

# 定向天线的双向单中继 AF 协同通信技术

王徐华, 柏鹏, 李明阳, 林晋福

(空军工程大学科研部, 陕西西安, 710051)

**摘要** 为了进一步提高协同通信系统中断性能, 引入了定向天线技术。在传统双向 AF 协同通信技术的基础上, 提出适用于基于定向天线的双向单中继 AF 协同通信协议, 并从理论上推导其中 2 种即 TDBC 和 OSS 的系统在全定向模式下的中断概率下界。仿真结果表明, 在高信噪比或者 2 个终端到中继的信道系数相差较大的条件下, 该下界和精确值很紧; OSS 方式中断性能优于 TDBC; 在频谱效率不高的情况下, 全定向协同通信中断性能优于传统方式。因此在通常情况下全定向模式的协同通信系统中断性能得到了提升, 在实际应用中应尽量采用 OSS 协议以充分发挥其优势。

**关键词** 双向协同; 定向天线; 中断概率

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.02.013

**中图分类号** TN915.9 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2013)02-0056-05

## Research on Bidirectional Single Relay AF Cooperative Communication Technology Based on Directional Antenna

WANG Xu-hua, BAI Peng, LI Ming-yang, LIN Jin-fu

(Scientific Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Directional antenna technique is adopted to enhance the outage performance of cooperative communication. Protocols which are suitable to bidirectional single relay AF cooperative communication based on directional antenna is proposed on the basis of the traditional Protocols and the outage probability low bound of TR-BF TDBC and OSS systems are derived theoretically. Simulation results show that the derived low bound and the exact value are very tight when SNR is high or the channel coefficients from two ends to relay vary widely. The outage performance of OSS is better than that of TDBC, and the outage performance of TR-BF AF cooperative communication is better than that of the traditional one when spectral efficiency is not very high. Usually, the outage performance of cooperative communication system with full directional mode is improved, and OSS protocol should be adopted as far as possible in practical applications in order to fully gain best of its advantages.

**Key words:** bidirectional cooperative; directional antenna; outage probability

传统的协同通信系统在源节点与目的节点的通信之间引入了中继辅助信道<sup>[1]</sup>, 获得了协作分集增

益<sup>[2-3]</sup>, 从而提高了通信链路的可靠性和稳定性。然而在实际应用中, 很多时候目的节点和源节点需要

收稿日期: 2012-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202339)

作者简介: 王徐华(1984—), 男, 浙江龙游人, 博士生, 主要从事电子系统综合化理论与技术研究。

E-mail: daleiwxh@163.com

交换信息<sup>[4]</sup>,此时传统的单向协同通信技术就无法满足其需求。因而近些年出现了许多关于双向协同通信技术的研 究<sup>[5-8]</sup>,几种新的适用于双向协同通信技术的协议陆续被提出,它们主要包括有物理层网络编码协议(Physical Layer Network Coding, PNC)<sup>[5]</sup>,基于模拟信号网络编码协议(Analog Network Coding, ANC)<sup>[6-7]</sup>以及分时广播协议(Time Division Broadcast, TDBC)<sup>[8]</sup>。这些协议能够充分利用了物理信道,提高了频谱利用率<sup>[9]</sup>。然而同时也存在着各自的问题,例如,前 2 种协议仅仅能获得一阶分集增益,在信噪比不高的条件下无法获得良好的系统性能<sup>[7]</sup>; TDBC 虽然获得了二阶分集增益<sup>[11]</sup>,却存在 2 个源节点误比特率严重不同,无法为每个通信节点的提供统一的网络服务质量的问题。Yi 等提出了基于概率的源节点选择策略(Opportunistic Source Selection, OSS)<sup>[10]</sup>,并且分析了这种协议下的系统中断概率及误比特率,从而证明其能获得更优的可靠性。定向天线可以将能量更为集中地发送到需要通信的方向上,减少对其他通信空间的干扰,从而扩大了通信范围,增加了空间复用度和信道容量<sup>[11-12]</sup>。随着信息技术的不断进步,定向天线应用越来越广泛,并且早就有了完整的基于定向天线的 Ad hoc 网络<sup>[13]</sup>。然而直到目前,鲜有关于定向天线在协同通信中的应用研究。本文将在协同通信中引入定向天线,研究基于定向天线的单节点双向 AF 协同通信系统性能。

## 1 系统模型

### 1.1 传统双向 AF 协同通信过程

图 1~图 3 分别给出了 TDBC, ANC, OSS 通信过程。一共存在 3 个节点, 2 个源节点分别为  $S_1$  和  $S_2$  及一个中继节点 R, 每个节点有一个天线, 工作于半双工模式下。 $h_0$  为  $S_1$  和  $S_2$  之间的信道系数,  $h_1$  为  $S_1$  和 R 之间的信道系数,  $h_2$  为  $S_2$  和 R 之间的信道系数。信道均为瑞利信道, 所有的信道系数服从独立高斯分布即  $h_i \sim N(0, \Omega_i), i \in \{0, 1, 2\}$ 。 $|h_i|^2$  是服从指数分布的随机变量, 其参数为  $\lambda_i$ , 即  $f(x_i) = \frac{1}{\lambda_i} e^{-\frac{x_i}{\lambda_i}}$ 。各信道噪声是加性高斯白噪声(AWGN)服从  $n_i \sim N(0, N_0)$ , 假设信道状态信息已知<sup>[14]</sup>。

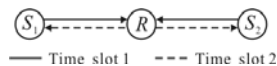


图 1 双向协同 ANC 过程

Fig. 1 Bi-directional cooperative ANC

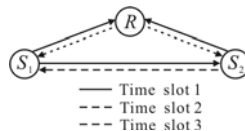


图 2 双向协同 TDBC 过程

Fig. 2 Bi-directional cooperative TDBC

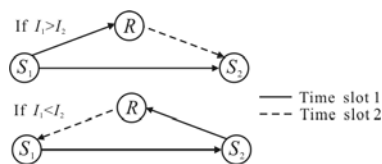


图 3 双向协同 OSS 过程

Fig. 3 Bi-directional cooperative OSS

### 1.2 基于定向天线的双向 AF 协同通信过程

根据文献<sup>[13]</sup>,可将定向天线通信分为全向发送-全向接收(N-BF),定向发送-全向接收(T-BF),全向发送-定向接收(R-BF)以及定向发送-定向接收(TR-BF)4 种模式。引入定向天线后,由于天线波束指向性的原因,不能实现信号广播,因而降低了频谱利用率。假设各节点天线的工作模式是一致的,如果天线模式在 N-BF 模式下,即为传统方式,网络没有定向增益。在 T-BF 模式下,仅仅利用了一端的定向增益,而且发送节点没有广播特性,即该模式下网络未能充分利用定向天线的增益,同时降低了频谱利用率。在 R-BF 模式下,网络虽然也未能充分利用定向天线的增益,但没有降低了频谱利用率。TR-BF 模式下,网络充分利用了定向天线的增益,但降低了频谱利用率。综上分析,为了能更好地利用定向增益,R-BF 或 TR-BF 应作合理地选择,此时本文主要分析能充分利用定向天线的增益的 TR-BF 模式下的 TDBC 与 OSS 协议。如果各节点处于定向工作条件下,那么获得的增益分别为  $G_i, i \in \{1, 2, 3\}$ ,接收和发送增益一致;否则增益为 1。信道参数如上节描述。分配给源节点和中继节点的功率分别为  $P_1, P_2$ 。

## 2 中断概率

### 2.1 TDBC 方式下的 TR-BF 放大转发协议

从图 4 可知该情况下,信息的交换需要 6 个时隙,分别用  $R_1$  和  $R_2$  表示  $S_1$  和  $S_2$  的信息速率,那么满足不发生中断事件的条件为:

$$R_1 < I_{1\_TR}^{\text{TDBC}} \text{ 并且 } R_2 < I_{2\_TR}^{\text{TDBC}} \quad (1)$$

TR-TDBC 情况下的 2 条链路容量为:

$$I_{1\_TR}^{\text{TDBC}} = \frac{1}{6} \log(1 + \text{SNR} |h_0|^2 G_1 G_2 + f(\text{SNR} |h_1|^2 G_1 G_3, \lambda \text{SNR} |h_2|^2 G_2 G_3)) \quad (2)$$

$$I_{2\_TR}^{\text{TDBC}} = \frac{1}{6} \log(1 + \text{SNR} |h_0|^2 G_1 G_2 + f(\text{SNR} |h_2|^2 G_1 G_3, \lambda \text{SNR} |h_1|^2 G_2 G_3)) \quad (3)$$

式中  $\text{SNR} = \frac{P_1}{N_0}$ ;  $f(x, y) = \frac{xy}{x+y+1}$ ;  $\lambda = P_2/P_1$ , 令

$\text{SNR} |h_0|^2 G_1 G_2 = X_0$ ,  $\text{SNR} |h_1|^2 G_1 G_3 = X_1$ ,  $\text{SNR} |h_2|^2 G_2 G_3 = X_2$ , 式中  $X_i, i \in \{0, 1, 2\}$  服从指数分布。其

参数为:  $\frac{1}{\text{SNR} \lambda_0^2 G_1 G_2}$ ,  $\frac{1}{\text{SNR} \lambda_1^2 G_1 G_3}$ ,  $\frac{1}{\text{SNR} \lambda_2^2 G_2 G_3}$ , 简化为  $L_0, L_1, L_2$ 。则:

$$I_{1\_TR}^{\text{TDBC}} = \frac{1}{6} \log(1 + X_0 + f(X_1, \lambda X_2)) \quad (4)$$

$$I_{2\_TR}^{\text{TDBC}} = \frac{1}{6} \log(1 + X_0 + f(X_2, \lambda X_1)) \quad (5)$$

当  $P_2 < P_1$ , 则:

$$P_{\text{out}}^{\text{TDBC}}(R) = \Pr((X_0 + \lambda X_2) < 2^{3R} - 1, X_1 > X_2) + \Pr((X_0 + \lambda X_1) < 2^{3R} - 1, X_1 < X_2) \quad (10)$$

可得到闭式表达如下:

$$P_{\text{out}}^{\text{TDBC}}(R) = -(L_1 + L_2) \left[ \frac{e^{L_0}}{(e^{2^{3R} L_0} (L_1 + L_2 - \lambda L_0))} - \frac{e^{L_0} e^{L_0 \lambda (2^{3R} - 1)}}{e^{(L_1 + L_2)(2^{3R} - 1) + 2^{3R} \lambda L_0} (L_1 + L_2 - \lambda L_0)} \right] - \left[ \frac{1}{e^{(L_1 + L_2)(2^{3R} - 1)} - 1} \right] \quad (11)$$

当  $P_2 > P_1$ , 则:

$$P_{\text{out}}^{\text{TDBC}}(R) = \Pr((X_0 + X_1) < 2^{3R} - 1, X_1 < X_2) + \Pr((X_0 + X_2) < 2^{3R} - 1, X_1 > X_2) \quad (12)$$

可得到闭式表达如下:

$$P_{\text{out}}^{\text{TDBC}}(R) = -(L_1 + L_2) \left[ \frac{e^{L_0}}{(e^{2^{3R} L_0} (L_1 + L_2 - L_0))} - \frac{e^{L_0} e^{L_0 \lambda (2^{3R} - 1)}}{e^{(L_1 + L_2)(2^{3R} - 1) + 2^{3R} \lambda L_0} (L_1 + L_2 - L_0)} \right] - \left[ \frac{1}{e^{(L_1 + L_2)(2^{3R} - 1)} - 1} \right] \quad (13)$$

## 2.2 OSS 方式下的 TR-BF 放大转发协议

在该协议下, 互信息为:

$$I_{1\_TR}^{\text{OSS}} = \frac{1}{3} \log(1 + \gamma_1), I_{2\_TR}^{\text{OSS}} = \frac{1}{3} \log(1 + \gamma_2) \quad (14)$$

因此:

$$I^{\text{OSS}} = \frac{1}{3} \log(1 + \max(\gamma_1, \gamma_2)) \quad (15)$$

那么:

$$P_{\text{out}}^{\text{OSS}}(R) = \Pr(I_{1\_TR}^{\text{OSS}} < R, \gamma_1 > \gamma_2) + \Pr(I_{2\_TR}^{\text{OSS}} < R, \gamma_1 < \gamma_2) = \Pr(I^{\text{OSS}} < R) \quad (16)$$

$$P_{\text{out}}^{\text{OSS}}(R) = \Pr\left[\frac{1}{3} \log(1 + \text{SNR} |h_0|^2 G_1 G_2 + \max(\min(\text{SNR} |h_1|^2 G_1 G_3, \lambda \text{SNR} |h_2|^2 G_2 G_3), \min(\text{SNR} |h_2|^2 G_2 G_3, \lambda \text{SNR} |h_1|^2 G_1 G_3))) < R\right] \quad (17)$$

同样设  $\text{SNR} |h_0|^2 G_1 G_2 = X_0$ ,  $\text{SNR} |h_1|^2 G_1 G_3 =$

那么中断概率可以表示为:

$$P_{\text{out}}^{\text{TDBC}}(R) = \Pr(I_{1\_TR}^{\text{TDBC}} < R_1 \cup I_{2\_TR}^{\text{TDBC}} < R_2) \quad (6)$$

其中  $R = R_1 + R_2$ 。

因为 2 个源节点在网络中处于平等地位, 所以

可以假设  $R_1 = R_2 = \frac{1}{2} R^{[15]}$ 。那么:

$$P_{\text{out}}^{\text{TDBC}}(R) = \Pr\left[I_{1\_TR}^{\text{TDBC}} < \frac{1}{2} R \cup I_{2\_TR}^{\text{TDBC}} < \frac{1}{2} R\right] \quad (7)$$

因此:

$$P_{\text{out}}^{\text{TDBC}}(R) = \Pr\left[\min(I_{1\_TR}^{\text{TDBC}}, I_{2\_TR}^{\text{TDBC}}) < \frac{1}{2} R\right] \quad (8)$$

由于精确的中断概率表达式非常难获得, 因此本文将试图利用以下的不等式<sup>[16]</sup>得到中断概率的下限:

$$\frac{xy}{x+y+1} < \frac{xy}{x+y} < \min(x, y) \quad (9)$$

$X_1, \text{SNR} |h_2|^2 G_2 G_3 = X_2$ , 并将参数简化为  $L_0, L_1, L_2$ 。

当  $P_1 > P_2$ :

$$P_{\text{out}}^{\text{OSS}}(R) = \Pr(X_1 + X_0 < 2^{3R} - 1, X_1 < \lambda X_2) + \Pr(X_2 + X_0 < 2^{3R} - 1, X_2 < \lambda X_1) + \Pr(\lambda X_1 + X_0 < 2^{3R} - 1, X_2 > \lambda X_1 > \lambda X_2) + \Pr(\lambda X_2 + X_0 < 2^{3R} - 1, X_1 > \lambda X_2 > \lambda X_1) \quad (18)$$

上式中的各累加项可以表达成如下:

$$\Pr(X_1 + X_0 < 2^{3R} - 1, X_1 < \lambda X_2) = A(L_1, \lambda L_2, L_0)$$

$$\Pr(\lambda X_1 + X_0 < 2^{3R} - 1, X_2 > \lambda X_1 > \lambda X_2) =$$

$$B(L_1, L_2, L_0, \lambda)$$

$$\Pr(X_2 + X_0 < 2^{3R} - 1, X_2 < \lambda X_1) = A(L_2, \lambda L_1, L_0)$$

$$\Pr(\lambda X_2 + X_0 < 2^{3R} - 1, X_1 > \lambda X_2 > \lambda X_1) =$$

$$B(L_2, L_1, L_0, \lambda)$$

同理, 当  $P_1 < P_2$ , 则:

$$P_{\text{out}}^{\text{OSS}}(R) = A\left[L_1, \frac{L_2}{\lambda}, L_0\right] + A\left[L_2, \frac{L_1}{\lambda}, L_0\right] + B\left[L_1, L_2, L_0, \frac{1}{\lambda}\right] + B\left[L_2, L_1, L_0, \frac{1}{\lambda}\right] \quad (19)$$

### 3 数值仿真与分析

假设 2 个终端节点以及一个中继节点在同一直线上<sup>[7-8,17]</sup>。归一化 2 个终端节点的距离,并用  $D$  表征源节点  $S_1$  到中继节点  $R$  的距离,并设  $|h_0|^2 = 1$ ,  $|h_1|^2 = D^4$ ,  $|h_2|^2 = (1 - D)^4$ <sup>[18]</sup>。  $E_{\text{tot}} = E_r + E_s$ ,  $N_0 = 1$ 。

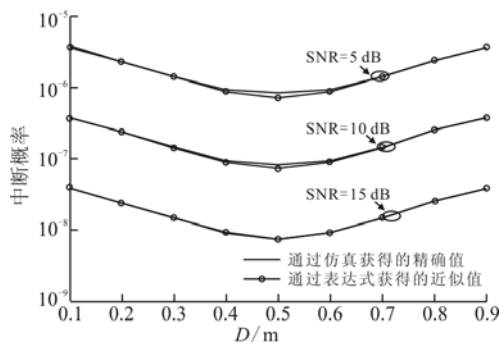


图 4 TR-BF TDBC 方式的 outage 概率与  $D$  的关系

Fig. 4 Outage probability of TR-BF TDBC versus  $D$

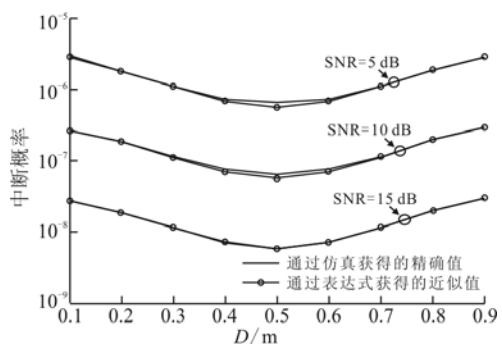


图 5 TR-BF OSS 方式的 outage 概率与  $D$  的关系

Fig. 5 Outage probability of TR-BF OSS versus to  $D$

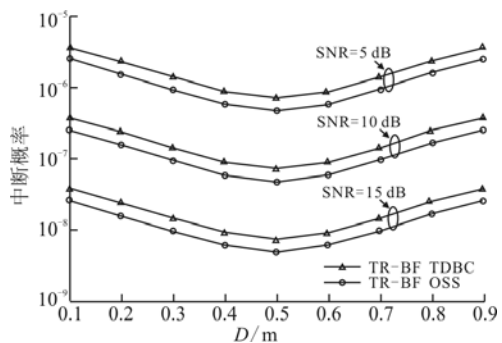


图 6 TR-BF OSS 及 TDBC 方式的 outage 概率

Fig. 6 Outage probability of TR-BF OSS and TDBC

图 4、5 和 6 中,设  $R=1$  bps/Hz,  $2E_r = E_s$ 。将本文所得到的 outage 概率下界与精确的 outage 概率进行比较。从图 4 及图 5 可以看出随着信噪比的增加,精确的 outage 概率值无限逼近本文所获得的 outage 概率下界,在信噪比为 15 dB 时,精确值和下界几乎重合。同时可以看出,在  $D$  远离 0.5 m 时,不管信噪比如何,下界和精确值都非常紧,这是由于此时  $x, y$

差别较大,  $\min(x, y)$  和  $\frac{xy}{x+y+1}$  较紧所致。因此,大信噪比条件下,可以用本文所得的 outage 概率下界去代替精确值,即便在信噪比不是很好的情况下,只要  $|h_1|^2$  和  $|h_2|^2$  区别较大,从图 4 和图 5 可知在  $D \in (0, 0.35) \cup (0.65, 1)$ , 此替代依然很精确,从而简化 outage 概率计算与分析。从图 6 可以看出,TR-BF OSS outage 概率优于 TR-BF TDBC 方式。

图 7 中,设  $R=1$  bps/Hz,  $2E_r = E_s$ 。用本文所得到的 outage 概率下界代替精确的 outage 概率,将 TR-BF 方式与传统方式进行比较。可以看出,TR-BF 方式与传统方式的 outage 概率随信噪比的变化速率一致,这说明 TR-BF 方式与传统方式一样均获得了 2 阶的满分集增益。但是由于定向增益的引入,TR-BF outage 性能明显优于传统方式。

图 8 给出了 SNR=10 dB,  $2E_r = E_s$  情况下,TR-BF 与传统方式的 outage 概率随  $R$  变化曲线图。可以看出在  $R$  较小时,传统方式 outage 性能明显不如 TR-BF 方式,但是随着  $R$  的增加,两者逐渐接近,这说明 TR-BF 方式的频谱利用效率不如传统方式。

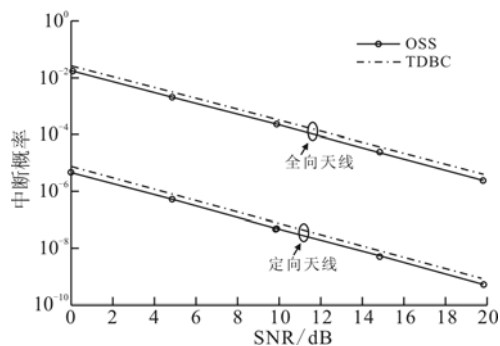


图 7 outage 概率与信噪比的关系

Fig. 7 The outage probability versus to SNR

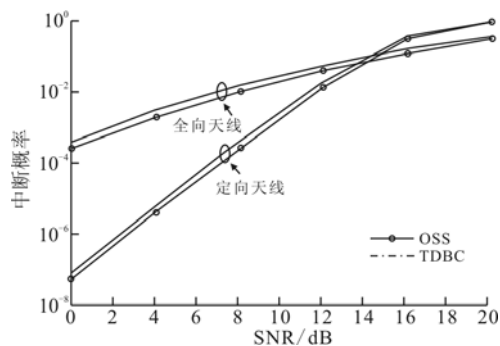


图 8 outage 概率与  $R$  的关系

Fig. 8 The outage probability versus to  $R$

### 4 结语

本文对基于定向天线双向单中继 AF 协同通信系统进行了研究,推导出了定向 OSS 以及 TDBC

方式的协同通信系统中断概率下界,在高信噪比或者2个终端到中继的信道系数相差较大的条件下,该下界和精确值很紧,因此可以用所得下界代替精确值进行中断概率的分析;在任何情况下OSS方式中断性能都优于TDBC方式;在频谱效率不高的情况下,全定向协同通信中断性能优于传统方式。该文着重研究的是TR-BF模式下的协同通信协议,但从图4可以看在R-BF模式下,系统虽未能充分利用定向增益,却有较高频谱利用率,具体的性能究竟如何,是需要进一步研究的问题。

#### 参考文献(References):

- [1] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. *IEEE transactions on information theory*, 2002, 50(12): 3062-3080.
- [2] Sendonaris A, Elza Erkip M, Aazhang B. User Cooperation diversity - part I: system description [J]. *IEEE transactions on communications*, 2003, 51(11): 1927-1948.
- [3] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity - part II: implementation aspects and performance analysis[J]. *IEEE transactions on communications*, 2003, 51(11): 1927-1948.
- [4] Kim S, Mitran P, Tarokh V. Achievable rate region for bidirectional relaying[EB/OL]. *IEEE trans inf theory*, submitted 2008. (2008-11-30)[2012-11-23]. <http://arxiv.org/PScache/arxiv/pdf/0808/0808.0954v1.pdf>.
- [5] Zhang S, Liew S C, Lam P. Physical layer network coding[C]//*Proceedings of the 12th annual international conference on mobile computing and networking*. New York: ACM press, 2006: 358-365.
- [6] Katti S, Gollakota S, Katabi D. Embracing wireless interference: analog network coding[R]. *Computer science and artificial intelligence laboratory technical report*, 2007.
- [7] Yi Z, Kim I M. Finite-SNR diversity-multiplexing tradeoff and optimum power allocation in bidirectional cooperative networks [EB/OL]. *IEEE trans inform theory*, submitted for publication, 2008. [2012-11-23] <http://arxiv.org/abs/0810.2746>.
- [8] Kim S J, Mitra P, Tarokh V. Performance bounds for bidirectional coded cooperative protocols [J]. *IEEE trans inf theory*, 2008, 54(11): 5235-5241.
- [9] Kim S J, Devroye N, Mitran P, et al. Comparison of bi-directional relaying protocols[C]//*Sarnoff symposium*. Princeton: IEEE press, 2008: 1-5.
- [10] Yi Z, Kim T. An opportunistic-based protocol for bidirectional cooperative networks[J]. *IEEE transactions on wireless communication*, 2009, 8(9): 4836-4846.
- [11] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks[J]. *IEEE transactions on information theory*, 2000, 46(2): 388-404.
- [12] Choudhury R R, Yang X, Ramanathan R, et al. Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks [C]//*The 8th annual international conference on mobile computing and networking*. Atlanta, Georgia: [s. n.], 2002: 59-70.
- [13] Ramanathan R, Redi J, Santivanez C, et al. Ad hoc networking with directional antennas: a complete system solution[J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2005, 23(3): 496-506.
- [14] Boris Rankov. Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels[J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2001, 25(2): 379-389.
- [15] Zhang S, Liew S, Lam P. Coded bi-directional relaying in combat scenarios[C]//*IEEE MILCOM 2007*. Orlando: IEEE press, 2007: 1-7.
- [16] Anghel P A, Kaveh M. Exact symbol error probability of cooperative network in a rayleigh-fading environment[J]. *IEEE trans inform wireless commun*, 2004(9): 1416-1421.
- [17] Liu P, Kim I M. Performance analysis of bidirectional communication protocols based on decode-and-forward relaying[J]. *IEEE transactions on communications*, 2010, 58(9): 2683-2696.
- [18] Ju M C, Kim I M. Joint relay selection and opportunistic source selection in bidirectional cooperative diversity networks[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2010, 59(6): 2885-2897.

(编辑:徐楠楠)