

# 无线传感器网络的节点智能部署方法研究

李燕君 潘 建

(浙江工业大学计算机学院 杭州 310023)

**摘 要** 为满足应用系统对无线传感器网络性能,如覆盖连通质量等方面提出的特定需求,研究了概率感知和通信模型下,保障连通覆盖性能的节点部署问题,提出了基于带精英策略的非支配排序遗传算法的节点智能部署方法。仿真结果显示,在满足应用需求的前提下,提出的部署方法与随机部署和网格部署相比,其需要部署的节点数目明显较少;并且,该方法能得到一组反映目标间制约关系的非支配解,可供用户直观地在多个目标之间进行权衡,并折衷选择部署方案。

**关键词** 无线传感器网络,部署,连通,覆盖,遗传算法

**中图法分类号** TP393 **文献标识码** A

## Intelligent Node Deployment Scheme for Wireless Sensor Networks

LI Yan-jun PAN Jian

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** To satisfy the specific requirements from wireless sensor network applications, e. g., the quality of coverage and connectivity etc., the sensor deployment issue for guaranteeing coverage and under probabilistic sensing and communication models was studied connectivity performance. A novel solution based on elitist non-dominated sorting genetic algorithm(NSGA-II) was proposed. Simulation results show that the proposed scheme can satisfy the user-specified coverage and connectivity requirements with a smaller number of nodes compared with random and grid deployment schemes. Furthermore, it provides a set of non-dominated solutions that reflect the conflicting relationship among multiple objectives, and gives the user more intuitive compromises to choose.

**Keywords** Wireless sensor networks, Deployment, Connectivity, Coverage, Genetic algorithm

### 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由于其无处不在的感知能力和网络自组织能力被广泛应用于监测、追踪等任务。在大范围监测应用中,传感器节点的部署通常采用随机抛撒的方式;而对于另一类应用场景,如建筑物健康监测,节点需要部署在特定位置以满足工程的要求。由此,节点部署方式可分为随机部署和人工部署两类。其中,随机部署适用于大范围或恶劣的环境,它是不考虑服务质量(Quality of Service, QoS)要求的盲目部署,只能用冗余换取性能保证;而人工部署能够预先计算最佳部署位置,使部署好的网络性能最大程度地满足应用的特定需求,如覆盖质量、连通质量、检测延迟、网络寿命等。显然,人工部署通过对节点位置的优化,不仅可以提高事件检测率<sup>[1]</sup>,还能节省成本<sup>[2]</sup>、延长网络寿命<sup>[3]</sup>。值得注意的是,在制定部署方案时需要考虑的目标往往不止一个,而这些目标之间又往往是相互制约的,如成本与性能。因此,部署优化问题的关键在于如何找到一组帕累托(Pareto)最优方案,使得 WSN 用户能够在这一组

方案中根据对目标的偏好和实际条件权衡选择折衷方案。不失一般性,本文以满足应用的覆盖和连通的质量需求和最小化成本为目标,进行节点部署方案的研究。对于其他需求目标,也可以采用与本文类似的研究方法。

覆盖和连通是衡量 WSN 服务质量最基本的两个指标。覆盖质量用来表征被监测区域的物理信息能否被准确感知;而连通表征捕获的事件信息能否被成功地传送到基站。传感器节点在空间上的部署只有同时满足一定的覆盖质量和连通质量,才能保证上层路由协议及 WSN 监测任务的顺利实现。本文的主要思想是根据应用环境中不同子区域对覆盖质量提出的不同要求,有区分地放置最少数量的节点,使得部署好的网络能最大程度地满足覆盖和连通质量要求。显然,这个问题可以归纳为多目标优化问题,以最小化部署节点数量同时最大化地满足应用对覆盖连通质量的要求为目标。求解多目标优化问题的方法有很多,但鉴于该问题,需权衡各个目标的本质特点及无法在多项式时间内得到精确解的情况,本文采用了基于带精英策略的非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II)求解,并将结果与随机

到稿日期:2011-10-22 返修日期:2012-02-17 本文受国家自然科学基金(6103264),工业控制技术国家重点实验室开放课题(ICT1110)资助。

李燕君(1982-),女,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为传感器网络服务质量保障, E-mail: yjli@zjut.edu.cn;潘建(1975-),男,硕士,副教授,主要研究方向为嵌入式系统、移动计算。

部署和网格部署做了比较。

## 2 相关工作

覆盖与连通,在 WSN 研究中是两个有一定关联的问题。在节点的感知和通信模型都为布尔圆模型的前提下,如果节点的通信半径至少是传感半径的两倍,那么凸区域的单覆盖就能同时满足单连通要求。可见,只有满足一定的前提条件,覆盖和连通问题才能转化为同一个问题。而一般情况下,两者需要区别对待。文献[3]研究的最优节点集选取问题也是部署问题的一个子问题,但是该研究基于上述假设,即认为通信半径是传感半径的两倍以上,所以其研究结果缺乏普适性。文献[4]系统地研究了通信半径和传感半径为任意比例下,能同时满足 k-覆盖和 k-连通的最优部署方案,然而布尔圆模型的假设仍没有被打破。在实际中,传感和通信模型不可能如此理想,因而文献[4]研究的最优部署方式实际上不是真正的“最优”。文献[5-7]在研究部署问题时,采用了概率感知模型。其中,文献[5]针对应用区域对于覆盖的需求,提出了一种启发式迭代算法 Min-Miss,以最小化累积漏检概率为优化目标,得到相应的部署方案;文献[6]在文献[5]的基础上,进一步考虑了网络中覆盖要求不均匀的情况,根据部署策略与漏检概率为线性移不变这一特性,将部署问题转化为整数线性规划问题,并提出启发式迭代算法 diff\_deploy,得到部署方案。然而,在研究中都只考虑了覆盖质量,不能保证网络的连通性能。文献[7]提出了基于禁忌搜索的满足连通覆盖要求的差异部署策略,但是该方法处理连通问题时考虑的是布尔圆模型,又由于禁忌搜索算法本身的局限性,其结果只能得到唯一最优解,这不利于对多个目标的权衡。本文提出的基于 NSGA-II 得到的部署方案更具多样性,便于在相互制约的多个目标之间更好地进行权衡与折衷,并且采用的感知和通信模型考虑了传感和通信的或然性,更加接近实际情况。

## 3 系统模型与问题描述

### 3.1 感知模型和通信模型

本文在研究中摒弃了传统的布尔圆感知模型和通信模型,而采用更加接近实际的指数衰减感知模型和基于阴影衰落的通信模型。具体地,传感器节点  $s$  检测到位置  $P$  发生事件的概率  $c_{sP}$  为:

$$c_{sP} = \begin{cases} 1, & h_{sP} \leq r_s \\ e^{-\omega(h_{sP} - r_s)^\beta}, & r_s < h_{sP} \leq r_u \\ 0, & h_{sP} > r_u \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $h_{sP}$  为节点  $s$  与位置  $P$  之间的距离,  $\omega$  和  $\beta$  是与感知能力衰减相关的系数,  $r_s$  和  $r_u$  是感知距离的两个阈值。实际中,红外和超声波传感器都符合指数衰减的感知模型。假如位置  $P$  发生的事件可以被多个传感器节点同时检测,那么它们的联合感知概率至少被一个节点检测到的概率为:

$$C_P = 1 - \prod_{s \in S} (1 - c_{sP}) \quad (2)$$

式中,  $S$  为能检测到位置  $P$  的节点的集合, 又称  $P$  的感知邻域, 即  $S = \{s | h_{sP} \leq r_u\}$ 。

经验显示,低功耗传感器节点的通信链路很不稳定,因此我们采用文献[8]中的基于丢包率的链路模型来衡量网络的连通质量。在采用非相干频移键控调制方式和不归零编码的条件下,链路丢包率可由式(3)决定:

$$p(h) = (1 - \frac{1}{2} \exp(-\frac{\gamma(h)}{2 \cdot 0.64}))^{8f} \quad (3)$$

式中,  $h$  为发送方和接收方之间的距离,  $\gamma(h)$  为信噪比,  $f$  是帧长度,对于给定的传输功率  $P_t$ , 信噪比  $\gamma(h)$  可表示为:

$$\gamma(h) = P_t - PL(h) - P_n \text{ (dB)} \quad (4)$$

式中,  $P_n$  为噪声水平, 文献[8]给出其参考值为  $-115$  dB;  $PL(h)$  是路径损耗, 基于阴影衰落信道模型, 它可由式(5)获得<sup>[9]</sup>:

$$PL(h) = PL(h_0) + 10n \log_{10}(h/h_0) + X_\sigma \text{ (dB)} \quad (5)$$

式中,  $h_0$  是参考距离, 值为  $1$  m,  $n$  是路径损耗系数,  $X_\sigma$  为服从零均值, 方差  $\sigma^2$  的正态分布随机数。将式(4)、式(5)代入式(3)即可得到任意收发方距离下的丢包率值。

### 3.2 问题描述

给定部署区域,我们可以从环境模型中提炼出对覆盖质量的需求。以面向火灾监测的应用为例,按照子区域的危险程度设定节点的覆盖概率,最危险的区域如化工厂、加油站、树林附近需要节点覆盖概率接近  $100\%$ , 周围区域按离危险中心的距离依次递减,而河流附近危险级别最低,只需设置  $20\%$  左右的覆盖阈值即可。为了便于系统的数学描述,我们将区域  $A$  离散化为  $X \times Y$  的栅格,当  $X, Y$  充分大时,每个栅格可看作一个点。栅格划分的精细程度取决于对目标的精度要求和允许的计算能力。对于任一栅格  $i$ , 给定覆盖概率阈值  $R_i$ , 要求最终的部署策略能确保该点实际感知概率  $C_i$  大于或等于覆盖阈值  $R_i$ 。任意两个栅格  $i, j$  之间的距离定义为两个栅格质心间的距离, 表示为  $h_{ij}$ 。显然,若部署的节点数目充分大,那么就很容易满足对任意栅格  $i, C_i \geq R_i$  的要求。但是考虑到增多节点的代价, 希望用尽量少的节点来满足对覆盖的要求。另外,节点能相互连通才能将感知到的信息传送到基站,因此部署好的网络需要满足应用对连通质量的需求。综上,本文要研究的部署问题可以转化为如下的多目标优化问题形式:

$$\begin{aligned} \min N &= \sum_{i=1}^{X \times Y} d_i \\ \min \Delta &= \sum_{i=1}^{X \times Y} \delta_i, \\ \text{s. t. } C_i &= Cn(G(V, E)) \geq R_i, d_i \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $\delta_i = \begin{cases} (R_i - C_i)/R_i, & R_i > C_i \\ 0, & R_i \leq C_i \end{cases}$ ,  $G(V, E)$  是由部署节点

构成的图,  $V$  为点集,  $E$  为可相互通信的链路组成的边集,  $Cn(\cdot)$  是连通质量函数, 定义为网络单连通概率。给定通信模型的相关参数和节点位置, 整个网络  $Cn(\cdot)$  就可以被计算出来<sup>[10]</sup>。在式(6)中, 第一个目标是使部署的节点数目最小; 第二个目标是使部署后所有栅格点的实际覆盖概率与既定需求值之间的差值累计总和最小; 限制条件是网络连通度大于系统要求的连通质量, 最终得到的部署策略由布尔矩阵来描述, 矩阵元素为  $1$  表示该栅格内部署节点, 反之则为不部署。图 1 为节点部署前后的示意图, 其中左图颜色越浅的区域火灾发生的概率越高, 相应设定的覆盖阈值越大; 相反, 颜色深的区域火灾发生概率小, 设置的阈值也小。右图是假定按照差异需求在区域内部署节点后, 这些节点自组织成网络, 任意点的被感知概率都大于给定阈值, 并且整个网络的连通质量也满足应用需求。

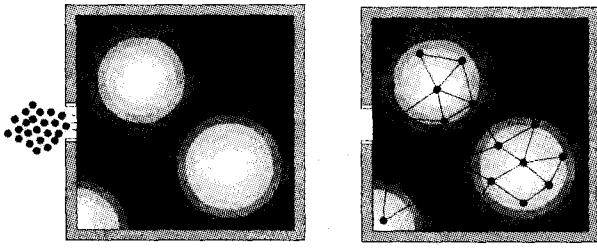


图1 节点部署前后示意图

图论中的最小几何圆覆盖(MGSC, Minimum Geometric Disk Cover)问题被证明是 NP-hard 问题<sup>[11]</sup>, 所以它的子集最小连通覆盖问题也是 NP-hard 问题。式(6)描述的多目标优化问题又是最小连通覆盖问题的一个子集, 因此它也是一个 NP-hard 问题, 其解空间虽然是有限的, 但是非常大, 值为  $2^{X \times Y}$ 。在如此庞大的解空间内, 搜索最优值需要借助于启发式算法。虽然启发式算法不能保证得到全局最优解, 但是它最大的优势在于能以多项式的搜索复杂度在较短的运算时间内得到一个最优或次优解。下面利用遗传算法这种启发式智能算法求解这个问题。

## 4 基于 NSGA-II 的部署方法

遗传算法 GA(Genetic Algorithms) 是受生物学进化学说和遗传学理论的启发而发展起来的一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法。GA 的多方向和全局搜索特点使得它对于搜索帕累托解十分有益。NSGA-II 是带精英策略的非支配遗传算法<sup>[12]</sup>, 它对于 GA 的改进主要有: (1) 将每个个体按照它们的支配与非支配关系进行分层, 再做选择操作; (2) 采用拥挤度和拥挤度比较算子以确保算法能收敛到一个均匀分布的帕累托面上; (3) 引入精英策略, 将父代种群与其产生的子代种群组合, 共同竞争产生下一代。本节采用 NSGA-II 来求解 3.2 节中描述的多目标优化问题。

### 4.1 产生初始种群

由于部署策略已经是由 0,1 组成的布尔矩阵, 因此不需要再进行参数编码, 就可以直接产生初始种群。为保证初始种群的均匀性和多样性, 通过随机部署和贪婪算法共同生成长度为  $N_p$  的初始种群  $P_0$ 。随机部署按式(7)进行:

$$d_i = \begin{cases} 1, & \text{rand} < K \cdot R_i \\ 0, & \text{其余情况} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\text{rand}$  是 (0,1) 之间的随机数,  $K$  是可调参数, 用以调节节点密度, 防止偏差太大而影响算法的收敛速度。贪婪方法与文献[6]中的初始化方法类似。令部署策略服从二项分布  $B(\theta)$ , 即以概率  $\theta$  部署节点, 以概率  $1-\theta$  不部署节点。 $\theta$  由式(8)决定, 其物理含义是栅格  $i$  的感知邻域中不满足覆盖要求的点占感知邻域中节点总数的比例。

$$\theta = \frac{1}{|S(P_i)|} \sum_{i=1}^{|S(P_i)|} 1_{\{C_i < R_i\}} \quad (8)$$

式中,  $|S(P_i)|$  是位置  $P_i$  的感知邻域  $S$  中的节点个数,  $1_{\{\cdot\}}$  是指示函数, 如果满足  $\{\cdot\}$  中的条件, 则其值为 1, 反之则为 0。贪婪算法的步骤如下: 1) 假定一开始网络中没有部署任何节点, 对任意栅格  $i$ , 都有  $C_i = 0$ , 代入式(8)计算  $\theta$  值; 2) 将所有点的  $\theta$  值按大小排序, 相应的栅格点与  $\theta$  值都存入表  $L$  中; 3) 选择表  $L$  中  $\theta$  值最大的栅格, 将其去除。同时比较该栅格实

际能被感知的概率  $C_i$  与需求  $R_i$ , 若  $C_i < R_i$ , 则依概率  $\theta$  部署节点于该栅格内; 4) 更新部署矩阵和该点的感知邻域及相应的  $\theta$  值, 更新表  $L$ 。若  $L$  非空, 则重复步骤 3)、4); 当  $L$  为  $\emptyset$  时, 便得到由贪婪算法产生的初始种群。

### 4.2 快速非支配排序

初始种群产生后, 对种群内的每个个体进行评估, 其目标函数由式(9)定义:

$$F_1 = \sum_{i=1}^{X \times Y} d_i, F_2 = \sum_{i=1}^{X \times Y} \delta_i, Ct = Cn(G) \quad (9)$$

式中, 目标  $F_1$ 、 $F_2$  和限制条件  $C_i$  分别与式(6)描述的目标和限制条件相对应。根据式(9)计算得到目标评估值后, 即可对种群的个体进行快速非支配排序。排序后的个体被分为若干个不同的等级。由于同一等级的个体无法比较优劣, 因此引入下一节的拥挤度比较。

### 4.3 拥挤度比较

拥挤度是指在种群中给定点周围个体的密度。在目标函数下对个体进行非支配排序, 如果两个个体的非支配排序不同级, 则取排序号较小的个体; 如果两个个体在同一级, 则取周围较不拥挤的个体。拥挤度算子维持了种群的多样性, 使得算法能够收敛到一个均匀分布的帕累托面上。得到的种群个体进入遗传操作环节。

### 4.4 遗传操作

遗传操作有选择、交叉和变异 3 步。选择操作体现了自然界中适者生存的思想。这里采用锦标赛选择, 随机地从父代种群中选择出一些个体, 根据适应度函数选择最好的进行繁殖, 选出的个体总数与初始种群数目相同, 也为  $N_p$ 。交叉是 GA 中产生新个体的主要方式, 体现自然界中信息交换的思想。交叉操作通过把两个父代个体的部分结构进行替换重组, 产生新个体。这里以概率  $p_c$  对选择得到的个体进行行或列的单点交叉。变异是自带基因按小概率扰动产生的变化, 它模拟了生物进化的偶然基因突变现象。这里以概率  $p_m$  对交叉得到的个体任取一个基因进行二进制变异。最终得到子代  $Q_0$ , 个体数为  $N_p$ 。

NSGA-II 引入了精英策略以扩大采样空间, 即将父代种群与子代种群组合, 共同竞争下一代种群。这里令  $R_0 = P_0 \cup Q_0$ , 个体变为  $2N_p$ 。对  $R_0$  进行非支配排序, 比较其拥挤度, 从  $R_0$  中选出大小为  $N_p$  的下一代父代种群  $P_1$ 。然后继续采用锦标赛选择、交叉、变异算子, 产生子代种群。直至进化代数满足设定的最大进化代数  $gen$ 。

### 4.5 计算复杂度

NSGA-II 的算法最差时间复杂度为  $O(m \times N_p^2)$ , 其中  $m$  为目标函数个数,  $N_p$  为种群大小。

## 5 仿真评价

本节对基于 NSGA-II 的部署策略进行仿真验证, 将其性能及资源耗费与随机部署和规则部署进行比较。

### 5.1 仿真设置

考虑  $50\text{m} \times 50\text{m}$  的方形区域, 若以  $1\text{m} \times 1\text{m}$  为单位来划分栅格, 每个栅格对应一个用户指定的覆盖阈值, 那么整个区域的覆盖阈值可由一个  $50 \times 50$  的方阵描述。阈值的范围从 0.1 变化到 0.99, 值越大, 意味着覆盖的要求越高, 相应地, 需要部署的节点就越密集。网络连通质量要求达到 95%, 即要求网络单连通概率至少为 95%。与传感器相关的参数  $\omega, \beta$ ,

$r_s$  和  $r_u$  分别设置为 0.4、1.2、1 和 6, 根据式(10)计算得到等效于布尔圆模型的传感半径  $ER_s$  为 4m。节点的传输功率从 -16.9dB 变化到 -3.2dB, 根据式(10)计算得到对应于等效于布尔圆的通信半径  $ER_c$  为 5m 变化到 11m。

$$ER_s = \int_0^{r_u} c \cdot dh \quad (10)$$

$$ER_c = \int_0^{\infty} p \cdot dh$$

式中,  $c$  和  $p$  分别由式(1)和式(3)决定。等效传感与通信半径与感知、通信模型的关系如图 2 所示。引入它们的目的是为了便于仿真中描述通信和感知范围之间的关系。

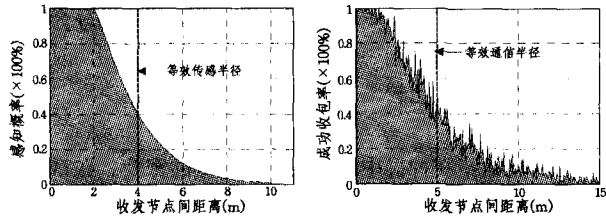


图 2 等效传感半径与等效通信半径示意图

对于 NSGA-II 算法, 设置初始种群个数  $N_p = 50$ , 进化代数  $gen = 50$ , 交叉概率  $p_c = 0.9$ , 变异概率  $p_m = 0.1$ ; 对于随机部署, 我们从 50 组随机产生的符合覆盖连通需求的解中, 选出节点数最少的与 NSGA-II 算法进行比较; 规则部署则采用正方形网格部署。

## 5.2 仿真结果

图 3 显示了随  $ER_c/ER_s$  的变化, 3 种部署策略为满足系统要求所需的节点个数。对于这 3 种策略, 所需节点数的变化趋势基本一致, 都是先随  $ER_c/ER_s$  的增大而减小, 最终收敛于一个较为恒定的值。这是因为传感参数没有发生变化, 因此, 为满足覆盖要求所需的最少节点数不会因为有效通信半径的增大而无止境增大。由此可见, 满足覆盖连通需求后, 盲目增大通信范围并不能有助于系统性能的提高, 反而是对能量的浪费。与随机部署和规则部署相比, 基于 NSGA-II 的部署策略所需节点数最少, 对于大规模网络它可大大节省系统费用。图 4 显示了这 3 种策略形成的网络的连通质量情况。由于低功耗无线通信的不稳定性, 网络连通质量不是一个恒定值, 图中标注了其波动范围。总体来看, 随着有效通信范围的增大, 通信质量也会有所提高, 基于 NSGA-II 的策略由于部署的节点少于随机部署和规则部署, 因此得到的网络质量不如这两种策略, 但是它仍然满足应用对于连通质量的需求。

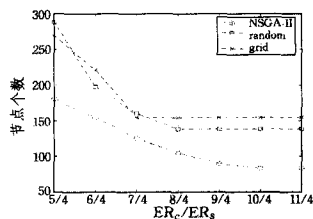


图 3 部署节点数目随  $ER_c/ER_s$  的变化

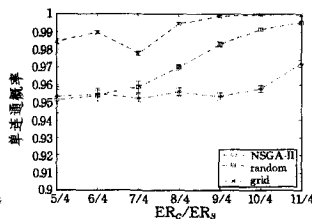


图 4 网络连通质量随  $ER_c/ER_s$  的变化

图 5 和图 6 显示了由 NSGA-II 得到的两组不同  $ER_c$  值下的非支配解。图 4 中的两组解均满足  $C_t = 95\%$  的限制条件。根据两个目标的不同取值, 用户可以在多个方案之间权衡。如果节点数目有限, 那么可以容许部分区域的实际覆盖

概率在阈值之下, 就可以选择左边区域的方案; 相反, 如果要求覆盖质量尽量满足需求, 可以承受增加少量节点的代价, 则可以选择右边区域的方案。图 5 中的两组解均满足  $F_2 = 0$ , 即实际检测概率都大于或等于给定阈值。图中显示了网络连通质量从 0.89 变化到 0.96 的一组方案供用户折衷选择。在这种情况下, 如果用户对网络连通质量的要求有所放松, 则可以选择节点数目较少的方案; 而如果要求网络连通质量达到较高水平, 则要付出一定的代价部署更多的节点, 即  $y$  轴上方的方案。

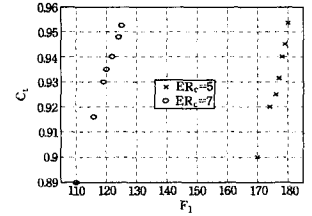
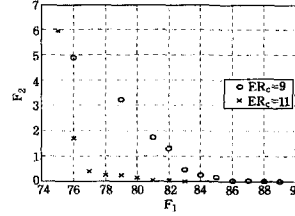


图 5 由 NSGA-II 得到的非支配部署方法, 其中  $C_t = 95\%$

结束语 本文研究了概率感知和通信模型下保障连通覆盖质量的节点部署问题。该问题被归纳为多目标优化问题, 并采用带精英策略的非支配排序遗传算法对其进行求解。仿真结果证明, 本文提出的部署策略在满足应用 QoS 需求的前提下, 比随机部署和规则部署需要部署的节点数目明显减少, 并且, 遗传算法能提供一组部署方法, 可供用户在相互制衡的多个目标值之间找到更好的折衷方案。

## 参考文献

- [1] Stolkin R, Vickers L, Nickerson J V. Using environmental models to optimize sensor placement[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(3): 319-340
- [2] 李明, 石为人. 基于二进制粒子群算法的异构传感器网络成本最优节点部署机制[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 63-66
- [3] 贾杰, 陈剑, 常桂然, 等. 无线传感器网络中基于遗传算法的优化覆盖机制[J]. 控制与决策, 2007, 22(11): 1289-1292, 1301
- [4] Yun Z, Bai X, Xuan D, et al. Optimal deployment patterns for full coverage and  $k$ -connectivity ( $k \leq 6$ ) wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Networking, 2010, 18(3): 934-947
- [5] Zou Y, Chakrabarty K. Uncertainty-aware and coverage-oriented deployment for sensor networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2004, 64(7): 788-798
- [6] Zhang J, Yan T, Son S H. Deployment strategies for differentiated detection in wireless sensor networks[C] // Proc. of IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). Reston, VA: IEEE Communication Society, 2006: 316-325
- [7] Aitsaadi N, Achir N, Boussetta K, et al. A tabu search WSN deployment method for monitoring geographically irregular distributed events[J]. Sensors, 2009, 9(3): 1625-1643
- [8] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low-power wireless links[C] // Proc. of IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). Santa Clara: IEEE Communication Society, 2004: 517-526

式(32)确定,由式(33)一式(37)得到视频流 C 的碰撞率,如图 2 所示。可以看到,在无接纳控制时,碰撞概率随负载增加而增大,当负载大到一定程度后,碰撞概率将下降,这是一些站点或流无法接入导致的。当采用本文的接纳控制后,由于接入流受到控制,碰撞概率较小;当网络饱和后,碰撞概率稳定在某一值。

#### 7.4 通过率分析

本文比较了某站点在以下 3 种条件下的系统通过率、语音通过率、数据通过率:(1)采用子载波比特分配和未采用自适应带宽预留及比特分配。(2)未采用自适应带宽预留和子载波比特分配。(3)采用自适应带宽预留和子载波比特分配。从图 3 可以看到:由于频谱效率提高,条件(2)比条件(3)推迟 50s 到达饱和状态,系统通过率提高 8Mits 左右,在饱和状态,采用自适应预留带宽的条件(1)比条件(2)通过率也有所提高,但不是很大,这是由于系统通过率受到信道带宽限制,自适应预留带宽的作用是根据业务流特征分配带宽,使业务间更具公平性。从图 4、图 5 可以看到,当网络趋于饱和时,语音流由于自适应预留带宽小于静态予流值而较早达到饱和,但视频流则相反,这就使语音、视频流基本同时饱和,克服了静态时视频流比语音流早 170s 达到饱和的缺陷,保证了公平性。图 4、图 5 还说明,网络负载较重时,由于数据业务可以释放信道,语音流比系统较晚饱和,且在条件(2)比条件(3)晚 170s 达到饱和,同理,视频流也比系统较晚饱和,且条件(2)比条件(3)晚 60s 达到饱和。图 6 为 3 个系统数据通过率之比,可以看到三者都是先增大,到达峰值后逐渐减小,直至稳定。这是因为网络负载较轻时,数据业务可被及时接纳;当网络饱和后,数据业务释放信道,直至最低限。同时可以看到:条件(2)比条件(3)推迟 60s 到达饱和,对于条件(1),自适应带宽预留机制使得当网络负载加重时,数据业务更快地释放信道,并拿出一定带宽用以解决视频业务负载过大问题。

**结束语** 本文提出了基于跨层的自适应预留带宽和具有多重 QoS 保证的 802.11eEDCA 动态分布式流接纳控制。在建议的机制中,通过 OFDM 子载波比特分配,信道频谱效率达到最大,提高了资源利用率;通过分布式测量的动态带宽预留,实现了自适应信道和业务特征的带宽分配;通过半模式化的中心控制的剩余因子估计方法,克服了直接测量的不准确性和分布式测量的局部性并使计算复杂度降低;带宽和碰撞率双重接纳标准使带宽、时延、误帧率等多重 QoS 参数得到了保证。

#### 参 考 文 献

[1] IEEE 802.11 WG. Draft Supplement to Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. MAC Enhancements for QoS, IEEE Std 802.11e/D4.3, May 2003

[2] Yang Xiao, Li Hai-zhon. Voice and Video Transmissions with Global Data Parameter Control for the IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2004, 15(11): 1041-1053

[3] Gavini K K, Apte V, Iyer S. PLUS-DAC: A Distributed Admission Control Scheme for IEEE 802.11e WLANs[C] // 13th IEEE International Conference on Networks. Nov. 2005, 1: 6

[4] Zhang Li-qiang, Zeadally S. HARMONICA: Enhanced QoS Support with Admission Control for IEEE802.11 Contention-based Access[C] // Proceedings of the 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'04). 2004: 64-71

[5] Pong D, Moors T. Call Admission Control for IEEE 802.11 Contention Access Mechanism[C] // GLOBECOM. 2003: 173-178

[6] Zhu Jiang, Fapojuwo A O. A New Call Admission Control Method for Providing Desired Throughput and Delay Performance in IEEE802.11e Wireless LANs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(2): 701-709

[7] Rashwand S, Misić J. IEEE 802.11e EDCA Under Bursty Traffic—How Much TXOP Can Improve Performance [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(3): 1009-1115

[8] Assi C M, Agarwal A, Liu Yi. Enhanced Per-Flow Admission Control and QoS Provisioning in IEEE 802.11e Wireless LANs [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 1077-1088

[9] Chou C-T, Shankar S N, Shin K G. Achieving Per-Stream QoS with Distributed Airtime Allocation and Admission Control[J]. IEEE 802.11e Wireless LANs, INFOCOM 2005. March 2005, 3: 1584-1595

[10] Wong C Y, Cheng R S. Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1999, 17(10): 1747-1758

[11] Wang I C, Shen Z. A Low Complexity Algorithm for Proportional Resource Allocation in OFDMA system[C] // SIPS. 2004: 1-6

[12] Bala E, Cimini L J. Low-Complexity and Robust Resource Allocation Strategies for Adaptive OFDMA[C] // SIPS. 2005: 176-180

[13] Weeraddana P C, Codreanu M, Latva-Aho M. Resource Allocation for Cross-Layer Utility Maximization in Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2790-2811

[14] Kong Z, Tsang D H K, Bensaou B, et al. Performance analysis of IEEE 802.11e contention-based channel access [J]. IEEE J. on Select. Areas. Commun., 2004, 22(10): 2095-2106

[15] Banchs A, Serrano P, Vollero L. Providing Service Guarantees in 802.11e EDCA WLANs with Legacy Stations[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(8): 1057-1071

(上接第 118 页)

[9] Rappaport T S. Wireless communications; principles and practice (second edition)[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002: 104-106

[10] Li Y, Song Y-Q, Schott R, et al. Impact of link unreliability and asymmetry on the quality of connectivity in large-scale sensor networks[J]. Sensors, 2008, 8(10): 6674-6691

[11] Karl H, Willig A. Protocols and architectures for wireless sensor networks[M]. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2005: 374-375

[12] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197