全视角覆盖率. 通过一系列仿真实验验证结论 1 中的模型理论值与实际场景仿真值的拟合情况. 由于节点及目标的部署具有随机性, 为获取更加准确的场景仿真结果, 每组场景分别反复运行  $m = 200$  次, 最后取其均值为最终的场景仿真结果 (Scenario Simulation Mean Result, SSMR), 即:

$$SSMR = \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_m}{m}$$

其中,  $C_i, 1 \leq i \leq m$  为每组场景第  $i$  次的仿真值.

本文采用平均绝对覆盖误差 (Mean Absolute Coverage Difference, MACD) [16] 来评价模型的准确性, 即:

$$MACD = \frac{|\Delta_1| + |\Delta_2| + \dots + |\Delta_m|}{m}$$

其中,  $|\Delta_i| = |C_i - P_f|, 1 \leq i \leq m$  为每组场景中第  $i$  次的仿真值与模型理论值的绝对误差.

为更加清晰地刻画异构视频传感器网络的异构性及简化实验, 本文只对 2 种异构网络 ( $u = 2$  及  $u = 3$ ) 进行仿真分析, 并假设各类异构节点的规模均相等, 同时定义异构比例  $T_2, T_3, 0 < T_2, T_3 \leq 1$ . 假设  $G_1$  类节点的感知半径为  $r_1$ 、感知视角为  $\alpha_1$ , 则  $G_2$  类节点的感知半径为  $T_2 r_1$ 、感知视角为  $T_2 \alpha_1$ ;  $G_3$  类节点的感知半径为  $T_3 r_1$ 、感知视角为  $T_3 \alpha_1$ . 基础实验参数如表 2 所示.

表 2 基础实验参数

参数名称	参数取值
监测区域边长 $L$	100m
目标数目 $M$	40
异构比例 $T_2$	0.8
异构比例 $T_3$	0.6
有效角 $\theta$	[30, 45, 60] 或 [30, 40, 50, 60]

## 4.1 节点数目的影响

### 4.1.1 $U=2$ 异构网络

$G_1$ 、 $G_2$  两类节点随机部署在扩展监测区域  $eR$  中,  $G_1$  类节点的感知半径及感知视角分别设置为  $r_1 = 10\text{m}$ ,  $\alpha_1 = 2\pi/3$ ;  $G_2$  类节点的相关参数为  $r_2 = T_2 r_1$ ,  $\alpha_2 = T_2 \alpha_1$ . 从图 7(a) 变化曲线可知, 目标全视角覆盖率随节点规模的不断增大而增大. 当节点规模一定时, 随着有效角  $\theta$  的增加, 目标全视角覆盖率不断增大. 当节点规模较小时, 目标全视角覆盖率较小, 这是由于节点规模越小, 监测区域中被全视角覆盖的目标数目较少. 当节点规模较大时, 此时为密集部署, 大多数目标均被全视角覆盖.

从图 7(b) 曲线可知, 平均绝对覆盖误差基本保持在 6.5% 之内, 表明模型理论值与场景仿真值拟合度较好. 在节点规模较小时, 平均绝对覆盖误差相对较小, 这是因为当节点规模较小时, 全视角覆盖率较低, 产生误差的机会便会较小. 从整个曲线的趋势可知, 当节点规模达到一定数目(2700 左右)后, 随着节点规模的增加, 平均绝对覆盖误差逐步均呈现递减的趋势, 这是由于节点规模较大时, 所有目标被近似完全视角覆盖.

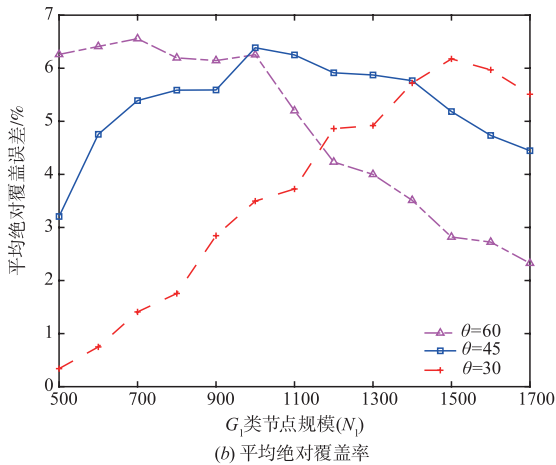
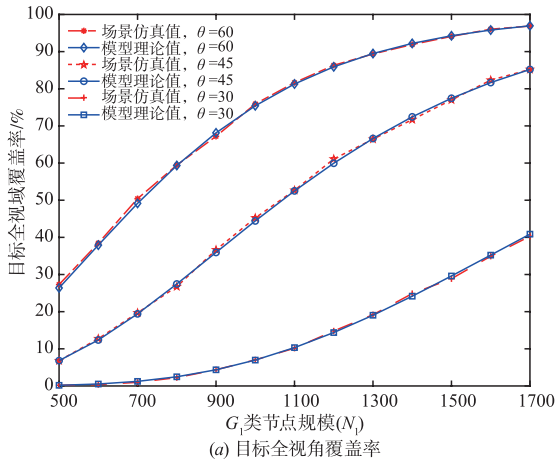


图7 节点规模对理论值及仿真值的影响,  $U=2$

### 4.1.2 $U=3$ 异构网络

$G_1$  类节点的感知半径及感知视角分别设置为  $r_1 = 10\text{m}$ ,  $\alpha_1 = 2\pi/3$ ; 由表 2 可知  $G_2$  及  $G_3$  类节点的相关参数. 与图 7 的分析类似, 从图 8 的变化曲线可知, 不管有效角  $\theta = \pi/6$ ,  $\theta = \pi/3$  或  $\theta = \pi/4$ , 场景仿真值与模型理论值的拟合度较好, 且它们的平均绝对覆盖误差均保持在 6.5% 之内. 当节点规模达到一定数目(2700 左右)后, 平均绝对覆盖误差率均呈现递减趋势, 说明场景仿真值与模型理论值之间的拟合度越来越好.

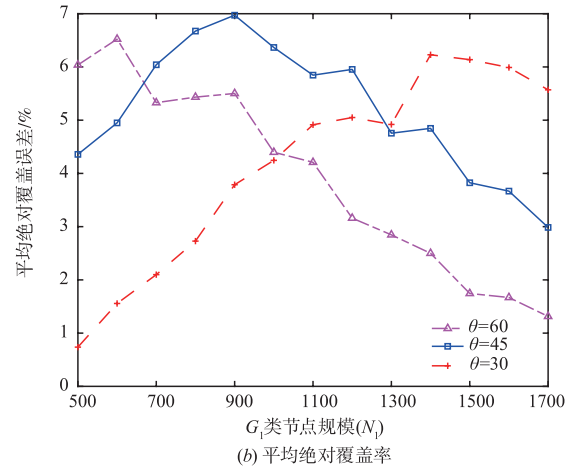
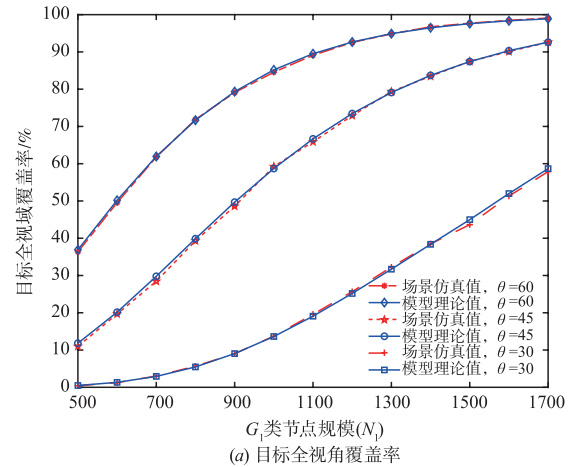
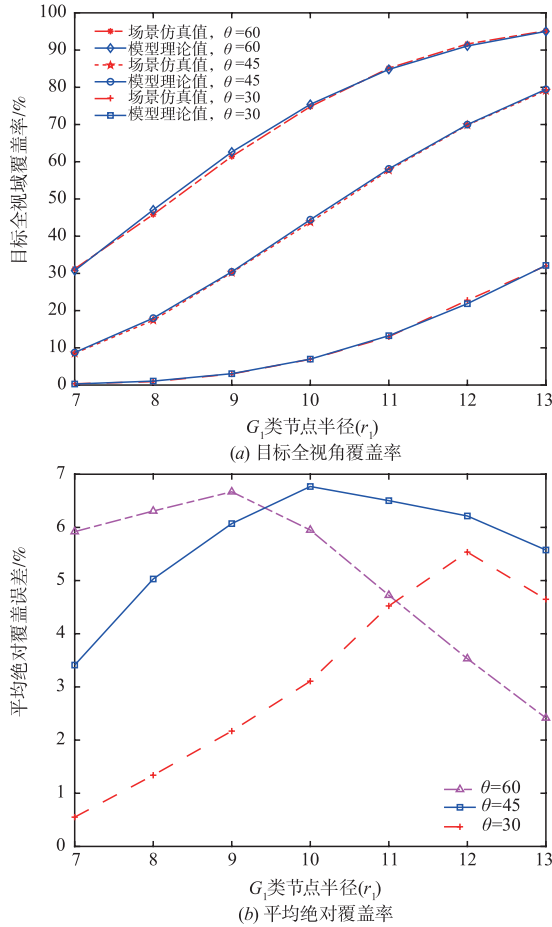


图8 节点规模对理论值及仿真值的影响,  $U=3$

## 4.2 节点半径的影响

### 4.2.1 $U=2$ 异构网络

$G_1$  类节点的规模及感知视角分别设置为  $N_1 = 1000$ ,  $\alpha_1 = 2\pi/3$ ;  $G_2$  类节点的相关参数为  $N_2 = 1000$ ,  $\alpha_2 = T_2 \alpha_1$ . 从图 9(a) 变化曲线可知, 目标全视角覆盖率随节点感知半径的不断增大而增大, 且增速较快. 当异构节点其它参数保持不变时, 节点感知半径越大, 说明节点的感知区域越大, 则可知目标被全视角感知的可能性越大. 有效角  $\theta$  越大, 说明目标被全视角覆盖所需的节点数目越少, 同样规模的节点可全视角覆盖更多的目标, 从而使得目标全视角覆盖率越大.

图9 节点半径对理论值及仿真值的影响,  $U=2$ 

从图 9(b) 曲线可知, 平均绝对覆盖误差基本保持在 6.5% 之内, 表明模型理论值与场景仿真值拟合度较好. 当节点半径较小时, 平均绝对覆盖误差相对较小, 这是因为当节点半径较小时, 节点的感知区域较小, 全视角覆盖率较低, 产生误差的机会便会较小. 当节点半径达到一定值(12m)后, 平均绝对覆盖误差呈现递减趋势.

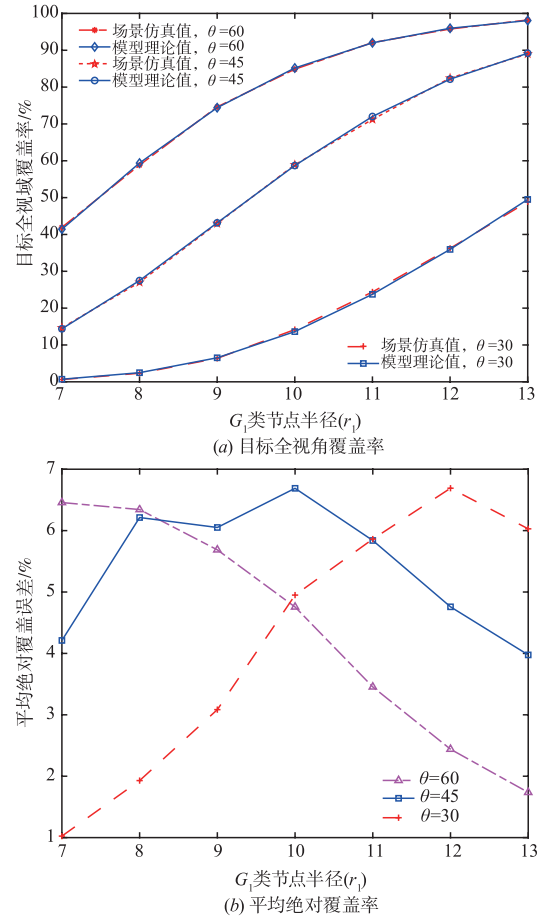
#### 4.2.2 $U=3$ 异构网络

$G_1$  类节点的规模及感知视角分别设置为  $N_1 = 1000, \alpha_1 = 2\pi/3$ ; 由表 2 可知  $G_2$  及  $G_3$  类节点的相关参数. 与图 8 的分析类似, 从图 10 的变化曲线可知, 随着节点感知半径的变化, 不管有效角  $\theta = \pi/6, \theta = \pi/3$  或  $\theta = \pi/4$ , 场景仿真值与模型理论值的拟合度较好, 且它们的平均绝对覆盖误差基本保持在 6.3% 之内.

### 4.3 节点感知视角的影响

#### 4.3.1 $U=2$ 异构网络

$G_1$  类节点的规模及感知半径分别设置为  $N_1 = 1000, r_1 = 10\text{m}$ ;  $G_2$  类节点的相关参数为  $N_2 = 1000, r_2 = T_2 r_1$ . 从图 11(a) 的变化曲线可知, 当异构节点其它参数保持不变时, 节点感知视角越大, 说明节点的感知区域越大, 则可知目标被全视角感知的可能性越大. 当感

图10 节点半径对理论值及仿真值的影响,  $U=3$ 

知视角很小或很大时, 目标全视角覆盖率近似 0 或近似完全全视角覆盖, 这与场景仿真值的变化曲线是一致的.

从图 11(b) 曲线可知, 平均绝对覆盖误差基本保持在 6.3% 之内, 说明模型理论值与场景仿真值拟合度较好. 当节点视角大于  $140^\circ$  时, 平均绝对覆盖误差呈现递减趋势.

#### 4.3.2 $U=3$ 异构网络

$G_1$  类节点的规模及感知视角分别设置为  $N_1 = 1000, r_1 = 10\text{m}$ ;  $G_2$  及  $G_3$  类节点的相关参数分别为  $N_2 = 1000, r_2 = T_2 r_1$  和  $N_3 = 1000, r_3 = T_3 r_1$ . 与图 11 的分析类似, 从图 12 的变化曲线可知, 随着节点感知视角的变化, 不管有效角  $\theta = \pi/6, \theta = \pi/3$  或  $\theta = \pi/4$ , 场景仿真值与模型理论值的拟合度较好, 且它们的平均绝对覆盖误差基本都保持在 6.5% 之内.

### 4.4 有效角的影响

$G_1$  类节点的规模及感知视角分别设置为  $N_1 = 1000, r_1 = 10\text{m}$ ;  $G_2$  及  $G_3$  类节点的相关参数分别为  $N_2 = 1000, r_2 = T_2 r_1, \alpha_2 = T_2 \alpha_1$  和  $N_3 = 1000, r_3 = T_3 r_1, \alpha_3 = T_2 \alpha_1$ . 从图 13 中可知, 随着有效角的增大, 目标全视角覆盖率不断增

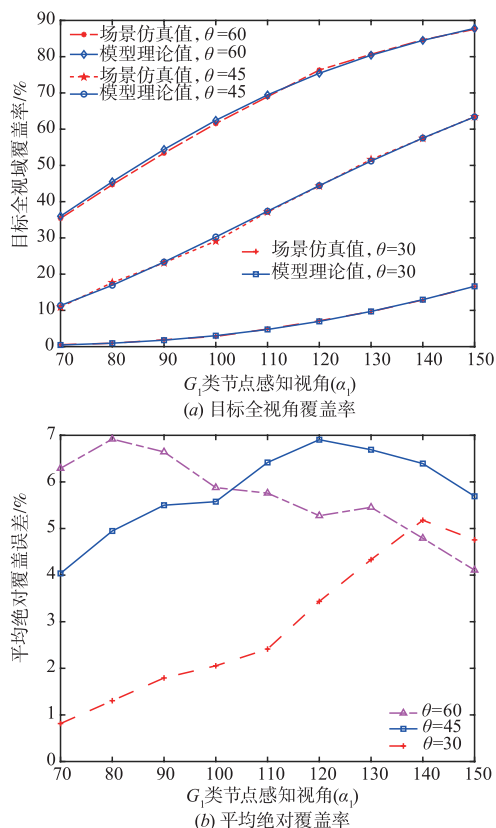


图11 感知视角对理论值及仿真值的影响,  $U=2$

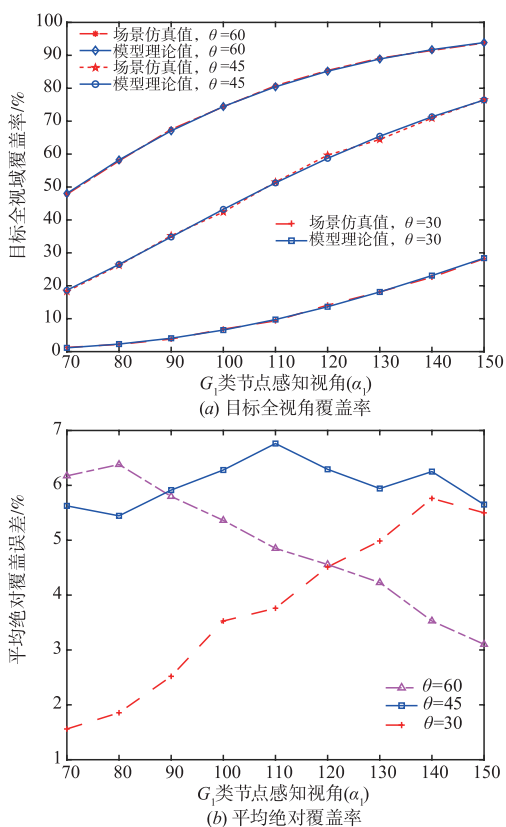


图12 感知视角对理论值及仿真值的影响,  $U=3$

大,这是由于有效角增大,说明形成全视角覆盖所需的节点数目相对较少,同等数目的节点可实现更高的全视角覆盖率;此外,从图中可知,模型理论值与场景仿真值拟合较好,平均绝对覆盖基本保持在6%以内.

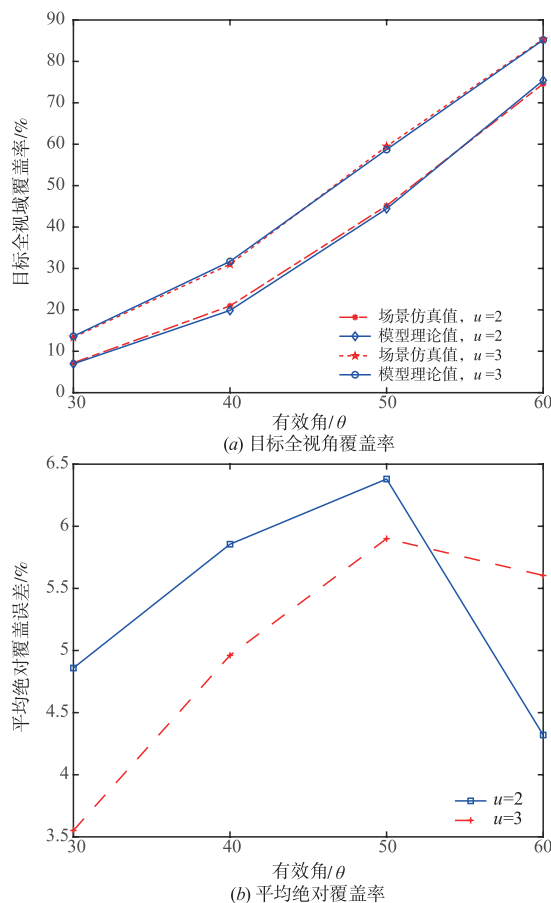


图13 有效角对理论值及仿真值的影响

## 5 总结

针对随机部署的异构视频传感器网络,本文研究了目标全视角覆盖估计问题,为消除异构部署的边界效应及实现所有目标均能被全视角覆盖,提出了扩展监测区域及最大探测区域的概论,并推导出了一种异构传感器网络全视角覆盖估计模型 HFCM,该模型反应了感知半径、节点密度、感知视角、有效角及监测区域边长与目标全视角覆盖率之间的关系.最后通过一系列的仿真实验验证了本文的目标全视角覆盖率估计模型与场景仿真值拟合度较好,可以有效地指导初始部署及估计异构节点数目.

本文仅仅研究了位置不可移动的异构视频传感器网络目标全视角覆盖估计问题,在有障碍物的情况下研究移动异构视频传感器网络全视角覆盖问题是下一步要研究的内容.

## 参考文献

- [1] B Cheng, L Cui, L W Jia, et al. Multiple region of interest coverage in camera sensor networks for tele-intensive care units [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(6): 2331 – 2341.
- [2] N Kumar, J H Lee, JJPC Rodrigues. Intelligent mobile video surveillance system as a Bayesian coalition game in vehicular sensor networks: learning automata approach [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 16(3): 1148 – 1161.
- [3] K R Konda, N Conci, F D Natale. Global coverage maximization in PTZ-camera networks based on visual quality assessment [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(16): 6318 – 6332.
- [4] 马华东, 陶丹. 多媒体传感器网络及其研究进展 [J]. 软件学报, 2006, 17(9): 2013 – 2028.  
Ma Hua-dong, Tao Dan. Multimedia sensor network and its research progresses [J]. Journal of Software, 2006, 17(9): 2013 – 2028. (in Chinese)
- [5] Y Wang, G H Cao. On full-view coverage in camera sensor networks [A]. INFOCOM [C]. USA: IEEE Press, 2011. 1781 – 1789.
- [6] Y Wang, G H Cao. Achieving full-view coverage in camera sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2013, 10(1): 1 – 31.
- [7] Y Wang, G H Cao. Barrier coverage in camera sensor networks [A]. MobiHoc [C]. USA: ACM Press, 2011. 12.
- [8] H D Ma, M Yang, D Li, et al. Minimum camera barrier coverage in wireless camera sensor networks [A]. INFOCOM [C]. USA: IEEE Press, 2012. 217 – 225.
- [9] R Yang, X Gao, F Wu, et al. Distributed algorithm for full-view barrier coverage with rotatable camera sensors [A]. GLOBECOM [C]. USA: IEEE Press, 2016. 1 – 6.
- [10] Y Hu, X Wang, X Gan. Critical sensing range for mobile heterogeneous camera sensor networks [A]. INFOCOM [C]. USA: IEEE Press, 2014. 970 – 978.
- [11] C Yang, W Zhu, J Liu, et al. Self-orienting the cameras for maximizing the view-coverage ratio in camera sensor networks [J]. Pervasive & Mobile Computing, 2015, 17(PA): 102 – 121.
- [12] S He, D H Shin, J Zhang, et al. Full-view area coverage in camera sensor networks: dimension reduction and near-optimal solutions [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7448 – 7461.
- [13] Q Zhang, S He, J Chen. Toward optimal orientation scheduling for full-view coverage in camera sensor networks [A]. GLOBECOM [C]. USA: IEEE Press, 2016. 1 – 6.
- [14] C Li, A Rosen, A G Bourgeois. On k full-view coverage algorithms in camera sensor networks [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer and Communications [C]. USA: IEEE Press, 2017.
- [15] Z Yu, F Yang, J Teng, et al. Local face-view barrier coverage in camera sensor networks [A]. INFOCOM [C]. USA: IEEE Press, 2015. 684 – 692.
- [16] 刘志敏, 贾维嘉, 王国军. 视频传感器网络边界部署 k-覆盖数量估计 [J]. 计算机学报, 2019, 42(2): 309 – 322.  
Liu Zhimin, Jia Weijia, Wang Guojun. K-coverage estimation in visual sensor networks based on boundary deployment [J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(2): 309 – 322. (in Chinese)

## 作者简介



刘志敏 男, 1983 年 7 月生于湖南郴州, 博士. 现为湖南第一师范学院讲师, 研究方向为无线视频传感网络、群智感知、雾计算.  
E-mail: zhiminl@qq.com



欧阳章东 (通讯作者) 男, 1981 年 1 月生于湖南郴州, 博士, 副教授. 现任湖南第一师范学院数计学院院长. 研究方向为图论及其算法.  
E-mail: oymath@163.com



王 田 男, 1982 年 2 月生于湖南汨罗, 博士. 现为华侨大学教授, 研究方向为传感网络、传感云、物联网、雾计算.  
E-mail: adamwt@163.com



刘树伟 男, 1980 年 11 月生于河北沧州, 博士. 现为湖南女子学院教授. 研究方向为云计算、虚拟化技术.  
E-mail: liu\_shukun@csu.edu.com