

DOI: 10.3724/SP.J.1187.2013.01005

# 基于干扰管理的无线网络跨层算法研究和设计\*

石雷<sup>1,3</sup> 石怡<sup>2</sup> 魏振春<sup>1,3</sup> 韩江洪<sup>1,3</sup>

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009; 2. 美国弗吉尼亚理工大学 弗吉尼亚州 24061;  
3. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心 合肥 230009)

**摘要:** 采用贪心策略设计了一种基于干扰管理的无线网络跨层算法。首先建立了基于干扰管理的无线网络跨层设计模型,该模型是一个混合整数规划模型,无法在多项式时间内求解。为此在保证最大化信噪比的前提下,通过研究瓶颈节点对网络吞吐量的影响,提出了一种基于贪心策略的跨层设计算法。该算法通过迭代不断扩大瓶颈节点的数据传输率,进而优化整个网络的吞吐量。仿真结果表明该算法在优化效果上比已有算法提高了 29.10%,在运算速度上比已有算法有成百倍的提高。

**关键词:** 干扰管理; 串行干扰消除; 跨层设计; 混合整数线性规划

**中图分类号:** TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Cross-layer algorithm for the wireless network with interference management

Shi Lei<sup>1,3</sup> Shi Yi<sup>2</sup> Wei Zhenchun<sup>1,3</sup> Han Jianghong<sup>1,3</sup>

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia 24061, USA; 3. Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

**Abstract:** A cross-layer algorithm for the wireless network with interference management based on the greedy policy design is proposed. First, a suitable cross-layer design model for the wireless network is established. It is a mixed integer programming model and cannot be solved within polynomial time in general. To solve it, based on ensuring the maximization of signal-to-noise ratio, after studying the influence of the bottleneck nodes on the network capacity, the cross-layer algorithm is proposed. The algorithm can expand the data transmission by iteration, thereby optimize the throughput of the entire network. The simulation results show that the throughput is increased by 29.10% than the existing algorithm, and the computing speed is improved by hundreds of times than the existing algorithm.

**Keywords:** interference management; successive interference cancellation; cross-layer design; mixed-integer linear programming

## 1 引言

无线网络技术的演进过程,就是人们不断追求更快的传输速率和更大的网络容量的过程<sup>[1]</sup>。由于无线通信的通信介质是整个自由空间,若同一空间范围内多个信号同时发送就会产生干扰。传统的通信协议,例如 Aloha、CSMA、MACA 等,会认为这些信号产生了冲突,并将其全部丢弃。显

然,这些信号并不是无用的,如果能对它们进行有效管理并接收下来,势必能大大提高无线网络的吞吐量。干扰管理(interference management, IM)<sup>[2]</sup>作为近年来一个研究热点,就是在此背景下产生的研究方向。

实现干扰管理的手段可以分为 3 大类:干扰消除(interference cancellation)<sup>[3]</sup>、干扰随机化(interference randomization)<sup>[4]</sup>和干扰协调(interference

收稿日期: 2013-03 Received Date: 2013-03

\* 基金项目: 教育部博士点基金(20100111110004)、安徽省自然科学基金(1208085QF113)资助项目

coordination)<sup>[4]</sup>，主要探讨采用干扰消除实现干扰管理。干扰消除的实现算法主要有串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC)<sup>[5]</sup> 和并行干扰消除 (parallel interference cancellation, PIC)<sup>[6]</sup>。其中, SIC 算法具有实现简单和高效的特点, 受到了广泛的研究和关注。因此, 将采用 SIC 算法实现干扰管理。

SIC 算法对信号的判决是一步一步依次进行的, 其工作原理可简述如下: 接收端根据信号功率的大小, 首先找到输出功率最强的信号, 并对该信号进行判决。根据判决结果, 该信号的扩频码, 及估计出的幅度和相位信息来得到该信号的估计值, 然后从总的接收信号中减去该值, 并得到一个新的接收信号。这一步等于是把输出功率最强的信号判决出来并消除了该信号对其他信号造成的多址干扰。这个过程会重复进行, 从而依次判决出功率第二强信号、第三强信号……直到不能再进行判决为止。

干扰管理属于物理层的实现手段, 要将其有效应用到无线网络中, 必须设计适合干扰管理的上层 (数据链路层、网络层) 算法或跨层算法, 才能充分发挥干扰管理所带来的吞吐量上的提升。目前, 学者们做的很多工作只是集中在某一层上, 例如数据链路层<sup>[7-8]</sup>、网络层<sup>[9-11]</sup>, 而没能充分对层间信息进行交换和共享, 亦即采用跨层<sup>[12]</sup>的方式设计基于干扰管理的无线网络优化算法的工作还较有限。

将设计一种基于干扰管理的无线网络跨层算法, 其中网络模型采用单跳多基站的拓扑结构, 该工作在文献 [13] 中也有涉及。文献 [13] 最终设计的模型是一个混合整数线性规划模型 (mixed integer linear program, MILP)<sup>[14]</sup>, 属于 NP-Hard 问题, 一般不可能在多项式时间内算出解, 因此文献 [13] 提出了一种被命名为 SF (sequential fixing)<sup>[15]</sup> 的求解策略来求解该 MILP 问题。SF 求解策略是求解 MILP 问题的通用求解策略, 虽然能找到可行解, 但算法复杂度较高。将尝试针对基于干扰管理的单跳多基站无线网络, 通过贪心策略设计一个具有多项式时间复杂度的跨层算法, 并通过仿真结果显示该算法具有很好的性能。

## 2 基于干扰管理的网络调度模型

考察一个具有  $n$  个节点和  $m$  个基站的单跳多

基站网络, 节点构成的集合记为  $N$ , 基站构成的集合记为  $M$ , 每个节点都用相同的功率  $P$  和带宽  $W$  将自身数据直接发送到和它距离最近的一个基站。网络拓扑结构如图 1 所示。注意到每个基站都有其覆盖范围, 不同基站之间的覆盖范围会有重合。在重合区域内的节点发送数据时会对其他基站产生影响。

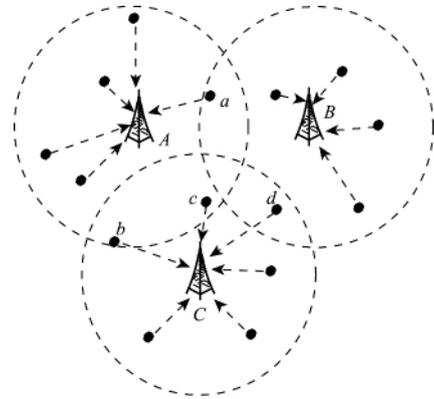


图 1 单跳多基站无线网络系统模型

Fig. 1 System model of the single-hop multi-base station wireless network

### 2.1 物理层模型

首先通过 Voronoi 图算法<sup>[13]</sup> 根据基站划分不同区域。若整个网络中有  $m$  个基站, 则可以划分成  $m$  个区域, 每个区域由一个基站  $B_l$  和若干个网络节点组成。将区域记为  $V_l (l = 1, \dots, m)$ , 即  $V_l$  由  $B_l$  和若干属于该区域的节点组成。

定义  $R_i$  表示  $s_i$  节点要求的最小平均数据传输速率, 定义  $d_{il}$  表示节点  $s_i$  和基站  $B_l$  之间的距离,  $\lambda$  为衰减指数,  $g_{il}$  表示节点  $s_i$  和基站  $B_l$  之间的功率衰减, 则有:  $g_{il} = a \cdot d_{il}^{-\lambda}$ 。这里可将  $a$  归一化, 即  $a = 1$ 。

若节点  $s_i \in V_l$ , 当节点  $s_i$  使用功率  $P$  发出数据时, 基站  $B_l$  收到的信号功率为  $g_{il}P$ 。此时  $s_i$  的信噪比可表示为:

$$SINR_{il} = \frac{g_{il}P}{N_0 + \sum_{j=1, \dots, n}^{g_a > g_j} g_{jl}P}$$

这里  $N_0$  表示噪声干扰, 分母中的  $g_{jl}$  表示和节点  $s_i$  同时发送的其他节点的干扰。

对于节点  $s_i$  来说, 当且仅当  $SINR_{il} \geq \beta$  时其发出的数据才能被  $B_l$  解码, 当且仅当  $SINR_{il} \geq \alpha$  时

其发出的数据才会对  $B_l$  产生干扰。 $\alpha$  和  $\beta$  是无线网络中的相关阈值参数。此时节点的传输半径  $R_T$  和干扰半径  $R_I$  分别为： $R_T = (\beta N_0/P)^{-1/\lambda}$ ， $R_I = (\alpha N_0/P)^{-1/\lambda}$ 。根据协议-干扰模型，将节点  $s_i$  的干扰集记为  $I_i$ ，则节点的及时传输速率可表达为： $W \ln(1 + \beta)$ 。

### 2.2 数据链路层模型

设调度用到的整个时间段  $T$  被等分为  $h$  个时间片，每个时间片的长度为  $t_k = T/h$ ，定义二值变量：

$$x_i^k = \begin{cases} 1, & \text{节点 } s_i \text{ 在时间片 } k \text{ 内向基站发送数据} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

如果某节点发送数据不能成功，那么显然此传输不应该进行。所以不妨假设只有当数据能被成功接收时  $s_i$  才会发送数据。此时，节点  $s_i$  在时间片  $t_k$  的信噪比可以表示为：

$$SINR_{il}^k = \frac{g_{il}P}{N_0 + \sum_{j=1, \dots, n}^{g_{jl} > g_{il}} g_{jl}P} \quad (1)$$

若此时信息被  $B_l$  正确解码，必有  $SINR_{il}^k \geq \beta$ 。通过对式(1)进行变换，可以得到：

$$\sum_{j=1, \dots, n}^{g_{jl} > g_{il}} x_j^k g_{jl} \leq \frac{g_{il}}{\beta} - \frac{N_0}{P} \quad (2)$$

当采用 SIC 算法实现干扰管理时，根据式(2)及节点的传输条件，可将问题描述如式(3)所示：

$$\begin{aligned} & \max K \\ & \text{s. t.} \\ & \left\{ \begin{aligned} KR_i & \leq \sum_{k=1, \dots, h} x_i^k \frac{W}{h} \log_2(1 + \beta) & (1 \leq i \leq n) \\ \sum_{j=1, \dots, n}^{g_{jl} > g_{il}} x_j^k g_{jl} & \leq x_i^k \left( \frac{g_{il}}{\beta} - \frac{N_0}{P} \right) + (1 - x_i^k) \sum_{j=1, \dots, n}^{g_{jl} > g_{il}} g_{jl} & (1 \leq l \leq m, 1 \leq k \leq h, s_i \in V_l) \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $x_i^k$  是 0 ~ 1 整数变量， $K$  是大于 0 的实数型变量。这是一个 MILP 问题。无法在多项式时间内得到最优解。

由于式(3)无法直接求解，文献[13]中，作者提出了一种命名为 SF (sequential fixing) 的求解策略来求解该问题，最终得到了可行解。

### 3 基于贪心策略的跨层求解方法

观察式(3)中的共同尺度因子  $k$  可发现，由于功率、带宽等是常数，在整个时间段内， $k$  值的大小完全取决于节点的发送次数(即出现在不同时间片内的次数越多，所取得的  $k$  值越大)和节点要求的最小平均数据传输速率(即  $R_i$  越小  $k$  值越大)，因此可以得到定义。

定义：在任一组可行解中都存在 1 个节点，整个网络的共同尺度因子  $k$  由这个节点决定，称这个节点为瓶颈节点。

可以预见这个节点出现在不同时间片内的次数较少，并且要求的最小平均数据传输速率较快。因此可以得到定理。

定理：对于满足式(3)的任一可行解，如果某个时间片里该组可行解的瓶颈节点没有发送，并且瓶颈节点在该时间片里发送不引起冲突，那么将该时间片加入瓶颈节点后，新解的  $k$  会更大。

证明：将整个发送时间段分为  $h$  个时间片，不妨设某 1 组可行解已经确定瓶颈节点在  $i$  个不同的时间片内发送，此时有： $k = \frac{iW}{R_i h} \log_2(1 + \beta)$ 。对于其他任一个节点  $s_j$ ，若已经确定在  $j$  个不同时间片内发送。则必有：

$$\frac{jW}{R_j h} \log_2(1 + \beta) = \frac{jW}{R_j h} \log_2(1 + \beta) = k$$

假设存在某个时间片，瓶颈节点  $s_i$  加入该时间片后不会引起任何冲突，则瓶颈节点  $s_i$  加入后得到的新的可行解有 2 种可能。

1)  $s_i$  仍然是这组新的可行解的瓶颈节点，则新可行解的共同尺度因子  $k'$  有：

$$k' = \frac{(i+1)W}{R_i h} \log_2(1 + \beta) > \frac{iW}{R_i h} \log_2(1 + \beta) = k。$$

2)  $s_i$  不再是这组新的可行解的瓶颈节点，取而代之的是  $s_j$ ，则新可行解的共同尺度因子  $k'$  有：

$$k' = \frac{jW}{R_j h} \log_2(1 + \beta) > \frac{iW}{R_i h} \log_2(1 + \beta) = k。$$

因此，新的可行解的  $k$  会更大。证毕。

定理给了我们一个通过迭代的方式寻找最佳的可行解的思路。紧接而来的问题是，对于一组可行解，当瓶颈节点找到后，如果有多个时间片可供

选择,即有多个不包含瓶颈节点的时间片可以保证加入瓶颈节点后不会引起冲突,如何选择时间片。

这里可通过寻找一种最大化概率的方法进行处理。不妨设某次操作可以有 2 个时间片进行选择,瓶颈节点加入到这 2 个时间片后会使得这 2 个时间片内所有节点的信噪比的最小值分别是  $SINR_1$  和  $SINR_2$ , 且有  $SINR_1 > SINR_2$ 。假设经过若干次定理描述的操作后,又有 1 个瓶颈节点可能加入到这 2 个时间片中。当不确定瓶颈节点的功率衰减  $g_{il}$  是多少时,显然,由于  $SINR_1 > SINR_2$ , 决定了该瓶颈节点加入到第 1 个时间片成功的可能性更大,因此在进行前一次操作时,瓶颈节点应该加入到第 1 个时间片里。根据以上分析,可以得到命题。

命题:在执行定理中的操作时,瓶颈节点应该放到加入后这个时间片内所有节点的  $SINR$  的最小值最大的一个时间片中。

基于以上讨论,基于贪心策略的跨层求解算法流程图如图 2 所示。

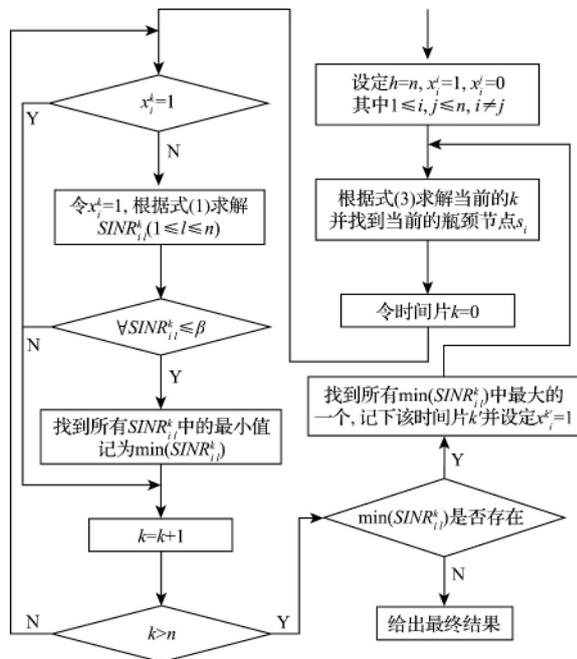


图 2 贪心策略求解算法流程

Fig. 2 Flowchart of the greedy strategy algorithm

### 4 仿真结果及分析

下面给出实验数据及仿真结果。参数设置如

下:令阈值  $\alpha = \beta = 3$ , 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。每个节点到基站的距离以及要求的最小平均数据传输速率  $R_i$  随机生成, 其中  $R_i$  在 100 Kbps ~ 1 Mbps, 距离不超过 250 m。实验程序采用 C# 语言编写, 基于 VS. NET 平台, 并通过 Lindo 工具包求解模型中的线性规划问题。

#### 4.1 一个具体网络的仿真结果

如图 3 所示的 2 个基站 20 个节点的随机网络。其中, 2 个基站的坐标分别是:  $A(250, 250)$ ,  $B(492, 333)$ 。节点的相关参数设置如表 1 所示。整个时间段被等分为 20 个时间片, 采用第 2 节描述的求解策略对该网络进行求解, 可解得  $k = 12.82$ ; 采用第 3 节描述的求解策略对该网络进行求解, 可解得  $k = 14.63$ 。

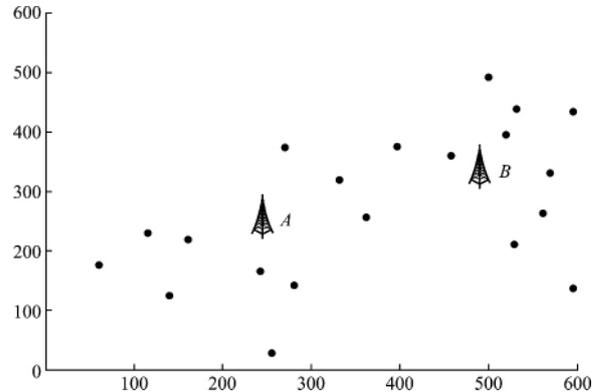


图 3 2 个基站 20 个节点的随机网络

Fig. 3 A random network with 2 base stations and 20 nodes

在算法运行时间上, 实验机器配置为速龙双核 CPU, 主频 2 300 MHz, 内存 2 G, 第 2 节描述的求解策略运行需要 140.35 s, 第 3 节描述的求解策略运行只需要 0.03 s。

#### 4.2 更多随机网络仿真结果比较分析

为了对模型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 20 ~ 50, 基站数从 2 ~ 5, 每种情况下都随机生成 20 个不同的网络, 并分别计算采用不同策略时的  $k$  值和花费时间, 取平均后列于表 2 中。

从表 2 可见, 所设计的贪心策略的跨层求解算法得出的结果无论是在运行速度上还是在优化效果上都较文献所提出的基于 SF 算法的求解策略

有很大提高。其中,运算速度在网络节点个数较多 时有成百倍的提高,  $k$  值的改进率大约为 29.10%。

表 1 随机网络的节点坐标、所属区域和最小平均数据传输速率

Table 1 Location, respective region and minimum data rate for each node in the random network

序号	坐标	区域	$R_i$ /Kbps	序号	坐标	区域	$R_i$ /Kbps	序号	坐标	区域	$R_i$ /Kbps
1	(596, 137)	B	313.93	8	(520, 394)	B	425.50	15	(529, 210)	B	273.99
2	(362, 256)	A	368.23	9	(397, 374)	B	386.39	16	(271, 373)	A	351.37
3	(332, 319)	A	751.65	10	(596, 443)	B	474.89	17	(161, 218)	A	514.64
4	(501, 491)	B	161.13	11	(61, 176)	A	274.24	18	(140, 124)	A	341.95
5	(281, 141)	A	299.89	12	(458, 359)	B	679.15	19	(256, 27)	A	313.61
6	(532, 437)	B	256.32	13	(243, 165)	A	509.68	20	(116, 229)	A	148.85
7	(562, 262)	B	758.24	14	(570, 330)	B	232.79				

表 2 更多网络计算结果比较

Table 2 The comparison of more network computing

基站 个数	节点 个数	SF 策略 $k$ 值	SF 策略 时间/s	贪心策略 $k$ 值	贪心策略 时间/s
2	20	7.27	2.06	7.17	0.02
3	20	7.54	2.16	7.93	0.02
4	20	10.27	1.83	11.02	0.01
5	20	10.38	1.36	12.04	0.02
2	30	4.06	6.98	4.72	0.03
3	30	4.27	4.84	5.88	0.03
4	30	5.52	5.47	6.41	0.02
5	30	5.95	5.38	7.14	0.01
2	40	2.54	28.02	3.19	0.03
3	40	3.18	28.66	4.26	0.02
4	40	3.48	24.09	4.78	0.03
5	40	4.34	34.94	5.80	0.03
2	50	2.17	83.11	3.03	0.05
3	50	2.33	145.01	3.45	0.02
4	50	2.69	130.73	4.12	0.04
5	50	3.31	84.61	4.85	0.04

## 5 结 论

针对基于干扰管理的单跳多基站无线网络,通过贪心策略设计一个具有多项式时间复杂度的跨层算法。仿真结果显示该算法具有很好的性能,同时运算速度较文献 [13] 提出的算法要快得多,因此更适用于实际工程应用。实际应用中,可以让算法运行于各基站上。

所建立的基于干扰管理的跨层算法适应于单跳多基站网络。目前,很多无线网络属于多跳结

构,因此如何通过贪心策略设计基于干扰管理的低复杂度跨层算法,是下一步的研究工作。

## 参考文献

- [1] 褚御芝,郑宝玉. 认知无线网络中基于最佳中继选择的协作传输策略 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 520-526.  
CHU Y ZH, ZHENG B Y. Cooperative transmission scheme based on optimal relay selection in cognitive radio network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2011, 32(3): 520-526.
- [2] DUY T N, LONG B L, THO L N, et al. Distributed interference management in two-tier CDMA femtocell networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 979-989.
- [3] 吴浩,吴怡. 提高传输效率的新型编码方法 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(2): 55-57, 70.  
WU H, WU Y. New coding method that can improve the transmission efficiency [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(2): 55-57, 70.
- [4] BOSISIO R, SPAGNOLINI U. Interference coordination Vs. interference randomization in multicell 3GPP LTE system [C]. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, NV, 2008: 824-829.
- [5] MOHSEN M, MAJID G. On the performance of successive interference cancellation in random access networks [C]. Proceedings of the 9th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, Seoul, 18-21 June, 2012: 461-469.
- [6] QING Y G, HONG L Z, QING G. Parallel interference cancellation for carrier frequency offset in OFDM assis-

- ted with recursive least squares algorithm [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2012, 17(3): 13-19.
- [7] DANIEL H, THOMAS A, DAVID W. Taking the sting out of carrier sense: Interference cancellation for wireless LANs [C]. Proceedings of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, San Francisco, CA, 2008: 339-350.
- [8] 王心霖, 许成谦. 无线网络中基于能量有效性的吞吐量跨层控制协议 [J]. 电子测量技术, 2010, 33(5): 54-57.  
WANG X L, XU CH Q. Cross-layer control protocol of the throughput energy efficiency over wireless net [J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(5): 54-57.
- [9] PELECHRINIS K, TAE S K, BROUSTIS I, et al. Topology control for effective interference cancellation in multi-user MIMO networks [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications, San Diego, CA, 2010: 1-9.
- [10] SHAO H L, XIAO D W, XING M Z. Scheduling under SINR model in ad hoc networks with successive interference cancellation [C]. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, Miami, FL, 2010: 1-5.
- [11] 魏振春, 高婧, 袁晓靖, 等. 建筑能耗无线监测系统模型及多 Sink 节点路由策略研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(6): 491-497.  
WEI ZH CH, GAO J, YUAN X J, et al. Research on building energy consumption monitoring system model and routing strategy for multi-sink node [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(6): 491-497.
- [12] SHAKKOTTAI S, RAPPAPORT T S, KARLSSON P C. Cross-layer design for wireless networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 41(10): 74-80.
- [13] 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, 2012, 30(3): 227-233.
- [14] BZARAA M S, JARVIS J, SHERALI H D. Linear programming and network flows [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2010.
- [15] THAI M T, PARDALOS P. The handbook of optimization in complex networks: theory and applications [M]. Springer Publisher, 2011.

### 作者简介

石雷, 1980 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院讲师, 博士, 主要研究方向为无线网络算法设计及优化。  
E-mail: shilei@ialab.hfut.edu.cn

**Shi Lei** was born in 1980, Ph. D. and lecturer in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His present research interests include the design and optimization of wireless network algorithm.

石怡, 1975 年出生, 美国弗吉尼亚理工大学兼职助理教授。主要研究方向为无线网络, 包括无线传感器网络、认知无线电、多输入多输出网络、协作通信等。  
E-mail: yshi@vt.edu

**Shi Yi** was born in 1975, assistant professor in the Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech.), USA. His present research interests include wireless sensor networks, cognitive radio networks, MIMO networks, and cooperative communication networks.

魏振春, 1978 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为物联网、无线传感器网络和分布式控制和嵌入式系统。  
E-mail: wzc@ialab.hfut.edu.cn

**Wei Zhenchun** was born in 1978, associate professor in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His main research interest is internet of things, wireless sensor network, DCS and embedded system.

韩江洪, 1954 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机网络与通信、计算机控制、物联网。  
E-mail: hanjh@hfut.edu.cn

**Han Janghong** was born in 1954, professor and Ph. D. tutor in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His main research interest is computer network and communication, computer network, and internet of things.