

基于流量预报的 WSNs 自适应占空比算法

张龙妹¹ 陆 伟²

(西安科技大学通信与信息工程学院 西安 710054)¹ (西安财经学院信息学院 西安 710100)²

摘要 提出一种无线传感器网络流量预报自适应占空比算法 AdcbTP,该算法通过预报的流量值实现对 SMAC 协议中占空比的自适应控制。在宏观的工作周期尺度上采用流量预报获得理论占空比实现“粗略预估调控”,在微观的休眠/侦听周期尺度上执行对占空比的“精微增量调控”。经过 NS2 仿真实验采集流量数据后进行预报并和原始流量对比,发现该模型预报的流量与原始值偏差很小。能耗及时延分析结果表明,该算法在不损失传输时延的同时最大程度地降低了能耗。

关键词 无线传感器网络,时间序列,流量预报,占空比,SMAC

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Adaptive Duty Cycle Algorithm Based on Traffic Prediction for WSNs

ZHANG Long-mei¹ LU Wei²

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)¹

(School of Information Engineering, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, China)²

Abstract A new adaptive duty cycle algorithm based on traffic prediction was proposed for WSNs, named AdcbTP. AdcbTP predicts the future traffic and estimates duty cycle on the basis of the predicted values, and then adaptively controls duty cycle of SMAC protocol. In the macro scale of work periods, it works out theoretic duty cycle value using traffic prediction model, and implements rough prediction control to duty cycle. In the micro scale of sleep/listen periods, it implements subtle incremental adjustment to duty cycle. NS2 simulations show little variance between the predicted value and the real value. Furthermore, extensive simulations on energy exhausting and latency simulation show that AdcbTP saves energy greatly without loss of latency.

Keywords Wireless sensor networks, Time series, Traffic prediction, Duty cycle, SMAC

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是集信息采集、信息处理、信息传输于一体的综合智能信息系统^[1]。当前的无线传感器网络 MAC 协议主要针对解决能耗问题而提出,例如 S-MAC^[2]协议采用周期性侦听/睡眠的固定低占空比方式来实现节能;T-MAC^[3]引入动态占空比,来应付不同时间和位置上负载的变化;WiseMAC^[4,5]协议采用前导码采样技术控制节点处于空闲侦听状态时的能量消耗;B-MAC^[6]协议利用低功率侦听技术减少空闲侦听,实现低功率通信;DMAC^[7]协议采用交错调度机制提供自适应占空比。

综观这些 MAC 协议,发现影响能耗最关键的因素就是占空比^[7]。直观上占空比和网络流量成正比,因此对网络进行流量预报并通过预报的流量值确定占空比的大小,提前做好占空比的自适应调控措施,会极大程度地降低能耗。

目前已有的网络流量预报方法很多,例如 Poisson^[8]、Markov^[9]、AR^[10]、CRTP^[11]等,但由于 WSN 网络自身特点(低处理能力、低能耗)所限,使得传统的网络流量预报模型不

适用于 WSN,因此必须研究针对于 WSN 的流量预报模型。

WSN 中以平稳性、周期性流量为主,对于平稳性的流量数据,时间序列模型能有效地描述其统计特性,本文提出一种 AdcbTP(Adaptive duty cycle based on Traffic Prediction)算法,该算法在借鉴通用网络流量预报模型的基础上建立 WSN 的时间序列模型。把无线传感器节点的工作过程划分为等间隔的工作周期,采集当前工作周期和历史工作周期的流量值并对未来工作周期的流量作出预报,使用预报的流量值计算得到理论占空比,实现在宏观工作周期尺度上对占空比的粗略自适应调控,每一个工作周期包括 L 个休眠/侦听周期,在工作周期内的 L 个休眠/侦听周期微观尺度上使用“增量调节”实现对占空比的精微自适应调控。

2 流量时间序列建模

2.1 时间序列简介

时间序列的自回归滑动平均模型 ARMA(p, q) 定义为 $\varphi(B)X_t = \theta(B)a_t$, 其中 $\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \dots - \varphi_p B^p$, $\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q$, X_t 为经过零均值平稳化后的随机流量数

本文受国家自然科学基金(61302133),西安科技大学博士启动基金(2014QDJ071),西安科技大学培育基金(201255,201356)资助。

张龙妹(1977—),女,博士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、信号与信息处理、模式识别,E-mail:305787827@qq.com;陆 伟(1975—),男,博士,讲师,主要研究方向为自主计算、软件工程,E-mail:luweinpu@nwpu.edu.cn。

据, a_t 为白噪声序列, B 为延迟算子, 即 $BX_t = X_{t-1}$ 。

把无线传感器网络的整个工作时间划分为均匀等间隔的工作周期, 每个工作周期内采集其原始网络流量构成一时间序列 $\{Y_t\}$, 节点流量的变化将体现在未来的工作周期中的占空比发生相同趋势变化。

2.2 模型定阶

模型定阶通常采用赤池准则^[12], 赤池准则定义为 $AIC(n, m) = \ln \hat{\sigma}_a^2 + 2(n+m+1)/N$, 其中 N 为样本大小。使得 $AIC(n, m)$ 取得极小值时的 (n, m) 即为 ARMA 模型的阶数 (p, q) 。实际中模型定阶需要反复迭代, 计算复杂度过大, 并不适合资源受限的无线传感器网络。

在实际应用中, 经验估计法也经常采用。大量的随机系统用 ARMA(2, 1) 模型就可以达到很高的精度, 同时保证了较小的迭代轮数和计算复杂度, 其模型为 $X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + a_t - \theta_1 a_{t-1}$ 。 X_t 是经过平稳化处理的零均值流量数据。

2.3 参数估计

模型定阶后需要进行参数估计, 待估计的参数有自回归系数 φ_1, φ_2 、滑动平均系数 θ_1 、噪声方差 σ_a^2 , 步骤如下:

1) 求样本协方差 $\hat{\gamma}_k = \frac{1}{N} \sum_{t=k+1}^N x_t x_{t-k}$, $k=0, 1, \dots, N-1$, 求自相关函数 $\hat{\rho}_k = \hat{\gamma}_k / \hat{\gamma}_0$;

2) 解 Yule-Walker 方程 $\begin{bmatrix} \hat{\rho}_2 & \hat{\rho}_0 \\ \hat{\rho}_2 & \hat{\rho}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_1 \\ \hat{\varphi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_0 \end{bmatrix}$, 得 AR 部分的参数估计值为:

$$\hat{\varphi}_1 = \frac{\hat{\rho}_1 \hat{\rho}_2 - \hat{\rho}_0 \hat{\rho}_3}{\hat{\rho}_2 (\hat{\rho}_1 - \hat{\rho}_0)} \quad (1)$$

$$\hat{\varphi}_2 = \frac{\hat{\rho}_3 - \hat{\rho}_2}{\hat{\rho}_1 - \hat{\rho}_0} \quad (2)$$

3) 令 $N_t = X_t - \hat{\varphi}_1 a_{t-1} - \hat{\varphi}_2 a_{t-2}$, 得到 N_t 的协方差函数表达式

$$\hat{\gamma}_k(N) = E(N_t N_{t+k}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \hat{\varphi}_i \hat{\varphi}_j \hat{\gamma}_{k+j-i} \quad (3)$$

其中 $\hat{\varphi}_0 = -1$, 将 $(\hat{\varphi}_0, \hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2)$ 代入可得最终协方差函数

$$\hat{\gamma}_k(N) = \hat{\varphi}_0 \hat{\varphi}_2 (\hat{\gamma}_{k-2} + \hat{\gamma}_{k+2}) + \hat{\varphi}_1 (\hat{\varphi}_0 + \hat{\varphi}_2) (\hat{\gamma}_{k-1} + \hat{\gamma}_{k+1}) + (\hat{\varphi}_0^2 + \hat{\varphi}_1^2 + \hat{\varphi}_2^2) \hat{\gamma}_k \quad (4)$$

4) 根据 MA(1) 序列的自相关函数定义式^[12]为

$$\hat{\gamma}_k(N) = \begin{cases} \sigma_a^2 (1 + \theta_1^2), & k=0 \\ -\sigma_a^2 \theta_1, & 1 \leq k \leq q \end{cases}$$

令 $N_t = a_t - \theta_1 a_{t-1}$, 得 MA 部分的参数估计为:

$$\hat{\theta}_1 = 2 \hat{\rho}_1(N) / (1 + \sqrt{1 - 4 \hat{\rho}_1^2(N)}) \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_a^2 = \hat{\gamma}_0(N) (1 + \sqrt{1 - 4 \hat{\rho}_1^2(N)}) / 2 \quad (6)$$

5) 最终得到全部参数估计值 $(\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \hat{\theta}_1, \hat{\sigma}_a^2)$ 。

2.4 假设检验

本模型可表示为 $a_t = X_t - \varphi_1 X_{t-1} - \varphi_2 X_{t-2} + \theta_1 a_{t-1}$, 其中下标为负数或零的值一律以零取代, 代入参数估计值和样本观测值 $\{x_t | t=1, 2, \dots, N\}$ 后可得残差递推序列, 具体步骤如下:

1) 计算残差序列的递推公式如下:

$$\begin{cases} a_1 = x_1 \\ a_2 = x_2 - \hat{\varphi}_1 x_1 + \hat{\theta}_1 a_1 \\ a_N = x_N - \hat{\varphi}_1 x_{N-1} - \hat{\varphi}_2 x_{N-2} + \hat{\theta}_1 a_{N-1} \end{cases} \quad (7)$$

2) 计算残差序列的协方差函数和自相关函数的估计值

$$\hat{\gamma}_k(a) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} a_t a_{t+k}, \hat{\rho}_k(a) = \frac{\hat{\gamma}_k(a)}{\hat{\gamma}_0(a)} \quad (k=1, 2, \dots, M), M=N/10;$$

10;

3) 假设 $H_0: \{a_t, t=1, 2, \dots, N\}$ 为高斯白噪声序列, 则统计量 $Q_M = N \sum_{i=1}^M \hat{\rho}_i^2(a)$ 服从 $\chi^2(M)$ 分布, 对于给定的显著性水平 $\alpha=0.05$, 若 $Q_M > \chi_\alpha^2(M)$, 则在显著性水平 α 上否定假设 H_0 , 否则就认可假设 H_0 。

2.5 流量预报

采用最小方差预报准则, 使得预报值和实际值之间的误差均方值最小。样本数量可以根据计算复杂度确定, 本模型中采样 50 个样本流量值进行预报。流量序列的一步及多步递推预报方程为式(8), $\hat{X}_k(s)$ 为已知当前时刻 k 的观测值 X_k 时的 s 步预报, 其中 $s=1, 2, \dots$ 。

$$\begin{cases} \hat{X}_k(1) = \hat{\varphi}_1 x_k + \hat{\varphi}_2 x_{k-1} - \hat{\theta}_1 a_k \\ \hat{X}_k(2) = \hat{\varphi}_1 \hat{X}_k(1) + \hat{\varphi}_2 x_k \\ \hat{X}_k(s) = \hat{\varphi}_1 \hat{X}_k(s-1) + \hat{\varphi}_2 \hat{X}_k(s-2) \end{cases} \quad (8)$$

3 自适应占空比算法

3.1 自适应占空比

3.1.1 占空比概述

无线传感器网络的 SMAC 协议是目前最具代表性的协议之一, SMAC 协议采用周期性的休眠/侦听使得节点在大部分时间处于休眠状态从而大大降低了能量消耗, 其中占空比定义为 $DC = \frac{T_{listen}}{T_{listen} + T_{sleep}}$, SMAC 协议采用固定的占空比不可避免会使得部分空闲节点浪费了能量, 而处于高忙工作状态的节点产生过大的传输时延, 因此其效率大打折扣, 当前的动态占空比算法由于种种限制并不能最大限度发挥其能量效率, 本文通过对未来流量的预报实现动态占空比自适应调控。

3.1.2 流量占空比关系

本文把整个传感器节点的工作时间划分为等间隔的工作周期, 每个工作周期约等于 L 个休眠/侦听周期, L 的取值应该为 10~100 之间, 采集每一个工作周期的流量建立其时间序列模型, 并根据当前和历史工作周期的流量值预报未来一个工作周期内的流量, 根据预报的流量计算确定未来一个工作周期内的理论占空比(最小占空比), 接着在每个工作周期内部对占空比进一步“微调”, 调控机制类似于通信原理中的“增量调制”。设定该工作周期的第一个休眠/侦听周期的占空比为理论占空比(最小占空比), 以后每隔一个休眠/侦听周期时间, 占空比固定增加或减少一个 Δdc , 是否增加或减少由当前数据队列长度决定, 队列长度大于等于 1, 则增加, 否则减少, 使得数据队列的长度始终保持在 0, 1 的状态。占空比增量 Δdc 由理论占空比和 L 确定。

直观上占空比和流量成正比, 设流量以 Tr (字节)表示,


```

delta-T=TRAFFIC-SAMPLE-CYCLE;//流量采集周期
//一个工作周期内的休眠/侦听周期数
L=NUM-SLEEP-LISTEN;
DC0=Tr * C/delta-T;//理论最小占空比
DC=DC0;//将理论占空比作为初值
delta-DC=(1-DC0)/L;//占空比的微调增量
}
L=L-1;//进入下一个休眠/侦听周期
if(Queue->ifq>0)//数据队列长度是否大于0
    DC=DC+delta-dc;
else
    DC=DC-delta-dc;
if(DC>1) DC=1;//占空比最大不能超过1
if(DC<DC0) DC=DC0;//最小不能小于理论占空比
duty-cycle=DC;
}

```

4 仿真实验

4.1 实验场景

在 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的区域内随机部署 50 个无线传感器节点, 任选其中 10 个节点分别向另外 10 个节点发送数据, 仿真从 40s 启动, 每个节点每隔 5s 发送一个 50 字节的 CBR 数据包, 在 150s 时节点停止发送数据包, 信道速率、传播时延及其他参数均使用缺省配置。

4.2 流量预报值与观测值对比

图 3、图 4 分别为 1 步预测和 3 步预测结果和实际流量对比曲线, 实验时每隔 1s 采集一次网络流量, 分别做 1—3 步预报, 样本数量取 50, 50s 以内模型无法预报, 故全部取为实测值, 因此两条对比曲线在通信启动前 50s 以内重合。

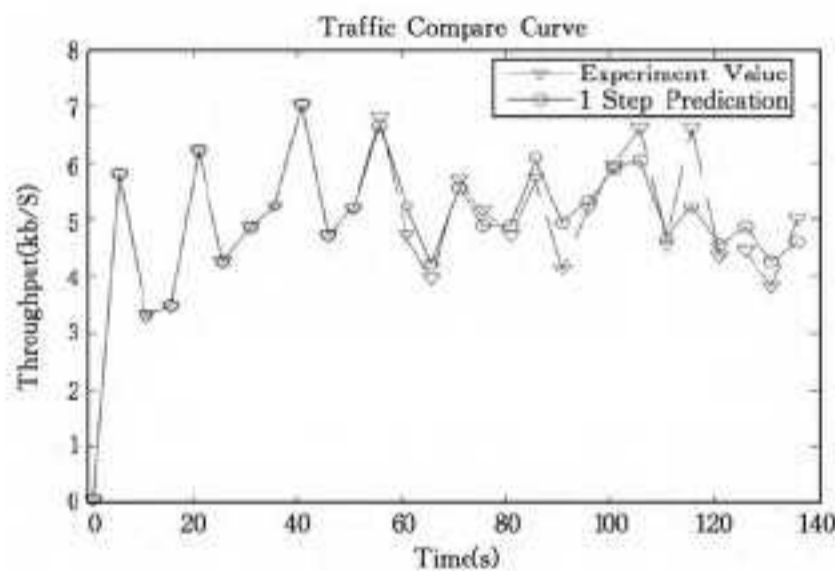


图 3 一步预报结果

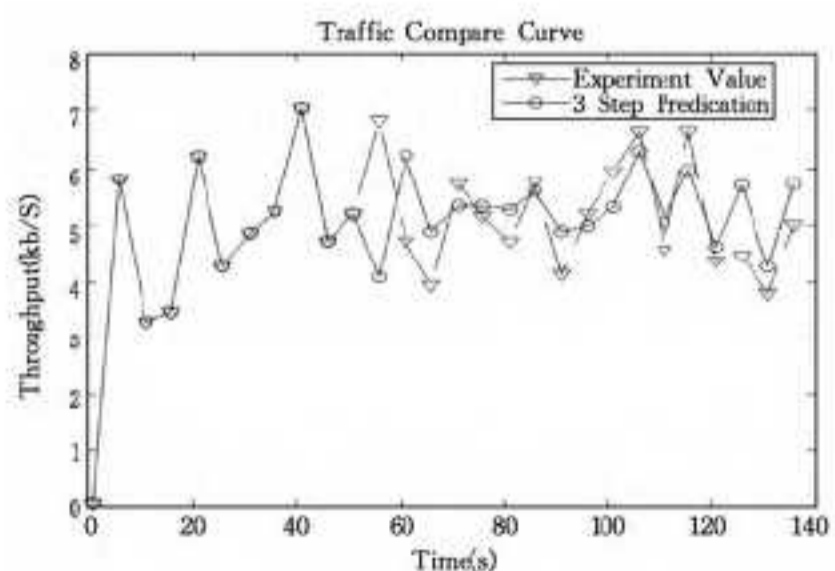


图 4 3 步预报结果

根据绘出预报值和实测流量数据对比曲线, 可以发现本模型对于 5 步以内的预报值和实际流量符合程度较高, 特别是一步预报偏差最小, 不到 5% , 随着预报步数的增多, 偏差也越来越大, 总体上 3 步以内的预报结果能大体反映真实的流量趋势。

4.3 能耗对比

图 5 为采用固定占空比和采用 AdcbTP 自适应占空比控制下的网络剩余能量总和对比曲线。

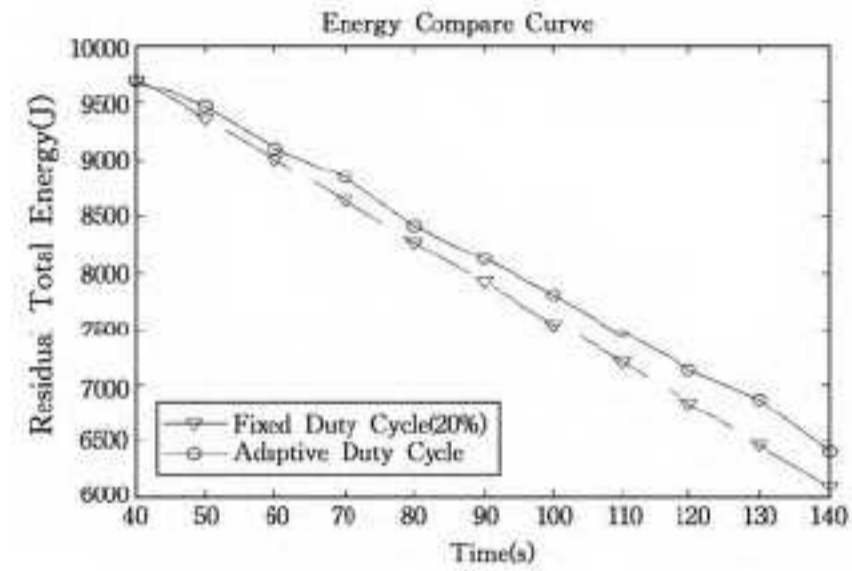


图 5 能量曲线

从图 5 中可看出, 通信开始时, 所有的 CBR 启动数据发送, 网中瞬间流量较大, AdcbTP 算法确定的占空比要高于固定占空比, 自适应占空比控制还未来得及发挥其功效, AdcbTP 算法并不比固定占空比 SMAC 协议有优势, 但随着时间推进, AdcbTP 自适应占空比控制下的 SMAC 协议逐渐使得占空比接近于最优, 部分空闲节点将大量时间用于休眠而并未参与侦听, 故它们的能耗逐渐的降低, 表现在剩余能量曲线图上, 自适应占空比算法始终处于固定占空比能量曲线的上面, 从而最大程度地发挥了网络的能量效率。

4.4 时延对比

图 6 所示为采用固定占空比的 SMAC 协议和采用 AdcbTP 自适应占空比控制下两种协议的网络时延对比曲线。从图中看出, 两者差别不大, 数据延时基本都在 $0.01-0.1$ 秒之间, 特别是在通信的后期, 当网络稳定运行后, 其时延大体上为 0.01 秒, 开始的一段时间, 自适应占空比的时延要小于固定占空比的时延, 后续则两者基本相同, 因为自适应占空比的调节目标是使得数据队列长度为 0, 也即只要数据队列中出现数据则立即处理, 绝不拖延, 因此总体上, 自适应占空比的时延要优于固定占空比的时延。

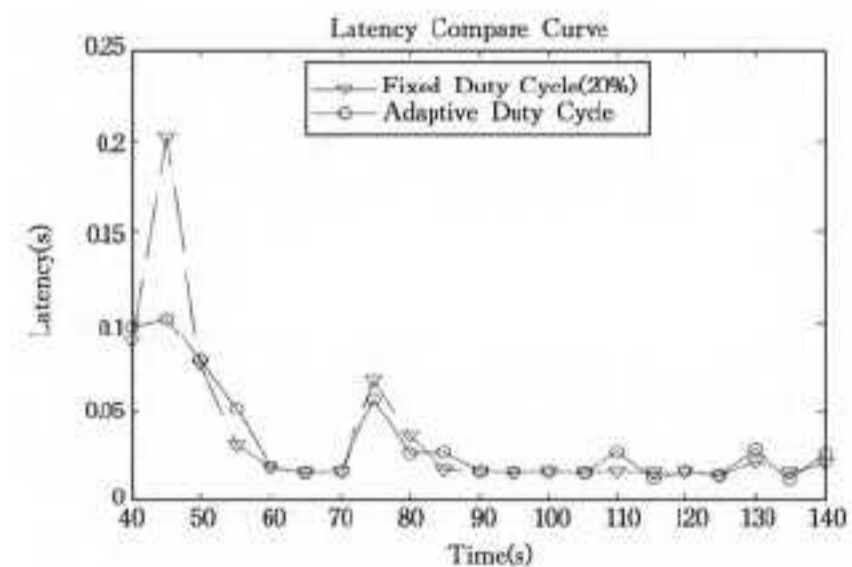


图 6 时延曲线

结束语 本文提出了用时间序列模型对无线传感器网络流量进行预报的算法, 在宏观和微观两个尺度上对占空比进行流量自适应调控, 有效地避免了保存大量历史数据的问题。AdcbTP 用于 SMAC 协议进行动态占空比调控, 一方面有效地降低了 SMAC 协议固定占空比的能耗, 另一方面在时延性能上也要优于固定占空比算法。

参考文献

- [1] Qian Z-H, Wang Y-J. Internet of Things-Oriented Wireless Sensor Networks Review[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 215-227

(下转第 306 页)

设置完无线路由器及 AP, 并对其无线安全机制做了修改之后, 要对无线网卡的参数做相应的设置, “SSID” 这项要保持一致才能连入网络。对于无线网卡来说, 允许两种类型的工作模式, 即通过 AP 互连工作模式和对等点对点互连模式。如果选择了前者, 无线网卡将会连接到一个信号好的 AP; 如果选择后者, 无线网卡将会直接连接到另一个无线工作站。在 AP 互连工作模式中, 主机的无线网卡使用的“信道”是自动检测的。只有在点对点对等模式中才需要设置信道值。

应当注意, 多个 AP 同时使用时, 其 SSID 应该相同, 但每个 AP 信道设置不能相同, 因为 802.11 定义的无线传输频率在 2.4-2.4xxxGHz, 这些频段又被划分为 13 个信道, 信道号相近时其频率也接近, 易产生干扰, 所以, 相邻 AP 所使用的信道号应该尽量数值差别大一些, 如 1、6、11。有人可能会问, 两个 AP 的信道号不同, 它们之间最初时使用哪个信道? 这一点也是物理层完成的工作, 从动者可以通过遍历方法寻找无线信号耦合。

此外, 我们原有一台网络打印服务器(不支持 WI-FI), 将其连接在 AP 的网络接口, 使用普通打印机也可构成无线可移动网络打印系统, 并且价格非常低廉。

3.4 组建廉价可移动打印机系统

打印机连接在一个末端 AP 上, 这个 AP 必须设置成为客户端模式, 虽然此时 AP 仅接收上级 AP 发送的无线帧, 但却可以通过自身网线将数据指令传输给打印服务器, 而打印服务器也会再将这些指令发送到打印机接口, 即可实现打印。

这时打印服务器的安装不同于无线网络打印服务器, 它经过了 AP, 所以必须为其配置静态 IP, 且与路由器 LAN 口同网段, 也不能使用 DHCP, 因为它的网卡直接连接的是 AP 而不是路由器, 此时的 AP 不会将它的 DHCP 请求发给路由器, 所以无法自动获取 IP 地址。安装打印驱动程序在每台需要使用打印机的计算机上, 且应选择直接连接方式, 而不能使用网络方式。最后再安装打印服务器软件, 安装完毕就可以使用打印机了, 并且多台计算机都可以共用(见图 3)。

完成打印的过程是, 客户主机的打印指令提交给打印服

务器软件, 该软件再将打印指令提交给网卡, 无论是有线或无线网卡都能实现数据发送, 无线网络发送给 AP, AP 将接收的无线打印指令数据通过有线网口传给打印服务器硬件, 打印服务器再传输给打印机。可以看出, 打印机虽然不是直接连在客户主机上, 但主机上的打印服务器软件与打印服务器硬件建立了逻辑关系, 它管理着打印服务器并在打印机与网络间建立了稳定的数据传输, 从而实现送往打印机接口的指令数据通过网络能够发送到打印机。

结束语 无线网络最大的特点就是舍弃了错综复杂的布线, 设备位置更加灵活, 其优势明显。但组建网络也必须将关键技术点弄清楚才能更好地发挥其性能, 否则有可能出现问题, 尤其在 AP 的配置上, 资料大多介绍的是基本方法, 而组网时的组织衔接及规则要求, 则需要我们自己探索。无线网络应用还可扩展到多种设备^[8], 我们在建设无线网络时, 使用普通打印机及不足百元的打印服务器, 提出了一种构建了廉价无线可移动打印系统的方法, 扩展了网络应用。

参考文献

- [1] 无线局域网交换机操控无线网络接[OL]. <http://network.51cto.com/art/201009/224792.htm>
 - [2] 无线网桥和无线 AP 的区别[OL]. <http://blog.sina.com.cn/s/blog-a63d5e5e0101d5vb.html>
 - [3] 无线网卡的工作原理[OL]. <http://www.elecfans.com/tongxin/119/2008063010029.html>
 - [4] Wireless Fundamental(2)-802.11 MAC 头格式解析 (updating)[OL]. <http://hi.baidu.com/cnss-ay/item/6d772ff984c707703c198b25>
 - [5] 常潘. Cisco 无线局域网配置基础[M]. 电子工业出版社, 2011(3)
 - [6] 黄超毅. 5 种常见的 AP 使用式[OL]. <http://wenku.baidu.com/view/fdf8530d76c66137ee061908.html>
 - [7] 51CTO. 无线网络架构及设计[OL]. <http://networking.ctocio.com.cn/433/12238933.shtml> 2012-01-09
 - [8] 企业如何部署 Wi-Fi 无线网络[OL]. <http://www.edu.cn/wxjq-9863/20100702/t20100702-492211.shtml>
-
- (上接第 293 页)
- [2] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C] // INFOCOM 2002. New York, June 2002; 1567-1576
 - [3] Dam T V, Langendoen K. An Adaptive Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C] // The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys'03). Los Angeles, CA, USA, November, 2003; 5-7
 - [4] Enz C, EL-Hoiydi A, Decotignie J-D, et al. WiseNET: An Ultra Low Power Wireless Sensor Network Solution[J]. Computer, 2004, 37(8): 62-71
 - [5] El-Hoiydi A, Decotignie J D. WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks[C] // The 9th Int'l Symp. on Computers and Communications Alexandria, Egypt, 2004
 - [6] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks[C] // ACM Sensys 04. Baltimore, Maryland, USA, 2004
 - [7] Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C. An Adaptive Energy Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks[C] // Proc 18th Int'l Parallel and Distributed Processing Symp (IPDPS'04). 2004; 26-30
 - [8] Paxson V, Floyd S. Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling[J]. IEEE ACM Transactions on Networking, 1995, 3(3): 226-244
 - [9] Ganesan D, Govindan R, et al. Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks[J]. Mobile Computing Review, 2002, 1(2): 11-25
 - [10] Lisa A, Shay. The wireless network environment sensor: A technology independent sensor of faults in mobile wireless network links [D]. Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, USA, 2002
 - [11] Sun Y, Xu L, Wu X, et al. A Chain Routing Algorithm Based on Traffic Prediction in Wireless Sensor Networks[J]. Communications and Network, 2013, 5: 504-507
 - [12] Brockwell P J, Davis R A. Time Series: Theory and Methods (Second Edition)[M]. Springer Press, 1990; 214-254, 189