

基于分层调制的物理层网络编码研究

唐猛^① 陈建华^{*①} 张艳^{①②} 张榆锋^①

^①(云南大学信息学院 昆明 650091)

^②(云南大学软件学院 昆明 650091)

摘要: 在实际的移动通信环境中, 信道的状态复杂多变, 该文针对双向中继信道的非对称性, 提出采用分层调制方式的物理层网络编码方案。首先构建源节点、中继节点均采用分层(2/4-PSK)调制的双向中继通信系统模型; 其次给出了中继节点的物理层网络编码解调及映射规则, 推导出加性高斯白噪声下中继误比特率及端到端误比特率理论计算公式; 最后仿真验证了理论分析结果。与采用传统 QPSK 调制技术的物理层网络编码相比, 该方案利用分层调制的技术优势, 确保较优信道的高速率传输, 也兼顾了较差信道的传输可靠性。

关键词: 物理层网络编码; 分层调制; 双向中继信道; 非对称信道

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)10-2568-07

DOI: 10.11999/JEIT151470

Physical-layer Network Coding Based on Hierarchical Modulation

TANG Meng^① CHEN Jianhua^① ZHANG Yan^{①②} ZHANG Yufeng^①

^①(School of Information Science and Engineer, Yunnan University, Kunming 650091, China)

^②(School of Software, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: In wireless communication network, the channel state information is complicated. A joint Hierarchical Modulation and Physical-layer Network Coding (HM-PNC) scheme is proposed for the asymmetric Two-Way Relay Channel (TWRC). In this scheme, the two source nodes and the relay node adopt the hierarchical modulation technology (2/4-PSK). In the relay node, a special demodulation/modulation and PNC mapping rule is designed. Corrupted by Additive White Gaussian Noise (AWGN), the relay Bit Error Ratio (BER) and the end-to-end BER expressions are derived. Simulation results show that the HM-PNC scheme not only improves the data rate in better links, but also takes into account the transmission reliability of the poor channels. Compared with the traditional QPSK-PNC scheme, the HM-PNC scheme has better mobile performance.

Key words: Physical-layer Network Coding (PNC); Hierarchical modulation; Two-Way Relay Channel (TWRC); Asymmetric channels

1 引言

在传统的无线传输方案中, 双向中继信道(Two-Way Relay Channel, TWRC)的基本模型^[1]含两个信源节点和一个中继节点, 完成双向信息互换需要 4 个时隙。2000 年, “网络编码(Network Coding, NC)”的技术概念在文献[2]中提出, 文献[3]对其支撑理论给予完善。NC 的核心是在中继节点处进行编码转发, 以提升整个网络的吞吐量。文献[4,5]对网络编码技术与三节点双向中继传输系统相结合展开研究, 实现 3 个时隙完成双向信息互换, 其吞吐量比传统方案提升了 33%。

在 2006 年, 基于对进一步提升无线网络吞吐量的网络编码技术研究, 文献[6]提出物理层网络编码(Physical-layer Network Coding, PNC)的概念。PNC 基本思想是: 在三节点的无线双向中继通信中, 利用电磁波特有的叠加特性, 将两个源节点同时发送所形成的叠加干扰信号, 在中继节点处当作有用信号进行解调处理, 完成 PNC 映射后广播出去, 接收节点利用自信息消除干扰, 获取所需信息, 从而实现两个时隙完成双向信息互换, 系统吞吐量相比传统方案提高了 1 倍, 这一优异的特性, 使其立即成了众多学者研究的焦点^[7-9]。

在实际的移动 TWRC 系统中, 各时隙的信道条件往往不对称, 且处于动态变化中, 有时非对称情况会很严重, 这就要求系统必须随着信道状态的变化及时调整合适的调制方式来保障通信。然而, 到目前为止, 大部分的物理层网络编码研究工作都

收稿日期: 2015-12-24; 改回日期: 2016-07-22; 网络出版: 2016-07-15

*通信作者: 陈建华 chenjh@ynu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61062005, 61561049)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61062005, 61561049)

是基于对称信道,即系统各阶段的信道条件相同,针对非对称性的研究文献很少。文献[10]分析了 4 种非对称信道条件下的物理层网络编码性能下降问题,但却未提出解决方案。

在非不对称性信道下,文献[11]把分层调制技术应用到中继通信中,使系统增益得到明显改善。文献[12]针对采用分层调制的无线通信网络给出了低复杂度的译码算法。2010 年,文献[13]针对非对称 TWRC 系统,提出网络编码和分层调制技术相结合 (Hierarchically Modulated-Network Coding, HM-NC) 的方案:在源节点采用分层调制技术,把非编码信号依据优先级的高低划分为“基本层”数据和“附加层”数据,分配不同的功率调制发送,在 3 个时隙内完成信号交换。HM-NC 方案通过分层调制满足信道的差异化需求,实现不对称速率传输,有效提升了系统的容错性。但文献[13]的 HM-NC 方案仅在链路较优的源节点采用分层调制技术,且要求两个端节点可以直接通信,中继转发信号时依然受限于一端,自适应性不好。因此,一些学者在分层调制、中继技术、网络编码结合上继续相关的研究工作,文献[14]在 HM-NC 方案的基础上引入信道编码,采用比特交织编码调制技术来改善非对称 TWRC 系统的 BER 性能,文献[15]在双中继的协同通信模型中对分层调制的功率比进行优化研究,以降低系统的 BER。

基于非对称 TWRC 通信系统,本文提出联合分层调制与物理层网络编码(HM-PNC)的方案。主要研究在非对称的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)双向中继信道下,源节点均采用分层调制技术发送信号到中继节点,中继节点对收到的叠加信号完成物理层网络编码后,再以分层调制方式广播发送信号到两端节点,端节点对收到的信号进行处理,恢复出新信号,在两个时隙内完成信息交换,既能充分利用较优信道条件实现高速率传输,又能兼顾较差信道传输可靠性。与传统的采用 QPSK 调制技术的物理层网络编码方案相比,该方案在移动通信中无需根据信道状况的频繁变化而不断改变调制方式,只需保持一种调制方案就能保障正常通信,体现出更好的移动性能。

2 系统模型

2.1 HM-PNC 系统模型

联合分层调制与物理层网络编码(HM-PNC)系统模型,如图1所示,包含两个阶段:上行阶段(时隙1),又称多址接入阶段和下行阶段(时隙2),即广播阶段。假设两个信源节点A和B之间不能直接通信,需借助中继节点R进行信息交换,所有节点均

工作在半双工通信模式,系统上行、下行阶段的各个信道具有不同的信道条件。在HM-PNC系统中,各节点均采用2/4-PSK分层调制技术传输,依据所发送信息的重要性不同划分两层优先级。如在图1中,节点*i*的信息由代表高优先级的基本层数据 i_D 和代表低优先级的附加层数据 i_R 两个部分组成, $i \in \{A, B, R\}$ 。在时隙1,源节点A和B同步发送分层数据给中继R;在时隙2,中继节点R对信号解调、PNC映射后以2/4-PSK分层调制信号,广播发送到两端节点,节点A和B依据自身信息提取新信息,完成信息交换。因此,在完成一次双向信息交换的通信中, HM-PNC系统仅需两个时隙,相对于需要4个时隙的传统方案可以得到100%的吞吐量性能提升,相比需要3个时隙的网络编码方案能有效提升50%吞吐量。

2.2 2/4-PSK 分层调制

图2(a)表示的是标准的QPSK调制星座图,各星座点具有相同的幅度值。图2(b)表示的是2/4-PSK分层调制星座图,每个码元所含2 bit信息用 $s_1 s_2$ 代表, $s_1 s_2 \in \{00, 01, 10, 11\}$, 选取高位比特数据 s_1 作为具有高优先级的基本层数据,选取低位比特数据 s_2 为优先级较低的附加层数据。在2/4-PSK分层调制中,基本层数据的调制欧式距离为 $2\alpha_1$,附加层数据调制的欧式距离为 $2\alpha_2$,二者的调制能量比 $r = \alpha_1^2 / \alpha_2^2$, $r \geq 1$ 。 r 越大,使高优先级比特获得较高的发送功率,其误比特率(Bit Error Ratio, BER)性能相应地越好;与之对应的低优先级比特获得的发送功率就较小,其BER性能就较差。当 $r = 1$ 时, 2/4-PSK分层调制就转化成标准的QPSK调制。

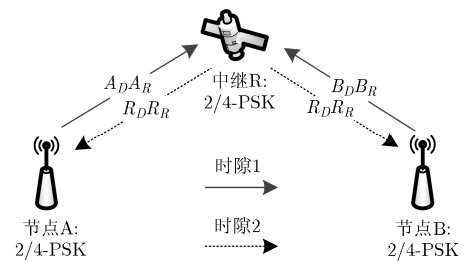


图 1 HM-PNC系统模型

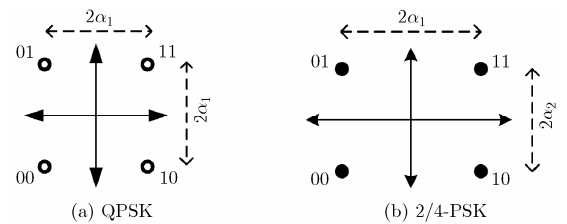


图 2 QPSK和2/4-PSK 分层调制星座图

3 HM-PNC 的系统方案

3.1 非对称双向中继信道

在非对称的 AWGN 双向中继信道条件下, 系统上行、下行阶段的各个信道条件不一样, 即拥有各自不同的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)。在表 1 中, 端节点 i 向中继节点 R 发送数据的信道定义为 $i2R$, 与之对应的信噪比定义为 SNR_{i2R} , 而中继节点 R 向端节点 i 发送数据的信道定义为 $R2i$, 相应的信噪比定义为 SNR_{R2i} , $i \in \{A, B\}$ 。

表 1 非对称信道状态表

阶段	上行		下行	
信道	A2R	B2R	R2A	R2B
信噪比	SNR_{A2R}	SNR_{B2R}	SNR_{R2A}	SNR_{R2B}

3.2 联合 2/4-PSK 分层调制与物理层网络编码的设计

在 HM-PNC 系统中, 采用 2/4-PSK, 只需两个时隙就能完成双向信息交换任务:

(1)在时隙 1, 属系统通信的上行阶段, 如图 3 所示, 源节点根据发送数据的重要性不同, 划分优先级, 分配给高优先级数据更高的调制功率, 以保证其 BER 性能满足较差信道的可靠性要求; 而低优先级的数据给予较低的发送功率, 以满足较优信道对数据传送速率的需求。其中, 节点 A 的分层调制能量比 $r = \alpha_1^2 / \alpha_2^2$, 则调制后发送的信号 $X_A = \alpha_1 A_D + \alpha_2 A_R$; 节点 B 的分层调制能量比 $r = \beta_1^2 / \beta_2^2$, 则

调制后发送的信号 $X_B = \beta_1 B_D + \beta_2 B_R$; 两节点同步发送信号, 中继 R 收到分层的叠加信号及两条链路带来的 AWGN 干扰噪声, 进行物理层网络编码处理。

(2)在时隙 2, 属系统通信的下行阶段, 如图 4 所示, 中继 R 的分层调制能量比 $r = \gamma_1^2 / \gamma_2^2$, 则调制后广播发送的信号 $X_R = \gamma_1 R_D + \gamma_2 R_R$; 各端节点对收到的中继信号解调译码后, 再与自身已知信息异或, 提取出新信号, 从而完成信息交换。在 HM-PNC 系统中, 中继节点处采用分层调制方式发送, 以解决下行阶段中继到两端节点的两条链路信道条件不对称难题, 和传统方案相比具有更好的适应性, 具体的理论分析及性能对比将在后文给出。

3.3 中继解调及映射方案

中继对两路叠加信号的处理过程是物理层网络编码研究的难点之一, 依据文献[6]的中继节点 PNC 映射法则, 在表 2 中给出 HM-PNC 系统中继对信源(S_A, S_B)的异或、PNC 输入、PNC 映射输出及 2/4-PSK 分层调制输出对应关系, 确保一一对应。在表 2 中, $i=1$ 表示高优先级信号, $i=2$ 表示低优先级信号。

4 AWGN 信道条件下 HM-PNC 的 BER 性能分析

在 AWGN 下的 TWRC 通信系统中, HM-PNC 主要针对两类典型的非对称信道进行研究:

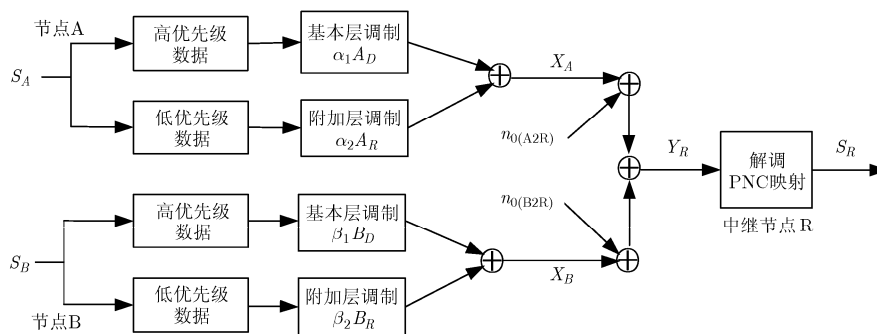


图 3 HM-PNC 的上行阶段传输模型

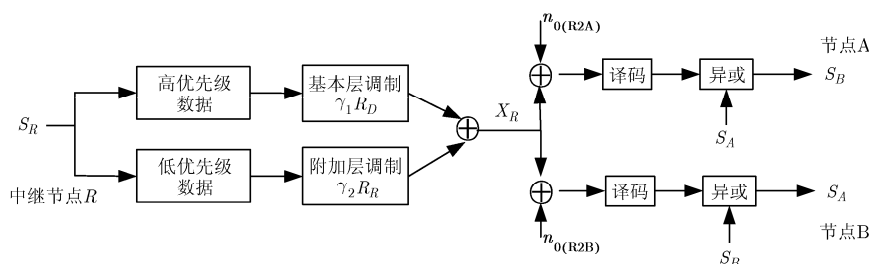


图 4 HM-PNC 的下行阶段传输模型

表 2 HM-PNC 中继调制解调与映射关系 ($i = 1, 2$)

$(S_{A,i} \oplus S_{B,i})$	PNC 输入	PNC 映射输出	2/4-PSK 输出
$(0 \oplus 0)$	$(-\alpha_i) + (-\beta_i)$	0	$(-\gamma_i)$
$(0 \oplus 1)$	$(-\alpha_i) + (\beta_i)$	1	(γ_i)
$(1 \oplus 0)$	$(\alpha_i) + (-\beta_i)$	1	(γ_i)
$(1 \oplus 1)$	$(\alpha_i) + (\beta_i)$	0	$(-\gamma_i)$

(1) I 类非对称信道，即系统的上行阶段对称，而下行阶段不对称。例如：时隙 1 信道 A2R 与信道 B2R 的条件同为“优”或“差”，二者视为对称情况；时隙 2 信道 R2A 与信道 R2B 的条件相反，一“优”一“差”，二者视为不对称情况。(2) II 类非对称信道，即系统的上行阶段不对称，下行阶段对称。例如：时隙 1 信道 A2R 与信道 B2R 的条件为相反，一“优”一“差”，二者视为不对称情况；时隙 2 信道 R2A 与信道 R2B 的条件同为“优”和“差”，二者视为对称情况。分析这两类典型的非对称信道下的 HM-PNC 抗噪声性能，具有重要意义。

4.1 I 类非对称信道下 HM-PNC 的 BER 性能分析

基于 I 类非对称信道的定义，在文中假设：时隙 1 信道 A2R、信道 B2R 与时隙 2 信道 R2A 条件为“优”，而时隙 2 信道 R2B 条件为“差”。

(1) 时隙 1：信道 A2R、信道 B2R 条件为“优”，源节点同步发送分层调制信号，中继能有效解调出叠加的基本层和附加层数据，考虑两条信道的噪声影响，由文献[6]得到中继收到的信号为

$$Y_R = X_A + X_B + n_0 \quad (1)$$

其中， $n_0 = n_{0(A2R)} + n_{0(B2R)}$ ， $n_{0(i)}$ ($i \in A2R, B2R$) 表示 A2R、B2R 两条信道的复加性高斯白噪声，其均值为 0，方差为 $N_{0(i)}/2$ ， $N_{0(i)}$ 为双边功率谱密度。

中继处的联合信噪比(SNR_R)定义为 A、B 两路叠加信号与信道噪声能量之比：

$$\text{SNR}_R = \frac{E\{|X_A|^2\} + E\{|X_B|^2\}}{N_0} \quad (2)$$

其中， $E\{\cdot\}$ 表示信号的平均功率， $E\{|X_A|^2\} = \alpha_1^2 + \alpha_2^2$ ， $E\{|X_B|^2\} = \beta_1^2 + \beta_2^2$ ， $N_0 = N_{0(A2R)} + N_{0(B2R)}$ 。因此， SNR_R 也可表示为

$$\begin{aligned} \text{SNR}_R &= \frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \beta_1^2 + \beta_2^2}{N_{0(A2R)} + N_{0(B2R)}} \\ &= \frac{\alpha_1^2 + \beta_1^2}{N_{0(A2R)} + N_{0(B2R)}} + \frac{\alpha_2^2 + \beta_2^2}{N_{0(A2R)} + N_{0(B2R)}} \end{aligned} \quad (3)$$

在式(3)中，令 $\text{SNR}_{R(D)} = \frac{\alpha_1^2 + \beta_1^2}{N_{0(A2R)} + N_{0(B2R)}}$ 表

示基本层叠加信号的联合信噪比，令 $\text{SNR}_{R(R)} = \frac{\alpha_2^2 + \beta_2^2}{N_{0(A2R)} + N_{0(B2R)}}$ 表示附加层叠加信号的联合信噪比。

在 2/4-PSK 分层调制中，基本层和附加层均只含一位比特，由文献[16]可推出中继节点所接收分层叠加信号的 BER 计算公式为

$$P_{R(i),e} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\sqrt{\text{SNR}_{R(i)}}\right), \quad i \in \{D, R\} \quad (4)$$

其中， $\text{erfc}(\cdot)$ 是互补误差函数，表示为 $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ ， $P_{R(D),e}$ 表示基本层叠加信号的 BER，

$P_{R(R),e}$ 表示附加层叠加信号的 BER。由于 $\text{SNR}_{R(D)} > \text{SNR}_{R(R)}$ ，故 $P_{R(D),e} < P_{R(R),e}$ ，表明代表高优先级的基本层 BER 性能好于低优先级的附加层 BER 性能。

由于输入的基本层、附加层信息是等概率分布的，则中继总的 BER 为

$$P_{R,e} = \frac{1}{2} (P_{R(D),e} + P_{R(R),e}) \quad (5)$$

(2) 时隙 2：中继对收到的叠加信号进行物理层网络编码处理后，以 2/4-PSK 分层调制广播信号到 A、B 两端。在 A 端，信道 R2A 条件为“优”，高低优先级比特信息均可解调出，收到的信号为

$$S_{R2A} = \gamma_1 R_D + \gamma_2 R_R + n_{0(R2A)} \quad (6)$$

其中， $n_{0(R2A)}$ 表示 R2A 信道的复加性高斯白噪声，其均值为 0，方差为 $N_{0(R2A)}/2$ ， $N_{0(R2A)}$ 为双边功率谱密度。

参照式(4)和式(5)，可推出中继 R 到 A 端的 BER 计算公式为

$$P_{R2A,e} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_1^2}{N_{0(R2A)}}}\right) + \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_2^2}{N_{0(R2A)}}}\right) \right) \quad (7)$$

所以，B 到 A 的端到端 BER 可表示为

$$P_{B2A,e} = P_{R2A,e} (1 - P_{R,e}) + (1 - P_{R2A,e}) P_{R,e} \quad (8)$$

同理，A 到 B 的端到端 BER 可表示为

$$P_{A2B,e} = P_{R2B,e} (1 - P_{R,e}) + (1 - P_{R2B,e}) P_{R,e} \quad (9)$$

其中， $P_{R2B,e} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_1^2}{N_{0(R2B)}}}\right) + \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma_2^2}{N_{0(R2B)}}}\right) \right)$ ，

表示中继 R 到 B 端的 BER， $N_{0(R2B)}$ 为 R2B 信道复加性高斯白噪声的双边功率谱密度。由于中继 R 到 B 端的信道条件“差”，故代表低优先级的基本层信息受到噪声的较大干扰，误比特率高，传输失

败。而代表高优先级的基本层信息抗干扰能力强, 误比特率低, 信息能有效送达。

4.2 II类非对称信道下 HM-PNC 的 BER 性能分析

基于 II 类非对称信道的定义, 在文中假设: 时隙 1 信道 B2R 条件为“差”, 信道 A2R 与时隙 2 信道 R2A、信道 R2B 条件为“优”。

(1)时隙1: 由于上行阶段信道不对称, 通过分层调制发送信号, 则 $\text{SNR}_{R(D)} > \text{SNR}_{R(R)}, P_{R(R),e} > P_{R(D),e}$, 可有效保证高优先级信号 A_D 和 B_D 的 BER 性能, 中继能解调出 A_D 和 B_D 叠加的基本层数据。然而, B2R 信道条件不好, 致使 B_R 的 BER 性能下降严重, 对 A_R 和 B_R 叠加的附加层数据 BER 性能造成较大影响, 使 $P_{R(R),e}$ 过大, 在中继处只能把这部分叠加信号视为干扰信号, 可不予考虑。因此, 在这种非对称情况下, 只有代表着高优先级的基本层叠加数据有效可靠, 其 BER 可表示为

$$P_{R(D),e} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{\alpha_1^2 + \beta_1^2}{N_{0(A2R)} + N_{0(B2R)}}} \right) \quad (10)$$

(2)时隙2: 下行阶段对称, 信道条件“优”, 意味着在中继处叠加形成的高误比特率附加层信息也能传输到终端, 最终造成整个 HM-PNC 系统端到端的附加层信息误比特率高, 无法解码, 低优先级信号传送失败。然而, 高优先级的信息比特仍然可以有效送达, 其 A 到 B 的端到端 BER 可表示为

$$P_{A2B(D),e} = P_{R2B(D),e} (1 - P_{R(D),e}) + (1 - P_{R2B(D),e}) P_{R(D),e} \quad (11)$$

其中, $P_{R2B(D),e} = (1/2) \text{erfc} \left(\sqrt{\gamma_1^2 / N_{0(R2B)}} \right)$ 为从中继 R 到 B 端的基本层信息 BER。

同理, 高优先级信息从 B 到 A 的端到端 BER 可表示为

$$P_{B2A(D),e} = P_{R2A(D),e} (1 - P_{R(D),e}) + (1 - P_{R2A(D),e}) P_{R(D),e} \quad (12)$$

其中, $P_{R2A(D),e} = (1/2) \text{erfc} \left(\sqrt{\gamma_1^2 / N_{0(R2A)}} \right)$ 为从中继 R 到 A 端的基本层信息 BER。

若下行阶段也不对称, 即 HM-PNC 系统的上下行通信均为非对称情况。由于上行信道的不对称, 决定了中继收到的低优先级叠加信号误比特率高, 高优先级叠加信息误比特率低。而下行信道不对称时, 由于中继转发的低优先级信号具有较高的误比特率, 不管传送的信道好坏, 终端收到的低优先级信号只会更差。因此, 该情况下的信息传送效果与 II 类非对称相似, 都只能保障高优先级信号的有效传输。

5 两类非对称 AWGN 信道下 HM-PNC 的 BER 性能仿真

在仿真实验中, 设置调制能量比为 $r = 9$, 依次在两类非对称 AWGN 信道条件下, 对 2/4-PSK 分层调制 PNC 方案与传统的 QPSK 调制 PNC 方案进行仿真实验比对, 以检验 HM-PNC 方案中继的 BER 性能及端到端的 BER 性能。

5.1 HM-PNC 系统中继 R 的 BER 性能

在 I 类非对称信道下, 两条上行链路拥有对称、信道好的条件, 从图 5 可看出中继节点对叠加信号的译码效果很好, 2/4-PSK 分层调制的高位比特数据和低位比特数据及 QPSK 调制的比特数据均有 10^{-4} 以上的 BER 表现, 即信号分层与不分层调制的 BER 表现相近。

在图 6 的 II 类非对称信道下, 两条上行链路不对称、信道一“好”一“差”, 采用 QPSK 调制的信号, 在中继处叠加信号的译码表现很差, BER 比 10^{-2} 差, 可以判断为译码失败, 即信号发送失败, 需更换调制方式重新发送数据。然而, 采用 2/4-PSK 分层调制的高位比特数据 BER 依然有明显好于 10^{-2} 的效果, 保证了高优先级信息的传送。以上分析均体现出在端到中继的信息传输中, HM-PNC 方案的可靠性明显优于传统的 QPSK-PNC 方案。

5.2 HM-PNC 系统端到端的 BER 性能

从图 7 和图 8 可知, 在信号从 A 到 R 再到 B 的链路中, 若经历 I 类非对称信道, 则要受到下行链路 R2B 的较差信道影响; 若经历 II 类非对称信道下, 则要受上行链路 B2R 的较差信道影响。在这两类状态下, 均导致采用 QPSK-PNC 方案的信号端到端 BER 大于 10^{-2} , 相当于信号发送失败, 需更换调制方式重新发送数据。然而, 采用 HM-PNC 方案的高位比特数据的 BER 依然保持小于 10^{-2} 的效果, 保证了高优先级信息的传送; 低位比特数据的误比特率 BER 虽大于 10^{-2} , 但这部分数据影响不大, 可舍去。从以上仿真实验结果可得出, HM-PNC 方案在端到端的数据传输可靠性方面依然优于传统的 QPSK-PNC 方案。

在信号从 B 到 R 再到 A 的链路中, 若经历 I 类非对称信道, 则整个链路均享受着较好的信道条件, 从图 9 可看出, HM-PNC 方案有着与传统的 QPSK-PNC 方案相近的端到端 BER 性能, 能满足信道的高速率传输。若经历 II 类非对称信道下, 则要受上行链路 B2R 的较差信道影响, 从图 10 可看

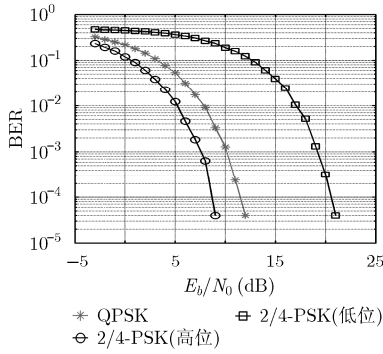


图 5 I 类非对称信道下中继 R 的 BER

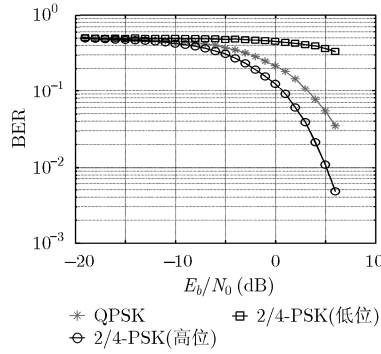


图 6 II 类非对称信道下中继 R 的 BER

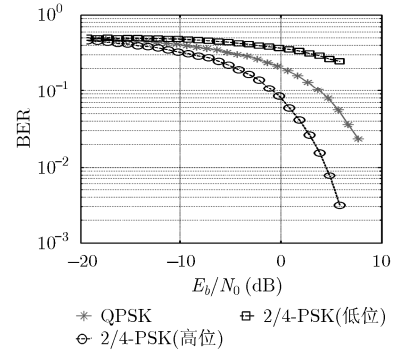


图 7 I 类非对称信道下 A 到 B 的 BER

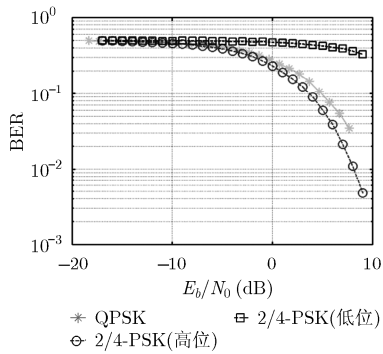


图 8 II 类非对称信道下 A 到 B 的 BER

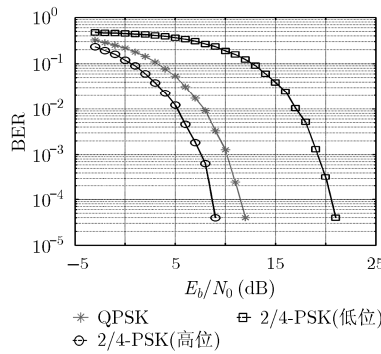


图 9 I 类非对称信道下 B 到 A 的 BER

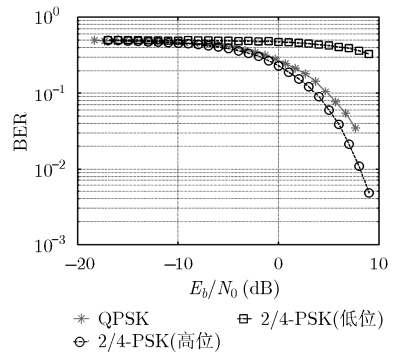


图 10 II 类非对称信道下 B 到 A 的 BER

出, QPSK-PNC 方案已失去意义, 而 HM-PNC 方案仍能保证高位比特数据传输可靠性。

5.3 不同的调制能量比对 HM-PNC 系统 BER 的影响

基于非对称信道, 在 HM-PNC 系统的中继处, 对不同的 r 分配策略下基本层、附加层 BER 性能分别进行了仿真比较。从图 11 可看出, 随着 r 的增大, 代表高优先级的基本层数据能获得更高发送功率, 其 BER 性能相应地更好, 系统增益相应得到提高。当 $r=9$ 时, 其基本层数据的 BER 优于 10^{-2} , 符合系统设计需求; 而 $r=2$ 时, 其基本层数据的 BER 明显变差; 当 $r=1$ 时, 为等功率分配, 就相当于 QPSK 调制, 其 BER 性能已不能满足通信需求。在图 12 中, 对不同的 r 下的附加

层数据 BER 进行比较, 随着 r 的增大, 获得的发送功率变小, 相应的 BER 越来越差, 但因信号优先级低, 可以忽略, 与理论分析一致。因此, 在 HM-PNC 系统中, 不同的 r 分配方案对系统的 BER 有直接的影响。

6 结束语

针对非对称信道条件下, 传统调制方式的物理层网络编码性能下降问题, 文中提出了 HM-PNC 解决方案。在两类典型的非对称 AWGN 信道条件下, 给出了 2/4-PSK 分层调制下的 PNC 方案中继及端到端 BER 计算理论公式, 并与采用传统 QPSK 调制的 PNC 方案进行实验仿真比对。实验仿真结果表明, 在信道条件较好时, HM-PNC 性

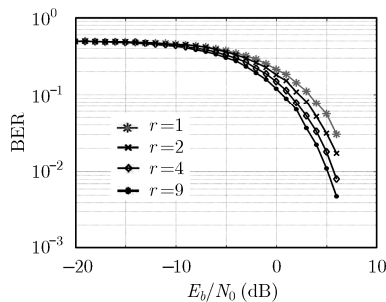


图 11 不同调制能量比下的基本层 BER

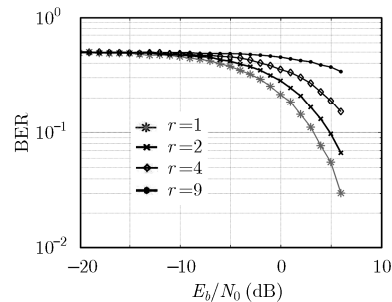


图 12 不同调制能量比下的附加层 BER

能与传统的QPSK-PNC方案相近,有着优于 10^{-4} 的BER表现,能保障系统的高速率信息传送。相比传统方案和网络编码方案,能有效提升吞吐量性能。在信道条件不好时, HM-PNC系统基本层信息的BER也好于 10^{-2} , 确保高优先级信息传输的可靠性,对系统增益的提升效果明显。这些特点,使得HM-PNC方案在实际的无线通信中具有更好的移动性能。由于对HM-PNC方案的研究还不多,如何充分挖掘HM-PNC的特性是值得深入研究的问题。

参考文献

- [1] COVER T and GAMA A. Capacity theorems for the relay channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, 25(5): 572-584. doi: 10.1109/TIT.1979.1056084.
- [2] AHLWEDE R, LI S R, YEUNG R W, *et al.* Network information flow[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216. doi: 10.1109/18.850663.
- [3] LI S R, YEUNG R W, and CAI N. Linear network coding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(2): 371-381. doi: 10.1109/TIT.2002.807285.
- [4] WU Y, CHOU P A, and KUNG S Y. Information exchanging in wireless networks with network coding and physical layer broadcast[R]. Redmond: Microsoft Research, 2004.
- [5] FRAGOULI C, BOUDEC J Y, and WIDMER J. Network coding: an instant primer[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2006, 36(1): 63-68.
- [6] ZHANG S, LIEW S C, and LAM P P. Hot topic: physical-layer network coding[C]. Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, CA, USA, 2006: 358-365.
- [7] LIEW S C, ZHANG S, and LU L. Physical-layer network coding: Tutorial, survey, and beyond[J]. *Physical Communication*, 2013, 6: 4-42. doi: 10.1016/j.phycom.2012.05.002.
- [8] 沙楠, 高媛媛, 益晓新, 等. 基于连续相位频移键控调制的物理层网络编码检测及性能分析[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1454-1459. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01201.
SHA Nan, GAO Yuanyuan, YI Xiaoxin, *et al.* Physical-layer network coding based on CPFSK modulation detection and performance analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1454-1459. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01201.
- [9] 党小宇, 李强, 虞湘宾, 等. 物理层网络编码的符号时钟估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1569-1574. doi: 10.11999/JEIT141364.
DANG Xiaoyu, LI Qiang, YU Xiangbin, *et al.* Symbol timing estimation for physical-layer network coding[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1569-1574. doi: 10.11999/JEIT141364.
- [10] LI B, WANG G, CHONG P, *et al.* Performance of physical-layer network coding in asymmetric two-way relay channels[J]. *China Communications*, 2013, 10(10): 65-73.
- [11] HAUSL C and HAGENAUER J. Relay communication with hierarchical modulation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(1): 64-66. doi: 10.1109/LCOMM.2007.061419.
- [12] HU Z X, JIANG H, LI H X, *et al.* A low-complexity decoding algorithm for coded hierarchical modulation in single frequency networks[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2014, 60(2): 302-312. doi: 10.1109/TBC.2014.2318554.
- [13] PARK J M, KIM S L, and CHOI J H. Hierarchically modulated network coding for asymmetric two-way relay systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2179-2184. doi: 10.1109/TVT.2010.2045521.
- [14] THARRANETHARAN S and HOSSAIN M J. A hierarchical modulation and network coding-assisted BICM system for asymmetric two way relay channels[C]. IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Vancouver, 2014: 1-5. doi: 10.1109/VTCFall.2014.6965815.
- [15] SUN H, NG S X, Chen D, *et al.* Decode-and-forward cooperation-aided triple-layer turbo-trellis-coded hierarchical modulation communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(4): 1136-1148. doi: 10.1109/TCOMM.2014.2387164.
- [16] GOLDSMITH A. Wireless Communications[M]. UK: Cambridge University Press, 2005: 159-168.

唐 猛: 男, 1979 年生, 副研究员, 博士生, 研究方向为网络编码、协同通信。

陈建华: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息传输理论与应用。

张 艳: 女, 1978 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为网络编码。

张榆锋: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字信息处理理论与微弱信号检测、医学电子学等。