

无线多跳网络下基于干扰管理的高容量跨层优化策略

石雷¹, 韩江洪¹, 石怡², 魏振春¹

(1.合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009;

2. 弗吉尼亚理工大学 电气与计算机工程学院, 弗吉尼亚布莱克斯堡 弗吉尼亚州 24061)

摘 要: 在多跳多基站无线网络环境下, 设计了一种基于干扰管理的高容量跨层优化策略。算法的物理层采用串行干扰消除实现干扰管理, 在上层首先通过 Voronoi 图实现区域划分, 然后基于节点的最小跳数建立每个节点到基站的初始链路分配和多跳路由方案, 之后通过多时间片分配或多跳路由的节点选取对方案进行优化, 并通过迭代的方式寻找吞吐量更大的优化策略。理论分析证明了该方案具有多项式时间复杂度, 仿真结果显示引入了干扰管理相关技术后, 整个网络的吞吐率有 2 到 5 倍的提升。

关键词: 无线多跳网络; 干扰管理; 串行干扰消除; 线性规划

中图分类号: TP393.02

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)12-0089-09

High capacity cross layer optimization strategy for multi-hop wireless network with interference management

SHI Lei¹, HAN Jiang-hong¹, SHI Yi², WEI Zhen-chun¹

(1. School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Dept. of ECE, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA)

Abstract: A high-throughput cross-layer optimization strategy based on the interference management for the multi-hop multi-base-station wireless network environment was proposed. In the physical layer the successive interference cancellation was used to realize the interference management. In the up layers, first the Voronoi algorithm was used to achieve the zoning, second based on the min-hop algorithm, the initial link allocation and multi-hop routing scheme was established, third optimize the scheme based on the multi-time-slot allocating or multi-hop routing, and at last try to find a better strategy in each iteration. Theoretical analysis shows that the strategy has a polynomial time complexity, and the simulation results show that the entire network throughput has a 2 to 5 fold increase by using interference management.

Key words: multi-hop wireless network; interference management; successive interference cancellation; linear program

1 引言

无线网络的通信介质是整个自由空间, 因此节点之间在进行数据发送/接收时较易受到干扰。近年来, 通过干扰管理的方式进一步提高无线网络的性能和容量正受到越来越多的关注^[1]。LTE 将干扰管理的手段分为 3 大类^[2]: 干扰消除、干扰随机化和干扰协调。干扰消除^[3,4]通过信号处理的手段将干扰信号从接收信号中滤除, 干扰随机化^[5]通过加扰技

术、交织技术等方法使干扰信号近似成“白噪声”, 干扰协调^[6]则是通过一些资源分配和复用的手段将干扰信号降低。

干扰消除实现手段中用的最多的是串行干扰消除 (SIC, successive interference cancellation) 算法^[7]。该算法具有复杂度低且效率高的特点, 因此得到了广泛的研究和应用。例如, 高通 (Qualcomm) 公司设计的芯片 CSM6850 就支持该算法^[8]。采用 SIC 算法不仅可以使接收方消除其他非期望节点信号

收稿日期: 2013-10-09; 修回日期: 2013-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61370088); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20100111110004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61370088); Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20100111110004)

的干扰,还可以让接收方同时接收到多个期望节点信号的信息,即实现多分组接收(MPR, multi-packet reception)^[9]。文献[10]详细讨论了采用 SIC 算法实现这 2 种情况的原理。

SIC 算法属于物理层的实现算法,要将其最大限度地应用到无线网络中,必须设计适合 SIC 算法的上层(数据链路层、网络层)算法和协议,才能充分发挥其所带来的吞吐量上的提升。目前,学者们在此基础上已经做了许多工作。这其中,多数工作都是通过跨层设计^[11,12]的方式来实现的。这是因为无线网络是广播信道,传输信号衰减快,加上无线频谱资源和工作能量的有限性^[13],使在设计无线网络相关算法和协议时,必须充分考虑网络的总体性能。采用跨层设计的方式,对各层参数进行联合控制和改变,可以最大限度地保证无线网络资源的有效利用。

例如,文献[14]设计了一种多输入多输出网络下基于 SIC 的高容错算法;文献[15]设计了一种可在双跳网络下高效工作的波束成形方案,其中接收节点采用了 SIC 算法;文献[10]设计了一种在多跳网络下采用 SIC 算法的跨层最优方案,仿真结果显示采用 SIC 算法后的吞吐量提高了 47%;文献[16]在文献[10]的基础上,通过启发式搜索设计了一种多项式复杂度的多跳单基站网络跨层调度算法;文献[17]设计了一种在多用户多输入多输出网络下,为了满足 SIC 算法的实现条件而对网络拓扑进行分划的启发式算法等。

但是在多跳网络环境下,复杂的网络环境导致基于 SIC 的链路分配和多跳路由算法的设计相当困难,因此,目前涉及到这方面的工作还较少。例如文献[18]设计的算法只能用于单跳单基站网络环境,文献[19]设计的算法只能用于单跳多基站网络环境,文献[16]设计的算法只能用于多跳单基站网络环境,而文献[10]设计的算法虽可用于多跳多基站网络环境,但算法所建立的最终模型是混合整数规划模型,属 NP-hard 问题,因此只适合于小规模的网络。

本文将尝试设计多跳多基站网络环境下基于 SIC 算法的无线网络链路分配和多跳路由算法。算法的核心思想是通过迭代的方式反复寻找更优的链路分配和多跳路由方案,最终最大化整个网络的吞吐量。

2 网络模型及分析

2.1 网络模型初探

考察二维平面上一个具有 n 个节点和 m 个基站

的多跳多基站无线网络,设节点 $s_i \in N(i=1, \dots, n)$, 基站 $b_j \in M(i=1, \dots, m)$ 。网络拓扑结构如图 1 所示。

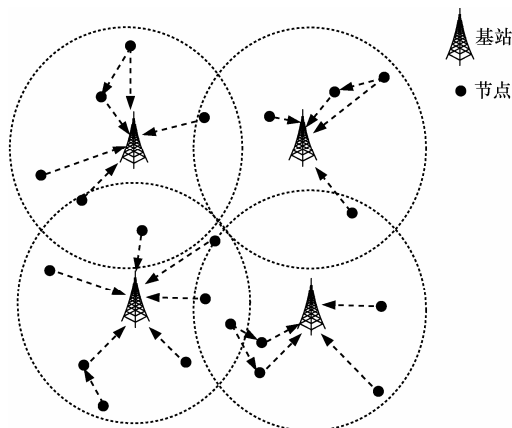


图 1 多跳多基站无线网络系统模型

假定节点用相同的功率 P 和带宽 W 将数据发送到基站。根据协议—干扰模型^[20],每个节点都有自己的传输半径和干扰半径。其中传输半径 $R_T = \left(\frac{\beta N_0}{P}\right)^{-1/\lambda}$, 干扰半径 $R_I = \left(\frac{\alpha N_0}{P}\right)^{-1/\lambda}$ 。这里 α 和 β 是无线网络中相关阈值参数, N_0 是噪声干扰, λ 是衰减指数。

定义 T_{s_i} (或 T_{b_j}) 表示在节点 s_i (或基站 b_j) 的传输半径之内的所有节点(不包括节点本身)组成的集合,定义 I_{s_i} (或 I_{b_j}) 表示在节点 s_i (或基站 b_j) 的干扰半径之内的所有节点(不包括节点本身)组成的集合。特别地,如果节点 $s_j \in T_{s_i}$, 则称节点 s_j 是节点 s_i 的邻居节点;如果节点 $s_j \in T_{b_j}$, 则称节点 s_j 是基站 b_j 的邻居节点。为了便于表达节点之间以及节点和基站之间的数据发送关系,首先引入链路的概念。

定义 1 对于节点 s_i 和节点 s_j (或基站 b_j), 若有 $s_i \in T_{s_j}$ (或 $s_i \in T_{b_j}$), 且在某时间片内 s_i 将数据直接发送到 s_j (或 b_j), 则称 s_i 和 s_j (或 b_j) 之间存在一条链路。记为 $s_i \rightarrow s_j$ (或 $s_i \rightarrow b_j$)。

根据香农原理,当 s_i 进行数据发送时,接收节点 s_j (或接收基站 b_j) 对于 s_i 的信噪比(SINR, signal and interference to noise ratio) δ 应满足 $\delta_{s_i \rightarrow s_j} \geq \beta$ (或 $\delta_{s_i \rightarrow b_j} \geq \beta$), 否则接收方将无法正确接收。同样,当且仅当 $\delta_{s_i \rightarrow s_j} \geq \alpha$ (或 $\delta_{s_i \rightarrow b_j} \geq \alpha$) 时发送方的发送才会对接收方产生干扰。

在网络一次完整的发送/接收过程中，设全部花费时间为 T 。为了便于建模，将时间段 T 等分为 h 个时间片，每个时间片的长度为 $t_k = T/h (k=1, \dots, h)$ 。

定义二值变量 $x_{s_i \rightarrow s_j}^k$ 和 $x_{s_i \rightarrow b_j}^k$ 如下

$$x_{s_i \rightarrow s_j}^k = \begin{cases} 1, s_i \text{ 在 } t_k \text{ 内向 } s_j \text{ 发送数据} \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

$$x_{s_i \rightarrow b_j}^k = \begin{cases} 1, s_i \text{ 在 } t_k \text{ 内向 } b_j \text{ 发送数据} \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

本文所设计算法的目标是在满足无线网络基本发送/接收的条件下，最大化整个网络的信道容量。

2.2 基于 SIC 的节点发送/接收规律分析

当采用 SIC 算法进行节点的发送/接收时，可以发现以下规律。

节点只可能向自己覆盖范围内的节点或基站发送数据，不可能向范围之外的节点或基站发送数据，因此有

$$\sum_{s_i \in T_{s_j}} x_{s_i \rightarrow s_j}^k + \sum_{s_i \in T_{b_j}} x_{s_i \rightarrow b_j}^k = 0 \quad (1)$$

其中， $s_i, s_j \in N, b_j \in M, 1 \leq k \leq h$ 。

节点在一个时间片内最多只能向另外一个节点（或基站）发送数据，不可能同时向 2 个或多个节点（或基站）发送数据。因此应有

$$\sum x_{s_i \rightarrow s_j}^k + \sum x_{s_i \rightarrow b_j}^k \leq 1 \quad (2)$$

其中， $s_i, s_j \in N, b_j \in M, 1 \leq k \leq h$ 。

在多跳网络下，节点既可以进行数据发送，也可以进行数据接收（转发数据），但不能同时进行发送和接收，因此有

$$\sum x_{s_i \rightarrow s_j}^k + \sum x_{s_i \rightarrow b_j}^k + \sum x_{s_m \rightarrow s_i}^k \leq 1 \quad (3)$$

其中， $s_i, s_j, s_m \in N, b_j \in M, 1 \leq k \leq h$ 。

节点在发送/接收时或基站在接收时应满足香农公式，根据 SIC 算法成功接收的条件，有

$$\delta_{s_i \rightarrow s_j}^k = \frac{g_{s_i \rightarrow s_j} P}{\sum_{s_l \neq s_i}^{g_{s_l \rightarrow s_j} \leq g_{s_i \rightarrow s_j}} (g_{s_l \rightarrow s_j} P \sum_{s_m \in T_{s_l}} x_{s_l \rightarrow s_m}^k) + N_0} \geq \beta \quad (4)$$

$$\delta_{s_i \rightarrow b_j}^k = \frac{g_{s_i \rightarrow b_j} P}{\sum_{s_l \neq s_i}^{g_{s_l \rightarrow b_j} \leq g_{s_i \rightarrow b_j}} (g_{s_l \rightarrow b_j} P \sum_{s_m \in T_{s_l}} x_{s_l \rightarrow s_m}^k) + N_0} \geq \beta \quad (5)$$

其中， $g_{s_i \rightarrow s_j}$ 表示节点 s_i 和节点 s_j 之间的功率衰减，

$g_{s_i \rightarrow b_j}$ 表示节点 s_i 和基站 b_j 之间的功率衰减。一般地，在功率一定的前提下，这是一个和距离 $d_{s_i \rightarrow s_j}$ 或 $d_{s_i \rightarrow b_j}$ 相关的参数，此时它们之间的计算关系为：

$$g_{s_i \rightarrow s_j} = d_{s_i \rightarrow s_j}^{-\lambda} \text{ 或 } g_{s_i \rightarrow b_j} = d_{s_i \rightarrow b_j}^{-\lambda}。$$

定义 $r(s_i) (s_i \in N)$ 表示节点 s_i 将数据传送到所属基站要求的最小平均数据传输速率，定义 $r_{s_i \rightarrow s_j} (s_j \in N, s_i \in T_{s_j})$ 表示节点 s_i 将数据（包括自身的和转发的）直接传送到节点 s_j 的平均数据传输速率，定义 $r_{s_i \rightarrow b_j} (b_j \in M, s_i \in T_{b_j})$ 表示节点 s_i 将数据（包括自身的和转发的）直接传送到基站 b_j 的平均数据传输速率，则有

$$\sum_{s_i \in T_{s_j}} r_{s_i \rightarrow s_j} + Kr(s_i) = \sum_{s_i \in T_{s_j}} r_{s_i \rightarrow s_j} + \sum_{s_i \in T_{b_j}} r_{s_i \rightarrow b_j} \quad (6)$$

其中， $s_i \in N, b_j \in M$ ， K 为共同尺度因子。 K 值越大，说明网络的性能越好。

定义 C 表示链路间的信道容量，则有

$$r_{s_i \rightarrow s_j} \leq \frac{1}{h} \sum_{k=1}^h (C x_{s_i \rightarrow s_j}^k) \quad (7)$$

其中， $s_i \in N, s_j \in T_{s_i}$ 。

问题可抽象为在满足以上各式的基础上，求解尽可能大的 K 值，使整个网络在全部时间段 T 内的信道容量尽可能最大化。因此可归结为

$$\begin{aligned} & \max K \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \text{式(1)~式(7)} \\ r_{s_i \rightarrow s_j}, r_{s_i \rightarrow b_j}, K \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

在式(8)中，约束都为线性约束，变量包括 0~1 二值变量 $x_{s_i \rightarrow s_j}^k$ 、 $x_{s_i \rightarrow b_j}^k$ ，以及大于 0 的实数变量 $r_{s_i \rightarrow s_j}$ 、 $r_{s_i \rightarrow b_j}$ 、 K ，因此这是一个混合整数规划问题，无法在多项式时间内求解。但若所有二值变量（即 $x_{s_i \rightarrow s_j}^k$ 和 $x_{s_i \rightarrow b_j}^k$ ）的取值已经确定，则问题可归结为

$$\begin{aligned} & \max K \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \text{式(6)和式(7)} \\ r_{s_i \rightarrow b_j}, r_{s_i \rightarrow b_j}, K \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)为一个线性规划问题，可以在多项式时间内求解。因此后文讨论的重点是设计合适的算法，确定所有的二值变量 $x_{s_i \rightarrow s_j}^k$ 和 $x_{s_i \rightarrow b_j}^k$ 的取值，使问题简化为式(9)，从而可在多项式时间内求解。

3 基于干扰管理的迭代求解策略

基于干扰管理的迭代求解策略的总体求解步骤描述如下。

步骤 1 根据二维网络下基站和节点分布情况将整个网络分为若干区域。

步骤 2 设计初始链路分配和多跳路由方案, 保证每个节点的数据都能发送到自己所在区域的基站。

步骤 3 根据式 (9) 求解当前方案下每个节点的实际数据传输率 (即 $r_{s_i \rightarrow b_j}$ 、 $r_{s_i \rightarrow b_j}$) 和 K 值。

步骤 4 尝试通过某种方式, 如让节点在更多的时间片发送, 或者通过更多的邻居节点转发数据到基站, 从而获得改进的链路分配和多跳路由方案。

步骤 5 如果可以寻找到更合适的方案, 转到步骤 3, 否则求解最终的 K 值, 结束。

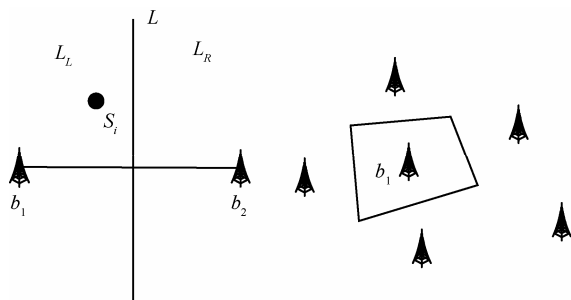
下面讨论各步骤的详细实现。

3.1 基于 Voronoi 图的多基站区域划分

求解策略的第一步是根据基站将整个网络分为若干区域。为此, 可采用 Voronoi 图算法对二维平面进行区域划分。如图 2 所示, 并有如下定义。

定义 2 如图 2(a)所示, 设 b_1 和 b_2 是二维平面上的 2 个基站, L 是线段 $\overline{b_1 b_2}$ 的垂直平分线, L 将平面分成 2 个半平面 L_L 和 L_R , 定义 $H(b_1, b_2)$ 表示半平面 L_L , $H(b_2, b_1)$ 表示半平面 L_R 。

不难证明, 对于平面上的任意节点 s_i , 若 s_i 在半平面 $H(b_1, b_2)$ 内, 则其到 b_1 和 b_2 的欧氏距离应满足 $d_{s_i \rightarrow b_1} < d_{s_i \rightarrow b_2}$ 。



(a) 两点划分示例 (b) 多点划分示例

图 2 采用 Voronoi 图算法对二维平面的区域划分

定义 3 定义 $V(b_i) = \bigcap_{i \neq j} H(b_i, b_j)$, 即 $V(b_i)$ 表示比其他点更接近于 b_i 的点的轨迹是 $(n-1)$ 个半平面的交, 它是一个不多于 $(n-1)$ 条边的凸多边形区域,

称为关联 b_i 的 Voronoi 多边形或关联 p_i 的 Voronoi 域。

例如, 图 2(b)所示关联 b_1 的 Voronoi 多边形, 它是一个四边形, $n=6$ 。

通过 Voronoi 算法对二维平面进行划分, 可将整个网络拓扑划分为若干区域, 当节点 $s_i \in V(b_j)$ 时, 其信息应最终发送到基站 b_j 。另外, 建立了区域划分方法后, 可以定义路径的概念。

定义 4 若节点 $s_i \in V(b_j)$, 在当前的路由方案中, s_i 可能通过不同的节点将自身数据发送到基站 b_j , 设其中一种方式是 $s_i \rightarrow s_{i1} \rightarrow \dots \rightarrow b_j$, 则称其为节点 s_i 到基站 b_j 的一条路径。

3.2 基于最小跳数的初始方案

算法的基本思想是通过迭代的方式不断寻找更优的方案, 为此初始时需要建立一个基本的节点链路分配和多跳路由方案将整个网络连接起来。因此步骤 2 中“设计初始方案”的关键点是将方案正确建立出来, 而不需要考虑方案的性能。因此, 可基于最小跳数算法设计该步骤。首先引入最小跳数的相关定义。

定义 5 节点 s_i 的最小跳数 $\text{hop}(s_i)$ 表示其信息发送到基站需要经过转发的最少次数。

显然, 如果 $s_i \in T_{b_j}$, 必有 $\text{hop}(s_i) = 1$, 否则应有 $\text{hop}(s_i) = \min_{s_j \in T_{s_i}} \text{hop}(s_j) + 1$ 。为了方便后面讨论, 定义基站的最小跳数 $\text{hop}(b_i) = 0$ 。对于每个节点的最小跳数的计算可采用一种类似“扩散”的思想逐步计算出来, 即首先确立最小跳数为 1 的节点, 然后基于此确立最小跳数为 2 的节点...该步骤反复进行直到确定所有节点的最小跳数。算法的流程如图 3 所示。

当所有节点的最小跳数都确定后, 初始链路分配和多跳路由方案就可以建立了, 即如果 $\text{hop}(s_i) = 1$, 则直接建立该节点和基站之间的链路; 如果 $\text{hop}(s_i) > 1$, 则选择其邻居节点中任意一个跳数比其小的节点建立链路即可。

在这一步中还有一个关于时间片分配的问题, 即如何为建立好的链路分配合适的发送时间片。一个简单的办法是为每条链路分配一个单独的发送时间片, 这样可以保证不会有发送冲突。但这不是一个好的方案, 在采用 SIC 算法进行无线网络的通信时, 即便是同一区域的节点在满足 SIC 正确接收条件的前提下也是可以同时发送的。为此, 在为链

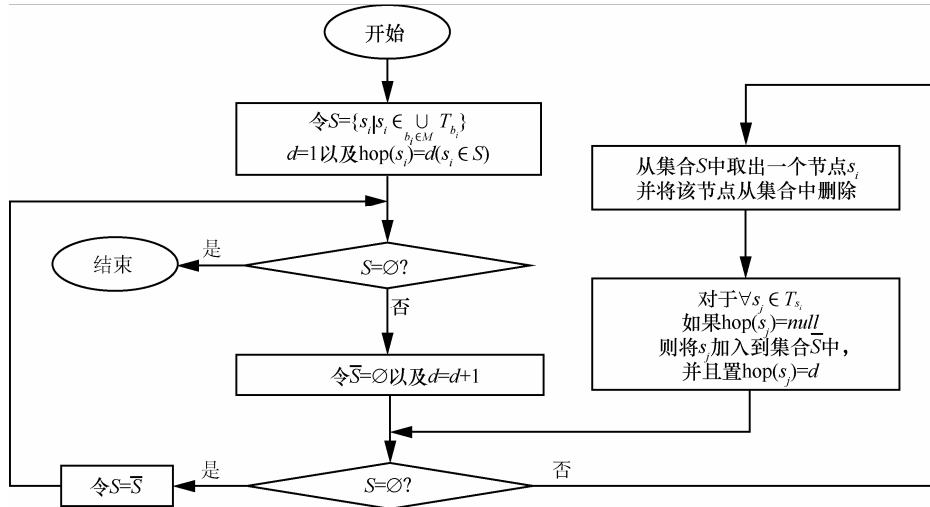


图 3 标记所有节点最小跳数的算法流程

路分配时间片时可尝试先加入到已经分配过的时间片中，如果产生冲突则分配新的时间片，否则分配到已分配且不冲突时间片中所有信噪比最小值最大的一个时间片。具体算法流程图如图 4 所示。

当初始链路方案确立后，通过求解式(9)即可得到该方案下的 K 值。式(9)是一个线性规划问题，可以在多项式时间内直接找到最优解。

3.3 迭代寻找优化方案

初始方案确立后，通过式(9)求解的结果是在该方案下的最好结果，但初始链路分配和多跳路由方案只能保证所有节点的数据都送到基站。此时，在整个时间段内，每条链路只有一次发送机会，每个节点也只有一条路径通往基站。因此初始方案有很大的优化空间。本节将讨论具体的优化方法。首先

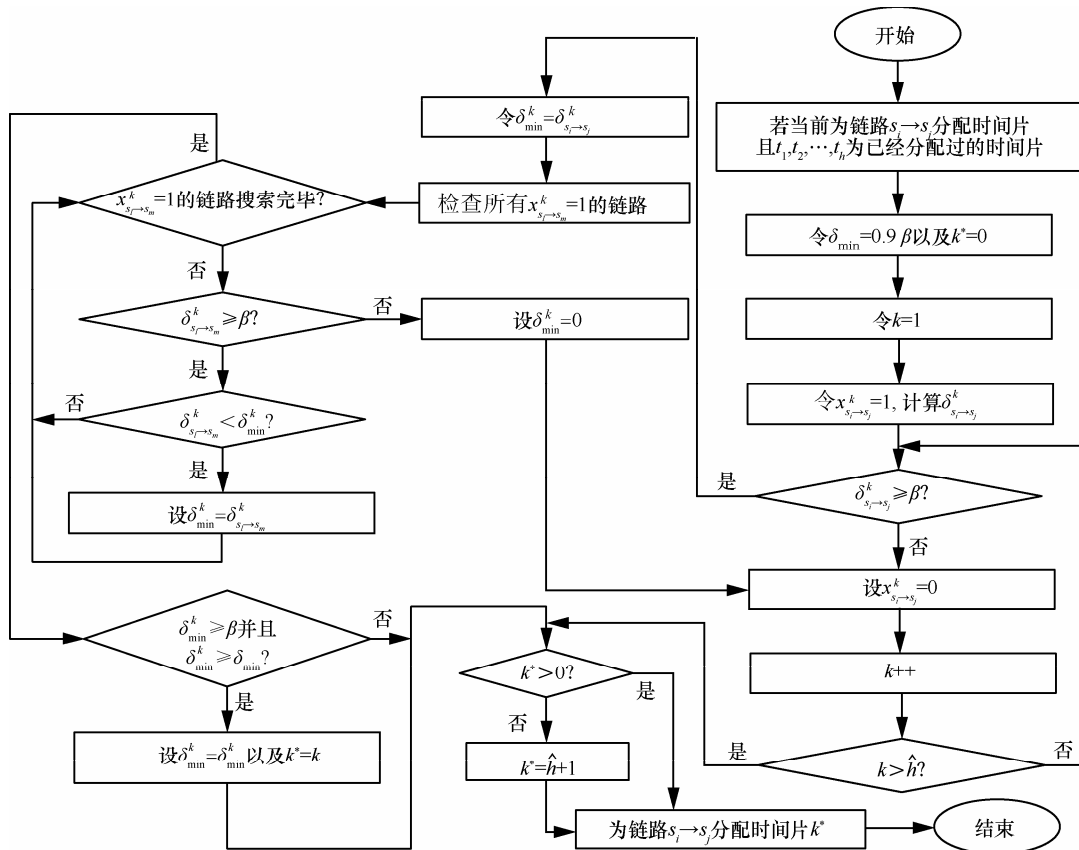


图 4 链路的时间片分配策略算法流程

引入相关定义。

定义 6 定义链路的剩余容量如下。链路 $s_i \rightarrow s_j$ (或 $s_i \rightarrow b_j$) 的剩余容量等于该链路的信道容量和该链路当前的实际数据传输速率之差, 用 $Z_{s_i \rightarrow s_j}$ (或 $Z_{s_i \rightarrow b_j}$) 表示, 即

$$\begin{cases} Z_{s_i \rightarrow s_j} = \frac{1}{h} \sum_{k=1}^h (C X_{s_i \rightarrow s_j}^k) - r_{s_i \rightarrow s_j}, s_j \in N, s_i \in T_{s_j} \\ Z_{s_i \rightarrow b_j} = \frac{1}{h} \sum_{k=1}^h (C X_{s_i \rightarrow b_j}^k) - r_{s_i \rightarrow b_j}, b_j \in M, s_i \in T_{b_j} \end{cases}$$

特别地, 若当前方案下节点 s_i 和节点 s_j (或基站 b_j) 之间不存在链路, 为了算法统一, 令 $Z_{s_i \rightarrow s_j} = -1$ (或 $Z_{s_i \rightarrow b_j} = -1$)。

定义 7 定义节点的剩余容量如下。在当前链路分配和多跳路由方案下, 节点 s_i 的剩余容量等于所有以该节点为发送节点的链路的剩余容量之和, 用 Z_{s_i} 表示, 即

$$Z_{s_i} = \sum_{s_j \in T_{s_i}} Z_{s_i \rightarrow s_j} + Z_{s_i \rightarrow b_k}, b_k \in M, s_i \in T_{b_j}$$

定义 8 定义瓶颈链路的概念如下。在整个网络的当前所有链路中, 剩余容量最小的一条链路称为瓶颈链路, 用 $\min(Z_{\text{link}})$ 表示。

在最优的方案中必然存在一条或几条瓶颈链路, 其剩余容量为 0。否则只需扩大瓶颈链路当前的实际传输速率从而使该瓶颈链路的剩余容量为 0, 整个网络的吞吐率即可增加。这时所有链路上的剩余容量都会减少, 但只有瓶颈链路减到 0, 从而可以找到一组更好的方案。

定义 9 定义瓶颈节点的概念如下。在当前网络的链路分配和多跳路由方案下, 和瓶颈链路直接相连的发送节点称为瓶颈节点, 用 $\min(Z_{\text{node}})$ 表示。

迭代优化网络容量的优化方式有 2 种, 一是尝试让瓶颈链路在更多的时间片里发送, 二是尝试让瓶颈节点的数据有更多的路径到达基站。对于方式 1, 可采用类似图 4 描述的算法进行优化, 对于方式 2, 可选取瓶颈节点的邻居节点中, 最小跳数不大于瓶颈节点且剩余容量最大的节点进行优化。在整体方案中, 可先尝试方式 1, 如果方式 1 无法优化则尝试方式 2。该方法反复进行, 直到 2 种方式都无法进一步优化为止。

算法整体流程如图 5 所示。

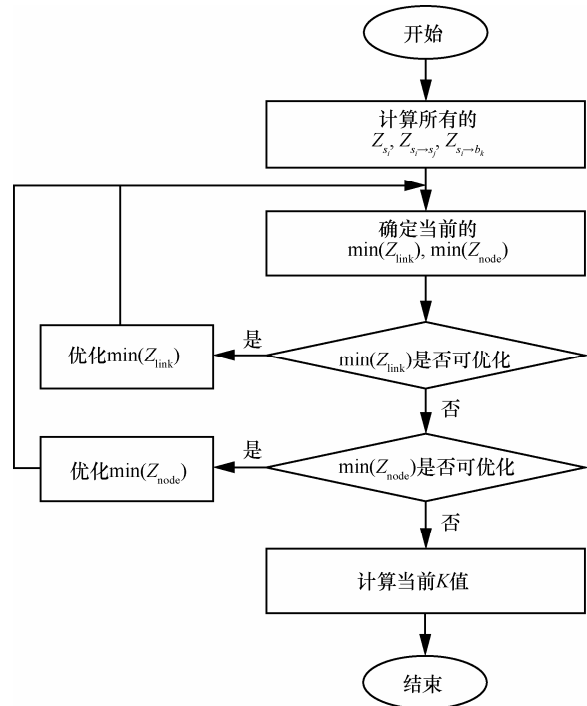


图 5 迭代优化网络容量算法流程

3.4 算法复杂度分析

算法第 1 步, 网络区域的划分, 需要遍历每个节点并确立每个节点所在区域, 因此其时间复杂度为 $O(nm)$ 。

在建立初路由方案时, 首先需要确立节点的最小跳数, 为此需要访问每个节点的所有邻居节点, 其时间复杂度为 $O(n^2)$ 。然后需要选择节点的下一跳接收节点 (或基站), 其时间复杂度为 $O(n)$ 。之后需要为这 2 个节点之间的链路分配时间片, 为此需要遍历已经使用过的所有时间片, 并尝试将新的链路加入该时间片中, 此时需要计算该时间片内所有接收节点在加入了新链路后变化了的信噪比。这一步的时间复杂度应为 $O(n^4 + hn^2)$, 其中 h 为时间片个数。最后, 求解式 (9) 线性规划问题的时间复杂度应为 $O(N_v^3)$, 其中 N_v 表示式 (9) 中变量的数量, 即 $N_v = O(n^2)$, 因此有 $O(N_v^3) = O(n^6)$ 。

因此, 初始链路分配和多跳路由方案的总时间复杂度应为

$$O(n^2) + O(n) + O(n^4 + hn^2) + O(n^6) = O(n^6 + hn^2)$$

算法的主体通过迭代方式寻找优化方案提升网络容量, 为此首先需要找到当前的瓶颈链路, 这一步的时间复杂度为 $O(n^2)$, 然后需要通过多时间片或多跳路由的方式扩大瓶颈链路的容量。如果是通过

多跳路由的方式，算法主体的时间复杂度应为 $O(n^3)$ ，由于需要遍历每个节点的所有邻居节点，因此时间复杂度应为 $O(n^4)$ ；如果是通过多时间片的方式，算法主体的时间复杂度应为 $O(hn^2)$ ，同样需要遍历所有节点，因此时间复杂度应为 $O(hn^3)$ 。最后，求解式 (9) 线性规划问题，时间复杂度为 $O(n^6)$ 。

因此，通过迭代方式寻找优化方案的一次迭代过程的算法时间复杂度应为

$$O(n^2) + O(n^4) + O(hn^3) + O(n^6) = O(n^6 + hn^3)$$

最后，所有二值变量 $x_{s_i \rightarrow s_j}^k$ 的个数应为 $O(hn^2)$ ，因此算法主体通过迭代方式寻找优化方案的总时间复杂度应为

$$O(hn^2)O(n^6 + hn^3) = O(hn^8 + h^2n^5)$$

综合以上讨论，算法的总时间复杂度应为

$$O(nm) + O(n^6 + hn^2) + O(hn^2)O(hn^8 + h^2n^5) = O(nm) + O(hn^8 + h^2n^5)$$

4 仿真结果及分析

本节给出实验数据及仿真结果。参数设置如下：阈值 $\alpha = \beta = 3$ ，衰减系数 $\lambda = 4$ ，噪声干扰 $N_0 = 10^{-10}$ W，功率 $P = 1$ W，频道带宽 $W = 22$ MHz。节点和基站的坐标在 1000 m^2 的二维平面内随机生成，节点要求的最小平均数据传输速率 $r(s_i)$ 在 100 kbit/s 到 1 Mbit/s 之间随机生成。

4.1 一个具体网络的仿真结果

考察二维平面上如图 6 所示的拥有 20 个节点、2 个基站的多跳多基站无线网络，2 个基站的坐标分别为 $b_1(200, 214)$ ， $b_2(688, 703)$ ，所有节点的坐标和要求的的最小平均数据传输速率列于表 1 中。

文献[10]详细描述了采用传统方法（即不采用 SIC 算法时）建立的模型和求解方案。其中模型和式 (8) 类似，只要注意当某个节点在进行接收时，范围内的其他邻居节点都不能发送即可。由此所建立的模型是比式 (8) 变量少很多的整数规划模型，文献[10]提出了一种命名为 SF 的求解方案对其求解。本文将沿用该求解方案对传统方法进行求解，从而和本文算法进行对比。通过求解，采用 SIC 算法和采用传统方法可分别解得 $K = 44.50$ 和 $K = 22.32$ ，可见在采用干扰管理相关技术后整个网络的容量有明显的提高。2 种情况下的具体链路分配和多跳路由方案分别如图 7 和图 8 所示。其中，写在

每条链路上的数字为该链路活跃的时间片编号。

表 1 20 个节点 2 个基站的多跳随机网络的节点坐标和要求的的最小平均数据传输速率

序号	坐标	$r(s_i)$	序号	坐标	$r(s_i)$
1	(611,299)	307.65	11	(47,560)	469.81
2	(393,244)	664.54	12	(637,462)	408.90
3	(529,335)	734.76	13	(875,232)	613.85
4	(569,861)	691.14	14	(400,800)	889.94
5	(442,435)	835.87	15	(523,94)	738.61
6	(363,401)	520.93	16	(813,830)	338.39
7	(568,600)	560.69	17	(155,104)	556.91
8	(769,133)	126.23	18	(376,700)	367.86
9	(67,372)	757.82	19	(536,198)	401.01
10	(200,483)	560.19	20	(830,430)	566.03

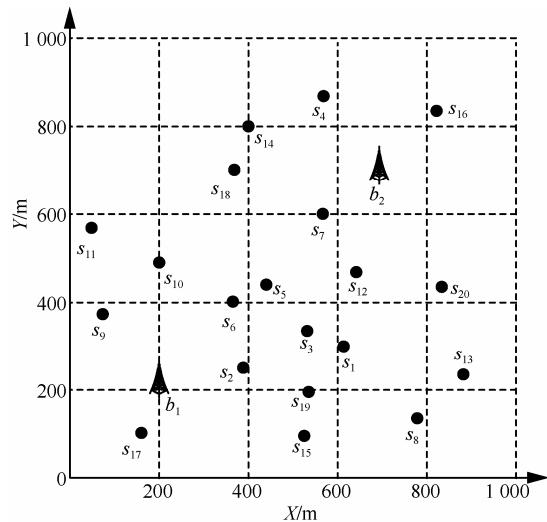


图 6 20 个节点 2 个基站的多跳随机网络拓扑结构

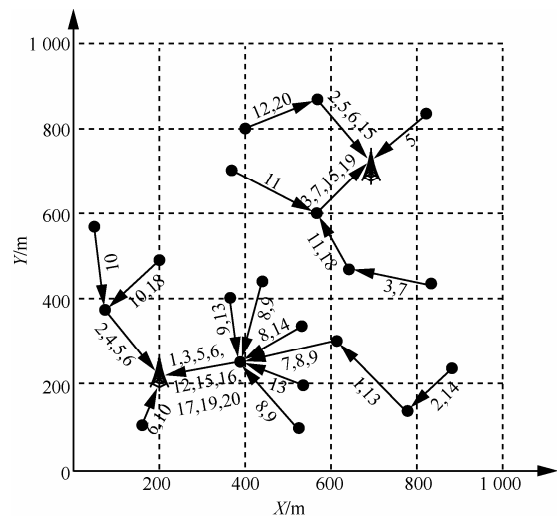


图 7 采用 SIC 算法下的节点链路和路由方案

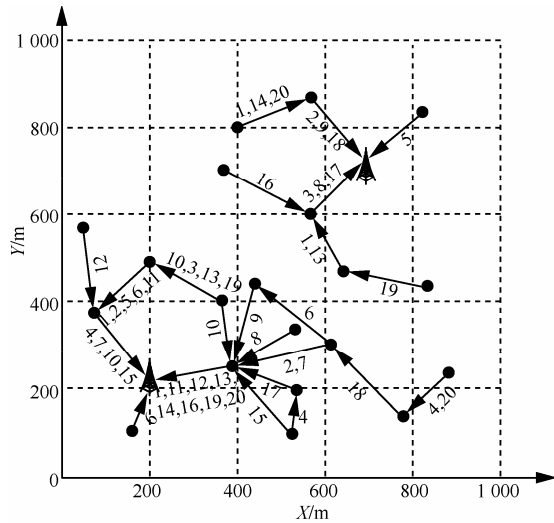


图 8 不采用 SIC 算法下的节点链路和路由方案

4.2 更多随机网络仿真结果比较分析

为了对算法进行进一步分析与研究，基于原来的参数设置，让网络节点数从 10 到 50，基站数从 2 到 5，每种情况下都随机生成 20 个不同的网络，

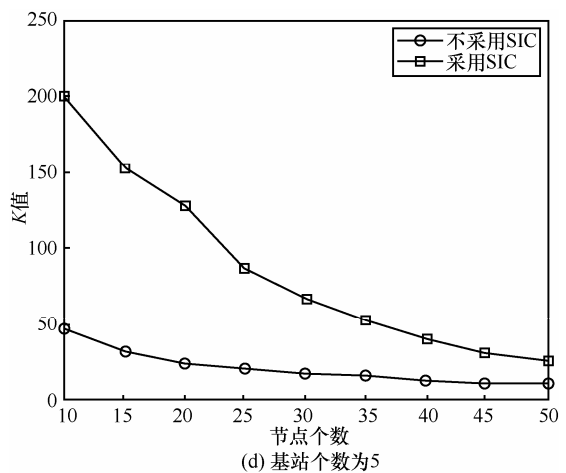
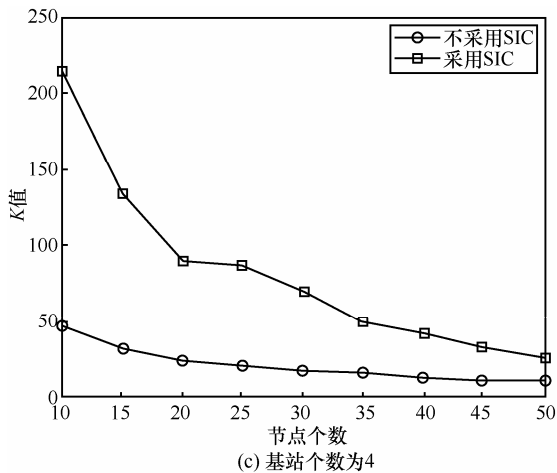
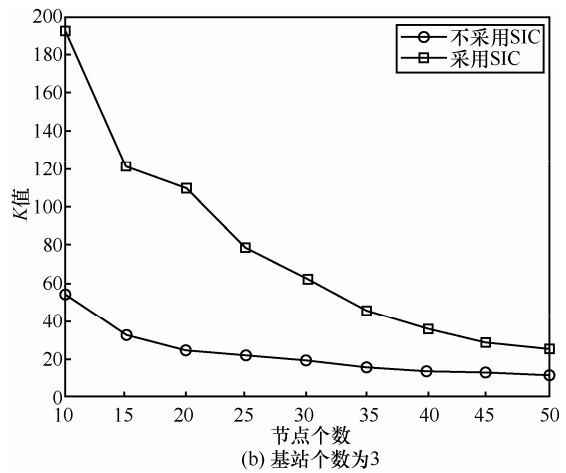
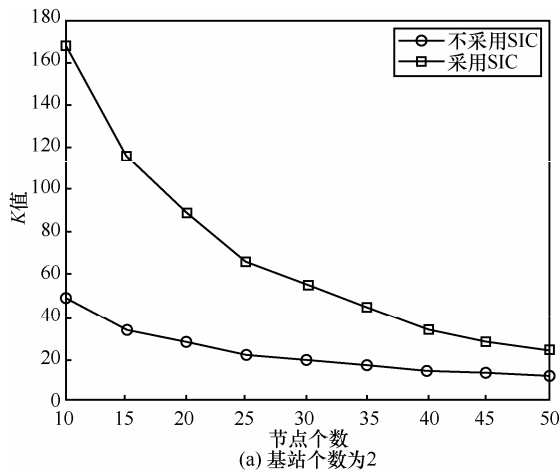


图 9 不同基站数目下更多随机网络的仿真结果比较

将求解的 K 值取平均后进行比较分析，得到的分析对比如图 9 所示。

从图 9 可见，本文所设计的求解策略对于每一种具体网络都可以较好地找到优化的节点链路分配和多跳路由方案。其中，采用 SIC 算法下的 K 值相较于不采用 SIC 算法下的 K 值有了很大的提高，其改进率在 2 到 5 倍之间。

5 结束语

本文研究了在采用干扰管理相关技术下多跳多基站无线网络链路分配和多跳路由方案的设计问题。通过 SIC 算法可以有效消除非期望信号的干扰，并可同时实现多分组接收，从而提高无线网络的吞吐量。为了充分发挥 SIC 带来的吞吐量的提升，设计了在物理层采用 SIC 算法后的链路层时间片分配和网络层的多跳路由方案。该方案具有多项式时间复杂度，可用于多跳多基站无线网络，仿真结果显示，采用 SIC 算法的链路分配和多跳路由方案比

不采用 SIC 算法的方案吞吐率提高了 2 到 5 倍。

本文算法虽具有多项式时间复杂度,但相对来说仍然不低,因此如何设计复杂度更低的求解算法是下一步可继续进行的工作。另一方面,本文算法的优化效果虽然较之传统方法有了很大提高,但其相对于最优方案的差距是多少,也值得探讨。如何从理论上进行分析,或从实例中进行仿真,寻找针对于式(8)模型的最优解或最优解的上限,从而和本文的优化方案进行比较,也是下一步可继续进行的工作。

参考文献:

- [1] 肖竹,李仁发,易克初等. 两层异构网络中 femtocell 研究进展与展望[J]. 通信学报, 2013, 34(2): 156-169.
XIAO Z, LI R F, YI K C, *et al.* Development and prospect of research on femtocell in two-tier heterogeneous networks[J]. Journal on Communications, 2013, 34(2):156-169.
- [2] YANG K. Interference management in LTE wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 19(3): 8-9.
- [3] 殷作亮,毛兴鹏,张钦宇等. 实现 MIMO 系统串行干扰消除迫零检测的快速递归算法[J]. 通信学报, 2012, 33(7): 67-74.
YIN Z L, MAO X P, ZHANG X Y, *et al.* Fast recursive algorithm for implementation of MIMO ZF-SIC detection[J]. Journal on Communications, 2012, 33(7): 67-74.
- [4] ANDREWS J G. Interference cancellation for cellular systems: a contemporary overview[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 12(2): 19-29.
- [5] KIM H, VECIANA G, YANG X. Alpha-optimal user association and cell load balancing in wireless networks[A]. INFOCOM[C]. San Diego, CA, 2010.1-5.
- [6] LOPEZ D, GUVENC I, ROCHE G. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 18(3): 22-30.
- [7] MOLLANOORI M, GHADERI M. On the performance of successive interference cancellation in random access networks[A]. SECON[C]. Seoul, Korea, 2012.461-469.
- [8] SAMBHWANI S, ZHANG W, ZENG W. Uplink Interference Cancellation in HSPA: Principles and Practice[Z]. QUALCOMM White Paper, 2009.
- [9] BABICH F, COMISSO M. Theoretical analysis of asynchronous multi-packet reception in 802.11 networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(6): 1782-1794.
- [10] JIANG C M, SHI Y, HOU Y T. Squeezing the most out of interference: an optimization framework for joint interference exploitation and avoidance[A]. INFOCOM[C]. Orlando, FL, USA, 2012.424-432.
- [11] SHAKKOTTAI S, RAPAPORT T S, KARLSSON P C. Cross-layer design for wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 41(10): 74-80.
- [12] VAN D S M. Cross-layer wireless multimedia transmission: challenges, principles, and new paradigms[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 12(4): 50-58.
- [13] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y. A survey on sensor networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 40(8): 102-114.
- [14] PARK J, CHUN J. Improved lattice reduction-aided MIMO successive interference cancellation under imperfect channel estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(6): 3346-3351.
- [15] ZHANG Y, LUO H W, CHEN W. Efficient relay beamforming design with SIC detection for dual-hop MIMO relay networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9):4192-4197.
- [16] SHI L, SHI Y, YE Y X. An efficient interference management framework for multi-hop wireless networks[A]. WCNC[C]. Shanghai, China, 2013.1129-1134.
- [17] GELAL E, PELECHRINIS K, KIM T S. Topology control for effective interference cancellation in multi-user MIMO networks[A]. INFOCOM[C]. San Diego, CA, 2010.1-9.
- [18] SHI L, HAN J H, SHI Y. Cross-layer optimization for wireless sensor network with multi-packet reception[A]. CHINACOM[C]. Beijing, China, 2010.1-5.
- [19] 石雷,韩江洪,石怡等. 多包接收无线 Mesh 网络的跨层优化[J]. 应用科学学报, 2012, 30(3): 227-233.
SHI L, HAN J H, SHI Y, *et al.* Cross-layer optimization for wireless mesh network with multi-packet reception[J]. Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 2012, 30(3): 227-233.
- [20] SHI Y, HOU Y T, LIU J, *et al.* How to correctly use the protocol interference model for multi-hop wireless networks[A]. Proceedings of the ACM International Symposium on Mobile ad hoc Networking and Computing[C]. 2009.239-248.

作者简介:



石雷 (1980-), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学讲师, 主要研究方向为无线网络。



韩江洪 (1954-), 男, 安徽泾县人, 合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机控制、可靠性工程、无线网络。

石怡 (1975-), 男, 安徽合肥人, 弗吉利亚理工大学兼职助理教授, 主要研究方向为无线网络。

魏振春 (1978-), 男, 宁夏青铜峡人, 合肥工业大学计算机系副主任、副教授, 主要研究方向为计算机控制、无线传感器网络。