

## 无线传感网规则拓扑结构的部署与设计综述

李文翔<sup>1</sup>, 马娅婕<sup>1</sup>, 徐俊<sup>2</sup>, 杨剑峰<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 在无线传感网应用中部署规则拓扑结构能实现感知区域的完全覆盖和采集点的精确定位, 以较小的部署代价提供更好的网络性能, 为无线传感网的优化设计提供参照依据, 对规则拓扑结构的相关研究进行综述。基于节点有效面积这个指标, 探讨了完全覆盖、 $k$ -覆盖、 $l$ -连通情况下的拓扑部署方式与效能, 并从连通性、能耗、传输性能、路由方案和 MAC 协议等方面总结了典型规则拓扑结构的性能、变化规律和适用范围。指出了各结构的最佳适用条件, 并提出了若干有待进一步研究的方向。

**关键词:** 无线传感网; 网络部署; 拓扑结构; 连通; 覆盖

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0207-10

## Survey on the deployment and design for regular topology structures in wireless sensor networks

LI Wen-xiang<sup>1</sup>, MA Ya-jie<sup>1</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, YANG Jian-feng<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In wireless sensor networks, such regular topology structures as Square, Hexagon and Triangle could fully cover the area to be monitored, provide accurate positioning for special events, and achieve better network performance. In order to provide valuable guidelines for WSN design and optimization, related works on regular topology structures was surveyed. By the analysis on the index of Area per Node, the deployment method and efficiency of regular topology structures under such cases as full coverage,  $k$ -coverage and  $l$ -connectivity was explored. the performance, variation and application scenarios in such aspects as network connectivity, energy consumption, transmission performance, routing scheme and MAC protocol was summarized. The optimal application conditions for each structure together with several directions for further research were proposed.

**Key words:** wireless sensor networks; network deployment; topology structure; connectivity; coverage

### 1 引言

无线传感网的拓扑结构对网络性能和寿命的优化至关重要, 高效的拓扑部署能有效地覆盖监测范围、降低通信时延、增大网络吞吐量、减少能耗, 并具有良好的容错性。目前无线传感网的拓扑结构可以

分为随机拓扑和规则拓扑 2 大类, 而后者又具有条状 Strip、正三角形 Triangle、正方形 Square、菱形 Rhombus、正六边形 Hexagon 和混合型 Hybrid 等多种。随机拓扑应用在覆盖程度要求不高的场合, 缺少准确的定位精度, 而规则拓扑结构能够实现监测区域的完全覆盖和采集点的精确定位, 有助于设计高效的路

收稿日期: 2012-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61104215); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2012AA010904)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61104215); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA010904)

由, 并带来更好的网络传输性能和扩展性, 对其进行优化设计具有重要的意义。近年来关于传感网规则拓扑结构的部署与设计研究陆续得到开展, 随着对网络协同、认知等新领域研究的深入以及水下、三维空间等特殊环境中传感网应用的推广, 针对规则拓扑结构的相关研究值得进一步探讨。

目前相关工作从实现节点通信连通和信号感知覆盖这 2 个角度出发, 研究规则拓扑网络的部署方式和对应的网络性能, 探讨在部署代价、能耗、吞吐量、时延等指标中进行折中的设计方法。本文对这些研究工作的方法和结论进行综述, 从最基本的完全覆盖情况拓展到多重覆盖、多重连通情况及组合/层次化结构, 以节点有效面积为指标, 给出典型规则拓扑结构的部署效能及网络性能的分析 and 描述, 指出研究工作中存在的不足, 并指出有待进一步研究的方向。

## 2 体现网络部署效能的指标

体现网络部署效能的指标包括节点的连通度、感知区域的覆盖度、感知强度因子<sup>[1]</sup>、节点有效面积 (APN, area per node)<sup>[2,3,4]</sup>及若干典型网络性能指标 (时延、分组交付率、能耗、速率、吞吐量等)。

基于 unit disk 模型描述节点的通信范围, 连通度 *l*-connectivity 体现了一个节点与邻节点之间能直接相互通信的无线链路数目, 取决于单元格的形状和通信半径  $r_c$ , 在足够大的  $r_c$  下, Hexagon、Square 和 Triangle 的节点连通度 *l* 分别为 3、4、6。

一般也采用 unit disk 模型描述节点的感知范围, 覆盖度 *k*-coverage 体现了特定被监测位置能被多少个传感节点所感知, 取决于感知半径  $r_s$ 。被覆盖的对象可以是一片区域或一个点, 对应区域覆盖问题和点覆盖问题 2 种提法<sup>[5]</sup>, 其中, 前者更为复杂, 目前相关研究多针对二维平面区域的覆盖。

给定区域 *A* 中被监测位置 *y* 到传感节点  $s_i$  的 euclidean 距离  $Ed(s_i, y)$ , 则 *y* 到最近传感节点的距离为  $\min_i Ed(s_i, y)$ , 从感知覆盖的角度, 感知强度因子  $d_{mm}$  体现了实现 *A* 中所有点被至少一个传感节点覆盖所需满足的距离要求, 定义为

$$d_{mm} = \max_{y \in A} \min_i Ed(s_i, y) \quad (1)$$

作为一个有全面代表性的指标, 节点有效面积 APN 综合考虑了感知覆盖和通信连通效果, 在相关工作中被研究得最多。它体现了单个节点对部署的

平均贡献, 其值越大表明部署效能越高, 定义为

$$APN^p = A_p N_n / N_p \quad (2)$$

其中,  $A_p$  为对应结构单元格的面积, 如 Square 结构的  $A_p$  为  $a^2$ , 其中,  $a$  为边长,  $N_n$  为组成这个结构所需的节点数, 如 Square 由 4 个节点连成, 则  $N_n=4$ ,  $N_p$  为一个节点相关的单元格数目, 如 Square 中, 一个节点关联 4 个单元格, 则  $N_p=4$ 。

对应的拓扑部署设计和优化问题描述为: 在给定区域中, 在保证各节点的通信连通度和各位置的感知覆盖度的条件下, 选择或设计最佳的拓扑结构, 以实现最小代价的网络部署。

## 3 实现完全覆盖的部署方法

### 3.1 节点有效面积的相关结论

完全覆盖指区域中所有位置都被至少一个节点所感知, 对应的临界感知覆盖状态指的是单元格中距感知节点的最远位置 (单元格中心) 恰好处于感知范围的边缘, 如图 1 中  $r_s$  指示所示, 此时若  $r_s$  增大, 则每个位置可被多个节点覆盖, 若  $r_s$  减小, 则有的位置无法被覆盖。

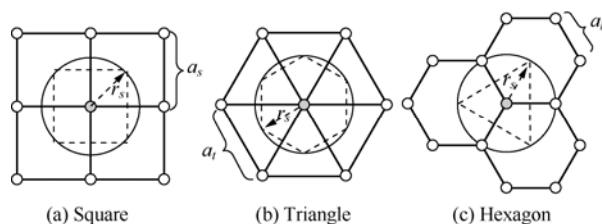


图 1 3 种规则拓扑结构的临界感知覆盖状态

图 1 中各虚线框所围面积对应为在临界感知覆盖状态下各结构的节点有效面积, 表示为  $(APN)_s$ <sup>[2,6]</sup>, 下标 *s* 代表 sensing, Square、Triangle 和 Hexagon 结构对应的  $(APN)_s$  的大小分别为

$$(APN^{squ})_s = 2r_s^2 \quad (3)$$

$$(APN^{tri})_s = 3\sqrt{3}r_s^2 / 2 \quad (4)$$

$$(APN^{hex})_s = 3\sqrt{3}r_s^2 / 4 \quad (5)$$

可以看出, 在相同  $r_s$  条件下, 临界  $(APN)_s$  的大小关系为  $(APN^{tri})_s > (APN^{squ})_s > (APN^{hex})_s$ , Triangle 结构的部署效率最高。

另一方面, 对应的临界通信连通状态指的是各节点恰好处于邻节点通信范围的边缘, 如图 2 中  $r_c$  指示所示。

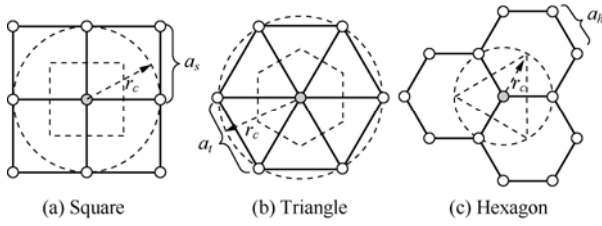


图 2 3 种规则拓扑结构的临界通信连通状态

图 2 中各虚线框所围面积对应为临界通信连通状态下各结构的节点有效面积，表示为  $(APN)_c$  [2,6,7]，下标  $c$  代表 communication，Square、Triangle 和 Hexagon 结构对应的  $(APN)_c$  的大小分别为

$$(APN^{squ})_c = r_c^2 \quad (6)$$

$$(APN^{tri})_c = \sqrt{3}r_c^2 / 2 \quad (7)$$

$$(APN^{hex})_c = 3\sqrt{3}r_c^2 / 4 \quad (8)$$

可以看出，在相同  $r_c$  条件下，临界  $(APN)_c$  的大小关系为  $(APN^{hex})_c > (APN^{squ})_c > (APN^{tri})_c$ ，Hexagon 结构的部署效率最高。

如果感知覆盖和通信连通同时达到临界状态，对 Hexagon、Square 和 Triangle 分别要求  $r_c = r_s$ 、 $r_c = \sqrt{2}r_s$  和  $r_c = \sqrt{3}r_s$ 。此时记  $APN^{hex} = (APN^{hex})_s = (APN^{hex})_c$ 、 $APN^{squ} = (APN^{squ})_s = (APN^{squ})_c$ 、 $APN^{tri} = (APN^{tri})_s = (APN^{tri})_c$ 。

实现临界感知覆盖和通信连通的 strip 结构的典型部署 [1,4,7] 如图 3 所示，体现为若干平行分布的路径  $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 、 $P4$ 、 $\dots$ ，相邻 2 路径间由 2 个节点连通，如  $P1$  和  $P2$  由 A 和 F 连通。对 strip 结构的  $APN$ ，本文借助图 4 所示的组合结构加以分析。在图 4 区域的内部，2 层 Triangle 和 2 层 Square 交替出现，且实现临界连通和临界覆盖。当网络规模很大时，忽略边缘的影响，则图 4 拓扑结构的  $APN$  为

$$APN^{2squ-2tri} \approx (APN^{squ} + APN^{tri}) / 2 = 0.933r_c^2$$

将图 4 中的白色节点去掉，即对 Triangle 和 Square 的分界仅保留左右 2 个端点，则图 4 变为图 3。当网络规模很大时，白色节点和黑色节点的数目近似相等，可认为图 3 用半数的节点实现了图 4 的部署效果，故有

$$APN^{strip} \approx 2 \cdot APN^{2squ-2tri} = 1.866r_c^2 \quad (9)$$

显然 strip 结构的  $APN$  比其他 3 种结构的  $APN$  要大，这个结论在文献[1]中通过仿真得到了验证，但 strip 存在连通性差、部分链路负载过重等缺点，故其应用范围得到一定的限制。

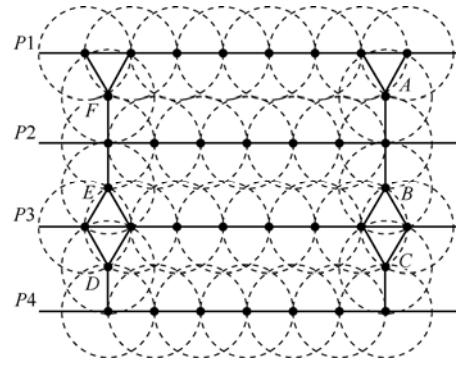


图 3 典型的 strip 结构部署方式

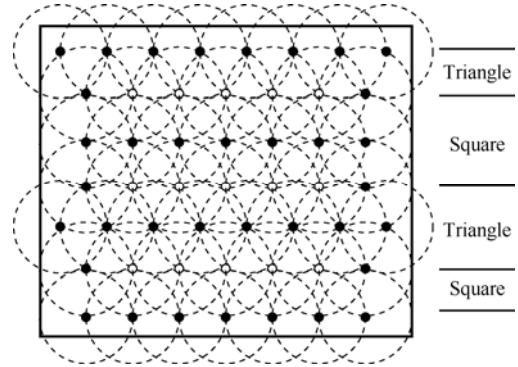


图 4 由 2 层 Triangle 和 Square 沿水平方向交替而成的组合拓扑结构

### 3.2 各种 $r_c/r_s$ 比值下的最优部署策略

对传感器节点而言，其感知范围  $r_s$  可认为是一个固定值，而调整并实现较大的  $r_c$  则相对容易，故研究更多关注于  $(APN)_s$ 。针对不同  $r_c/r_s$  比值下对应哪种结构最优（即  $APN$  最大）这个问题，文献[4]中定义一种新的规则拓扑结构——菱形 Rhombus。如图 5 所示，由 A、B、C、D 4 个节点布设在不同位置而组成不同的结构，O 为临界感知位置点。图 5 中左侧为 2 个 Triangle 的组合，右侧为 Square，中间为 Rhombus，其满足  $\sqrt{2} < r_c/r_s < \sqrt{3}$ 、 $\pi/3 < \angle BAD < \pi/2$ ，其中，B 点和 D 点距离较远，不能够直接通信，O 点的位置向对角线 BD 靠近，其  $APN$  为

$$(APN^{rho})_s = r_c^2 \sin \theta = \frac{r_c^3 \sqrt{4r_s^2 - r_c^2}}{2r_s^2} \quad (10)$$

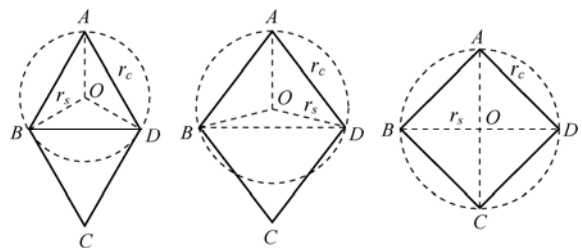


图 5 正三角形、菱形、正方形的临界感知覆盖

本文以  $r_c/r_s$  为取值在(0,2)之间的变量, 针对临界覆盖情况, 绘出式(3)、式(4)、式(5)和式(10)的曲线如图 6 所示。可以发现当  $r_c/r_s$  从小增到大时, 最大 APN 分别由 Hexagon、Square、Rhombus 和 Triangle 实现, 如式(11)所示。图 6 中从左至右, 当  $(APN^{squ})_s = (APN^{hex})_s$ 、 $(APN^{rho})_s = (APN^{squ})_s$  及  $(APN^{rho})_s = (APN^{tri})_s$  时得到 3 个拐点分别为  $3^{3/4}/2$ 、 $\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{3}$ 。

$$(APN)_{s,max} = \begin{cases} (APN^{hex})_s, & 0 < r_c/r_s \leq 3^{3/4}/2 \\ (APN^{squ})_s, & 3^{3/4}/2 \leq r_c/r_s \leq \sqrt{2} \\ (APN^{rho})_s, & \sqrt{2} \leq r_c/r_s \leq \sqrt{3} \\ (APN^{tri})_s, & \sqrt{3} \leq r_c/r_s \end{cases} \quad (11)$$

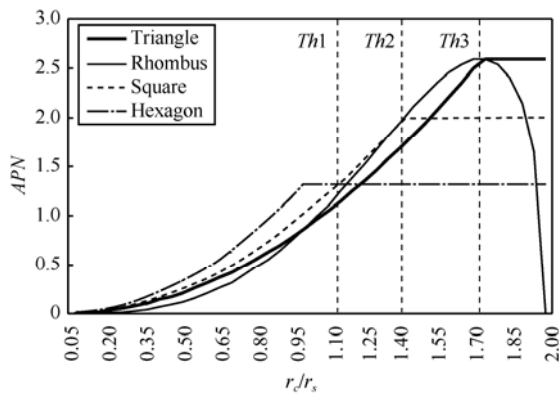


图 6 不同  $r_c/r_s$  取值下的 APN 相对大小

#### 4 实现 $k$ -覆盖的规则拓扑部署方法

在某些应用场合, 如多维目标定位, 要求各个点被多个传感节点感知, 这就提出了  $k$ -覆盖问题。如果某监测位置处在  $k$  个传感节点的覆盖范围内, 就称其被  $k$ -覆盖。如图 7 所示, 文献[3]在由 Square 单元格组成的大片区域中探讨此问题, 选择节点 5 周围的三角形阴影区域为研究对象, 因为对称性, 故这个区域的结论能适用于整个网络。

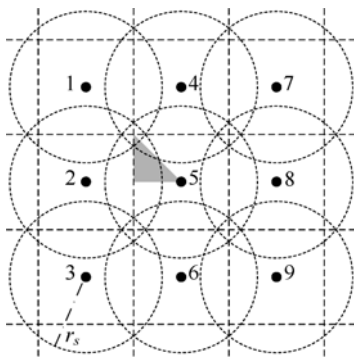


图 7  $k$ -覆盖问题的分析模型

令水平或垂直方向上的节点间距恰好为  $r_c$ , 研究方法为建立不等式组, 找出实现区域  $k$ -覆盖的  $r_c/r_s$  的取值范围, 满足: 区域中所有位置被  $k$  个传感节点覆盖 (到对应传感节点的距离小于  $r_s$ ), 且区域中存在位置不被  $k+1$  个传感节点覆盖。得到 Square 中实现 2、3、4-覆盖的结论分别为

$$(APN^{squ})_{2s} = r_s^2, \quad \frac{2}{\sqrt{5}} \leq \frac{r_c}{r_s} < 1 \quad (12)$$

$$(APN^{squ})_{3s} = \frac{4}{5}r_s^2, \quad \frac{3\sqrt{2}}{5} \leq \frac{r_c}{r_s} < \frac{2}{\sqrt{5}} \quad (13)$$

$$(APN^{squ})_{4s} = \frac{18}{25}r_s^2, \quad 0 \leq \frac{r_c}{r_s} < \frac{3\sqrt{2}}{5} \quad (14)$$

类似得到 Hexagon 中实现 2、3、4-覆盖的结论为

$$(APN^{hex})_{2s} = \frac{3\sqrt{3}}{4}r_s^2, \quad \frac{2}{\sqrt{7}} \leq \frac{r_c}{r_s} < 1 \quad (15)$$

$$(APN^{hex})_{3s} = \frac{3\sqrt{3}}{7}r_s^2, \quad \frac{5}{7} \leq \frac{r_c}{r_s} < \frac{2}{\sqrt{7}} \quad (16)$$

$$(APN^{hex})_{4s} = \frac{75\sqrt{3}}{196}r_s^2, \quad 0 \leq \frac{r_c}{r_s} < \frac{5}{7} \quad (17)$$

Triangle 中实现 3、4-覆盖的结论为

$$(APN^{tri})_{3s} = \frac{\sqrt{3}}{2}r_s^2, \quad \frac{\sqrt{3}}{2} \leq \frac{r_c}{r_s} < 1 \quad (18)$$

$$(APN^{tri})_{4s} = \frac{3\sqrt{3}}{8}r_s^2, \quad 0 \leq \frac{r_c}{r_s} < \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (19)$$

图 8 所示为由 Triangle 和 Square 交替组成的 5-连通组合结构, 求出其实现 2、3、4-覆盖的结论为

$$(APN^{squ-tri})_{2s} = 0.933r_s^2, \quad \frac{2}{\sqrt{5}} \leq \frac{r_c}{r_s} < 1 \quad (20)$$

$$(APN^{squ-tri})_{3s} = 0.833r_s^2, \quad \frac{3\sqrt{2}}{5} \leq \frac{r_c}{r_s} < \frac{2}{\sqrt{5}} \quad (21)$$

$$(APN^{squ-tri})_{4s} = 0.685r_s^2, \quad 0 \leq \frac{r_c}{r_s} < \frac{3\sqrt{2}}{5} \quad (22)$$

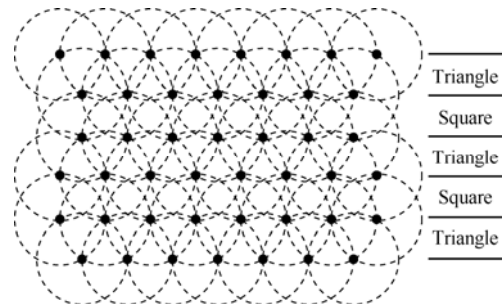


图 8 由 Triangle 和 Square 沿水平方向交替组成的 5-连通组合结构

### 5 实现 $l$ -连通的规则拓扑部署方法

在某些应用场合不仅要求实现完全覆盖，还要求实现  $l$ -连通，确保传感节点具有良好的通信可靠度和传输效率。其中，2-连通、3-连通、4-连通和 6-连通一般分别用 Strip、Hexagon、Square 和 Triangle 结构实现，5-连通可用图 8 所示的组合结构实现。

一种改进的临界 4-连通结构如图 9(b)所示，命名为 Diamond<sup>[8]</sup>，作为 Triangle（如图 9(a)所示）和 Square（如图 9(c)所示）之间的过渡，其中， $r_{c1} > r_{c2} > r_{c3}$ ， $r_{s1} > r_{s2} > r_{s3}$ ，从图 9(a)~图 9(c)， $O$ 、 $A$ 、 $D$  之间的距离保持不变， $E$ 、 $F$ 、 $B$ 、 $C$  向  $O$  点所在水平线靠近，图 9(b)中  $O$  点和  $B$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $F$  之间的距离恰好为  $r_{c2}$ ，能够直接通信， $A$ 、 $D$  之间的距离超过  $r_{c2}$  而不能直接通信。其 APN 及约束条件为

$$(APN^{dia})_s = \frac{r_c^3 \sqrt{4r_s^2 - r_c^2}}{r_s^2}, \quad \sqrt{2} \leq \frac{r_c}{r_s} \leq \sqrt{3} \quad (23)$$

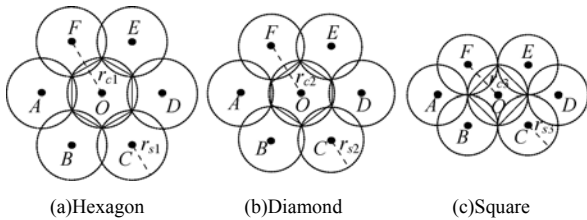


图 9 网络结构演化

将式(23)与临界感知情况的最大 APN 实现（式(4)所示）和临界连通情况的最大 APN 实现（式(8)所示）相比，可以发现 Diamond 的 APN 明显大些，且通信连通度由 6 降为 4，能减小通信干扰。

文献[9]针对不同  $r_c/r_s$  下，实现 3-连通和 5-连通的问题进行了详细结构设计，以 Hexagon 为基本结构，依一定的策略设定链路的连通状态，由实线“固定链路”构成确保特定连通性的各种新结构，如图 10 所示。但虚线“可选冗余链路”的存在更容易引发通信冲突。

### 6 规则拓扑结构的容错连通性能

在存在节点和链路失效的环境中，网络连通性能的研究具有重要的意义，目前专门针对规则拓扑结构网络的连通性研究还很少。文献[10]通过随机过程分析方法，提出在节点随机失效的 Square 结构中，同时确保区域覆盖和节点连通的充分必要条件为

$$p(n)r^2(n) \sim \log(n)/n \quad (24)$$

其中， $n$  为节点数， $p(n)$  为节点正常工作概率， $r(n)$  为节点传输半径。当  $n$  很大时，在很小的  $p(n)$  和  $r(n)$  下，式(24)成立，仍然能同时实现覆盖和连通。此外，还得到了给定  $n$  下同时实现覆盖和连通的概率上下限以及节点仅仅保持连通的充分条件，指出实现连通的充分条件不一定能确保覆盖。但文献[10]的结论主要针对区域中若干离散位置点的覆盖问题，而非整个区域的覆盖问题。

面对更多的拓扑结构，文献[11]基于 ALOHA 协议，通过对节点孤立概率、端到端连通性、网络连通性这 3 个指标的理论分析，分别研究了 Square、Triangle 和 Hexagon 结构中 2 点间路径可用概率的描述和计算模型。仿真实验表明，由于节点连通度为 6，Triangle 结构的节点孤立概率相对低些，网络连通性较好，此外其 2 点间通信跳数较小，故中间链路失效的现象少些，路由有效时间相对长些。而 Hexagon 结构的节点连通度为 3，邻节点通信干扰小，具有最高的 SNR 和节点端到端连通概率。有优化工作<sup>[12]</sup>对网络节点划分  $K$ -阶子集，分析了  $K$  为若干取值条件下的子集间的连通性，结果表明这样的分簇提升了 Triangle 结构的连通性。

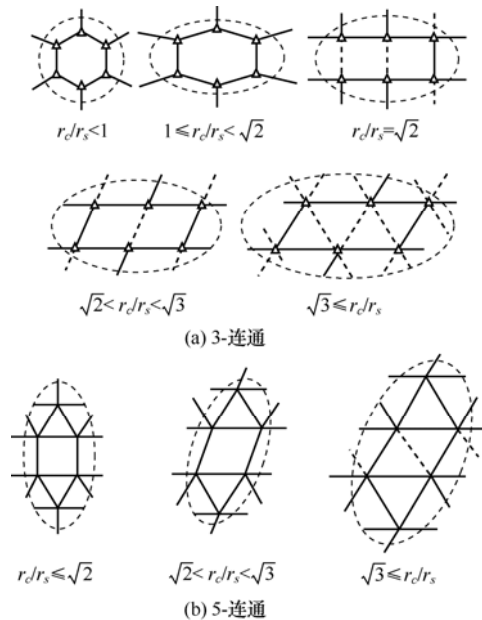


图 10 基于 Hexagon 的组合部署模式（实线为固定链路，虚线为可选链路）

### 7 规则拓扑结构的能耗分析

在能耗优化方面，文献[13]针对 Square 和

Triangle 研究了优化网络寿命的设计方法, 通过解析到 Sink 不同距离的节点能耗, 探讨数据转发的多种部署方案, 包括等间隔部署节点和按对数递增间隔部署节点, 其中, 后者采用“节点同配置不同间距”的思路实现较长的网络寿命, 对承担较重转发任务的节点设定较短的传输距离及较小的发送功率。这种模式不能形成规则拓扑结构, 等效的优化方法为在规则拓扑结构中采用“节点同间距不同配置”的思路<sup>[14]</sup>来部署节点, 在靠近 Sink 节点的位置, 节点的密度更大, 备份节点更多, 此处可用的能量更多。

面对多种规则拓扑结构, 文献[15]通过仿真实验表明在不考虑邻节点干扰的条件下, 当路径损耗指数 $\alpha$ 较小时, Triangle 结构由于传输跳数少, 所以产生最小的能耗。但针对存在邻节点干扰的环境, 还没有相关的能耗分析和比较结论。需要注意的是, 关于各种拓扑结构的能耗分析需要结合具体的 MAC 和路由协议展开。

## 8 规则拓扑结构的网络传输性能

针对网络传输能力, 从拓扑结构性能比较的角度, 相关的研究<sup>[15~18]</sup>讨论了传输成功率、吞吐量、传输速率等性能指标。其中, 首先证明 Rayleigh 衰落模型下噪声与邻节点干扰对传输的影响是独立的, 可以分开讨论。然后在仅存在噪声 (Rayleigh 衰落) 而没有邻节点干扰的条件下, 通过解析和仿真实验表明, 当 $\alpha=2, 3$  时, Triangle 结构具有最小的时延及最大的路径效率 (定义为“直线几何距离/实际路线几何距离”)。文献[15]中接着探讨了仅存在邻节点干扰条件下的最大吞吐量和最优传送效率, 采用简单的时隙 ALOHA MAC 方案, 结果表明当 $\alpha=4$  时, Hexagon 结构具有最好的传输效果, 原因在于连通度小, 干扰程度小。

其他有价值的工作包括: 文献[19]面向网络吞吐量的最大化目标, 针对 Triangle、Square 和 Hexagon 结构, 建立不等式模型分析了实现最大公平性的速率分配方法, 分别提出了链路容量、最佳传输速率的定量描述, 分析表明当网络规模 (体现为通信跳数 *hop*) 从小到大变化时, 实现最大吞吐量的结构依次是 Triangle、Square 和 Hexagon。文献[20]和文献[21]描述了一般网络的容量区间, 提出取得对应容量的调度策略, 给出网络容量的上限, 进而得出 Square 结构中节点平均距离和最大网络

容量的描述, 并分析了链路衰落、时隙 ALOHA 协议、链路状态信息、拓扑信息对网络传输速率的影响。文献[22]针对 Spine、Ribbon、Square、Hexagon 和 Random 等多种拓扑结构, 基于 NS-2 仿真, 通过对分组交付率、路由开销、平均端到端时延这几个指标的综合比较, 认为最优的节点度为 4, 即采用 Square 结构在 Triangle 和 Hexagon 之间进行折中。

针对时延特性的研究<sup>[10]</sup>指出在节点随机失效的 Square 结构中, 网络的直径  $D(n)$  按  $\sqrt{n/\log(n)}$  规律变化, 并得到了  $r(n)D(n)$  的上下限为

$$\sqrt{2} < D(n)r(n) < \frac{2}{1 - \frac{2}{\sqrt{c\pi}}} \quad (25)$$

其中,  $c$  是与节点的功耗或可靠度相关的参数。

## 9 规则拓扑结构的网络设计

### 9.1 路由方案的研究与设计

目前针对路由方案的分析多面向随机游走路由方案。文献[14]探讨了在 Square 中随机游走路由的分组交付率的描述模型, 求出了给定跳数内数据分组传输成功概率的离散分布, 指出了相比最短路径或泛洪这 2 种路由方式, 随机游走在能耗节省和负载均衡上具有优越性。文献[23]指出利用局部网络拓扑信息能有效地减少时延, 基于图谱理论, 以网络节点数、任务周期占比概率、链路状态扩散范围为变量参数, 给出随机游走路由方式平均时延的精确描述。文献[24~26]基于图谱理论, 给出了随机游走方式的传输时延上下限, 并给出了在 *r*-nearest cycle (一种环状的传感网部署方式) 和 torus grid 这 2 种拓扑结构中采用随机游走路由方案的时延表达式。

针对随机游走路由方案的改进<sup>[15]</sup>用不同的信号传输半径 ( $d$ 、 $1.414d$  和  $2d$ ) 对应实现了 4-Neighbor、8-Neighbor 和 12-Neighbor 这 3 种路由方案, 其中, 后 2 种方案不仅能进行水平和垂直路由, 还能进行对角线方向路由, 如图 11 所示。仿真结果表明 4-Neighbor 和 8-Neighbor 方案的能耗差不多, 而 8-Neighbor 方案在时延和路径效率方面有明显优势。

文献[27]针对 Triangle 结构进行了立体映射和节点编址, 探讨了 4 种路由方案的相对性能。立体映射的方法如图 12 所示, 将平面的 Triangle 结构等分为 3 部分, 用 3 个轴隔开, 3 部分映射到立方体的 3 个面。

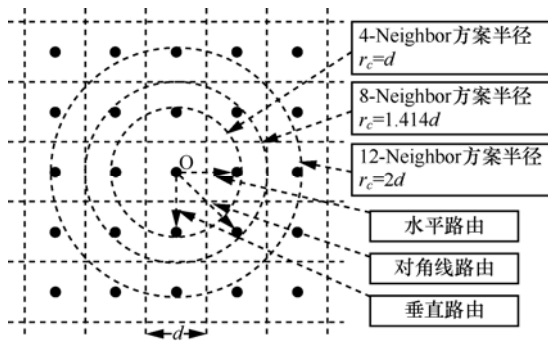


图 11 Square 中设定不同传输半径实现不同的路由方向

所提出的第 1 个路由方案为 (QDOR, quadrant-based dimension order) 路由, 数据分组沿平行于轴线的路径传送, 到达轴后, 再一直向位于中心的汇点传送。第 2 个方案为最短跳数优先 (MHF) 路由, 选择最短路径发向汇点。第 3 个为树型路由 (TB), 由 3 个轴和 3 个与相邻轴成 45 度角的直线组成 6 个树的主干, 各节点沿逆时针方向附到其最近的主干上。在第 4 种一聚合流式路由 (FB) 中, 在 Triangle 的每个半区选择一条遍历各个节点并在汇点终止的路径, 数据分组沿此路径传输并被聚合。文献[27]中通过仿真实验比较了这 4 种路由方案的性能, 指出 TB 路由能以最短路径实现流量平衡、节能和寿命优化, 提供最佳的性能, MHF 的性能次之, QDOR 的性能排第 3 位, FB 由于流量过于集中, 故性能最差。

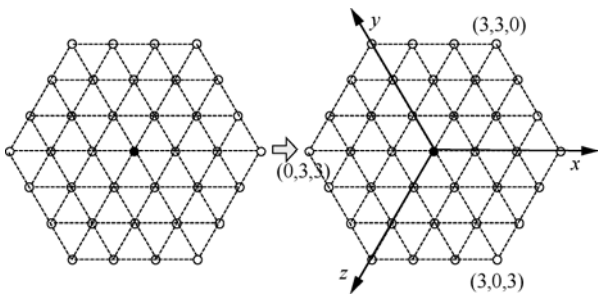


图 12 Triangle 结构的立体映射和节点编址

以上研究所提出的路由方案均未针对拓扑的规则对称性进行优化, 传输效率较低 (冗余传输较多)。基于结构的对称性和节点的可编址性, 改进工作[28]提出具有节能意识的路由协议 (DSAP, directional source-aware protocol), 研究该路由协议下的最佳拓扑结构。该协议不需要路由表, 为每个节点分配一个向量标识符, 标识节点与各个边界相隔的节点数目。当传输消息时, 进行源点和汇点标识符的减法运算, 通过若干准则确定优化能耗和传输时延的下一跳节点。

仿真结果表明, 在 Square 和 Triangle 中沿边界路径传输 (edge routing) 相比在区域内部传输 (interior routing) 需要较少的能耗; 由于在减少传输消息数目 (进而减小能耗) 和增大数据分组接收概率 (通过增加节点度数实现) 之间存在一个折中, 较低度数的拓扑结构 (如 Hexagon) 的能耗较少。

针对负载均衡问题的研究[29,30]指出, 采用传统的 uniform spreading (round-robin 方式) 选用 2 点间的各条最短路径进行数据传输, 向各条路径的转发概率相同, 存在负载不均衡的问题, 文献[30]中针对多种规则拓扑结构, 提出基于 Contour 的 Optimal Spreading 方法, 为各条出边设定不同的转发概率, 确保离源点相同距离的节点转发相同数目的消息。将多跳传输描述为一个多级排队网络, 设计存在链路失效条件下的仿真实验, 验证了此方法能均衡利用所有的最短路径并提升 QoS。相似的工作[15]分别针对点对点传输和多点对一点传输, 比较了对角线传输方案 (如图 13(a)所示) 和直线传输方案 (如图 13(b)所示) 的负载均衡性。理论分析与仿真实验表明, 转发区域中部的节点比边缘的节点负载要大, 且直线传输方案的负载均衡性要好些。

针对广播问题的研究[31]也充分利用结构的规则对称性, 为 5 种规则拓扑结构 (Triangle、Hexagon、4-Neighbor Square、8-Neighbor Square、Cube) 设计节能、低时延的广播协议 (分为 1-to-all 与 all-to-all 2 种), 1-to-all 广播协议选择部分合适的节点作为中继, 并采用有效的冲突处理策略, 以最少的跳数和消息数目实现全部节点的广播覆盖。通过节点分组和信道分配, 在每个信道内进行一组节点的 1-to-all 广播, 实现 all-to-all 的高效广播协议。

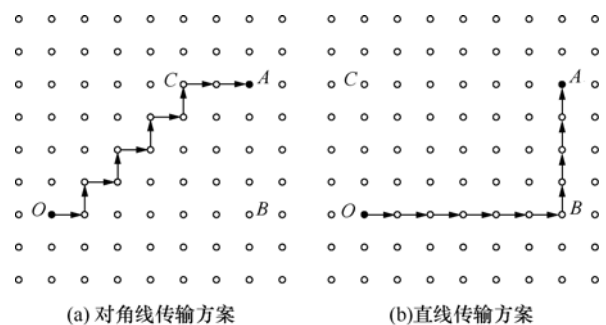


图 13 Square 中的 2 种路由方案

以上研究工作的缺点在于, 路由设计尚未充分针对通信环境的特性 (如链路和节点的失效等) 展开优化, 在实际环境下的可用性显得不足。

## 9.2 MAC 层的研究与设计

在 MAC 协议的设计方面, 文献[15,18]从最简单的时隙 ALOHA 方案出发, 针对 Square 结构展开解析和仿真研究, 结果表明:  $\alpha=4$  时, Hexagon 结构由于邻节点干扰小, 具有最好的传输效果。选择最优空分复用 MAC 方案作为比较对象, 仿真表明: 在  $\alpha=3, 4, 5$  时, 时隙 ALOHA 方案与最优空分复用方案的吞吐量之比分别为 0.71, 0.48, 0.43, 这说明当  $\alpha$  较小时, ALOHA 方案更接近于最优空分复用方案。这 2 种 MAC 方案分别代表了 MAC 协议性能的下限和上限。此外还在 Square 结构中比较了自适应功率传输策略和等功率传输策略的性能, 仿真结果表明, 对 ALOHA 方案, 自适应功率传输策略的吞吐量分布比等功率传输策略的均匀得多, 其综合性能也远强于后者。

文献[32]针对 Square、Hexagon 和 Triangle, 考虑非衰落信道与 Rayleigh 衰落信道、全向与定向天线等因素, 比较 2 种信道接入协议 (同步阵列法 SAM 和时隙 ALOHA) 的性能, 用 SINR 模型求出了各自的吞吐量和时延的定量描述。在规则拓扑结构中, SAM 协议不需要全局拓扑知识, 所有的数据传输在时间或频率上都是正交的。研究表明 SAM 比时隙 ALOHA 具有高得多的吞吐量。

MAX<sup>[33]</sup>是专门面向规则拓扑结构的、具有实用性的时分复用 MAC 协议, 在基本的实现方法中, 将规则拓扑网络划分为相同大小的不交集合 tile, 如图 14 阴影区域所示。

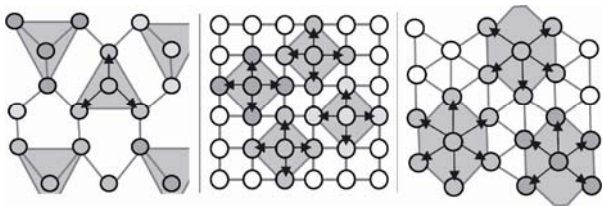


图 14 针对 Hexagon、Square、Triangle 的 tile 分隔

每个 tile 内的  $M$  个节点中, 一个时隙内只有一个节点发送数据, 实际的通信容量为单个链路容量的  $1/M$ , 文献[33]中给出了为 tile 内各节点分配时隙的方法。深入地分析探讨了  $r_c$  为任意取值时及干扰信号半径  $I > r_c$  时 tile 设置方法, 并研究了采用多信道通信、为超级节点分配较多时隙资源、多径传输减小拥塞、均匀网关节点布设等优化方法。仿真结果证明, MAX 提供了更优的端到端吞吐量和时延, 实现了灵活的上行与下行链路带宽管理、先验式路

由、接入控制、网关部署等功能。

## 9.3 组合/层次化规则拓扑结构设计

面向大范围传感网的覆盖和通信优化设计, 相关研究基于节点异构和层次化设计的思路, 构建 2 层拓扑结构, 其中, 文献[34]中用 Base Cell 实现充分的区域覆盖, 采用 Connect Cell 与若干个 Base Cell 相连, 提供高可靠性和长寿命, 分析表明采用 Hexagon 作为 Base Cell 比采用 Square 结构具有更好的覆盖效果。文献[35]针对 4 种规则拓扑结构 (Strip、Triangle、Square、Hexagon), 引入簇首节点设计 2 层拓扑结构。理论分析和仿真结果表明, 在相同的节点传输半径和覆盖范围条件下, 采用 Square 结构需要最小的单元格数目, Hexagon 具有最佳的可靠度和感知能力, 但需要最多的单元格数目, 而 Triangle 需要最小的能耗和跳数。

在优化设计方面, 文献[36]在 Square 中设计了相似的 2 层拓扑结构, 由普通节点和簇首节点组成, 分析了中继节点和簇首节点的能耗, 提出了以最小部署代价优化整网能耗及寿命的模型, 指出网络所需的簇首数目大致按  $n_0^{1-\alpha/4}$  规律变化, 其中,  $n_0$  是网络中普通节点的数目。文献[37,38]设计了一种虚拟层次化的规则拓扑结构, 进而通过拓扑分割构成微虚拟小区来解决网络的可扩展性问题。

该 2 层体系结构实现简单, 但会带来簇首节点的负载过重问题, 且针对高性能层次体系结构的设计, 如上层逻辑拓扑结构、路由方式等方面, 还具有很大的探讨和创新空间。

## 10 结束语

以上研究用节点有效面积指标对规则拓扑结构的部署方法和效能进行了分析和比较, 提出了在不同  $r_c/r_s$  配置下的最优部署模式。从中发现:

1) 网络的信号覆盖、通信连通效果与通信半径和传输半径之比  $r_c/r_s$  的设置有密切的关系, 可以对照相关结论进行部署设计。

2) 可以认为在邻节点干扰较强的环境中, 宜采用低连通度的 Hexagon 结构, 反之可采用高连通度的 Triangle 结构, 实现低时延, Square 的抗干扰性能居中。

3) Square 结构相对来说得到了更广泛的关注, 其次是 Hexagon 和 Triangle, 已经得到了关于网络容量、时延、能耗、路由、MAC 协议、广播、负载均衡等方面的多个结论。

尽管较早就展开有针对规则拓扑结构的研究, 但这方面需要解决的问题还很多。结合无线传感网技术的发展, 可以预见将来值得研究的内容包括如下内容。

1) 具体应用环境可能无法采用单一的规则拓扑结构, 需要研究规则拓扑结构的变化与组合特性, 包括三维空间的组合层次化结构设计、具有 Scale-free、Small-world 特性的拓扑结构优化设计、离散点(区域)的连通-覆盖问题研究以及拓扑结构的时变演化特性。

2) 规则拓扑的区域内部节点和边界节点具有不同的转发能力, 以 Square 为例, interior routing 具有 2 个出边, 而 edge routing 仅有 1 个出边, 且边界效应不可忽略, 这些节点的异构性问题值得深入探讨。

3) 在路由和传输方面, 目前的工作多针对“单源点—单汇点”间传输的随机游走路由方式, 机会路由、容错路由、高效源路由、饱和流等内容值得进一步研究。

4) 目前的相关研究多基于仿真, 随着节点软硬件开发技术的成熟与成本的下降, 基于实物测试床的研究成为可行, 有必要基于更准确的物理层模型和测试床实验, 展开更准确可靠的分析与实证。

5) 未来无线网络应具有足够的认知和协作能力, 在规则拓扑结构中更容易利用可预知的拓扑和节点位置信息, 设计有效的网络认知优化模型和协作模型。

#### 参考文献:

- [1] TIAN H, SHEN H, MATSUZAWA T. Developing energy-efficient topologies and routing for wireless sensor networks[A]. Lecture Notes in Computer Science[C]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005. 461-469.
- [2] WANG Y, DHARMA P A. Optimizing sensor networks for autonomous unmanned ground vehicles[A]. SPIE[C]. Cardiff, UK: SPIE Press, 2008. 711215-1-711215-11.
- [3] MIAO Z, CUI L G, ZHANG B H. Deployment patterns for k-coverage and l-connectivity in wireless sensor networks[A]. IET International Conference on Wireless Sensor Networks 2010[C]. Beijing, China, 2010. 73-77.
- [4] BAI X L, SANTOSH K, XUAN D. Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity[A]. 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. Florence, Italy, 2006. 131-142.
- [5] KOUSHIK K, SUMAN B. Node placement for connected coverage in sensor networks[A]. International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks 2003[C]. Sophia-Antipolis, France, 2003.
- [6] EDOARDO S B, GALEN S. Wireless sensor placement for reliable and efficient data collection[A]. 36th Hawaii International Conference on System Sciences 2003[C]. Hawaii, USA, 2003.
- [7] RAJAGOPAL I, KOUSHIK K, SUMAN B. Low-coordination topologies for redundancy in sensor networks[A]. 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. Urbana-Champaign, USA, 2005. 332-342.
- [8] BAI X L, YUN Z Q, XUAN D. Deploying four-connectivity and full-coverage wireless sensor networks[A]. 27th IEEE INFOCOM[C]. Phoenix, USA, 2008. 906-914.
- [9] YUN Z Q, BAI X L, XUAN D. Complete optimal deployment patterns for full-coverage and k-connectivity ( $k < 6$ ) wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3): 934-947.
- [10] SHAKKOTTAI S, SRIKANT R, SHROFF N. Unreliable sensor grids coverage connectivity and diameter[A]. 22th IEEE INFOCOM[C]. San Francisco, USA, 2003. 1073-1083.
- [11] RAJAGOPALAN R, VARSHNEY P K. Connectivity analysis of wireless sensor networks with regular topologies in the presence of channel fading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3475-3483.
- [12] WU D W, XIE D Q. The analysis of fault tolerance in triangular topology sensor networks[A]. Lecture Notes in Computer Science[C]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007. 248-261.
- [13] TIAN H, SHEN H, ROUGHAN M. Maximizing networking lifetime in wireless sensor networks with regular topologies[A]. 9th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies[C]. Denudin, Newzealand, 2008. 211-217.
- [14] TIAN H, SHEN H, MATSUZAWA T. Random walk routing in WSNs with regular topologies[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2006, 21(4): 496-502.
- [15] LIU X W. Performance Analysis and Topology Control of Large Wireless Networks with Fading[D]. Notre Dame: University of Notre Dame, 2007.
- [16] LIU X W, HAENGGI M. Throughput analysis of fading sensor networks with regular and random topologies[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2005, 2005(4): 554-564.
- [17] LIU X W, HAENGGI M. The impact of the topology on the throughput of interference-limited sensor networks with Rayleigh fading[A]. 2nd IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad-Hoc Communications and Networks[C]. Santa Clara, USA, 2005. 317-327.
- [18] LIU X W, HAENGGI M. Performance analysis of rayleigh fading ad hoc networks with regular topology[A]. IEEE Global

- Telecommunications Conference 2005[C]. St. Louis, USA, 2005. 2725-2729.
- [19] NARAYANAN S, JUN J H, PANDIT V. Proportionally fair rate allocation in regular wireless sensor networks[A]. IEEE Conference on Computer Communications Workshops 2011[C]. Shanghai, China, 2011. 549-554.
- [20] MERGEN G, TONG L. Stability and capacity of regular wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(6): 1938-1953.
- [21] MERGEN G, TONG L. Capacity of regular ad hoc networks with multipacket reception[A]. 39th Allerton Conference on Communication, Control, and Computing[C]. Allerton, USA, 2001.
- [22] PRAGASEN M, THULANI N, MATTHEW A. A performance comparison of wireless multi-hop network topologies based on average node degree[A]. Southern African Telecommunications Networks and Applications Conference 2007[C]. Sugar Beach Resort, Mauritius, 2007.
- [23] PRITHWISHT B, SAIKAT G. Effect of limited topology knowledge on opportunistic forwarding in ad hoc wireless networks[A]. 8th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks[C]. Avignon, France, 2010. 71-80.
- [24] PRITHWISHT B, CHAU C K. Latency of opportunistic forwarding in finite regular wireless networks[A]. 5th International Workshop on Foundations of Mobile Computing[C]. Toronto, Canada, 2008. 55-63.
- [25] PRITHWISHT B, CHAU C K. Opportunistic forwarding in wireless networks with duty cycling[A]. 3rd ACM Workshop on Challenged Networks[C]. San Francisco, California, USA, 2008. 19-26.
- [26] CHAU C K, PRITHWISHT B. Exact analysis of latency of stateless opportunistic forwarding[A]. 28th IEEE INFOCOM[C]. Rio de Janeiro, Brazil, 2009. 828-836.
- [27] SALHIEH A, WEINMANN J, KOCHHAL M. Power efficient topologies for wireless sensor networks[A]. International Conference on Parallel Processing[C]. Valencia, Spain, 2001. 156-163.
- [28] GU H X, WANG K, WANG H Y. Routing in hexagonal wireless sensor networks[A]. 4th International Conference on Wireless and Optical Communications Networks[C]. Singapore, Singapore, 2007. 1-5.
- [29] MAMIDISETTY K K, DUAN M L, SASTRY S. Multipath dissemination in regular mesh topologies[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(8):1188-1201.
- [30] MAMIDISETTY K K. Generalizing Contour Guided Dissemination in Mesh Topologies[D]. Akron: University of Akron, 2008.
- [31] SHEN J P, HSU C S, CHANG Y J. Efficient broadcasting protocols for regular wireless sensor networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2006, 6(1):35-48.
- [32] HONG K Z, HUA Y B. Throughput analysis of large wireless networks with regular topologies[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2007, 2007(26760): 26760.
- [33] MANGHARAM R, RAJKUMAR R. MAX: A maximal transmission concurrency MAC for wireless networks with regular structure[A]. 3rd IEEE International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems[C]. San Jose, USA, 2006. 4374406.
- [34] TIAN H, SHEN H. An optimal coverage scheme for wireless sensor network[A]. Lecture Notes in Computer Science[C]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005. 722-730.
- [35] JIN Y L, MIAO H J, WANG H. Power-efficient topologies for wireless sensor networks with fixed communication range[J]. Journal of Shanghai University (English Edition), 2010, 14(1):39-44.
- [36] VIVEK M, CATHERINE R, DANIEL K. Design of surveillance sensor grids with a lifetime constraint in EWSN[A]. 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks[C]. Berlin, Germany, 2004. 263-275.
- [37] 胡致远, 王景, 邓建良. 无线 mesh 网络规则拓扑结构与容量研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(11): 4197-4200, 4221.  
HU Z Y, WANG J, DENG J L. Architecture and capacity research of wireless mesh network with regular topology[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(11): 4197-4200, 4221.
- [38] 胡致远, 邓建良, 姜建伦. 无线传感器网络与路由算法[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(8):138-140, 146.  
HU Z Y, DENG J L, JIANG J L. Wireless sensor networks and routing algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(8): 138-140, 146.

#### 作者简介:



李文翔 (1979-), 男, 湖北武汉人, 博士, 武汉科技大学讲师, 主要研究方向为认知无线网络、无线传感器网络等。



马娅婕 (1974-), 女, 广西横县人, 博士, 武汉科技大学副教授, 主要研究方向为网络智能控制、无线传感器网等。



徐俊 (1986-), 女, 湖北赤壁人, 武汉大学博士生, 主要研究方向为无线工业控制网络。

杨剑峰 (1976-), 男, 江苏南通人, 博士, 武汉大学副教授, 主要研究方向为无线网络与嵌入式系统。