两跳双中继协同 ARQ 策略研究 *

熊 莹, 唐 伦, 陈前斌
(重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘 要: 基于中继择优选择,提出一种新型协同通信系统传输方案:两跳双中继协同 ARQ 策略。该方案是传输时延和传输效率的优化折中。理论分析和仿真结果说明,在时间相关瑞利衰落信道模型下,两跳双中继协同 ARQ 策略无论是在源到中继链路质量较好时,还是源到中继链路衰落较为严重时,给系统带来的性能增益都远优于单中继协同 ARQ 策略和双中继协同系统。

关键词: 中继; 协同通信; ARQ; 误比特率; 性能比较
中图分类号: TN925 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2010)01-0311-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.01.092

Research on cooperative ARQ for two-hop and two-relay system

XIONG Ying, TANG Lun, CHEN Qian-bin
(*Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing* 400065, *China*)

Abstract: The paper proposed a new transmission scheme in cooperative communication system based on best relay selection: cooperative ARQ scheme for two-hop and two-relay. The scheme was a tradeoff between transmission delay and efficiency. The analysis of theory and simulation results show that, under time correlated Rayleigh fading channel, cooperative ARQ scheme for two-hop and two-relay can give the best performance gain compared with single relay cooperative ARQ system and two relay cooperative system, not only when the qualities of source and relay are good, but also when there is a bad fading in the link of source to relay.

Key words: relay; cooperative communication; ARQ; bit error ratio; performance comparison

下一代无线网络(4G)要求无线系统满足更好的 QoS,如频谱利用率、传输可靠性以及延时等性能指标。为此,提出了中继协同通信技术[1],它的基本思想源于小区内多用户因无线信道的广播特性协同传输有用信息到目的端,它能在空间范围内收集多个用户的分布式天线阵列,形成虚拟多天线阵列,使得单天线用户终端同样可获得更高的空间分集增益。

目前,在协同无线网络领域,已提出多种中继协同通信方式[2~4],常见的有放大前传(AAF)、译码前传(DAF)、选择中继以及空时分组编码协作(CC)。当使用多个中继时,为了满足多个协作终端在下一阶段同时传输数据,需采用特殊的调制方式和空时编码。当源到中继或者中继到目的端链路质量较差时,源与中继节点协作通信将使系统性能比起非协作时性能更差。考虑到无线链路质量的实时变化情况,将 ARQ 协议引入多跳中继系统中能大大提高系统的性能,而引起了目前工业和学术界极大的兴趣。文献[5]考虑将 ARQ 策略引入到单中继协同系统中。本文在此基础上,结合中继择优选择,根据 CRC 校验比特结果在多个中继中选择最优中继重传数据包,提出一种两跳双中继协同 ARQ 策略,仿真结果明显优于文献[5]提出的单中继协同 ARQ 策略。

1 中继选择和系统模型[6]

考虑整个无线网络由一个源 S、一个目的端 D 和多个中继 $R_1, R_2, \cdots, R_n$ 构成。源传送一帧数据时附上部分 CRC 校验比特,目的终端在接收到来自源的数据包后,根据 CRC 检测结果向目的端返回确认信息 ACK/NACK。同时,n 个中继也侦听到来源发送的数据包,根据检测结果,并基于最优路径原则[7]:

原则Ⅰ: $$h_r = \min\{|h_{sr}|^2, |h_{rd}|^2\} \tag{1}$$

原则Ⅱ: $$h_r = \frac{2}{\frac{1}{|h_{sr}|^2} + \frac{1}{|h_{rd}|^2}} = \frac{2|h_{sr}|^2|h_{rd}|^2}{|h_{sr}|^2 + |h_{rd}|^2} \tag{2}$$

在 n 个中继中选择出最优中继 $R_1 \cdots R_m$ 并确定为最优候选中继负责数据重传,并存储当前信息。其中最大重传数 $N_r^{\max}$ 为系统参数,是提前设定好的。考虑到系统的延时,文中只考虑两个后备中继的情况,即 R_1 和 R_2,系统模型如图 1 所示。

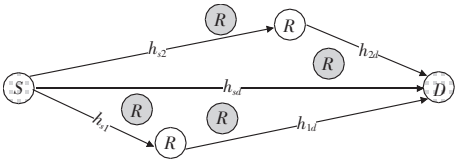

图 1 两跳双中继协同系统模型

本文研究为两跳双中继协同分集系统,它基于 TDD 准静态瑞利衰落信道,即在同一数据传输块中信号衰落系数是恒定不变的,但在不同的帧中,信道衰落系数变化是独立的。它包含三个传输阶段:

a)源发广播信息,中继和目的端都将同时接收到来自源

收稿日期: 2009-04-17; **修回日期**: 2009-05-18 **基金项目**: 国际科技合作计划项目(2008DFA12110);新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0778);重庆市自然科学基金资助项目(2007BB2390,2008BB2413);重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ070501,KJ080522)

作者简介:熊莹(1985-),女,重庆潼南人,硕士研究生,主要研究方向为协作分集技术(xiongying809@126.com);唐伦(1973-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为泛在网络和异构无线网络;陈前斌,博导,博士,主要研究方向为下一代网络、个人通信、多媒体信息处理与传输.

的信号为 y_{sr} 和 y_{sd}，分别表示为

$$y_{sr} = h_{sr}x + n_{sr} \tag{3}$$

$$y_{sd} = h_{sd}x + n_{sd} \tag{4}$$

其中：x 为源发送的数据包，$r = 1,2$，分别表示中继 R_1 和 R_2；h_{sr}、h_{sd} 分别为中继链路和直达链路的衰落系数，主要是由路径损耗、阴影衰落和频率非选择性衰落引起的，它们的包络服从瑞利分布。n_{sr}、n_{sd} 服从均值为零，方差为 N_0 的复高斯随机分布。

b）目的端接收最优中继的重传信号为 y_{1d}。

c）目的端接收次优中继的重传信号为 y_{2d}，它们分别为

$$y_{1d} = h_{1d}s_1 + n_{1d} \tag{5}$$

$$y_{2d} = h_{2d}s_2 + n_{2d} \tag{6}$$

其中：s_1、s_2 为中继的重传信号；h_{rd} 为中继到目的端链路的衰落系数，噪声 n_{rd} 满足均值为零，方差为 N_0 的复高斯随机分布。

在瑞利衰落环境中，接收信噪比 γ_{ij} 的均值 $\overline{\gamma_{ij}}$ 服从指数分布，概率密度函数为

$$f_{\gamma_{ij}}(\gamma) = (1/\overline{\gamma_{ij}})\exp(-\gamma/\overline{\gamma_{ij}}) \tag{7}$$

其中：$\{i,j\} = \{s,d\}$，$\{s,r_1\}$ $\{s,r_2\}$ $\{r_1,d\}$ $\{r_2,d\}$，系统采用 BPSK 调制方式，当信噪比为 γ_{ij} 时，相应的平均误比特率[8]为

$$\overline{\mathrm{BER}}(\overline{\gamma_{ij}}) = \int_0^\infty \mathrm{BER}(\gamma_{ij})f_{\gamma_{ij}}(\gamma)\mathrm{d}\gamma \tag{8}$$

$$\mathrm{BER}(\gamma_{ij}) = Q(\sqrt{2\gamma_{ij}}) \approx (1/2)\exp(-\gamma_{ij}) \tag{9}$$

2　两跳双中继协同系统性能分析

直达链路 $\{s,d\}$ 的平均误比特率[5]为

$$\overline{\mathrm{BER}}(\overline{\gamma_{sd}}) = \int_0^\infty \mathrm{BER}(\gamma_{sd})f_{\gamma_{sd}}(\gamma_{sd})\mathrm{d}\gamma_{sd} = 1/(2(1+\overline{\gamma_{sd}})) \tag{10}$$

中继链路 $\{s,r_1,d\}$ $\{s,r_2,d\}$ 的平均误比特率分别为 $\overline{\mathrm{BER}}(\overline{\gamma_{s1d}})$ 和 $\overline{\mathrm{BER}}(\overline{\gamma_{s2d}})$，有如下表达：

$$\overline{\mathrm{BER}}(\overline{\gamma_{s1d}}) = \int_0^\infty\int_0^\infty \mathrm{BER}(\gamma_{s1d})f_{\gamma_{s1}}(\gamma_{s1})f_{\gamma_{1d}}(\gamma_{1d})\mathrm{d}\gamma_{s1}\mathrm{d}\gamma_{1d} = \frac{1}{2(1+\overline{\gamma_{s1}})} + \frac{2}{2(1+\overline{\gamma_{1d}})} - \frac{1}{4(1+\overline{\gamma_{s1}})(1+\overline{\gamma_{1d}})} = \frac{3+2\overline{\gamma_{s1}}+2\overline{\gamma_{1d}}}{4(1+\overline{\gamma_{s1}})(1+\overline{\gamma_{1d}})} \tag{11}$$

$$\overline{\mathrm{BER}}(\overline{\gamma_{s2d}}) = \int_0^\infty\int_0^\infty \mathrm{BER}(\gamma_{s2d})f_{\gamma_{s2}}(\gamma_{s2})f_{\gamma_{2d}}(\gamma_{2d})\mathrm{d}\gamma_{s2}\mathrm{d}\gamma_{2d} = \frac{3+2\overline{\gamma_{s2}}+2\overline{\gamma_{2d}}}{4(1+\overline{\gamma_{s2}})(1+\overline{\gamma_{2d}})} \tag{12}$$

$$\mathrm{BER}(\gamma_{s1d}) = \mathrm{BER}(\gamma_{s1}) + \mathrm{BER}(\gamma_{1d}) - \mathrm{BER}(\gamma_{s1})\mathrm{BER}(\gamma_{1d})$$

$$\mathrm{BER}(\gamma_{s2d}) = \mathrm{BER}(\gamma_{s2}) + \mathrm{BER}(\gamma_{2d}) - \mathrm{BER}(\gamma_{s2})\mathrm{BER}(\gamma_{2d})$$

目的端采用最大比合并[5]（MRC）原则合并三跳链路信号式（10）～（12），整个协同中继系统的误比特率可以表示为

$$\overline{\mathrm{BER}} = \binom{5}{3}\overline{\mathrm{BER}}(\overline{\gamma_{sd}})\prod_{r=1}^{2}\overline{\mathrm{BER}}(\overline{\gamma_{srd}}) \tag{13}$$

3　两跳双中继协同 ARQ 策略分析

本系统基于择优原则只考虑选择两个最优中继作为重传后备中继，$N_r^{\max} = 2$ 为最大重传次数。同时假设原始传输和重传时间间隔远远小于信道的相干时间，即信道为时间相关的瑞利衰落信道，且反馈的 ACK/NACK 能被源和中继成功接收。

基于传输流程，文中考虑三种可能出现的情况：

a）源发出广播信息 PDU#1，中继和目的端都将收到此信息，并将其存储于临时缓存器中，当目的端成功接收数据包，并将确认信息 ACK 返回时，源和中继丢弃此包，下一时刻，传输新的数据包。

b）当源发出广播信息 PDU#2 时，若目的端返回 NACK，此时先由最优中继 R_1 重传数据包，再由次优中继 R_2 重传，并在目的端对重传多路数据进行最大比合并。

c）若中继重传次数达到预先系统给定的最大重传次数而目的端还不能成功译码 PDU#3，源丢弃此包，下一时刻传输新的数据包 PDU#4。

由于信道为时间相关瑞利衰落信道，文中只考虑一种极端情况，重传时信道状况没有发生变化，即目的端每次的接收信噪比相等，即 $\gamma_{ij} = \gamma'_{ij} = \gamma''_{ij}$。

两跳双中继协同 ARQ 系统直达链路 $\{s,d\}$ 的平均误比特率为

$$\overline{\mathrm{BER}}_{\mathrm{TR_ARQ}}(\overline{\gamma_{sd}}) = \int_0^\infty \mathrm{BER}(\gamma_{sd})^3 f_{\gamma_{sd}}(\gamma_{sd})\mathrm{d}\gamma_{sd} = \frac{1}{8(1+3\overline{\gamma_{sd}})} \tag{14}$$

两跳双中继协同 ARQ 系统中最优中继首次重传链路 $\{s,r_1,d\}$ 的平均误比特率为

$$\overline{\mathrm{BER}}_{\mathrm{TR_ARQ}}(\overline{\gamma_{s1d}}) = \int_0^\infty\int_0^\infty \mathrm{BER}_{\mathrm{TR_ARQ}}(\gamma_{s1d}) \times f_{\gamma_{s1}}(\gamma_{s1})f_{\gamma_{1d}}(\gamma_{1d})\mathrm{d}\gamma_{s1}\mathrm{d}\gamma_{1d} \tag{15}$$

两跳双中继协同 ARQ 系统二次重传时，中继链路 $\{s,r_2,d\}$ 的平均误比特率为

$$\begin{aligned}\overline{\mathrm{BER}}_{\mathrm{TR_ARQ}}(\overline{\gamma_{s2d}}) &= \int_0^\infty\int_0^\infty\int_0^\infty\int_0^\infty \mathrm{BER}(\gamma_{srd})f_{\gamma_{s1}}(\gamma_{s1}) \times \\ &f_{\gamma_{1d}}(\gamma_{1d})f_{\gamma_{s2}}(\gamma_{1d})f_{\gamma_{2d}}(\gamma_{1d})\mathrm{d}\gamma_{s1}\mathrm{d}\gamma_{1d}\mathrm{d}\gamma_{s2}\mathrm{d}\gamma_{2d} = \\ &\frac{9+6(\overline{\gamma_{s1}}+\overline{\gamma_{s2}}+\overline{\gamma_{1d}}+\overline{\gamma_{2d}})}{16(1+\overline{\gamma_{s1}})(1+\overline{\gamma_{1d}})(1+\overline{\gamma_{s2}})(1+\overline{\gamma_{1d}})} + \\ &\frac{4(\overline{\gamma_{1d}}\overline{\gamma_{2d}}+\overline{\gamma_{s2}}\overline{\gamma_{1d}}+\overline{\gamma_{s1}}\overline{\gamma_{2d}}+\overline{\gamma_{s1}}\overline{\gamma_{s2}})}{16(1+\overline{\gamma_{s1}})(1+\overline{\gamma_{1d}})(1+\overline{\gamma_{s2}})(1+\overline{\gamma_{1d}})}\end{aligned} \tag{16}$$

其中：

$$\mathrm{BER}(\gamma_{srd}) = (\mathrm{BER}(\gamma_{s1}) + \mathrm{BER}(\gamma_{1d}) - \mathrm{BER}(\gamma_{s1}) \times \mathrm{BER}(\gamma_{1d}))$$
$$(\mathrm{BER}(\gamma_{s2}) + \mathrm{BER}(\gamma_{2d}) - \mathrm{BER}(\gamma_{s2})\mathrm{BER}(\gamma_{2d}))$$

将式（14）～（16）代入到下式，即两跳双中继协同 ARQ 系统的平均误码率为

$$\overline{\mathrm{BER}}_{\mathrm{TR_ARQ}} = \binom{5}{3}\overline{\mathrm{BER}}_{\mathrm{TR_ARQ}}(\overline{\gamma_{sd}})\prod_{r=1}^{2}\overline{\mathrm{BER}}_{\mathrm{TR_ARQ}}(\overline{\gamma_{srd}})$$

目的端的中断概率[9]为链路 i 到 j 的终端概率定义为接收信噪比 γ_{ij} 低于门限值 γ_0 的概率：

$$P_o(\overline{\gamma_{ij}}) = P_o(\gamma_{ij} < \gamma_0) = \int_0^{\gamma_0} f_{\gamma_{ij}}(\gamma_{ij})\mathrm{d}\gamma_{ij} \tag{17}$$

系统中断概率为

$$P_o = P_o(\overline{\gamma_{sd}})P_o(\overline{\gamma_{s1d}})p_o(\overline{\gamma_{s2d}}) = (1-\mathrm{e}^{-\frac{\gamma_0}{\overline{\gamma_{sd}}}})\prod_{r=1}^{2}(1-\mathrm{e}^{-(\frac{\gamma_0}{\overline{\gamma_{sr}}}+\frac{\gamma_0}{\overline{\gamma_{rd}}})}) \tag{18}$$

由目的端中断概率决定的两跳双中继协同 ARQ 系统的平均误比特率为

$$\overline{\mathrm{BER}}_{P_o} = P_o\,\overline{\mathrm{BER}}_{\mathrm{TR_ARQ}} + (1-P_o)\overline{\mathrm{BER}}_{\mathrm{TR}} \tag{19}$$

4　仿真结果与分析

文章最后给出两跳中继协同系统、单中继协同 ARQ 系统和两跳双中继协同 ARQ 系统的性能仿真结果比较。其中，单中继协同 ARQ 系统的性能仿真在文献[5]已给出。假设信道为时间相关瑞利衰落信道，调制方式为 BPSK 调制。中断概率门限 γ_0 为 5 dB。

图 2 和 3 考虑源到最优中继和源到次优中继的信噪比为低信噪比即 $\overline{\gamma_{s1}} = \overline{\gamma_{s2}} = 0$ dB，分析了两种情况，即当源到目的端和中继到目的端平均信噪比相同和不同的情况。不同情况时，取值为 $\overline{\gamma_{1d}} = \overline{\gamma_{2d}} = 10$ dB（图 2）或者取值为 $\overline{\gamma_{1d}} = \overline{\gamma_{2d}} = 20$ dB（图 3）。图 2 中，当 $\overline{\gamma_{sd}} = 0$ dB 时，相同情况下，两跳中继协同系统、

单中继协同 ARQ 系统和两跳双中继协同 ARQ 系统总的平均误码率分别为 0.478 5,0.158 4,0.033 0;当不同的情况下,三个系统平均误码率分别降低为 0.201 8,0.102 8,0.022 5。

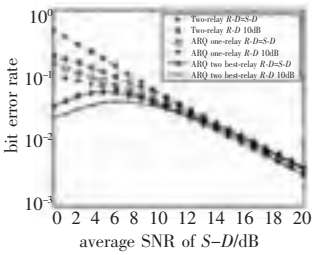

图 2　三种系统两种情况的性能比较 $\bar{\gamma}_{sr}$=0 dB

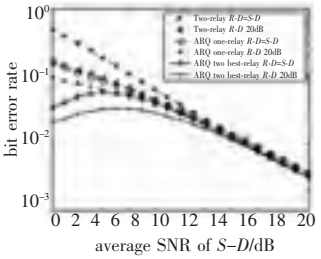

图 3　三种系统两种情况的性能比较 $\bar{\gamma}_{sr}$=0 dB

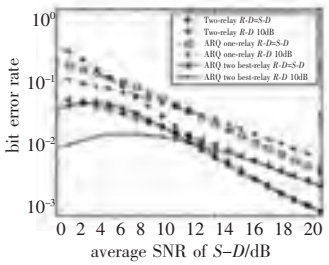

图 4　三种系统两种情况的性能比较 $\bar{\gamma}_{sr}$=10 dB

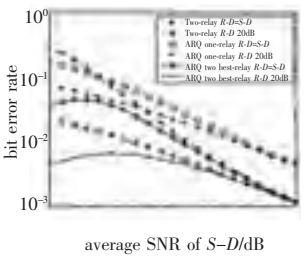

图 5　三种系统两种情况的性能比较 $\bar{\gamma}_{sr}$=10 dB

图 4 和 5 考虑源到最优中继和源到次优中继链路质量较好即分别取 $\bar{\gamma}_{s1}=\bar{\gamma}_{s2}$ 为 10 dB,同样讨论两种情况下三种系统的总的平均误比特率的比较。

5　结束语

将中继择优选择引入协同通信系统中,并结合 ARQ 重传技术,提出了两跳双中继协同 ARQ 策略。仿真对两跳双中继协同、单中继协同 ARQ 和两跳双中继协同 ARQ 三种系统进行了性能比较。仿真结果表明,当源到中继的平均信噪比越小时,ARQ 重传机制对单中继和两个最优中继系统带来的性能增益较大;但当源到中继的平均信噪比较大时,两跳双中继协同系统和两跳双中继协同 ARQ 系统获得的增益明显优于单中继协同 ARQ 系统。本文提出的基于中继择优选择的双中继协同 ARQ 策略既能最小化延时,又能最大化传输效率。

参考文献:

[1] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity-part I: system description[J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938.

[2] JEON S Y, CHO D H. Modelling and analysis of ARQ mechanisms for wireless multi-hop relay system[C]//Proc of IEEE VTC. Singapore: IEEE, 2008: 2436- 2440.

[3] PUNG Kun, LI Yong-hui, VUCETIC B. An improved hybrid ARQ scheme in cooperative wireless networks[C]//Proc of the 68th IEEE VTC. Comada: [s. n.], 2008: 1-5.

[4] ZHAO B, VALENTI M. Practical relay networks: a generalization of hybrid-ARQ[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1): 7-18.

[5] 陈吉学,王文博. 目的端控制中继协同 ARQ 策略研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3123-3126.

[6] ZHU Yi-jun, LI Ying, DUAN Zhi-ying, *et al*. Joint relay selection and ARQ in cooperative diversity wireless networks [C]//Proc of WiCOM'08. 2008: 1-3.

[7] BLETSAS A, LIPPMAN A, REED D P. A simple distributed method for relay selection in cooperative diversity wireless networks, based on reciprocity and channel measurements[C]//Proc of IEEE Vehicular Technology Conference. Stockholm: [s. n.], 2005: 1484-1488.

[8] GOLDSMITH A. Wireless communications[M]. UK: Cambridge University, 2005.

[9] 陈吉学,王文博. 两种中继协同 HARQ 协议[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 31(2): 123-127.

(上接第 294 页)$k=1$ 时增长了 118%,而改进 kCDS 算法得到的连通支配集大小相对比较稳定,在 $k=5$ 时比 $k=1$ 时增长了 21.4%。在 $k=5$ 时,kCDS 算法得到的连通支配集要比改进 kCDS 算法得到的连通支配集多 79.9%。同样的原因见对图 1 的分析。

5　结束语

本文研究了在一个无线传感器网络中构造一个容错的连通 k 支配集问题。首先提出了一个分布式算法 DACDS 来构造一个连通支配集,然后在此基础上根据构造一般容错连通支配集规则提出了 kCDS 算法,并且针对 kCDS 算法缺点提出了改进 kCDS 算法,理论分析算法 DACDS 具有较好的性能和较低的信息复杂度。仿真结果表明,改进 kCDS 要比 kCDS 算法好。

参考文献:

[1] NI S Y, TSENG Y C, CHEN Y S, *et al*. The broadcast storm problem in a mobile Ad hoc network[C]//Proc of MOBICOM. 1999: 151-162.

[2] WAN Peng-jun, ALZOUBI K M, FRIEDER O. Distributed construction of connected dominating set in wireless Ad hoc networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2004, 9(2): 141-149.

[3] LI Y S, THAI M T, WANG F, *et al*. On greedy construction of connected dominating sets in wireless networks[J]. Wiley Journal on Wireless Communications and Mobile Computing, 2005, 5(8): 927-932.

[4] WU W L, DU H W, JIA X H, *et al*. Minimum connected dominating sets and maximal independent sets in unit disk graphs[J]. Theoretical Computer Science, 2006, 352(1-3): 1-7.

[5] LI Y, ZHU S, THAI M T, *et al*. Localized construction of connected dominating set in wireless networks[C]//Proc of NSF International Workshop on Theoretical Aspects of Wireless Ad hoc, Sensor and Peer-to-Peer Networks. 2004.

[6] DAI F, WU J. On constructing k-connected k-dominating set in wireless networks[C]//Proc of IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005.

[7] WANG Feng, THAI M T, DU Ding-zhu. 2-connected virtual backbone in wireless networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1230-1237.

[8] SHANG W P, WAN P J, YAO F F, *et al*. Algorithms for minimum m-connected k-tuple dominating set problem[J]. Theoretical Computer Science, 2007, 381(1-3): 241-247.

[9] THAI M T, ZHANG N, 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.

[10] WU Y, WANG F, THAI M T, *et al*. Constructing k-connected m-dominating sets in wireless sensor networks[C]//Proc of Military Communications Conference. 2007: 29-31.

[11] BIAN Y, YU H, ZENG P. Construction of a fault tolerance connected dominating set in wireless sensor network[C]//Proc of ICMTMA. 2009: 610-614.

[12] SHANG W, YAO F, WAN P, *et al*. Algorithms for minimum m-connected k-dominating set problem[C]//Proc of COCOA 2007. 2007: 182-190.