

乘积转发型双向中继网络性能分析及功率控制研究

桑 燃 徐大专 许生凯 邓大椿

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 211106)

摘 要: 在高斯信道下, 乘积转发(Product-and-forward, PF)双向中继网络可以提供比放大转发(Amplify-and-forward, AF)双向中继网络更低的误符号率(Symbol-error rate, SER)。为了研究 PF 中继网络在瑞利衰落信道下的性能, 推导出了 PF 中继网络的 SER 性能渐进表达式, 且理论分析显示 PF 中继网络比 AF 中继网络拥有更好的 SER 性能。仿真结果和理论分析吻合, 充分验证了该表达式的合理性与 PF 中继网络的优越性。为了进一步提高 PF 中继网络的 SER 性能, 以发射总功率为约束条件, 提出了最小化 SER 的功率控制算法。仿真结果表明所提算法可以显著提高系统 SER 性能。

关键词: 双向中继; 乘积转发; 误符号率; 功率控制

中图分类号: TP929.5 **文献标志码:** A

Performance Analysis and Power Allocation for Two-Way Product-and-Forward Relay Networks

Sang Ran, Xu Dazhuan, Xu Shengkai, Deng Dachun

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: Two-way product-and-forward (PF) relay networks can provide lower asymptotic symbol-error rate (SER) than amplify-and-forward (AF) relay networks. In order to study the performance of PF relay networks over Rayleigh fading channels, the asymptotic SER expression of the PF relay networks is derived and analytical results show that PF relay networks have better SER performance than AF relay networks. Experimental results agree well with the analytical results. In order to enhance the SER performance of PF relay networks, a power allocation algorithm to minimize SER under total transmit power constraint is proposed. Simulations show that proposed algorithm can significantly enhance the SER performance.

Key words: two-way relay; product-and-forward; symbol-error rate (SER); power allocation

引 言

近年来, 协作中继技术由于可以克服无线信道下信号衰落问题而成为无线通信研究方向的热点^[1]。协作中继技术通过中继扩大信号覆盖范围, 提高分集增益, 从而提高系统的吞吐量。中继网络可以分为单向中继网络和双向中继网络两大类。在双向中继网络中, 两个源节点通过中继交换信息, 较之单向中

继,前者具有更高的传输效率和系统吞吐量^[2]。目前协作中继转发策略^[3]主要有放大转发(Amplify-and-forward, AF)、解码转发(Decode-and-forward, DF)等,其中 AF 具有低复杂度的特性,是十分有效的转发方案,得到了较多的关注和研究。

在已有文献中,文献[4]分析了 AF 双向中继网络的中断概率,并根据中断概率提出了 AF/DF 自适应选择的协作策略。合理地分配中继网络中各节点的发射功率可以较大地提升系统性能,因此基于 AF 双向中继网络的功率控制算法得到了大量的研究。文献[5]分析了一种采用机会中继方案的双向中继网络的中断概率性能。文献[6]以最大化瞬时接收信噪比为目标,采用信噪比平衡技术得到功率分配解。文献[7]提出了最大化和速率的功率控制算法,并采用拉格朗日乘法优化目标函数得到功率分配值。文献[8]提出了在 Nakagami- m 衰落信道下基于 AF 双向中继模型的功率控制算法。文献[9]推导了 AF 双向中继网络的误符号率(Symbol-error rate, SER)表达式,并提出最小化 AF 双向中继网络的 SER 功率控制算法。文献[10]提出了一种新型双向中继网络,称之为乘积转发(Product-and-forward, PF)中继网络,在该中继网络中,中继节点对来自源节点的信号做乘积处理,然后将乘积结果转发至源节点。文献[10]假定在 AF 和 PF 中继网络中,两个源节点之间的信息交换需要 3 个时隙,且不存在直接路径。分析表明,PF 中继网络可以提供更好的误码率性能。

在文献[10]分析高斯信道下 PF 中继网络性能的基础上,本文分析了中继网络在衰落信道下的性能,推导了在瑞利衰落信道下该中继网络的 SER 渐进性能表达式,仿真结果和理论分析吻合表明该表达式准确描述了系统的特性。理论和仿真结果进一步表明,相比于 AF 中继网络,PF 中继网络拥有更好的 SER 性能,验证了 PF 中继网络性能的优越性。因此可以在衰落信道下对 PF 中继网络展开相关的工作。由上文描述可知,功率控制算法可以提升 AF 中继网络性能。为了进一步提高 PF 中继网络的 SER 性能,本文在总发射功率受限的条件下,以最小化 PF 中继网络平均 SER 为目标,提出了功率控制算法。仿真结果表明该算法可以显著地提高 PF 中继网络的 SER 性能。

1 系统模型

双向中继网络模型包含 2 个源节点 A, B 和 1 个中继节点 R,如图 1 所示。为了简化分析,本文假定 AF 和 PF 中继网络完成 1 次完整的信息交换均需要 3 个时隙,且两源节点之间不存在直传路径。 h_A 和 h_B 分别表示源节点 A, B 到中继节点 R 的信道系数,它们相互独立且服从均值为 0、方差为 σ_A^2 , σ_B^2 的复高斯分布。此外,本文假设在一帧数据的时间内信道衰落系数恒定不变,并且系统具有完美的信道估计。

在第 1 时隙,源节点 A 以发射功率 p_A 向中继节点发送信息;同样,在第 2 时隙,源节点 B 以发射功率为 p_B 向中继节点发送信息。两时隙中继节点的接收信号可分别表示为

$$\begin{cases} r_A = \sqrt{p_A} h_A x_A + n_A \\ r_B = \sqrt{p_B} h_B x_B + n_B \end{cases} \quad (1)$$

式中 n_A 和 n_B 为加性高斯白噪声,其均值为 0,方差为 σ^2 。

在第 3 时隙,中继节点 R 首先将前两个时隙的接收信号做乘积处理,结果为

$$y_r = r_A r_B = \sqrt{p_A p_B} h_A h_B x_A x_B + \sqrt{p_A} h_A x_A n_B + \sqrt{p_B} h_B x_B n_A + n_A n_B \quad (2)$$

然后将乘积结果放大并转发至源节点 A, B。令 x_r 为中继节点的待发射信号,则 x_r 可表示为 $x_r = \beta y_r$,其中 β 为放大因子,其大小为

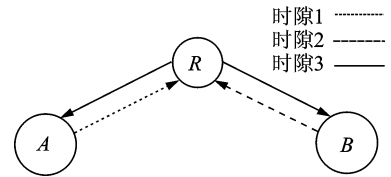


图 1 双向中继网络

Fig. 1 Two-way relay network

$$\beta = \sqrt{\frac{p_r}{p_A p_B |h_A h_B|^2 + p_A |h_A|^2 \sigma^2 + p_B |h_B|^2 \sigma^2 + \sigma^4}} \quad (3)$$

式中 p_r 表示中继发射功率。

假定信道互惠, 源节点 A, B 的接收信号可分别表示为

$$y_A = h_A x_r + n_a =$$

$$\beta \sqrt{p_A p_B} h_A h_A h_B x_A x_B + \beta \sqrt{p_A} h_A h_A x_A n_B + \beta \sqrt{p_B} h_A h_B x_B n_A + \beta h_A n_A n_B + n_a \quad (4)$$

$$y_B = h_B x_r + n_b =$$

$$\beta \sqrt{p_A p_B} h_A h_A h_B x_A x_B + \beta \sqrt{p_A} h_A h_A x_A n_B + \beta \sqrt{p_B} h_A h_B x_B n_A + \beta h_B n_A n_B + n_b \quad (5)$$

式中 n_a 和 n_b 为加性高斯白噪声, 其均值为 0, 方差为 σ^2 。 A, B 节点已知自己的发射信息, 因此可对接收信号进行完全自干扰消除^[10], 则 A, B 节点的接收信号可简化为

$$\begin{cases} \hat{y}_A = y_A x_A^* = \beta \sqrt{p_A p_B} h_A h_A h_B x_B + \beta \sqrt{p_A} h_A h_A n_B + \beta \sqrt{p_B} h_A h_B x_B x_A^* n_A + \beta h_A x_A^* n_A n_B + x_A^* n_a \\ \hat{y}_B = y_B x_B^* = \beta \sqrt{p_A p_B} h_B h_A h_B x_A + \beta \sqrt{p_A} h_B h_A x_A x_B^* n_B + \beta \sqrt{p_B} h_B h_B n_A + \beta h_B x_B^* n_A n_B + x_B^* n_b \end{cases} \quad (6)$$

式中 $(\cdot)^*$ 指共轭运算。从式(6)可知, A, B 节点的瞬时接收信噪比分别为

$$\text{SNR}_A = \frac{p_A p_B p_r |h_A h_A h_B|^2}{((p_B p_r + p_A p_B) |h_A h_B|^2 + p_A p_r |h_A|^4 + (p_r + p_A) |h_A|^2 + p_B |h_B|^2 + 1) \sigma^2} \quad (7)$$

$$\text{SNR}_B = \frac{p_A p_B p_r |h_B h_A h_B|^2}{((p_A p_r + p_A p_B) |h_A h_B|^2 + p_B p_r |h_B|^4 + (p_r + p_B) |h_B|^2 + p_A |h_A|^2 + 1) \sigma^2} \quad (8)$$

2 误码率性能分析

本节主要分析 PF 中继网络 SER 性能, 并给出高信噪比情况下 SER 性能渐近表达式。由接收信噪比表达式(7,8)可知, 准确求解 SER 非常困难。为了简化分析和计算, 首先对接收信噪比做合理的近似处理, 然后根据近似结果推导 PF 中继网络 SER 性能渐近表达式。

在高信噪比情况下, 接收信噪比式(7,8)可分别渐进近似为

$$\text{SNR}_A \approx \frac{p_A p_B p_r |h_A h_A h_B|^2}{((p_B p_r + p_A p_B) |h_A h_B|^2 + p_A p_r |h_A|^4) \sigma^2} = \frac{p_A p_B p_r |h_A h_B|^2}{((p_B p_r + p_A p_B) |h_B|^2 + p_A p_r |h_A|^2) \sigma^2} \quad (9)$$

$$\text{SNR}_B \approx \frac{p_A p_B p_r |h_B h_A h_B|^2}{((p_A p_r + p_A p_B) |h_A h_B|^2 + p_B p_r |h_B|^4) \sigma^2} = \frac{p_A p_B p_r |h_A h_B|^2}{((p_A p_r + p_A p_B) |h_A|^2 + p_B p_r |h_B|^2) \sigma^2} \quad (10)$$

在 M-PSK 调制下, 由上面的近似结果可得源节点 A 的瞬时 SER^[11] 为

$$P_{e,A,\text{psk}}^{h_A, h_B} \approx \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{M-1}{2M}} \exp\left(-\frac{q_{\text{psk}} \text{SNR}_A}{\sin^2 \varphi}\right) d\varphi \quad (11)$$

式中 $q_{\text{psk}} = \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)$ 。通过求 $P_{e,A,\text{psk}}^{h_A, h_B}$ 的期望, 可得源节点 A 的 SER 为

$$P_{e,A,\text{psk}} \approx \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{M-1}{2M}} M_{\text{SNR}_A} \left(\frac{q_{\text{psk}}}{\sin^2 \varphi}\right) d\varphi \quad (12)$$

式中 $M_{\text{SNR}_A}(\gamma)$ 是接收信噪比 SNR_A 的矩母函数(Moment generating function, MGF), 表示为

$$M_{\text{SNR}_A}(\gamma) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-\gamma \theta) P_{\text{SNR}_A}(\theta) d\theta \quad (13)$$

式中 $P_{\text{SNR}_A}(\theta)$ 代表接收信噪比 SNR_A 的概率密度函数, 式(9)可以表示为调和平均值的形式

$$\text{SNR}_A = \frac{p_B}{(p_B p_r + p_A p_B)} \frac{(p_B p_r + p_A p_B) p_A p_r |h_A h_B|^2}{((p_B p_r + p_A p_B) |h_B|^2 + p_A p_r |h_A|^2) \sigma^2} = a \frac{XY}{X+Y} = aZ \quad (14)$$

式中: $a = \frac{p_B}{(p_B p_r + p_A p_B)}$; $X = \frac{(p_B p_r + p_A p_B) |h_B|^2}{\sigma^2}$; $Y = \frac{p_A p_r |h_A|^2}{\sigma^2}$ 。由文献[11]可知,在高信噪比下,即 p_A, p_B 和 $p_r \gg \sigma^2$, Z 的矩母函数可以近似表示为

$$M_Z(\gamma) \approx \frac{\sigma^2}{\gamma} \left(\frac{1}{(p_B p_r + p_A p_B) \sigma_B^2} + \frac{1}{p_A p_r \sigma_A^2} \right) \quad (15)$$

接收信噪比 SNR_A 的矩母函数可以近似表示为

$$M_{\text{SNR}_A}(\gamma) = M_Z(a\gamma) = \frac{\sigma^2}{\gamma} \left(\frac{1}{p_A \sigma_A^2} + \frac{1}{p_B \sigma_B^2} + \frac{1}{p_r \sigma_A^2} \right) \quad (16)$$

将式(16)代入(12)式可得源节点 A 的误符号率为

$$P_{e,A,\text{psk}} = \sigma^2 \nu_{\text{psk}} \left(\frac{1}{p_A \sigma_A^2} + \frac{1}{p_B \sigma_B^2} + \frac{1}{p_r \sigma_A^2} \right) \quad (17)$$

式中 $\nu_{\text{psk}} = \frac{1}{\pi q_{\text{psk}}} \left(\frac{M-1}{2M} \pi - \frac{1}{4} \sin \left(2 \frac{M-1}{M} \pi \right) \right)$ 。类似地,在高信噪比情况下可以得到源节点 B 的 SER 渐进表达式

$$P_{e,B,\text{psk}} = \sigma^2 \nu_{\text{psk}} \left(\frac{1}{p_A \sigma_A^2} + \frac{1}{p_B \sigma_B^2} + \frac{1}{p_r \sigma_A^2} \right) \quad (18)$$

通过式(17,18),PF 双向中继系统的平均 SER 可以表示为

$$P_{e,\text{PF,psk}} = \frac{P_{e,A,\text{psk}} + P_{e,B,\text{psk}}}{2} = \sigma^2 \nu_{\text{psk}} \left(\frac{1}{p_A \sigma_A^2} + \frac{1}{p_B \sigma_B^2} + \frac{1}{2p_r} \left(\frac{1}{\sigma_A^2} + \frac{1}{\sigma_B^2} \right) \right) \quad (19)$$

对于 3 时隙 AF 中继,接收信噪比可以表示为

$$\text{SNR}_{A-\text{AF}} = \frac{p_B p_r |h_A h_B|^2}{(p_A |h_A|^2 + p_B |h_B|^2 + 2p_r |h_A|^2 + 2\sigma^2) \sigma^2} \approx \frac{p_B p_r |h_A h_B|^2}{(p_A |h_A|^2 + p_B |h_B|^2 + 2p_r |h_A|^2) \sigma^2} \quad (20)$$

$$\text{SNR}_{B-\text{AF}} = \frac{p_A p_r |h_A h_B|^2}{(p_A |h_A|^2 + p_B |h_B|^2 + 2p_r |h_B|^2 + 2\sigma^2) \sigma^2} \approx \frac{p_A p_r |h_A h_B|^2}{(p_A |h_A|^2 + p_B |h_B|^2 + 2p_r |h_B|^2) \sigma^2} \quad (21)$$

类似地,可以得到 3 时隙 AF 中继网络的平均 SER 为

$$P_{e,\text{AF,psk}} = \sigma^2 \nu_{\text{psk}} \left(\frac{1}{p_A \sigma_A^2} + \frac{1}{p_B \sigma_B^2} + \frac{1}{2p_r} \left(\frac{1}{\sigma_A^2} + \frac{1}{\sigma_B^2} \right) + \frac{p_B}{p_A p_r \sigma_A^2} + \frac{p_A}{p_B p_r \sigma_B^2} \right) \quad (22)$$

可以看出,在高信噪比下不等式 $P_{e,\text{PF,psk}} < P_{e,\text{AF,psk}}$ 恒成立,这表明 PF 双向中继网络具有更好的 SER 性能。因此可以在瑞利衰落信道下对 PF 中继网络展开研究工作,本文提出了基于 PF 中继网络的功率控制算法。

3 功率分配

为了进一步提高 PF 中继网络的 SER 性能,根据第 2 节求得的 SER 渐进表达式,本文提出在满足发射总功率限制的条件下最小化 SER 的功率控制算法。假定系统可允许的最大总发射功率为 p_t ,功率优化问题可以描述成

$$\begin{aligned} & \min_{p_A, p_B, p_r} P_{e,\text{PF,psk}} \\ \text{s. t.} \quad & p_A + p_B + p_r \leq p_t \end{aligned} \quad (23)$$

将式(19)代入式(23),优化问题具体表示为

$$\begin{aligned} \min_{p_A, p_B, p_r} \quad & \frac{1}{p_A \sigma_A^2} + \frac{1}{p_B \sigma_B^2} + \frac{1}{2p_r} \left(\frac{1}{\sigma_A^2} + \frac{1}{\sigma_B^2} \right) \\ \text{s. t.} \quad & p_A + p_B + p_r \leq p_t \end{aligned} \quad (24)$$

由于式(24)的目标函数和约束函数都是优化变量 p_A, p_B 和 p_r 的正项式。所以式(24)是一个几何规划问题。令 $p_i = e^{z_i}, i=A, B, r$, 则式(24)等价于

$$\begin{aligned} \min_{z_A, z_B, z_r} \quad & \ln \left(\frac{e^{-z_A}}{\sigma_A^2} + \frac{e^{-z_B}}{\sigma_B^2} + \frac{e^{-z_r}}{2} \left(\frac{1}{\sigma_A^2} + \frac{1}{\sigma_B^2} \right) \right) \\ \text{s. t.} \quad & \ln \left(\frac{e^{z_A} + e^{z_B} + e^{z_r}}{p_t} \right) \leq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

式(25)的目标函数和约束函数都是关于优化变量 z_A, z_B 和 z_r 的凸函数,因此式(25)是一个非线性凸优化问题且有一个全局最优解^[12]。采用拉格朗日乘子法,构造目标函数为

$$L = \ln \left(\frac{e^{-z_A}}{\sigma_A^2} + \frac{e^{-z_B}}{\sigma_B^2} + \frac{e^{-z_r}}{2} \left(\frac{1}{\sigma_A^2} + \frac{1}{\sigma_B^2} \right) \right) + \lambda \ln \left(\frac{e^{z_A} + e^{z_B} + e^{z_r}}{p_t} \right) \quad (26)$$

式中 λ 为拉格朗日乘子。 L 分别对 $p_i = e^{z_i}, i=A, B, r$ 和 λ 求偏导,令偏导为 0,得到优化解为

$$\begin{aligned} z_A &= \ln \left(\frac{p_t \sigma_B}{\sigma_A + \sigma_B + f_k} \right) \\ z_B &= \ln \left(\frac{p_t}{\sigma_A + \sigma_B + f_k} \right) \\ z_r &= \ln \left(\frac{p_t f_k}{\sigma_A + \sigma_B + f_k} \right) \end{aligned} \quad (27)$$

式中 $f_k = \sqrt{\frac{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}{2}}$ 。进而可以得到各节点的发射功率分配解

$$\begin{aligned} p_A &= \frac{p_t \sigma_B}{\sigma_A + \sigma_B + f_k} \\ p_B &= \frac{p_t \sigma_A}{\sigma_A + \sigma_B + f_k} \\ p_r &= \frac{p_t f_k}{\sigma_A + \sigma_B + f_k} \end{aligned} \quad (28)$$

从式(28)可以看出,本文所提的功率算法是根据信道统计状态信息进行功率分配,具有低复杂度的特点。将优化的功率分配解式(28)代入式(29)可以得到功率优化后系统的平均 SER 为

$$P_{e, \text{all, psk}} = \sigma^2 \nu_{\text{psk}} \frac{(\sigma_A + \sigma_B + f_k) (2\sigma_A f_k + 2\sigma_B f_k + \sigma_A^2 + \sigma_B^2)}{2p_t \sigma_A^2 \sigma_B^2 f_k} \quad (29)$$

4 仿真及分析

为了便于仿真且不失一般性,假设路径损耗因子为 4,各节点的噪声方差为 $\sigma^2 = 0$ dB。任意两节点间的信号衰落为瑞利衰落,令 d_{Ar}, d_{Br} 分别代表 A, B 到中继的距离,将 d_{Ar} 与 d_{Br} 之和归一化,即 $d_{Ar} + d_{Br} = 1$,则信道系数的方差分别为 $\sigma_{Ar}^2 = d_{Ar}^{-4}, \sigma_{Br}^2 = (1 - d_{Ar})^{-4}$ 。

图 2 给出了 $d_{Ar} = 0.5$,即 A, B 到中继距离相等时各节点功率平均分配的 PF 中继网络的 SER 性能。可以看出在高信噪比情况下,仿真得到的 SER 与式(19)分析结果十分吻合,这验证了分析得到的 SER 渐进表达式是合理的。此外,图 2 还给出了 AF 中继网络的 SER 的仿真值和理论值。可以看到在

瑞利信道下, PF 中继网络可以达到更好的 SER 性能, 与理论分析结果相符。图 3 给出了在 $d_{Ak} = 0.25$ 时, 分别采用文中所提功率控制算法和平均功率分配算法的 PF 中继网络的 SER 性能。从图 3 中可以看出, 在瑞利信道 M-PSK 调制情况下, 随着调制阶数增大, 理论分析值和仿真值越来越吻合。同时, 文中提出的功率控制算法相比于平均功率分配算法, 可以提供 1.5 dB 左右的 SER 性能增益。

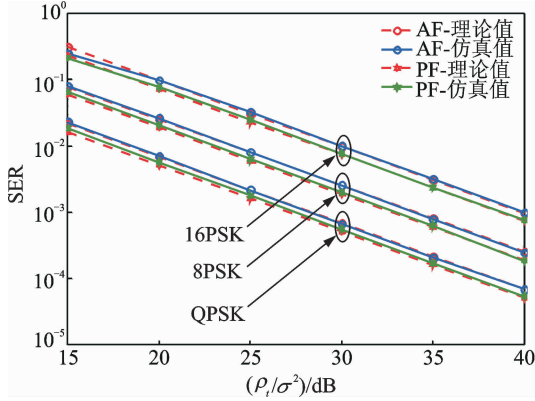


图 2 AF, PF 中继网络的误符号率

Fig. 2 SER performance of AF and PF relay networks

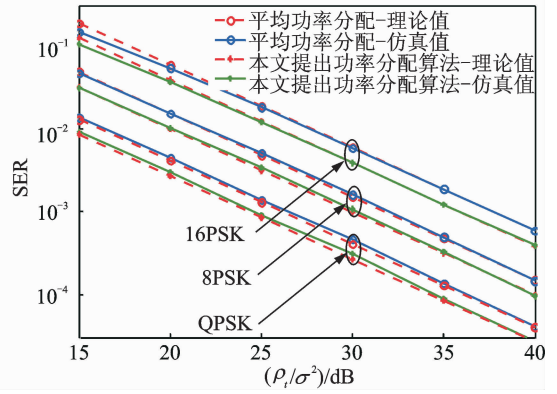


图 3 PF 中继网络不同功率控制算法的 SER

Fig. 3 SER performance of different power control schemes for PF relay network

5 结束语

本文研究了 PF 双向中继网络在衰落信道下的误符号率性能以及功率控制算法。本文利用在高信噪比情况下接收信噪比的近似值, 推导出了瑞利信道下 PF 中继网络的误符号率性能渐进表达式。理论分析和仿真结果吻合, 表明在瑞利信道下, 较之 AF 中继网络, PF 中继网络拥有更好的 SER 性能, 从理论上证明了 PF 中继网络性能的优越性。在分析得到 SER 性能渐进表达式的基础上, 为了进一步提高 PF 中继网络的 SER 性能, 提出了满足最大总发射功率限制条件下最小化 SER 的功率控制算法。理论和仿真结果表明所提算法可以显著提高系统的 SER 性能。为了进一步提高 PF 中继网络性能, 接下来可以设计联合中继选择和功率控制方案。

参考文献:

- [1] Guther S. Wireless relay networks[J]. Network IEEE, 1997, 11:46-51.
- [2] Rankov B, Wittneben A. Spectral efficient signaling for half-duplex relay channels[C]// Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers. Illinois, Monticello: IEEE Computer Society Press, 2005:1066-1071.
- [3] 陈文, 韦莎. 无线协作网络的物理层网络编码研究进展[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(3):415-428.
Chen Wen, Wei Sha. Research progress on physical layer network coding for wireless cooperative networks [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(3):415-428.
- [4] Li Q, Ting S H, Pandharipande A. Adaptive two-way relaying and outage analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(6):3288-3299.
- [5] 梁文文, 田华, 徐友云, 等. 非对称双向多中继系统机会式网络编码中断概率分析[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(1):28-33.
Liang Wenwen, Tian Hua, Xu Youyun, et al. Outage probability analysis of opportunistic network coding for asymmetric bidirectional multi relay system [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28 (1): 28-33.

- [6] 唐伦, 刘通, 陈前斌, 等. Two-way 中继系统协作节点选择及功率分配策略[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9):2077-2082. Tang Lun, Liu Tong, Chen Qianbin, et al. Cooperative node selection and power allocation strategy for two-way relay system [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32 (9): 2077-2082.
- [7] Yuan Q, Zhou Y, Zhao M, et al. Optimal transmission power allocation for two-way relay channel using analog network coding[C]//International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. Xianning, Hubei, China: IEEE Computer Society Press, 2011: 4243-4246.
- [8] Yang Y. Power allocation for two-way opportunistic amplify-and-forward relaying over Nakagami-m channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(7):2063-2068.
- [9] Wang C L, Cho T N, Yang K J. On power allocation and relay selection for a two-way amplify-and-forward relaying system [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8):3146-3155.
- [10] Xu S, Xu D, Zhang X, et al. Two-way relay networks based on product relay[J]. Electronics Letters, 2015, 51(5):429-430.
- [11] Su W, Sadek A K, Liu K J R. Cooperative communication protocols in wireless networks: Performance analysis and optimum power allocation[J]. Wireless Personal Communication, 2008, 44: 181-217.
- [12] Yang J, Cao X H, Chen R. Minimum transmit power under/considering relay selection for asymmetric two-way relaying networks[J]. IET Communications, 2014, 8(18):3254-3258.

作者简介:



桑燃(1993-),男,硕士研究生,研究方向:协作通信,E-mail:sangran_nuaa@163.com。



徐大专(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向:通信理论与信号处理。



许生凯(1990-)男,博士研究生,研究方向:数字喷泉码、编码理论。



邓大椿(1993-)男,硕士研究生,研究方向:编码理论。

(编辑:张黄群)

