









$$P(\Omega_3) = \frac{S_{\Omega_3}}{S_{\Omega}} = \frac{4r(L-2r)}{L^2} \tag{7}$$

当节点位于内区域时,节点的感知区域全部落在目标区域内,将其视为无边界效应问题.可得内节点的可能感知区域面积期望值.

$$E(\Omega_1) = \pi r^2 \tag{8}$$

如图 4 所示,节点  $s(x,y)$  是边角节点,可得到此时节点  $s(x,y)$  的可能感知区域在目标区域内的面积  $C_{\Omega_2}$  为

$$C_{\Omega_2} = S_{oAsE} + S_{\Delta ABs} + S_{\Delta EDs} + S_{\widehat{BCD}} = xy + \frac{y\sqrt{r^2-y^2}}{2} + \frac{x\sqrt{r^2-x^2}}{2} + \left( \frac{\pi/2 + \arcsin(y/r) + \arcsin(x/r)}{2\pi} \right) \pi r^2 \tag{9}$$

因此,可以计算得到边角节点的可能感知区域面积期望值  $E(\Omega_2)$  为

$$E(\Omega_2) = \frac{1}{r^2} \int_0^r \int_0^r C_{\Omega_2} dx dy = \frac{1}{r^2} \int_0^r \left[ xy + \frac{y\sqrt{r^2-y^2}}{2} + \frac{x\sqrt{r^2-x^2}}{2} + \left( \frac{\pi/2 + \arcsin\left(\frac{y}{r}\right) + \arcsin\left(\frac{x}{r}\right)}{2} \right) r^2 \right] dx dy \tag{10}$$

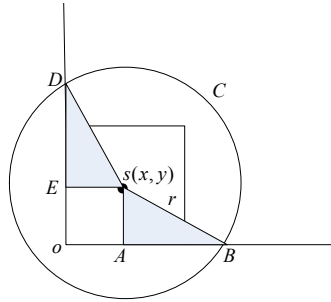


Fig.4 Possible sensing area of corner node

图 4 边角节点可能感知区域

如图 5 所示, $s_1(x,y)$ 和  $s_2(x,y)$ 均为边节点,当边节点落于边区域且与边区域左右边界距离小于  $r$  时,如图 5 中边节点  $s_1(x,y)$ .可得到此时节点  $s_1(x,y)$  的可能感知区域在目标区域内的面积  $C_{\Omega_3}^1$  为

$$\begin{aligned} C_{\Omega_3}^1 &= S_{\Delta_4 B_1 s_1} + S_{\Delta E_1 D_1 s_1} + S_{\widehat{A_1 s_1 E_1}} + S_{\widehat{B_1 C_1 D_1}} \\ &= y\sqrt{r^2-y^2} + x\sqrt{r^2-x^2} + \left( \frac{2\pi - 2\arccos(y/r) - 2\arccos(x/r)}{2\pi} \right) \pi r^2 \\ &= y\sqrt{r^2-y^2} + x\sqrt{r^2-x^2} + (\pi - \arccos(y/r) - \arccos(x/r))r^2 \end{aligned} \tag{11}$$

当边节点落于边区域且与边区域左右边界距离大于等于  $r$  时,如图 5 中边节点  $s_2(x,y)$ .可得此时节点  $s_2(x,y)$  的可能感知区域在目标区域内的面积  $C_{\Omega_3}^2$  :

$$C_{\Omega_3}^2 = \pi r^2 - (S_{\widehat{s_2 A_2 B_2 C_2}} - S_{\Delta A_2 s_2 C_2}) = \frac{1}{2} r^2 (2\pi - 2\arccos(y/r) + \sin(2\arccos(y/r))) \tag{12}$$

因此,可以计算得到边节点的可能感知区域面积期望值  $E(\Omega_3)$  为

$$E(\Omega_3) = \frac{1}{(L-2r)r} \left( 2 \int_0^r \int_0^r C_{\Omega_3}^1 dx dy + \int_r^{L-3r} \int_r^r C_{\Omega_3}^2 dx dy \right) \tag{13}$$

根据以上推理,当节点随机部署在目标区域内时,考虑到边界效应影响,目标区域中某个子区域被  $k$  个节点感知到的概率为

$$P[N(\Omega) = k] = e^{-\lambda \times E(S) \times P} \times \frac{(\lambda \times E(S) \times P)^k}{k!} \tag{14}$$

其中,  $E(S)=P(\Omega_1)E(\Omega_1)+P(\Omega_2)E(\Omega_2)+P(\Omega_3)E(\Omega_3)$ ,  $P=\frac{\alpha}{\pi}$ ;  $\lambda$  为节点密度, 即单位面积内节点数目;  $k$  为目标区域内监测到任意一点的节点个数. 与 NDMOB 模型一样, 此模型可用于多重覆盖问题. 现以一重覆盖为例, 得出覆盖预测及数量估计公式. 已知考虑边界效应的节点可能感知区域面积期望值为  $E(S)$ , 求目标区域  $\Omega$  中任意一点至少被 1 个节点感知的概率为

$$P_{cov}=P[N(\Omega)\geq 1]=1-P[N(\Omega)=0]=1-e^{-\lambda \times E(S) \times P} \tag{15}$$

$$\lambda = -\frac{\ln(1-P_{cov})}{E(S) \times P} \tag{16}$$

由式(15)、式(16)可知: 当要求目标区域内网络覆盖率至少达到  $P_{cov}$  时, 所需部署的节点数为

$$N=\Omega\lambda \tag{17}$$

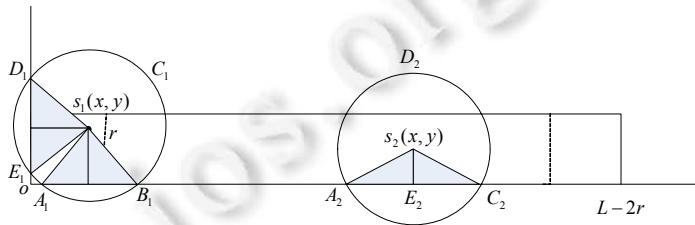


Fig.5 Possible sensing area of side node  
图 5 边节点可能感知区域

### 2.2 模型概率属性

**命题 1.**  $P_{cov}=1-e^{-\lambda \times E(S) \times P}$  满足概率属性

证明: 当没有节点落在目标区域时, 即  $\lambda \rightarrow 0$ , 于是可得:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} P_{cov} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} (1 - e^{-\lambda \times E(S) \times P}) = 0.$$

当整个目标区域布满节点时, 即  $\lambda \rightarrow \infty$ , 可得:

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} P_{cov} = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} (1 - e^{-\lambda \times E(S) \times P}) = 1.$$

由于  $e^{-\lambda \mu(s)}$  是  $\lambda$  的单调减函数, 于是,  $P_{cov}=1-e^{-\lambda \times E(S) \times P}$  是  $\lambda$  的单调增函数, 因此可得:  $0 \leq P_{cov} \leq 1$ . □

**命题 2.** 当节点感知区域远小于目标区域时, 即, 近似目标区域不存在边界效应, 则 PCPMB 与 NDMOB 的结果相同.

证明: PCPMB 与 NDMOB 的比值为:  $f = \frac{1 - e^{-\lambda \times E(S) \times P}}{1 - e^{-\lambda \mu(S)}}$ .

由于  $\mu(S) = \alpha r^2 = \pi r^2 \times \frac{\alpha}{\pi}$ , 现设  $E(S') = \pi r^2$ , 即, 节点的可能感知区域;  $P = \frac{\alpha}{\pi}$ , 即, 感知区域在可能感知区域中

的比例, 与 PCPMB 模型中的  $P$  相同. 即  $f$  表示为:  $f = \frac{1 - e^{-\lambda \times E(S) \times P}}{1 - e^{-\lambda \mu(S)}} = \frac{1 - e^{-\lambda \times E(S) \times P}}{1 - e^{-\lambda \times E(S') \times P}}$ .

当节点感知区域远小于目标区域时, 近似目标区域不存在边界效应. 边节点、节角节点的可能感知区域面积期望值与内节点的可能感知区域面积期望值近似相等, 即:  $E(\Omega_1) \sim E(\Omega_2) \sim E(\Omega_3) = \pi r^2$ .

可知:

$$E(S) = P(\Omega_1)E(\Omega_1) + P(\Omega_2)E(\Omega_2) + P(\Omega_3)E(\Omega_3) \cong \frac{(L-2r)^2}{L^2} \times \pi r^2 + \frac{4r^2}{L^2} \times \pi r^2 + \frac{4r(L-2r)}{L^2} \times \pi r^2 = \pi r^2.$$

于是可得:

$$f = \frac{1 - e^{-\lambda \times E(S) \times P}}{1 - e^{-\lambda \times E(S') \times P}} \sim 1.$$

即证明了命题 2 成立. □

实验验证如图 6 所示,横坐标表示目标区域边长  $L$  与节点感知半径  $r$  的比值,纵坐标表示 PCPMB 与 NDMOB 所得覆盖率比值.

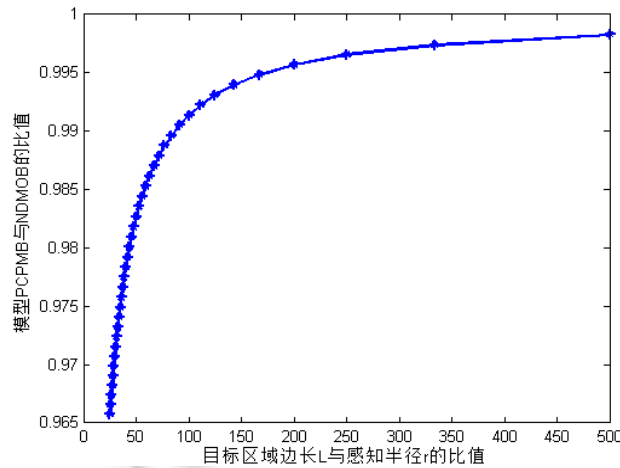


Fig.6 Comparison between PCPMB and NDMOB

图 6 PCPMB 和 NDMOB 近似比较

### 3 模型性能分析与评价

本实验在 Windows 7 环境下,利用 matlab 7.0 进行仿真,并分析了 CPMOB,NDMOB 及 PCPMB 之间的性能,验证了 PCPMB 跟实际部署情况更加符合,准确性更好.实验仿真参数见表 1.

Table 1 Experimental parameters

表 1 实验参数

参数名称	参数取值
目标区域边长 $L$	500m, 600m, 700m
区域覆盖率 $P$	[0,1]
节点数量 $N$	[50,280]
感知半径 $r$	[30,100]
传感角度 $\alpha$	[30°,60°]

#### 3.1 覆盖预测分析

通过一系列仿真实验来说明 3 个主要参数对 CPMOB,NDMOB 及 PCPMB 的影响,分别是:节点规模、感知半径、节点传感角度.针对此 3 个参数,本节将对模型所得理论覆盖率进行比较,并与实验真实覆盖率进行比较,以此判断模型的准确性.

为更加清晰地比较模型理论结果与实验真实覆盖率之间的近似程度,本实验定义覆盖误差率(coverage error rate,简称 CER)的概念,即

$$CER = \frac{\text{TheoreticalResults} - \text{ExperimentalResults}}{\text{ExperimentalResults}}$$

通过反复对随机部署的有向传感器网络进行仿真,并计算其覆盖率,本实验中所得的实验真实覆盖率为 30 次仿真的平均值.

如图 7(a)变化曲线可以看出:当  $r$  和  $\alpha$  一定时,网络覆盖率随着节点规模  $N$  的不断增加而扩大,且增加速度较快.当节点规模非常大时,4 条曲线趋向一致.这是由于当节点规模非常大时,整个目标区域将被完全覆盖,即覆盖

率 1.同时,在相同的节点规模下,PCPMB 的理论覆盖率为实验真实覆盖率误差非常小,拟合度好.从图 7(b)中曲线可知:本文所提模型与实验真实值之间的覆盖误差率基本都保持在 1%之内,最大误差率小于 2.5%.其他两种模型的覆盖误差率最小值大于 3%,最高误差率接近 10%.

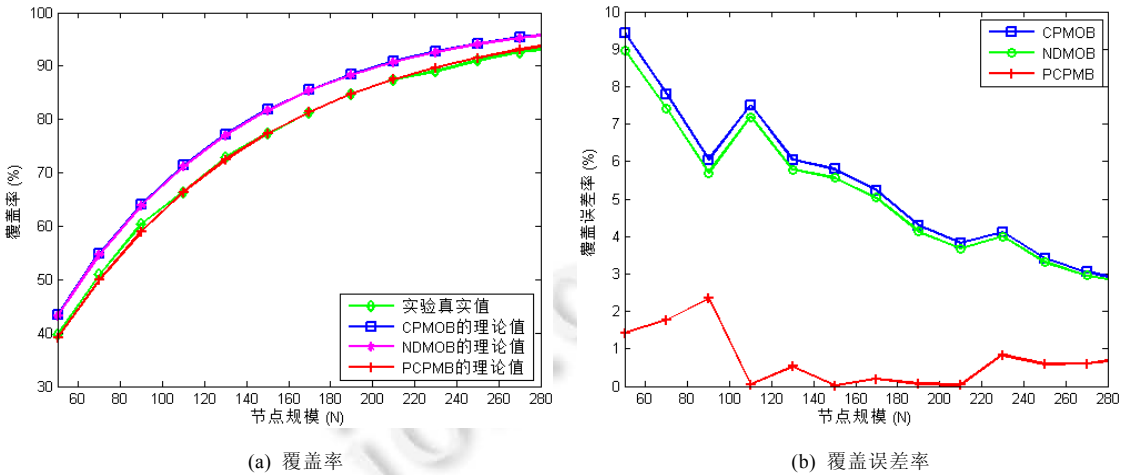


Fig.7 Effect of sensing node scale, other parameters:  $r=60m, \alpha=\pi/4$

图 7 节点规模的影响,其他参数: $r=60m, \alpha=\pi/4$

感知半径  $r$  对 CPMOB,NDMOB,PCPMB 和实验真实覆盖率的影响也类似.当节点规模一定时,节点感知半径越大,说明节点可感知面积越大,从而覆盖率会随之不断上升.由图 8(a)可知:PCPMB 的理论覆盖率为实验真实覆盖率误差非常小,拟合度好.从图 8(b)中曲线可知:本文所提模型理论值与实验真实值之间的覆盖误差率基本都保持在 1.3%之内,最大误差率小于 2%.其他两种模型的覆盖误差率最小值大于 4.1%,最高误差率接近 8%.

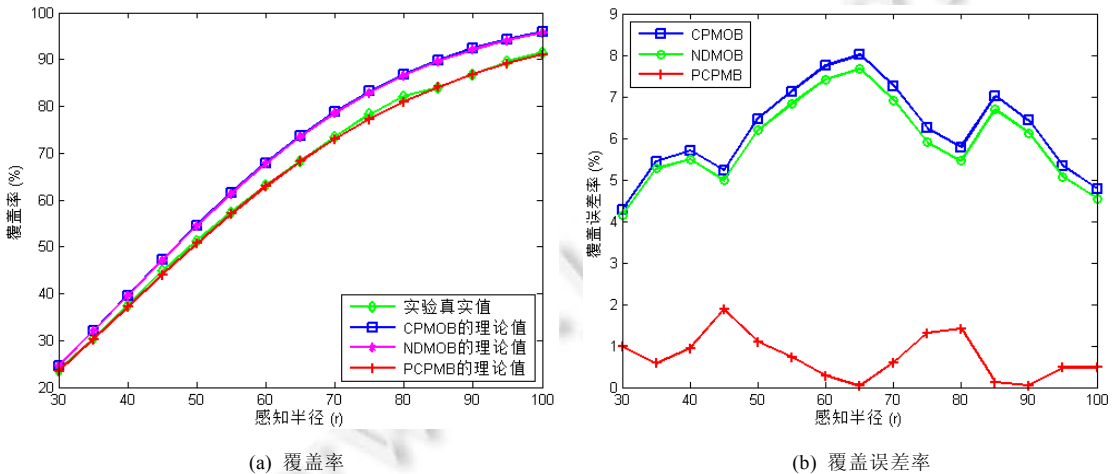


Fig.8 Effect of sensing node scale, other parameters:  $N=100, \alpha=\pi/4$

图 8 感知半径的影响,其他参数: $N=100, \alpha=\pi/4$

同样地,传感角度  $\alpha$ 对 CPMOB,NDMOB,PCPMB 和实验真实覆盖率的影响也类似.当节点规模一定时,传感角度越大,说明节点可感知面积越大,覆盖率会不断上升.由图 9(b)可知:本文所提模型理论值与实验真实值之间的覆盖误差率基本都保持在 1.5%之内,最大误差率小于 1.8%.其他两种模型的覆盖误差率最小值大于 5%,最高



大于 9%的误差.

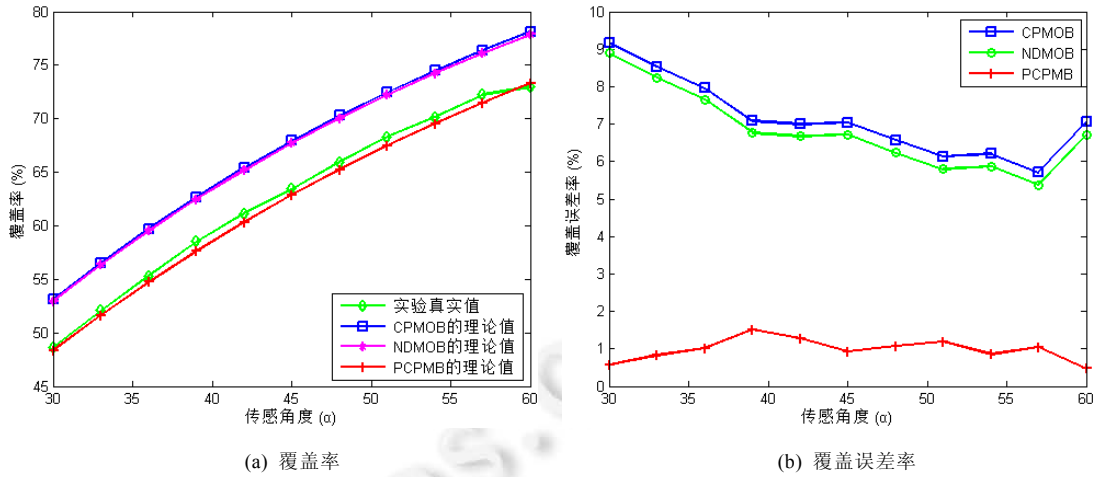


Fig.9 Effect of sensing offset angle, other parameters:  $N=100, r=60m$

图 9 传感角度的影响,其他参数: $N=100, r=60m$

综合上述 3 组对比实验得知:PCPMB 模型准确度更好,对初始部署时网络覆盖率的预测更加准确.说明其在覆盖率预测等方面有着更优的性能,与实际情况更加吻合.

### 3.2 节点规模数量分析

图 10(a)表示 PCPMB 模型节点数量估计理论值在不同目标区域不同覆盖率情况下的变化曲线.由图 10(a)的曲线可知:随着网络覆盖率的提高,初始随机部署时所需的节点数量增长速度大致呈指数级的增加;随着覆盖率要求的不断提高,初始部署时所需节点数量也不断增加;同时,随着目标区域的增大,实现相同覆盖率所需部署的节点数量也会快速增加.

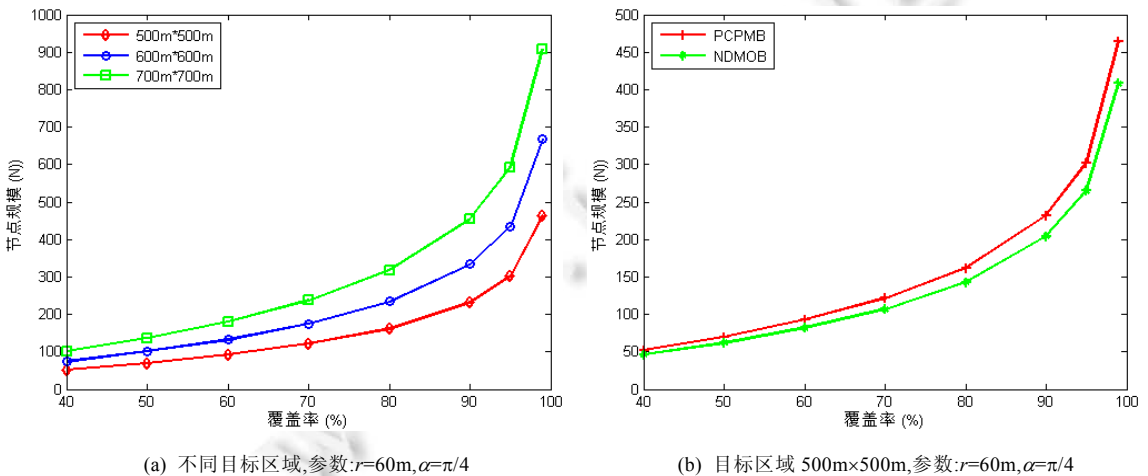


Fig.10 Effect of coverage probability on node scale

图 10 覆盖率对节点规模的影响

从图 10(b)可以看出:随着网络覆盖率的提高,目标区域中所需部署的节点数量也相应增加,且增加速度较快;当初始网络覆盖率较低时,边界效应对网络影响较小,两条曲线趋向一致;在相同网络覆盖率时,PCPMB 对部

署节点数量的预测更加准确。

#### 4 结束语

本文针对有向传感器网络随机部署节点环境下的网络覆盖及节点规模预测问题,提出了一种基于概率的覆盖预测模型,该模型反映了节点密度、节点感知半径、传感角度与覆盖率之间的数学关系。最后,通过一系列仿真实验,说明本文所提出的模型在预测性能上有较大提升。由于充分考虑了目标区域边界效应,与实际随机部署环境更加符合,当初始随机部署需要满足确定覆盖率时,通过该模型准确的预测节点数量来指导部署。

#### References:

- [1] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8):102–114. [doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422]
- [2] Szweczyk R, Mainwaring A, Polastre J, Anderson J, Culler D. An analysis of a large scale habitat monitoring application. In: *Proc. of the ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*. 2004. 214–226. [doi: 10.1145/1031495.1031521]
- [3] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [4] Ma HD, Tao D. Multimedia sensor network and its research progresses. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2007,17(9): 2013–2028 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm> [doi: 10.1360/jos172013]
- [5] Liu L, Ma HD, Zhang X. On directional  $K$ -coverage analysis of randomly deployed camera sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. 2008. 2707–2711. [doi: 10.1109/ICC.2008.511]
- [6] Wang Y, Cao G. On full-view coverage in camera sensor networks. *IEEE INFOCOM*, 2011,10(6):1781–1789. [doi: 10.1109/INFOCOM.2011.5934977]
- [7] Ma HD, Li YH. On coverage problems of directional sensor networks. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005,3794:721–731. [doi: 10.1007/11599463\_70]
- [8] Tao D, Ma HD, Liu L. A virtual potential field based coverage-enhancing algorithm for directional sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2007,18(5):1152–1163 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]
- [9] Dai N, Mao JL, Fu LX. Virtual potential field based coverage optimization algorithm for directional sensor networks. *Application Research of Computers*, 2014,31(3):905–907 (in Chinese with English abstract).
- [10] Chen J, Lu Z, Kuo YH. Coverage-Enhancing algorithm based on overlap-sense ratio in wireless multimedia sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2013,13(6):2077–2083. [doi: 10.1109/JSEN.2013.2248144]
- [11] Wang XC, Feng XF, Feng XY. Study of mixed virtual potential field coverage algorithm in WMSN. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2013,24:1–6 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13001.htm>
- [12] Mohamadi H, Ismail AS, Salleh S. Utilizing distributed learning automata to solve the connected target coverage problem in directional sensor networks. *Sensors & Actuators A Physical*, 2013,198(16):21–30. [doi: 10.1016/j.sna.2013.03.034]
- [13] Liu L, Zhang X, Ma HD. Minimal exposure path algorithms for directional sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2014,14(10):979–994. [doi: 10.1002/wcm.2250]
- [14] Xing XF, Wang GJ, Wu J, Li J. Square region-based coverage and connectivity probability model in wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing*. 2009. 1–8. [doi: 10.4108/ICST.COLLABORATECOM2009.8335]
- [15] Liu L, Zhang X, Ma HD. Localization-Oriented coverage in wireless camera sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2011,10(2):484–494. [doi: 10.1109/TWC.2010.01.080956]
- [16] Zhao J, Zeng JC. Sense model and number estimation of wireless multimedia sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(8):2104–2114 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4159.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04159]

- [17] Attar AM, Yarahmadian S, Samavi S. Coverage estimation in heterogenous floorplan visual sensor networks. Sensors, IEEE, 2013,28(1):1-4. [doi: 10.1109/ICSENS.2013.6688426]

#### 附中文参考文献:

- [4] 马华东,陶丹.多媒体传感器网络及其研究进展.软件学报,2006,17(9):2013-2028. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm>
- [8] 陶丹,马华东,刘亮.基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法.软件学报,2007,18(5):1152-1163. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm>
- [9] 戴宁,毛剑琳,付丽霞,段绍米,乔冠华.基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖优化算法.计算机应用研究,2014,31(3):905-907.
- [11] 王晓晨,冯秀芳,冯晓媛.无线多媒体传感器网络混合虚拟势场覆盖研究.软件学报,2013,24:1-6. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13001.htm>
- [16] 赵静,曾建潮.无线多媒体传感器网络感知模型与数量估计.软件学报,2012,23(8):2104-2114. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4159> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04159]



刘志敏(1983-),男,湖南郴州人,博士生,主要研究领域为无线多媒体传感器网络, ad hoc 网络.



王国军(1970-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为透明计算,移动计算,云计算,可信计算,软件工程.



贾维嘉(1957-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为组播,路由,无线宽带网络,移动多媒体通信,分布式系统.