

# OFDM 移动接收中的迭代干扰消除

曹嘉麟, 陈绪斌, 陈 赟, 曾晓洋

(复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 201203)

**摘要:** 针对正交频分复用系统在高速移动接收中存在快衰落信道难以估计、子载波间干扰(ICI)过大的问题, 提出基于迭代结构的信道估计算法和 ICI 消除算法。利用信道解码器输出判决信息, 通过离散傅里叶变换实现信道估计, 并对时变信道进行线性近似, 以较低的计算复杂度消除子载波间的干扰。仿真结果表明, 该方法可以对抗 10%~15% 的归一化多普勒频移。

**关键词:** 无线通信; 正交频分复用; 信道估计; 子载波间干扰; 线性近似

## Iterative Interference Mitigation for OFDM Mobile Receiving

CAO Jia-lin, CHEN Xu-bin, CHEN Yun, ZENG Xiao-yang

(State Key Laboratory of ASIC & System, Fudan University, Shanghai 201203, China)

**【Abstract】** In order to overcome the fast fading channels which are difficult to be estimated and the considerable Inter Carrier Interference(ICI) in highly mobile Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) system, an iterative channel estimation and ICI mitigation algorithm are proposed. It uses feedback information from the channel decoder. Discrete Fourier Transform(DFT) based channel estimation is employed and linear approximation is used to mitigate the ICI with low complexity. Simulation results show that the method allows reliable reception with normalized Doppler frequency at 10%~15%.

**【Key words】** wireless communication; Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM); channel estimation; Inter Carrier Interference(ICI); linear approximation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.21.019

### 1 概述

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术将高速的串行数据流分割为多个并行的低速数据流, 然后将每路低速数据流采用相互正交的子载波调制并叠加在一起构成发送信号<sup>[1]</sup>。OFDM 技术可以有效地对抗由多径信道带来的频率选择性衰落和符号间干扰(Inter Symbol Interference, ISI)。近年来, OFDM 调制技术被众多无线通信标准采用, 受到广泛应用和研究。然而, 由于移动接收中信道的时变特性使得传统的信道估计算法性能受到影响, 并且各个子载波间的正交性遭到破坏, 进而使系统性能恶化。所以, 设计针对高速接收的 OFDM 系统是极大的挑战, 需要引入新的技术比如子载波间干扰(Inter Carrier Interference, ICI)消除才能够支持高吞吐率。

基于迭代结构的 OFDM 接收机近来受到广泛的关注, 文献[2-4]提出的迭代的 OFDM 解调技术可以极大地改善系统的性能。这类接收机利用从信道解码器输出的反馈信息以提高信道估计、均衡等模块的可靠性, 随着迭代的进

行, 反馈信息越来越可信, 可以进一步地提升系统的整体性能。但文献[2-3]提出的信道估计算法需要提前知晓信道的统计特性, 有时这类信息是不可预知的。文献[4]算法在信道时延较长的情况下性能会有较大的恶化。

本文利用信道解码器的硬判决输出, 使用基于 DFT 的算法完成有效的信道估计, 利用线性近似对信道的时变情况做估计, 并以较低的复杂度消除 ICI。

### 2 系统描述与时变信道分析

本文考虑的 OFDM 系统共含  $N$  个子载波, 一组经过编码的频域符号并均匀插入一组导频所组成的向量  $X_n$  为频域发射信号。时域发射信号为频域发射信号的快速傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT):

$$x_n(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_n(k) e^{j2\pi km} \quad (1)$$

插入长度超过信道最大延时的循环前缀以消除 ISI:

$$x_n(m) = \begin{cases} x_n(N+m) & m = -G, -G+1, \dots, -1 \\ x_n(m) & m = 0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (2)$$

在发射信号通过一个长度为  $L$ , 且含有  $N_h$  个多径分

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助重点项目(SQ2008AA01ZX1480432)

**作者简介:** 曹嘉麟(1986—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 无线通信, 集成电路设计; 陈绪斌, 硕士研究生; 陈 赟, 讲师; 曾晓洋, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2012-02-14 **修回日期:** 2012-03-13 **E-mail:** chenyun@fudan.edu.cn

量的信道后得到:

$$\tilde{h}(t, \tau) = \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{h}(l, t) \delta(t - \tau_l) \quad (3)$$

移除循环前缀后的时域接收信号向量  $y_n$  为:

$$y_n(m) = \sum_{l=0}^{L-1} h_n(l, m) x_n(m-l) + w_n(m) \quad (4)$$

其中,  $h_n(l, m)$  为第  $n$  个 OFDM 符号、第  $m$  个采样时刻、第  $l$  跟径上的信道响应;  $w_n$  为高斯白噪声向量。频域接收信号向量  $Y_n$  为  $y_n$  的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT), 整理后得:

$$Y_n(m) = H_n(m, m) X_n(m) + \sum_{d=0, d \neq m}^{N-1} H_n(m, d) X_n(d) + W_n(m) \quad (5)$$

其中, 信道响应矩阵为  $H_n$ , 其中:

$$H_n(m, m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} h_n(l, k) e^{-\frac{j2\pi lm}{N}} = \sum_{l=0}^{L-1} \hat{h}_n^{\text{ave}}(l) e^{-\frac{j2\pi lm}{N}} \quad (6)$$

$$H_n(m, d) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} h_n(l, k) e^{-\frac{j2\pi ld}{N}} e^{-\frac{j2\pi(d-m)k}{N}} \quad (7)$$

由式(5)可知, 信道频域响应为一个符号内的信道响应时域平均值的离散傅里叶变换。式(5)中的第2项是由时变信道所产生的 ICI 分量, 第3项向量  $W_n$  为  $w_n$  的 FFT 结果, 即频域的噪声项。

本文提出的基于迭代结构的 OFDM 接收机, 见图 1。

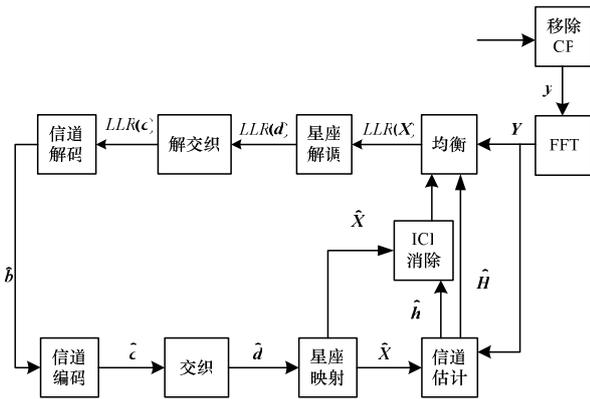


图 1 基于迭代结构的 OFDM 接收机

### 3 迭代信道估计算法

本文提出的迭代信道估计分 2 个阶段完成, 在这里先将 ICI 分量作为一项高斯白噪声来处理以简化问题。在第一阶段进行信道估计的初始化, 利用信号中的导频信息, 使用最小二乘法(Least Squares, LS)得到导频子载波上的信道频域响应。然后使用线性插值算法完成粗信道估计:

$$\hat{H}_n(m, m) = \alpha \hat{H}_n(p, p) + \beta \hat{H}_n(p + \Delta, p + \Delta) \quad (8)$$

其中,  $\beta = 1 - \alpha = (m - p) / \Delta$ ,  $\Delta$  为相邻 2 个导频子载波间的间隔。粗信道估计后依次完成均衡、星座解映射等整个 OFDM 解调及信道解码工作后, 利用信道解码器的输出信息, 进行编码、交织、星座映射等 OFDM 发射机的信号调制工作, 产生估计的发射信号为:

$$\hat{X}_n(m) = X_n(m) + \varepsilon_n(m, i) \quad (9)$$

其中,  $\hat{X}_n(m)$  为系统反馈的硬判决信息, 使用硬判决可以节省可观的存储空间;  $\varepsilon_n(m, i)$  为第  $i$  次迭代后反馈信息中的错判信息。与第 1 次迭代不同的是, 使用 LS 法则对数

据子载波上的信道响应也做估计。

$$\hat{H}_n(m, m) = \frac{Y_n(m)}{\hat{X}_n(m)} = H_n(m, m) + Y_n(m) \varepsilon_n^*(m, i) + W_n'(m) = H_n(m, m) + W_e'(m) + W_n'(m) \quad (10)$$

接下来对信道响应做滤波处理, 文献[2-4]算法在做低通滤波时采用的通带过大, 无法有效滤除带内噪声, 而本文使用基于离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的算法能够更有效地滤除噪声。基于 DFT 的信道估计算法已有很多研究, 如文献[5-6]所示, 对估计出的信道频域响应做 IFFT 变换:

$$\hat{h}_n(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{H}_n(m, m) e^{-\frac{j2\pi km}{N}} \quad (11)$$

由式(11)得到时域信道冲击响应(Channel Impulse Response, CIR), 结合式(6)可以得到:

$$\hat{h}_n(m) = \begin{cases} \hat{h}_n^{\text{ave}}(m) + w'(m) + w_e'(m) & m < L \\ w_e'(m) + w'(m) & L \leq m < L \end{cases} \quad (12)$$

传统算法如文献[5], 通过从 CIR 中寻找能量较大的分量来完成信道估计, 并抑制噪声分量, 这样算法在不提前知晓  $N_b$  的情况下性能较差。通过分析发现, 除了拥有较高的能量, 信道对应的 CIR 分量还拥有较稳定的相位信息。

$$w_e'(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Y_n(m) \delta(m, i) e^{-\frac{j2\pi km}{N}} \quad (13)$$

式(13)代表系统 2 次迭代之间估计出的 CIR 间的变化量, 其中,  $\delta(m, i) = \varepsilon_n^*(m, i) - \varepsilon_n^*(m, i-1)$  为信道解码器输出的变化。由于  $\delta(m, i)$  的随机性,  $w_e'(m)$  拥有随机变化的相位信息, 而式(12)中的其他分量拥有稳定相位信息。因此可以通过寻找在 2 次迭代间相位变化较小的分量来有效地完成信道估计并同时抑制噪声。由于  $\delta(m, i)$  的随机性, 并且信道解码器输出的变化量随着迭代的进行而逐渐变小, 因此传统的阈值设置方法并不适用于此。本文采用基于排序的方法, 从估计的 CIR 中找出  $M$  个拥有最大能量的分量为集合  $A$ , 同样找出相位变化最小的  $M$  个分量为集合  $P$ 。然后完成滤波:

$$\hat{h}_n'(m) = \begin{cases} \hat{h}_n(m) & m \in A \cap P \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

信道频域响应通过滤波后 CIR 的 FFT 获得。在这里可以将  $M$  设定为大于  $N_b$  的数, 也可以保证信道估计的性能。本文算法计算复杂度取决于 FFT 与 IFFT 运算, 其计算复杂度为  $O(M \log N)$ , 虽然相比文献[4]的算法复杂度  $O(N)$  高, 但相比文献[2]的复杂度  $O(N^2)$  有一定优势。

### 4 迭代干扰消除算法

当移动速度越来越快, 由多普勒频移所产生的 ICI 的能量越来越大, 对系统性能产生比较明显的影响, 不能当作白噪声来对待。在归一化多普勒频率  $f_d T_s$  ( $f_d$  代表多普勒频移,  $T_s$  代表符号时间)在 20% 以下, 可以使用线性近似对信道的时变情况作估计<sup>[7]</sup>。由之前信道估计算法得到的 CIR 作为信道在当前 OFDM 符号内的平均值, 这里

使用文献[7]方法,结合前后相邻2个符号的信息,得到关于信道的时变情况信息:

$$\hat{h}_{\text{slope,pre}} = \frac{\hat{h}_{n-1}(m) - \hat{h}_n(m)}{T}, \hat{h}_{\text{slope,next}} = \frac{\hat{h}_n(m) - \hat{h}_{n+1}(m)}{T} \quad (15)$$

其中,  $T$  代表传输整个 OFDM 符号的时间(包括循环前缀);  $\hat{h}_{\text{slope,pre}}$  代表前半符号信道的时变斜率;  $\hat{h}_{\text{slope,next}}$  代表后半符号信道的时变斜率。

接下来需要对 ICI 能量进行估计,先对信道的斜率做 FFT 变换,生成一对角矩阵,接着乘以一个可以提前计算的参数矩阵:

$$\begin{aligned} \hat{H}^{\text{pre}} &= \tilde{C}^{r1} \times \text{diag}\{FFT(\hat{h}_{\text{slope,pre}})\} \\ \hat{H}^{\text{next}} &= \tilde{C}^{r2} \times \text{diag}\{FFT(\hat{h}_{\text{slope,next}})\} \end{aligned} \quad (16)$$

由于 ICI 能量集中在目标子载波附近的子载波上,而相距较远的子载波上的干扰可以忽略,因此对文献[5]中的方法做出化简。在式(16)中,  $\tilde{C}^{r1}$ 、 $\tilde{C}^{r2}$  为文献[6]中  $C^{r1}$ 、 $C^{r2}$  经过简化后的形式,只含有对角线和对角线左右各 2 列上的元素最后需要消除估计出的 ICI 能量,之所以选择保留这些元素是由于文献[8]中已证明当归一化多普勒频移达 13% 时,98% 的干扰集中在相邻的 5 个子载波内。具体消除干扰的算法如下:

$$Y' = Y - (H^{\text{pre}} + H^{\text{next}})\hat{X} \quad (17)$$

这里与信道估计算法一样使用了信道解码器输出的判决信息,具体 ICI 消除算法的示意图如图 2 所示。

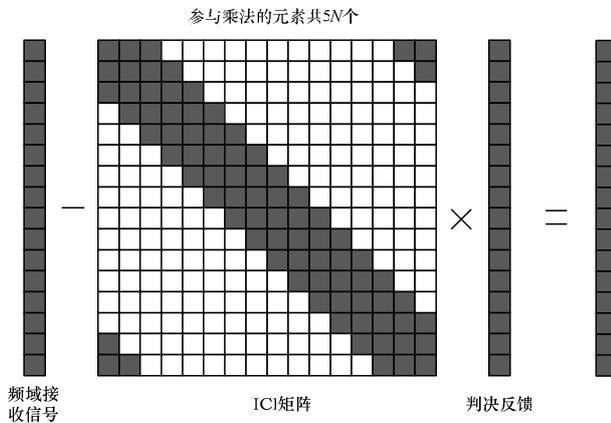


图 2 ICI 消除示意图

其中,白色的方块代表置零元素。ICI 估计算法的复杂度取决于 FFT 运算,为  $O(M \log N)$ ,而干扰消除运算因为 ICI 矩阵中只含有  $5N$  个非零元素参与矩阵乘法。相比文献[6]中涉及矩阵求逆的计算复杂度为  $O(N^3)$  的方法,大大降低了复杂度。最后,为了控制错误传播,在前 2 次迭代中由于反馈信息可信度较差,因此不使用 ICI 消除算法。

## 5 性能仿真结果及分析

仿真环境设置为:OFDM 系统有 256 个子载波,其中,12 个为导频(能量高于数据子载波)。使用 1/2 码率的卷积码,调制方式为 QPSK,循环前缀长度为 1/4。信道环境为 TU-6 多径信道,各条径拥有独立的瑞利分布,参数如表 1 所示,其中,最大迭代次数为 6。

表 1 信道参数

迭代次数	能量/dB	延时/ $\mu\text{s}$
1	-3.0	0.0
2	0.0	0.2
3	-2.0	0.5
4	-6.0	1.6
5	-8.0	2.3
6	-10.0	5.0

对基于 DFT 的迭代信道估计算法做性能评估,评判标准为频域信道响应估计值的均方误差,与文献[2,4]中迭代信道估计算法作比较。可以看到,在  $f_d T_s$  为 10% 的情况下,本文提出的算法误码率性能优于其他 2 种的迭代算法。

在移动速度进一步提高后,仅依靠信道估计算法有其不足之处,在高信噪比下性能衰减并且相对需要较多的迭代次数。在引入迭代 ICI 消除算法后,以系统误码率为评价标准。可以看到,在  $f_d T_s$  分别为 10%、15% 的条件下,当没有引入 ICI 消除算法时,系统在 4 次迭代后大多数的迭代对性能的提升作用不大。但在引入 ICI 消除算法后,仅需要 4 次迭代,并且在其中前 2 次没有使用 ICI 消除算法的情况下,就可以超越原先 6 次迭代的性能。信道估计性能(归一化多普勒频移为 10%)、ICI 消除性能(归一化多普勒频移为 10%)、ICI 消除性能(归一化多普勒频移为 15%)分别如图 3~图 5 所示。

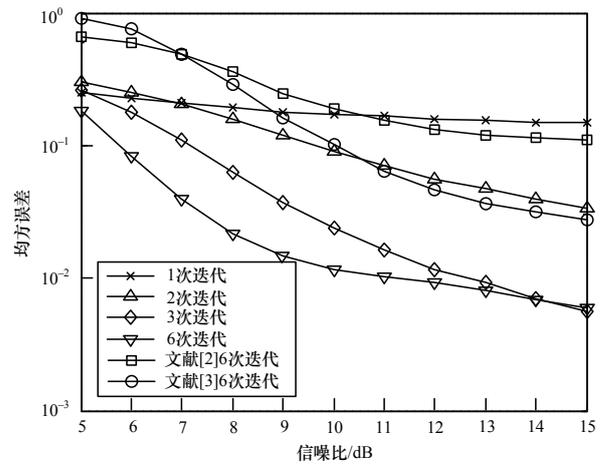


图 3 信道估计性能(归一化多普勒频移 10%)

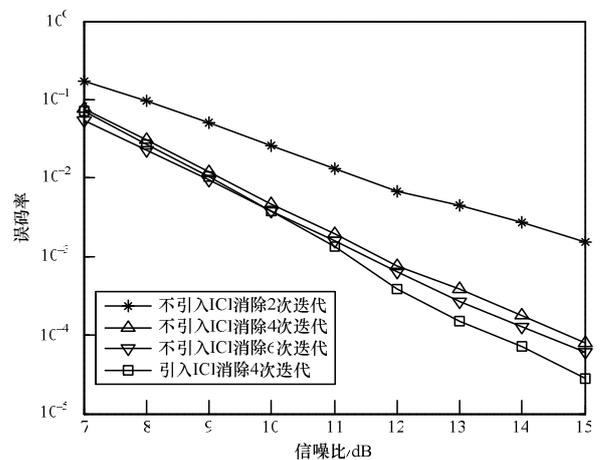


图 4 ICI 消除性能(归一化多普勒频移 10%)

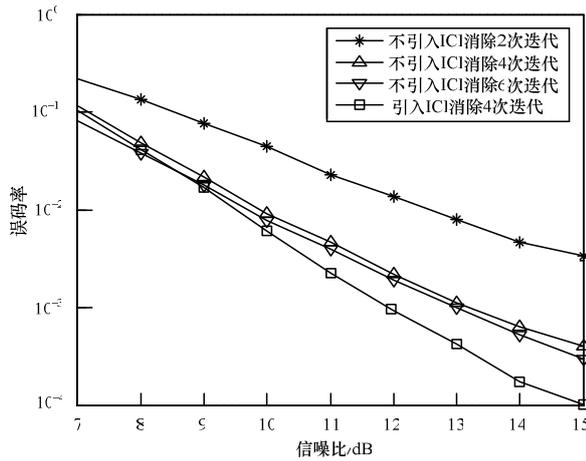


图 5 ICI 消除性能(归一化多普勒频移 15%)

### 6 结束语

为解决 OFDM 系统在高速移动接收中时变信道难以估计和 ICI 较大从而影响性能的问题, 本文提出基于迭代结构的信道估计和 ICI 消除算法, 迭代使用从信道解码器输出的判决信息, 并采用基于 DFT 的算法完成信道估计, 并对时变信道作线性近似, 在较低的计算复杂度下有效地消除子载波间干扰, 提升系统在高速移动接收情况下的整体性能。

#### 参考文献

[1] 陈 霞, 谈振辉. 基于输出多普勒扩展函数的 OFDM 载波间干扰分析[J]. 电子学报, 2004, 32(4): 665-668.

[2] Zhao Ming, Shi Zhenning, Reed M C. Iterative Turbo Channel Estimation for OFDM Systems over Rapid Dispersive Fading Channel[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2008, 7(8): 3174-3184.

[3] Temino L A M R D, Manchon C N I, Rom C, et al. Iterative Channel Estimation with Robust Wiener Filtering in LTE Downlink[C]//Proc. of IEEE Vehicle Technology Conference. Calgary, Canada: [s. n.], 2008.

[4] Vigato A, Tomasin S, Vangelista L, et al. Coded Decision Directed Demodulation for Second Generation Digital Video Broadcasting Standard[J]. IEEE Trans. on Broadcasting, 2009, 55(3): 607-614.

[5] Zheng Kan, Su Jian, Wang Wenbo. DFT-based Channel Estimation in Comb-type Pilot-aided OFDM System with Virtual Carriers[C]//Proc. of IEEE International Symposium on Personal, Indoor Mobile Radio Communication. Helsinki, Finland: [s. n.], 1997.

[6] Lu S, Al-Dhahir N. Coherent and Differential ICI Cancellation for Mobile OFDM with Application to DVB-H[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4110-4116.

[7] Mostfi Y, Cox D. ICI Mitigation for Pilot-aided OFDM Mobile Systems[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2005, 4(2): 765-774.

[8] Liu D N, Fitz M P. Iterative MAP Equalization and Decoding in Wireless Mobile Coded OFDM[J]. IEEE Trans. on Communications, 2009, 57(7): 2042-2051.

编辑 陆燕菲

(上接第 69 页)

模  $n$  呈现出稳定的线性关系, 例如, 当  $r=3, k=3$  时, 若记  $n$  个节点的网络中支配集的大小为  $D(n)$ , 则  $D(i): D(j) \approx i:j$ , 这表明 MLM 算法的运行是稳定的。

表 1 MLM 算法得到的连通  $r$ -跳  $k$ -支配集大小

$(r, k)$	$n=1\ 000$	$n=1\ 500$	$n=2\ 000$	$n=2\ 500$	$n=3\ 000$	$n=3\ 500$
(2,3)	115	170	227	280	339	395
(3,2)	61	90	123	152	181	211
(3,3)	72	107	143	179	213	252
(3,4)	84	125	167	206	252	285
(4,3)	50	76	102	128	156	181

### 4 结束语

本文提出了一种求解连通网络图中最小连通  $r$ -跳  $k$ -支配集的启发式算法, 对节点度数采用贪心策略, 逐步将能分离的小度数节点转为被支配点, 从而将度数大的节点保留在所求的支配集中。在 UDG 上分析了算法的计算复杂性, 并在该类网络模型中进行了模拟实验, 结果证明本文算法对计算连通  $r$ -跳  $k$ -支配集是有效的。

#### 参考文献

[1] Wu Jie, Lou Wei, Dai Fei. Extended Multipoint Relays to Determine Connected Dominating Sets in MANETs[J]. IEEE Trans. on Computers, 2006, 55(3): 334-347.

[2] 赵学锋, 王秀华, 杨海斌, 等. 基于学习自动机的最小连通支配集算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(10): 149-151.

[3] Butenko S, Cheng Xiuzhen, Oliveira C, et al. A New Heuristics for the Minimum Connected Dominating Set Problem on Ad Hoc Wireless Networks[C]//Proc. of Recent Developments in Cooperative Control and Optimization. New York, USA: Kluwer Academic Publisher, 2004: 61-73.

[4] Dai Fei, Wu Jie. On Constructing  $k$ -connected  $k$ -dominating Set in Wireless Ad Hoc Sensor Networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2006, 66(7): 947-958.

[5] Thai M, Zhang Ning, Tiwari R, et al. On Approximation Algorithms of  $k$ -connected  $m$ -dominating Sets in Disk Graphs[J]. Theoretical Computer Science, 2007, 385(1-3): 49-59.

[6] Yang Hong-Yen, Lin Chia-Hung, Tsai M. Distributed Algorithm for Efficient Construction and Maintenance of  $k$ -hop Dominating Sets in Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008, 7(4): 444-457.

[7] Li Deying, Liu Lin, Yang Huiqiang. Minimum Connected  $r$ -hop  $k$ -dominating Set in Wireless Networks[J]. Discrete Mathematics, Algorithms and Applications, 2009, 1(1): 45-57.

[8] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithms[M]. 2nd ed. Cambridge, USA: MIT Press, 2001.

编辑 张 帆

