

基于智能天线的 WLAN 信号覆盖控制方法

周 元, 龚 兵

(华为技术有限公司中央研究院, 广东深圳 518129)

摘 要: 对于无线局域网的信号不仅希望在工作区域内覆盖良好, 提供高速的接入服务, 同时在工作区域以外希望信号迅速衰减, 以避免通信内容被非法窃听等安全隐患, 为此本文提出了一种基于智能天线的 WLAN 无线信号覆盖控制方法, 首先设置区域内、区域边界、区域外三类传感器以及其接收信号场强的权值和目标值, 利用粒子群优化算法, 调整带智能天线的 WLAN AP 的波束组合和发射功率, 从而达到使区域内信号场强最大、区域边界信号场强可接受、区域外信号场强最小的无线信号覆盖控制目的. 通过仿真和原型平台验证, 该控制方法达到了较好的覆盖控制效果.

关键词: 无线局域网; 无线信号覆盖控制; 传感器; 智能天线

中图分类号: TP393.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)08-1613-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.08.024

A Smart Antenna-Based WLAN Signal Coverage Control Solution

ZHOU Yuan, GONG Bing

(Central Research Institute of Huawei Technologies CO., LTD, Shenzhen, Guangdong 518129, China)

Abstract: WLAN signal is not only hoped to be strong enough in work area, but also to be attenuated rapidly in no-work area, so content of WLAN signal cannot be intercepted illegally. This paper proposes a novelty solution of a smart antenna based WLAN Wireless Signal Coverage Control. Firstly deploying three kinds of sensor, including Inter Sensor, Edge Sensor, Outer Sensor. Initializing object values of weight value and received RSSI. Then through the Particle Swarm Optimizer, combinations of beam and Tx powers of WLAN APs with smart antenna will be determined, so that the wireless signals are the strongest in inter work area, are acceptable on the boundary of work area and the weakest in no work area. Simulations and experiments over a prototype demonstrate that the solution achieved significantly the destination of WLAN wireless signal coverage control.

Key words: WLAN; wireless signal coverage control; sensor; smart antenna

1 引言

WLAN 早已大规模的商用, 对于 WLAN 信号覆盖控制方面的大量研究集中在提高覆盖范围、提升信号质量和网络容量方面, 文献[1]讨论了室内环境下 WLAN 部署中 AP 的布放位置和固定信道的分配问题, 文献[2]给出了 WLAN 覆盖优化的通用性讨论, 文献[3]在 RSSI、覆盖范围、邻信道干扰等方面比较了 IEEE 802.11a/b/g/n 不同标准的技术. 但这些工作都没有将覆盖控制、网络吞吐量和网络安全问题结合起来考虑, 由于通信安全等原因, WLAN 网络的管理者常常会希望在一定区域内 WLAN 信号非常强, 能提供高速接入服务, 而在该区域以外的地方则希望 WLAN 信号很弱, 让非法或恶意用户无法接入, 从而保证通信安全, 以此为目标的 WLAN 覆盖控制研究一直比较欠缺.

在传感器网络领域也有大量研究针对信号的覆盖控制问题, 文献[4]研究了动态环境下基于位置的覆盖控制问题, 文献[5]建立了三维空间的随机最佳覆盖数学模型, 给出了一种低时间复杂性的分布式启发算法, 文献[6]研究了在生命时间受约束的情况下最小化覆盖间隙问题和在覆盖间隙受约束的条件下最大化网络生命时间问题. 但这些覆盖控制算法并不能直接用于本文的目标, 首先这些算法主要针对多跳的场景, 其次对每个覆盖的点都有相同的信号强度要求, 第三文献[6]中利用的是定向接收分集, 本文是利用 AP 智能天线的定向发射分集.

本文提出了一种基于智能天线的 WLAN 信号覆盖控制方案, 该方案在不同区域部署多个无线传感器, 利用无线传感器采集各个带智能天线的 WLAN AP 的信号强度值并上报给一台信号覆盖控制器, 由控制器计算

各个 WLAN AP 的最佳信号发送波束组合和功率值并进行调整,无线传感器再测量和上报,如此迭代,从而达到对无线信号覆盖进行控制的目标.相对于 WLAN 网络传统只通过调整发射功率来控制覆盖范围的方法,本文引入了智能天线波束选择这一维新的控制手段,极大地增强了覆盖控制效果.

2 解决方案描述

2.1 场景描述

根据收到的信号强度目标值不同,将无线传感器分成三类:一类为内部传感器,即期望它收到的信号强度足够高,意味着覆盖区域中心用户接入速率很高;二类为边缘传感器,即期望它收到的信号强度是合适值,意味在覆盖区域边缘用户接入速度是个可接受的值;三类为外部传感器,即期望它收到的信号强度值非常小,意味着在覆盖区域之外的地方 WLAN 信号微弱到不能正常解码,从而保证通信的安全.

如果在一个覆盖控制区域中有多个带有智能天线的 AP,由于不同传感器可以接收到多个 AP 的信号,因此须分别反馈不同 AP 的信号场强值,这样增加了不同 AP 的选择这一维优化空间,同时增加了覆盖控制服务器的计算复杂度.另外本控制算法赋予不同传感器不同的权值,以优先满足不同传感器的目标值.

2.2 算法建模

覆盖控制算法的总体目标是使得各个传感器的接收信号强度值与设定的目标值之间的误差权重和最小.因此,总体目标函数可以表示为:

$$\arg \min_{(C_i, b_i)} \| WT - W \max_i(C_i b_i) \|_2 \quad (1)$$

其中, T 为各传感器的目标场强值, W 为各传感器的权重值, i 为 AP 的编号,在有 N 个 AP 的网络中, i 取值 $1 \sim N$, C_i 为各 AP 到传感器的信道向量,由波束组合和实际传播环境决定; b_i 为各 AP 的发射功率.

本文采用的智能天线阵为一种切换天线阵,一个 AP 上的波束组合有 64 种,即 C_i 的个数有 64 种,再加上每个 AP 还有 L 种波束功率可调整,即 b_i 有 L 种选择,这样每个 AP 的波束和功率组合是 $64L$ 种,那全解是网络中所有 AP 的波束和功率组合,即网络中一共有 $(64L)^N$ 种波束和功率组合,显然不能通过全遍历求最优解.

通过总体目标函数(1)和以上分析,我们可以分别设定波束组合的选择准则和功率调整准则来分解、简化总体目标函数.

2.2.1 波束组合和功率选择准则

波束组合选择的准则也是要使 AP 选择波束组合之后的各传感器的接收信号强度与目标功率误差越小

越好.因此,波束选择准则为选择在某一发射功率下到各有影响的传感器的接收场强值与传感器目标场强值的误差和最小值对应的波束组合,可表示为

$$\arg \min_{(k)} \left\{ \frac{\sum_j \text{impact_gene}(i, j, k) w_j (t_j - c_{i,j,k} b_i)^2}{\sum_j \text{impact_gene}(i, j, k)} \right\} \quad (2)$$

其中, i 为 AP 的编号(取值 $1 \sim N$), j 为传感器的编号(取值 $1 \sim M$), k 为 AP 波束组合的编号(取值为 $1 \sim 64$), w_j 为各传感器的权重值, t_j 为各传感器的目标场强值, $c_{i,j,k}$ 为各 AP 到各传感器的信道向量, b_i 为各 AP 的发射功率.

$\text{impact_gene}(i, j, k)$ 是影响因子,因为有些 AP 距离某传感器非常远或非视距传播,就算用最大功率发射信号其场强值仍然小于其他 AP 用最小功率发射,因此在波束选择时这些 AP 到传感器的影响不作考虑.

影响因子表达式如下:

$$\text{impact_gene}(i, j, k) = \begin{cases} 1, [\text{pathloss_max}(i, j, k) - \min_{i,j,k}(\text{pathloss_min}(i, j, k))] > 0 \\ 0, [\text{pathloss_max}(i, j, k) - \min_{i,j,k}(\text{pathloss_min}(i, j, k))] < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, pathloss_max 为 AP 最大功率下的传感器信号接收强度, pathloss_min 为 AP 最小功率下的传感器信号接收强度.

功率优化准则是基于各 AP 所选定的波束组合下使各传感器接收的最大信号场强值与传感器目标值的误差和最小的发射功率,可表示为:

$$\arg \min_{(b)} \left\{ \sum_j w_j [t_j - \max_i(c_{i,j,k} b_i)]^2 \right\} \quad (4)$$

其中, i 为 AP 的编号, j 为传感器的编号, k 为 AP 波束组合的编号, w_j 为各传感器的权重值, t_j 为各传感器的目标场强值, $c_{i,j,k}$ 为各 AP 到各传感器的信道向量, b_i 为各 AP 的发射功率.

2.2.2 算法流程

覆盖控制算法流程如下:

(1) 设置各个传感器的目标功率值 T 以及每个传感器的权重值 W 以及其他参数;

(2) 对于各 AP 的每个波束组合以最大/最小功率发射测量信号,各传感器反馈接收信号强度给覆盖控制服务器,计算 $\text{pathloss_max}/\text{pathloss_min}$;

(3) 计算各 AP 的各波束组合到各传感器影响因子 impact_gene ;

(4) 覆盖控制服务器利用粒子群优化算法搜索各 AP 的波束组合和发射功率,并调整各 AP 的信号发射参数;

(5)各传感器反馈接收到的 AP 信号强度;

(6)覆盖控制服务器判断各传感器接收信号强度和目标值的总体误差是否达到算法设定的要求或迭代次数是否超过门限,如果 No,则重复(4)、(5)这两步骤;

(7)监听各 AP 随机波束组合的信道衰落 C ,如果发现变化较大超出门限,则执行(2)、(3)两步骤,重新测量并计算 $pathloss_max$ 和 $pathloss_min$,否则算法结束.

2.2.3 粒子群波束组合和功率优化算法

粒子群(PSO)算法^[7]是通过模拟鸟群觅食过程中迁徙和群聚行为而提出的一种基于群体智能的全局随机搜索算法,它不依赖于初始值,并且算法对目标优化函数的维数增加不敏感,非常适合本文有多维约束条件的最优解搜索需求,具体算法过程如下:

(1)随机初始化粒子群,包括粒子个数 X ,各粒子的初始位置 D_m 和速度 V_m .其中每个粒子位置都是一组所有 AP 的随机功率值, m 代表粒子的索引,即第 m 个粒子的初始位置 $D_m = (b_1 b_2 \cdots b_i \cdots b_N)$, b_i 为各 AP 的发射功率值, N 为 AP 总数;速度 V_m 在粒子群算法中最原始是表示每个粒子移动的速度,在这里实际表示每次搜索功率时基于上次功率的变化值大小.

另外,初始化阶段还包括计算初始阶段各粒子的历史最优值 P_m ,由于初始阶段各粒子没有历史值,所以初始位置 D_m 即为 P_m .各粒子的初始全局最优值 G 则是按照第(3)步的适应度准则计算各粒子的 Error 值,最小 Error 值对应的粒子的初始位置则为初始全局最优值 G .

在初始化阶段还要设置算法迭代次数门限.

(2)通过各粒子的位置 D_m 中各 AP 的功率值 b_i ,按波束组合搜索准则公式(2)确定各 AP 的最优波束组合 K .

(3)利用上述准则得到各粒子中各 AP 的波束组合对应的信道向量 $c_{i,j,k}$ 和各粒子中各 AP 的功率 b_i ,将公式(4)稍微变形一下为适应度函数如下:

$$\text{Error} = \sum_j w_j [t_j - \max_i (c_{i,j,k} b_i)]^2 \quad (5)$$

其中, i 为 AP 的编号, j 为传感器的编号, k 为 AP 波束组合的编号, w_j 为各传感器的权重值, t_j 为各传感器的目标场强值, $c_{i,j,k}$ 为各 AP 到各传感器的信道向量, b_i 为各 AP 的发射功率.

(4)根据得到的各粒子的邻居最优值 P_m 和全局最优值 G 按以下方式进行速度和位置更新:

$$V_m = \alpha V_m + \beta_1 \gamma_1 (P_m - D_m) + \beta_2 \gamma_2 (G - D_m) \quad (6)$$

$$D_m = D_m + V_m \quad (7)$$

其中,公式(6)中位置更新的速度和方向是由三部分决定的:

一部分:惯性速度,即上一次的速度 V_m ,所占权重

系数为 α ,一般取 0.4~0.9;

第二部分:记忆比较,和之前的位置进行对比,选最优方向倾斜, β_1 一般取 2.0, γ_1 为随机数;

第三部分:群体协作方式找群体中最优的位置,朝群体最优的方向倾斜, β_2 一般取 2.0, γ_2 为随机数;

每个粒子在通过这三个部分进行速度和方向的调整之后,再利用公式(7)更新到下一个位置,由于 $D_m = (b_1 b_2 \cdots b_i \cdots b_N)$, b_i 为各 AP 的发射功率值, N 为 AP 总数,因此,每个粒子的位置更新相当于对各 AP 的发射功率进行更新.

(5)各粒子都计算出适应度 Error,各粒子首先与之前一次存储的历史最优位置 P_m 计算的 Error 进行对比,如果当前粒子位置计算的适应度 Error 小于历史最优位置 P_m 计算的 Error,则将当前位置 D_m 更新为该粒子的历史最优位置 P_m ,等所有粒子的历史最优位置都更新完毕,再将所有粒子的历史最优位置计算出的 Error 进行对比,将最小 Error 对应的那个粒子的历史最优位置更新为当前的全局最优值 G .

(6)判断迭代次数是否超过初始设定的门限,如果超过,则退出算法,记录当前全局最优值 G 对应的粒子位置,各 AP 的发射功率则取该粒子对应的波束组合和发射功率,完成算法;如果迭代次数没有到,则继续第(2)步操作.

2.2.4 算法时间复杂度

从 2.2.2 节算法流程中不难看出,整个覆盖控制算法计算复杂度最高的步骤有两部分:第一部分是利用传感器测量每个 AP 的每种波束组合下以最大/最小功率发射时的接收信号强度,即信道衰落向量,用于计算影响因子;第二部分是进行最优波束组合和功率的搜索过程.

针对第一部分信道衰落的测量由于是每个 AP 独立进行,所以循环次数为 $N * M * K$ (其中 N 为 AP 个数, M 为传感器个数, K 为波束组合数,这里是 64),则时间复杂度为 $O(n^2)$.

针对第二部分搜索 AP 的最优波束组合和功率,不同的搜索算法有不同的时间复杂度,如果按最大似然遍历的方式进行搜索,则循环次数为: $(K * L)^N$ (其中, K 为波束组合数, L 为 AP 功率的等级数, N 为 AP 的个数),由于 K 和 L 都可看作常数 C ,这样时间复杂度为 $O(C^n)$.如果按照本文上述 PSO 算法来进行搜索,由于每个 AP 的波束组合筛选是按公式 2 进行,所以循环次数为 $X * Y$,其中, X 为 PSO 算法初始化的粒子数, Y 为 PSO 算法的迭代次数,这样时间复杂度为 $O(n^2)$.

综合第一、二部分,如果按最大似然遍历来进行搜索,整个算法的时间复杂度为: $O(C^n)$,如果按 PSO 粒子群算法进行搜索,整个算法的时间复杂度为: $O(n^2)$,可

见 PSO 算法时间复杂度远低于最大似然遍历。

PSO 算法的初始化粒子数与迭代次数越大, 查找全局最优的能力越强, 在解决复杂问题时粒子数的参考值为 20, 迭代次数为 50, 这也是算法的最长收敛时间。

3 算法仿真验证

算法仿真主要目的是验证算法搜索结果的有效性和收敛性, 天线和信道模型尽量简化。

仿真时模拟切换天线阵每个阵元的波束采用 3GPP 的蜂窝网络定向天线方向图^[8]模式, 可表示如下:

$$A(\theta) = A_{\max} - \min\left[12\left(\frac{\theta}{\theta_{3\text{dB}}}\right)^2, A_m\right] \quad (8)$$

这里 $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, 3dB 波束宽度 $\theta_{3\text{dB}}$ 为 60° , $A_m = 25$ (dB), 0 度方向的天线最大增益 A_{\max} 为 14(dbi)。

信道衰落则是利用大尺度衰落, 即路损公式^[9]如下:

$$\text{Pathloss}(i, j) = 43.3 * \log_{10} \text{Dist}(i, j) + 11.5 + 20 * \log_{10} f_c \quad (9)$$

其中, i, j 分别为 AP 和传感器的编号, $\text{Dist}(i, j)$ 为两者之间的距离, f_c 为信号频率。

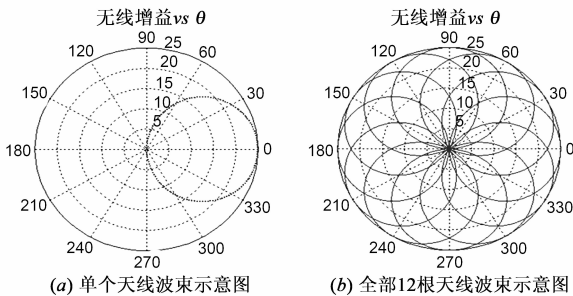


图1

由于使用了简化的信道模型, 并没有快衰落等随机变量, 每次直接根据公式(9)计算传感器处的信号场强值。

仿真中用于比较基准的常规算法是指只调整各 AP 的发射功率, 波束组合随机选择, 通过用随机函数采样 10 次作平均得到结果, 常规算法用于模拟传统只调整发射功率进行覆盖控制的方案效果。

比较本算法和常规算法的覆盖控制效果优劣是通过公式(5)的适应度函数, 当本算法搜索出最优波束组合和发射功率后, 计算两种算法的适应度, 适应度值越低, 算法越满足覆盖控制目标。

算法对传感器权值进行了归一化处理。

3.1 AP 网络拓扑场景

在一个 100 米 × 100 米的区域内, 放置十二个 AP、四个内部传感器、四个边缘传感器和四个外部传感器,

网络拓扑如图 2 所示。

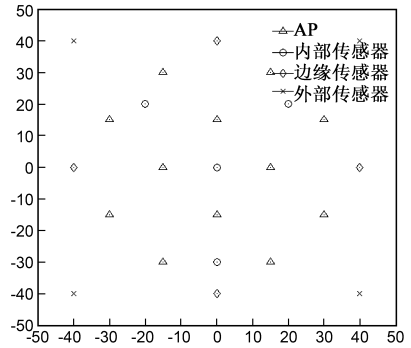


图2 AP网络拓扑(横轴/纵轴单位m)

3.2 初始目标值设置及调整后效果

设仿真网络中的内部、边缘、外部传感器的序号依次为 1 - 12, 初始权值/目标场强值以及调整后权值/目标场强值如表 1 所示。

表 1 两组加权值和初始功率值

传感器序号	初始加权值	初始目标场强值(dBm)	调整后加权值	调整后目标场强值(dBm)
1	0.084	-20	0.1	-30
2	0.084	-20	0.1	-30
3	0.084	-20	0.1	-30
4	0.084	-20	0.1	-30
5	0.083	-40	0.05	-60
6	0.083	-40	0.05	-60
7	0.083	-40	0.05	-60
8	0.083	-40	0.05	-60
9	0.083	-60	0.1	-90
10	0.083	-60	0.1	-90
11	0.083	-60	0.1	-90
12	0.083	-60	0.1	-90

从图 3 可以看出初始值设置下, 本算法比常规算法适应度优 17.8238%, 从图 4 可以看出通过调整加权值和目标场强值, 使得外区传感器处不能正确解码, 本算法比常规算法适应度优势有大幅提高, 达到 60.2798%。

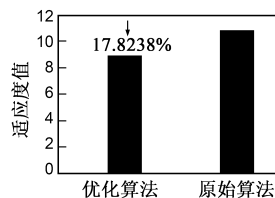


图3 初始参数值的效果

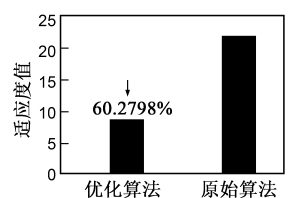


图4 调整后参数值的效果

4 算法原型平台验证

4.1 实测网络描述

本文 AP 均使用了自行开发的一种切换智能天线阵列^[10],如图 5 所示,共 64 种天线波束组合,发射功率可以调整。

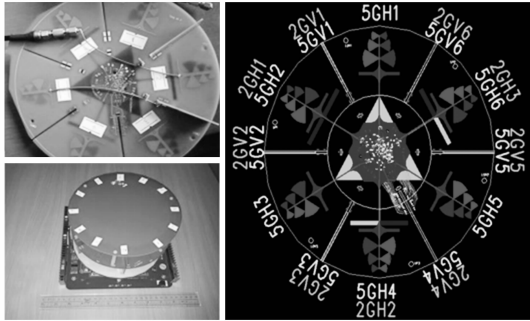


图 5 (a) 智能天线阵实物图 (b) 天线阵天线单元排列图

实际网络包含 2 个 AP 和 6 个传感器,功率调整步长为 0.5dB,传感器 1、2 和 3 所处位置被视为内区,传感器 4 和 5 所处位置被视为边界区域,传感器 6 所处位置为外区。

实测时算法流程和仿真有一定差别,仿真时使用信道模型直接计算出 AP 信号到达传感器处的场强值,实测时由传感器反馈实际场强值,覆盖控制服务器搜索波束组合和发射功率后调整 AP 的发射参数,传感器再反馈实际场强值,形成一次闭环过程,如此多次迭代.由于信道的时变性、深衰落以及人员走动等环境变化因素,传感器实时接收信号场强波动较大,为利于算法的收敛,对实测场强值进行了一定平滑处理。

4.2 不同组加权值和目标场强值的测试

对于一个新的覆盖区域,设定各类传感器的第一组目标场强值需要参考 802.11 标准中单流最高阶调制下需要的信号强度值(大于 -65dBm)、环境底噪值(-95dBm)等参数.传感器的初始参数值见表 2,实测结果见图 6。

表 2 两组加权值和目标功率值

传感器序号	初始加权值	初始目标场强(dBm)	调整后加权值	调整后目标场强(dBm)
1	0.167	-35	0.125	-35
2	0.167	-35	0.125	-35
3	0.167	-35	0.125	-40
4	0.166	-65	0.25	-60
5	0.166	-65	0.25	-70
6	0.167	-85	0.125	-80

从图 6 可以看到,内区传感器 1、2 和传感器 3 的测

量值低于目标值较多;边界传感器 4 的场强值还较大,同时和传感器 5 之间的梯度不够大;外部传感器 6 处的场强也与目标值相差较大(大于 10dBm),所以初始参数配置并不能满足覆盖控制的目标。

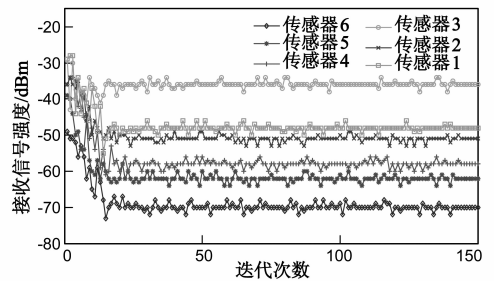


图 6 初始参数值的测量结果

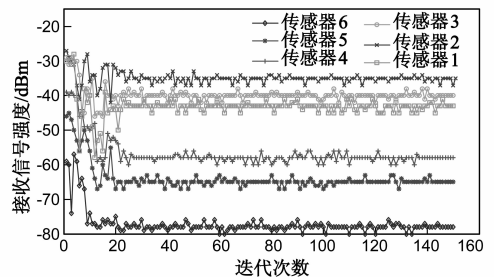


图 7 调整后参数值的测量结果

传感器的加权值是相对值,同时一个 AP 的波束组合和发射功率会影响所有传感器的场强结果,我们尝试调整算法中传感器的加权值,同时对传感器目标场强值进行调整,提高边界传感器 4 的目标值、降低边界传感器 5 的目标值,使边界传感器之间的目标值有足够的梯度,同时适当提高外部传感器 6 的目标值,调整后参数测试结果见图 7,内部传感器 1、2、3 的场强值在 -35dBm 到 -43dBm 之间,信号很强;边界传感器 4、5 的场强分别在 -58dBm 和 -65dBm 左右,有较好梯度;外部传感器 6 的场强值接近 -80dBm 左右,反映出信号从内部到外部衰落很快,实测结果符合整体覆盖控制目标。

整个实测结果还说明权值和目标值对算法的结果能起到比较强的牵引作用,两者需要配合共同达成整体覆盖控制目标。

5 结束语

良好的覆盖性能体现在可以控制内部、边界和外部不同区域的覆盖强度,以达到应用所需的要求.然而,覆盖性能不仅取决于 AP 本身的辐射方式,同时还取决于覆盖区域的传播特性.闭环控制的过程使本文的覆盖控制方案具有自动优化的特性,即不需要预先知道所需覆盖区域的传播特性,因此具有较强的适用性.相对于 WLAN 网络传统只通过调整发射功率进行覆盖控制,本文基于智能天线,引入了波束调整这一维

新的手段,经过仿真和原型平台的一系列测试,可以看到,算法可以获得较好的覆盖性能:内区覆盖强度平均为-40dBm左右,远大于单流最高阶调制方式所要求的信号强度最小值(-65dBm);内部与外部能达近40dB的信号强度差;边界区域传感器之间有明显的信号强度梯度(大于5dB)。根据以上的情况,可以说明算法获得良好的覆盖控制效果。

通过原型平台的测试可以看到要达到区域覆盖的控制目标,传感器权值和目标场强值的设置会影响整个控制算法的性能,需要多次调整才能达成整体目标,对于一个新的部署环境,这增加了控制算法应用的复杂度,怎样降低这种复杂度是未来需要进一步完善的工作。

参考文献

- [1] Ricardo C Rodrigues, Geraldo R Mateus, Antonio A E Loureiro. On the Design and Capacity Planning of a Wireless Local Area Network[A]. Network Operations and Management Symposium (NOMS)[C]. Honolulu: IEEE, 2000. 335 - 348.
- [2] L Nagy, Z Szalay. Global optimization of indoor radio coverage [A]. ICECom, 2010 Conference Proceedings[C]. Dubrovnik: KoREMA. 2010. 1 - 4.
- [3] S Sendra, M Garcia, C Turro, J Lloret. WLAN IEEE 802.11a/b/g/n indoor coverage and interference performance study[J]. International Journal on Advances in Networks and Services, 2011, 4(1-2).
- [4] J Cortés, S Martínez, T Karatas, F Bullo. Coverage control for mobile sensing networks[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 243 - 255.
- [5] 任彦, 张思东, 张宏科. 无线传感器网络三维空间最佳覆盖路由协议[J]. 电子学报, 2006, 34(2): 306 - 311.
Ren Yan, Zhang Sidong, Zhang Hongke. Three-dimensional optimal coverage routing protocol in wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(2): 306 - 311. (in Chinese)

- [6] 杨辉强, 李德英, 李政. 定向传感器网络中的最小化覆盖间隙和最大化网络 Lifetime 问题的研究[J]. 电子学报, 2010, 38(2A): 138 - 142.
Yang Huiqiang, Li Deying, Li Zheng. Minimum coverage breach and maximum network lifetime in directional sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2A): 138 - 142. (in Chinese)
- [7] Russell Eberhart, James Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory [A]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science [C]. Nagoya: IEEE, 1995.
- [8] 3GPP TR 25.996 V9.0.0[S].
- [9] 3GPP TR 36.814 V1.3.0[S].
- [10] Wen-Chao Zheng, Long Zhang, Qing-Xia Li, Yuan Zhou, Rong Rong. Dual-Band Dual-Polarized Antenna Array for Beam Selection MIMO WLAN [A]. GLOBECOM 2012 [C]. Anaheim: IEEE, 2012. 4770 - 4774.

作者简介



周元男,高级工程师,1968年出生于湖北,2006年于西安交通大学通信学院获得博士学位,现为华为技术有限公司中央研究院技术专家,主要研究方向为WLAN技术、无线MESH/Ad Hoc网络以及WLAN和蜂窝融合技术。
E-mail: zhouyuan@huawei.com



龚兵男,工程师,1985年出生于江西,2010年于华南理工大学自动化学院获得硕士学位,现为华为技术有限公司中央研究院工程师,主要研究方向为WLAN技术、无线物理层技术。
E-mail: gongbing851217@163.com