

双向中继通信中的联合正交物理层网络编码

李 博, 王 钢, 杨洪娟, 刘荣宽

(哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 150001 哈尔滨)

摘要: 为了改善物理层网络编码(PNC)在非对称双向中继通信系统中误比特率(BER)性能,提出了一种新的PNC方案,称为联合正交物理层网络编码(COPNC).方案中2个源节点采用正交载波发送信息,中继节点对信息进行正交综合后广播到2个目的节点.理论分析与仿真结果表明,当双向中继通信系统信道条件非对称时,COPNC方案可以改善PNC的误比特率性能.特别是当2个上行信道的信噪比(SNR)不同时,COPNC方案的误比特率比PNC降低了约3dB.因此,COPNC特别适合应用于上行信道非对称的双向中继通信系统.

关键词: 双向中继通信;物理层网络编码;联合正交物理层网络编码;正交综合;误比特率

中图分类号: TN911.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)09-0012-05

Combined orthogonal physical-layer network coding in two-way relay communications

LI Bo, WANG Gang, YANG Hongjuan, LIU Rongkuan

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: To improve the bit error rate (BER) performance of physical-layer network coding (PNC) in asymmetric two-way relay communication systems, a new PNC scheme named combined orthogonal physical-layer network coding (COPNC) is proposed. In the scheme, the two source nodes employ orthogonal carriers; then the relay node employs orthogonal combination and broadcasts the combined signal to the two destination nodes. Analytical and simulation results show that COPNC can provide better BER performance when the channel conditions in the systems are asymmetric. Especially when the two uplink channels have different signal to noise ratio (SNR), BER of COPNC is lower about 3 dB than PNC. As a result, COPNC is very suitable to be used in two-way relaying communication systems with asymmetric uplink channels.

Key words: Two-way relay communication; physical-layer network coding; combined orthogonal physical-layer network coding; orthogonal combination; bit error rate

物理层网络编码(physical-layer network coding, PNC)^[1-2]技术自从2006年被提出以来,受到无线通信领域学者的广泛关注.这是由于,在双向中继通信系统(two-way relay channels, TWRC)^[3-4]中,PNC方案比传统多跳方案和网络编码(network coding, NC)方案分别可以提高100%和50%的系统吞吐量^[1].但是,大部分有关于物理层网络编码的研究主要都集中于对称信

道,即上行信道和下行信道具有相同的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR).文献[5]研究了2个下行信道具有不同信噪比的情况,给出了相应的解决方法,文献[6]研究了两源节点采用不同调制方式的情况.但是,截止到目前,还没有对于PNC在以下2种非对称条件下的研究成果发表:1)上行信道与下行信道具有不同的信噪比;2)2个上行信道具有不同的信噪比.

文献[7]提出了一种新方案称为正交物理层网络编码(orthogonal physical-layer network coding, OPNC),OPNC方案在保证通信时隙数与PNC相等的同时,由于采用了正交载波,获得了一定的系统误比特率(bit error rate ratio, BER)增

收稿日期: 2013-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61101248).

作者简介: 李 博(1983—),男,博士研究生;

王 钢(1962—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 王钢, gwang51@hit.edu.cn.

益. 本文基于文献[7]正交载波思想, 提出了一种新的联合正交方案, 称为联合正交物理层网络编码 (combined orthogonal physical-layer network coding, COPNC). 在信道对称的条件下, 分析了各种方案的误比特率性能; 在以上 2 种非对称条件下, 仿真实验表明 COPNC 方案与 PNC 以及 OPNC 方案相比, 可以获得更好的 BER 性能.

1 系统模型

本文研究如图 1 所示的双向中继通信系统模型. 节点 1 与节点 2 之间没有直达链路, 必须通过节点 R 中继来交换信息. 假设所有节点都工作在半双工模式下, 即每个节点不能同时进行信息的收发. 在时隙 1, 节点 1 和 2 把各自的已调信息 x_1 和 x_2 同时发送到节点 R , 节点 R 对收到的混叠信号进行处理, 得到综合的信息 x_R , 并在时隙 2 将其广播到节点 1 和 2, 节点 1 和 2 在已有信息的辅助下解码出对方传送的信息. 需要注意的是, 在 PNC 和 NC 方案中, 中继 R 对信息综合的过程采用 XOR 的方式. 此处定义时隙 1 为上行阶段, 定义时隙 2 为下行阶段. 本文假设不采用信道编码或者采用端到端 (end-to-end channel coding) 的信道编码^[8], 即中继节点不必考虑信道的编解码, 节点 1 和 2 都采用二进制移相调制 (binary phase shift keying, BPSK) 调制, 所有信道都为加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 信道.

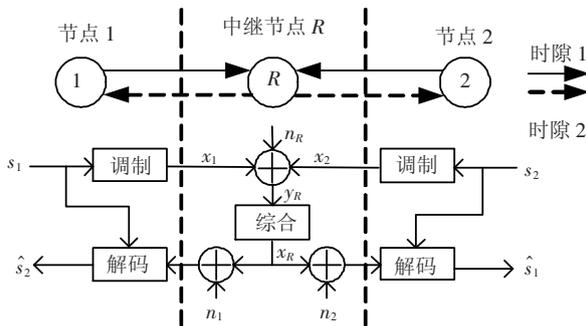


图 1 双向中继通信系统模型

2 物理层网络编码方案与正交物理层网络编码方案

2.1 PNC 方案

当系统采用 PNC 方案时, 节点 1 和 2 在上行阶段把各自的已调信息乘以理想同步的载波. 后发射到无线信道, 中继节点 R 接收到叠加噪声的混叠信号后, 对其进行如图 2 所示的信号处理过程. 经过相关器后得到的基带信号为

$$y_R = \sqrt{E_b} x_1 + \sqrt{E_b} x_2 + n_R. \quad (1)$$

式中: n_R 是均值为 0, 功率 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声.

经过判决与映射得到综合信息 s_R , 然后对 s_R 进行 BPSK 调制得到已调信息 x_R 并在下行阶段进行广播. PNC 方案对两路信号的综合处理表达式为

$$\begin{cases} s_R = s_1 \oplus s_2, \\ x_R = x_1 \cdot x_2. \end{cases} \quad (2)$$

在下行阶段, 节点 1 和 2 各自利用已有信息与节点 R 的广播信息解码出对方的信息.

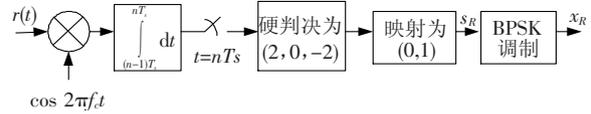


图 2 PNC 方案中继节点 R 的信号处理过程

文献[1]给出了当所有信道具有相同的信道条件, 即所有信道完全对称的情况下, 中继节点的判决门限以及映射方法. 由判决门限可以计算出中继节点的判决错误概率为

$$\begin{aligned} P_{e-PNC} = & Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} + \frac{1}{2\sqrt{2E_b}} \sqrt{\frac{N_0}{2E_b}} \ln\left[1 + \sqrt{1 - e^{-\frac{8E_b}{N_0}}}\right]\right) + \\ & \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} - \frac{1}{2\sqrt{2E_b}} \sqrt{\frac{N_0}{2E_b}} \ln\left[1 + \sqrt{1 - e^{-\frac{8E_b}{N_0}}}\right]\right) - \\ & \frac{1}{2} Q\left(3\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} + \frac{1}{2\sqrt{2E_b}} \sqrt{\frac{N_0}{2E_b}} \ln\left[1 + \sqrt{1 - e^{-\frac{8E_b}{N_0}}}\right]\right). \end{aligned} \quad (3)$$

式中: E_b 为每比特能量, 函数 $Q(x)$ 参见文献[11]. 由于下行阶段就是点到点的 BPSK 调制传输, 下行错误概率为 $P_e = Q(\sqrt{2E_b/N_0})$ ^[11]. 所以整个系统的误比特率为

$$BER_{PNC} = (1 - P_{e-PNC})P_e + P_{e-PNC}(1 - P_e). \quad (4)$$

2.2 OPNC 方案

OPNC 方案与 PNC 方案的主要区别在于节点 1 和 2 在发送信息时的载波有 $\pi/2$ 的相位差, 即正交载波. 不妨假设节点 1 的载波为 $\cos 2\pi f_c t$, 节点 2 的载波为 $\sin 2\pi f_c t$. 上行阶段节点 R 收到叠加噪声的混叠信号, 处理过程如图 3 所示. 节点 R 收到的基带信号表示为

$$y_R = \sqrt{E_b} x_1 + j \sqrt{E_b} x_2 + n_R. \quad (5)$$

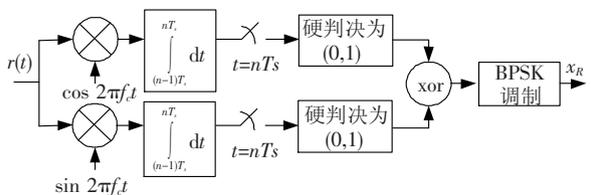


图 3 OPNC 方案中继节点 R 的信号处理过程

由于在同相分量和正交分量都有信息, 所以需要分 2 个支路进行处理并分别判决得到 2 个源信息, 然后对 2 个源信息进行 XOR 综合, 再经过

BPSK 调制并广播. OPNC 对两源信息的综合处理与 PNC 相同, 即(2). 下行阶段, 节点 1 和节点 2 采用与 PNC 完全相同的处理方法得到对方传输的信息.

当所有信道条件对称时, 考虑中继节点 R 得到 XOR 信息的错误概率. 由于 $s_R = s_1 \oplus s_2$, 当且仅当节点 1 和 2 传输的信息中有一个错误的时候, 综合信息 s_R 会错. 而每个支路的错误概率就是 P_e , 所以中继节点 s_R 的错误概率为

$$P_{e-OPNC} = 2P_e(1 - P_e) = 2Q(\sqrt{2E_b/N_0})[1 - Q(\sqrt{2E_b/N_0})]. \quad (6)$$

整个系统的误比特率为

$$BER_{OPNC} = (1 - P_{e-OPNC})P_e + P_{e-OPNC}(1 - P_e) = 4Q^3(\sqrt{2E_b/N_0}) - 6Q^2(\sqrt{2E_b/N_0}) + 3Q(\sqrt{2E_b/N_0}). \quad (7)$$

3 联合正交物理层网络编码方案

COPNC 方案如图 4 和图 5 所示. 在上行阶段, 节点 1 和 2 采用与 OPNC 方案相同的正交载波, 所以节点 R 收到的基带信号也是(5). 仍然采用两支路分别处理并判决得到 2 个源信息, 与 OPNC 不同的是, COPNC 直接对两支路的判决结果进行 QPSK 调制, 不妨以同相支路的输出作为 QPSK 信号的同相分量, 以正交支路的输出作为 QPSK 信号的正交分量, 如图 4. COPNC 对两路信号的综合处理表达式为

$$x_R = x_1 + jx_2. \quad (8)$$

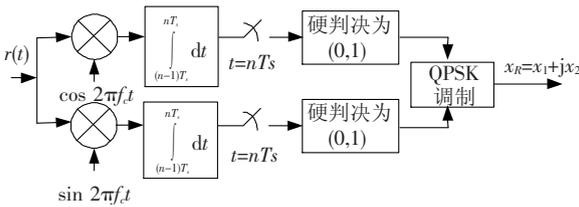


图 4 COPNC 方案中继节点 R 的信号处理过程

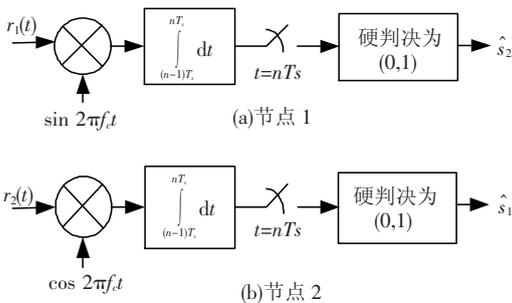


图 5 COPNC 方案下行阶段节点 1 和 2 的信号处理过程

由(8)可以明显看出, COPNC 的综合是基于正交信号处理, 因此称之为正交综合, 对应于文献[1]的 XOR 和文献[12]的线性综合. 由于本方案中两

源节点的传输采用正交载波, 中继节点采用正交综合, 所以称为联合正交物理层网络编码方案.

考虑下行阶段, 中继节点 R 广播 QPSK 调制信号到目的节点 1 和 2. 在节点 1, 期望得到的信息 x_2 包含于节点 R 发射信号的正交分量中, 所以节点 1 只需要对接收信号乘以载波 $\sin 2\pi f_c t$ 并进行积分、采样以及硬判决即可得到 s_2 的估计值, 如图 5(a). 在节点 2, 期望得到的信息包含于接收信号的同相分量中, 需要乘以载波 $\cos 2\pi f_c t$ 以得到 s_1 的估计值.

由于上行阶段采用正交载波, 中继节点采用正交综合并在下行阶段以 QPSK 调制广播, 所以在每条信道具有相同的信噪比时, 分析系统的误比特率可以单独分析每个信息(s_1 或 s_2). 考虑信息 s_1 , 其在上行阶段以 BPSK 调制发送到节点 R , 错误概率为 $P_e = Q(\sqrt{2E_b/N_0})$; 下行阶段, s_1 包含于 QPSK 调制信号的同相分量中, 被节点 2 接收, 其接收过程与 BPSK 解调过程一样, 所以下行的错误概率仍为 $P_e = Q(\sqrt{2E_b/N_0})$. 当且仅当上行和下行阶段中其中一个发生错误, s_1 将会被错误传输. 所以

$$P_{e-s_1} = 2P_e(1 - P_e) = 2Q(\sqrt{2E_b/N_0})[1 - Q(\sqrt{2E_b/N_0})]. \quad (9)$$

由于 s_2 的误比特率与 s_1 完全一样, 所以整个系统的误比特率为

$$BER_{COPNC} = P_{e-s_1} = P_{e-s_2} = 2Q(\sqrt{2E_b/N_0})[1 - Q(\sqrt{2E_b/N_0})]. \quad (10)$$

采用 COPNC 方案的优势分析如下. 当上行信道处于低信噪比区间或者两条信道条件不对称, 即一条信道信噪比高, 一条信道信噪比低的时候, 最有可能发生的情况就是在中继节点 R 两源信息 s_1 和 s_2 其中的一个正确接收, 而另一个发生判决错误. 在这种情况下, 对于 PNC 和 OPNC 方案, 中继节点 R 采用 XOR 的方式将 2 个信息进行综合, 从而得到的综合信息 s_R 是错误的. 然后在下行阶段, 节点 R 把 s_R 广播到 2 个目的节点, 如果下行传输不发生错误, 则 2 个目的节点解码出的信息全是错误的. 但是对于 COPNC 方案, 由于中继节点采用正交综合的方式(8), 并以 QPSK 方式进行广播, 然后节点 1 和 2 只处理携带他们期望得到信息的(正交或同相)分量. 所以, 节点 1 和 2 其中一个可以得到正确的信息, 而另外一个得到错误的信息. 相比于 PNC 和 OPNC 方案中, 2 个目的节点得到的信息全部错误, 很明显, COPNC 可以提高 TWRC 系统的误比特率性能.

4 仿真结果与分析

根据前面对各个方案误比特率性能的分析, 由式(4)、(7)和(10)画出 PNC、OPNC 以及 COPNC 方案在所有信道完全对称的条件下误比特率性能曲线如图6所示. 从图中可以看出, 在信道条件完全对称时, COPNC 方案的误比特率略低于 PNC 和 OPNC 方案, 3种方案误比特率性能十分接近.

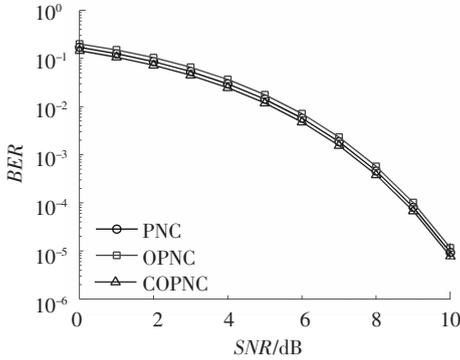
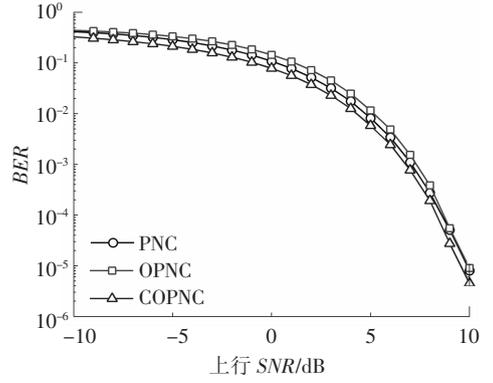
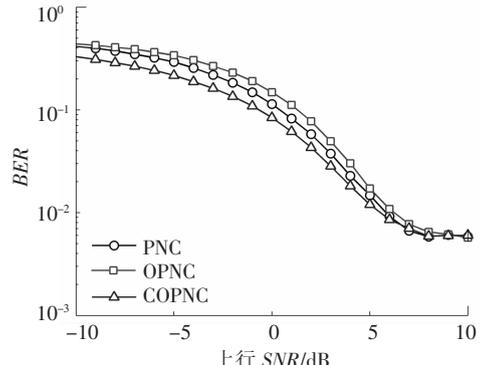


图6 信道条件完全对称时3种方案 BER 理论值

图7给出了当上行信道与下行信道具有不同的信噪比时3种方案的 BER 仿真. 图7(a)给出的是下行信道具有理想的信道条件(下行 SNR = 20 dB), 上行 SNR 从 -10 dB 到 10 dB 变化的情况; 图7(b)给出的是下行信道不可靠(下行 SNR = 5 dB), 上行 SNR 从 -10 dB 到 10 dB 变化的情况. 可以看出, 在这2种情况下, COPNC 具有最好的 BER 性能, 与上一节的分析一致. 在图7(b)中, 当信噪比大于 5 dB 时, 3种方案的 BER 性能趋于一致, 这是由于此时误比特率主要由不可靠的下行信道决定且3种方案下行信道条件一样.



(a) 下行 SNR = 20 dB



(b) 下行 SNR = 5 dB

图7 上行信道与下行信道条件非对称时 BER 仿真结果

当下行信道条件理想(下行 SNR = 20 dB), 2个上行信道条件非对称时, 3种方案的误比特率性能如图8所示. 2个上行信道具有不同的信道比, 等效于两源节点发射功率不同. 不失一般性, 假设节点2的发射功率为1, 节点1的发射功率为P. 对于PNC方案, 中继节点R不能继续采用文献[1]中的判决门限与映射方法, 这里对于PNC方案, 给出一种上行信道非对称条件下基于对数似然比(log likelihood ratio, LLR)的判决与映射算法. 在一个符号周期内, LLR 的计算为

$$\Lambda = \log\left(\frac{Pr(s_r = 0/y_R)}{Pr(s_r = 1/y_R)}\right) = \log\left(\frac{Pr((x_1 = 1, x_2 = 1)/y_R) + Pr((x_1 = -1, x_2 = -1)/y_R)}{Pr((x_1 = 1, x_2 = -1)/y_R) + Pr((x_1 = -1, x_2 = 1)/y_R)}\right) = \log\left(\frac{Pr(y_R/(x_1 = 1, x_2 = 1)) + Pr(y_R/(x_1 = -1, x_2 = -1))}{Pr(y_R/(x_1 = 1, x_2 = -1)) + Pr(y_R/(x_1 = -1, x_2 = 1))}\right) = \log\left(\frac{e^{-\frac{(y_R-1-P)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(y_R+1+P)^2}{2\sigma^2}}}{e^{-\frac{(y_R-1+P)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(y_R+1-P)^2}{2\sigma^2}}}\right). \quad (11)$$

判决及映射方法为

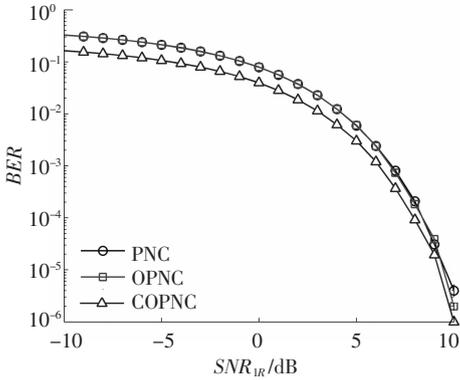
$$\Lambda \underset{s_R=1}{\overset{s_R=0}{\geq}} 0. \quad (12)$$

图8(a)给出了当 SNR_{2R} 固定在 20 dB, SNR_{1R} 从 -10 dB 变化到 10 dB 时3种方案的 BER 性能. 从图中可以看出, 与其他2种方案相比, COPNC 方案仍然具有最低的误比特率. 特别是当 SNR_{1R} < 5 dB 时, COPNC 的 BER 明显低于其他2种方案, 这是由于当 SNR_{1R} 落入这个信噪比区间时, 节点1发射的比特经常会发生错误, 而由于节点2到节点R

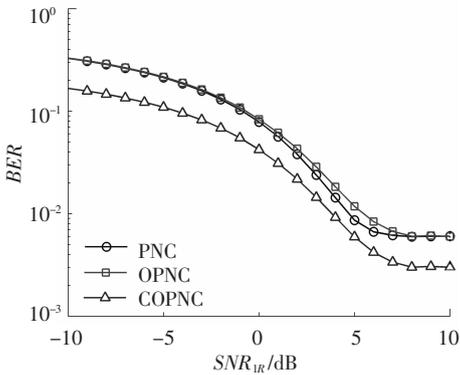
的信道条件是理想的, 节点2发射的比特不会发生错误, 如第3节分析的一样, PNC 和 OPNC 方案此时两目的节点都接收到错误的比特, 而 COPNC 方案只有一个目的节点接收到错误比特, 另一个节点接收正确的比特. COPNC 方案的误比特率会明显低于其他2种方案.

图8(b)给出了当 SNR_{2R} 固定在 5 dB 时的情况, 这时, 源节点2发射的比特 s₂ 经常发生错误. 在这种情况下, 与其他2种方案相比, COPNC 方案仍然具有最好的 BER 性能, 特别是当 SNR_{1R} >

5 dB 时,此时系统的误比特率主要由节点 2 到中继 R 的上行不可靠信道条件决定. 此时源节点 1 发射的比特 s_1 可以被节点 R 正确接收, 由于下行信道理想, 对于 COPNC 方案, 目的节点 2 就可以收到正确的比特 s_1 , 而对于其他 2 种方案, 2 个目的节点都将会接收到错误的比特. 从图 8(b) 中可以看出, COPNC 的误比特率约等于其他 2 种方案误比特率的一半.



(a) $SNR_{2R} = 20$ dB, 下行 $SNR = 20$ dB



(b) $SNR_{2R} = 5$ dB, 下行 $SNR = 20$ dB

图 8 2 个上行信道条件非对称时 BER 仿真结果

5 结 论

1) 提出了一种新的物理层网络编码方案, 称为联合正交物理层网络编码. 方案中 2 个源节点采用正交载波发送信息, 中继节点对信息采用正交综合并以 QPSK 调制的方式将综合信息广播到两目的节点.

2) 通过对称信道下的 BER 性能理论分析和非对称信道下的 BER 仿真实验, 可以看出: 当信道条件完全对称时, COPNC 方案的误比特率性能略好于 PNC 和 COPNC 方案, 三者非常接近; 当双向中继通信系统的上行信道与下行信道条件不对称时, COPNC 方案可以获得最优的 BER 性能; 当下行信道理想, 两上行信道条件不对称时, COPNC 的误比特率约为 PNC 和 OPNC 案的一半, 与理论分析吻合.

3) COPNC 方案特别适合应用于上行信道非对称的双向中继通信系统系统.

参 考 文 献

[1] ZHANG Shengli, LIEW S C, LAM, P P. Hot topic: physical-layer network coding [C]//Proceedings of MobiCom'06, New York: ACM, 2006: 358-365.

[2] LIEW S C, ZHANG Shengli, LU Lu. Physical-layer network coding: tutorial, survey, and beyond [EB/OL]. (2011). <http://arxiv.org/abs/1105.4261>.

[3] SHANNON C E. Two-way communication channels [C]//Proceedings of Berkeley symposium on mathematical statistics and probability. Berkeley: UC Berkeley, 1961, 1: 611-644.

[4] PAPADOGIANNIS A, BURR A G, TAO Meixia. On the maximum achievable sum-rate of interfering two-way relay channels [J]. IEEE Communication Letters. 2012, 16(1): 72-75.

[5] LIU, Jianquan., TAO, Meixia., XU, Youyun, et al. Superimposed XOR: a new physical layer network coding scheme for two-way relay channels [C]//Proceedings of Globecom'09, Hawaii: IEEE Press, 2009.

[6] WANG Lei, WU Zhuo. BER Analysis of Physical Layer Network Coding with PSK Modulations for Two-Way Relay Channels [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC'12), Hong Kong: IEEE Press 2012: 484-489.

[7] XIONG Wenhao. Orthogonal physical layer network coding [D]. Wichita, USA: Wichita State University, College of Engineering, 2009.

[8] LIEW S C, ZHANG Shengli, LU Lu. Physical-layer network coding: tutorial, survey, and beyond [EB/OL]. Physical Communications. (2012). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490712000419>.

[9] ZHANG Shengli, LIEW S C, LAM P P. On the synchronization of physical-layer network coding [C]//Proceedings of Information Theory Workshop (ITW 2006), Chengdu: IEEE, 2006: 404-408.

[10] LU Lu, LIEW S C. Asynchronous physical-layer network coding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2012, 11(2): 819-831.

[11] PROAKIS J, SALEHI M. Digital communication (5th Edition)[M]. New York: McGraw-Hill, 2008: 190-193.

[12] YANG Hongjuan, MENG Weixiao, LI Bo. Performance analysis of amplify-and-forward cooperative diversity with multiple-antenna nodes via analog network coding [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series). 2013, 19(6): 13-16.