云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2):246~253 Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition



非对称调制下物理层网络编码

系统设计及性能分析

方太彬,唐 猛**,陈庆豪,陈建华,曾国峰 (云南大学信息学院,云南昆明 650500)

摘要:对于非对称信道,通信系统两端采用相同调制方式发送信号时会存在误码率高、传输功率浪费等问题.针对以上问题,设计了基于非对称调制的物理层网络编码方案.首先给出方案的系统模型并制定中继节 点处的解调映射规则;其次对系统在不同功率分配比下展开分析;最后在系统中引入 LDPC 码作为信道编码, 设计相应的译码映射算法.仿真实验结果表明,在非对称信道条件下,当功率分配比优化为1时,与传统的对 称调制方案相比,非对称调制方案的译码准确率提升了7.6%.

关键词: 非对称调制; 物理层网络编码; LDPC 码; 功率分配 中图分类号: TN925 文献标志码: A 文章编号: 0258-7971(2022)02-0246-08

网络编码(Network Coding, NC)^[1] 技术通过在 中继节点对信息进行比特异或以提高系统的吞吐 量.物理层网络编码(Physical-layer Network Coding, PNC)^[2] 技术是在 NC 技术的基础上,根据电磁信 号的叠加特性提出的, PNC 系统的吞吐量相比 NC 系统提升了 50%.

在实际的双向中继通信系统中,上下行阶段的 信道条件处于动态变化中,为了提升系统数据传输 的可靠性等性能,需要随着信道条件的变化调整系 统的通信方案.文献 [3-6] 基于非对称信道条件,提 出了异构物理层网络编码方案,源节点根据信道条 件和信息交换的业务负载比例选择不同的调制方 式进行数据传输,可改善系统的误码率性能.文 献 [7] 提出了基于可变 QAM 调制的 PNC 系统,设 计了两阶段搜索算法实现最优映射,从而得到较低 的误码率.文献 [8] 提出了双正交物理层网络编码 方案,在中继节点采用正交组合,提高了非对称通 信系统的传输可靠性.文献 [9-11] 提出了基于分层 调制的物理层网络编码方案,确保在各种信道条件 下系统的高速率传输和可靠性.文献 [12] 在莱斯衰 落信道中,推导出了 4/16-QAM 分层调制下 PNC 系统的平均符号差错率的解析表达式,减少中继节 点的欧式距离计算的数量,系统吞吐量得到提升. 文献 [13] 在非对称调制的物理层网络编码系统中, 提出了一种聚类最大化算法和标记约束策略,有效 降低译码错误概率,提高中继的解码转发性能.当 叠加星座点不满足排他律和标记约束时,启发式最 近邻去噪映射算法表现较差.

针对非对称双向中继信道(Two-Way Relay Channel, TWRC),通过调整系统源节点两端的功 率分配方案能够有效改善系统性能.文献 [14] 提出 了将分层调制技术、低密度奇偶校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码、功率优化策略与 PNC 技 术联合进行研究,提升了整个系统的通信性能.文 献 [15] 在物理层网络编码系统中提出了自适应功 率分配方案,在上行阶段,最大化中继节点接收的 网络编码符号的欧氏距离,在下行阶段,中继节点 以源节点间的最小互信息最大化为目标函数,使用 窄范围方法选择最佳的天线组,并根据算法分配功 率,该方案虽然改善了系统误码率性能,但增加了 系统的复杂度.

基于非对称信道,本文构建了正交相移键控

收稿日期:2021-05-16; 接受日期:2021-07-25; 网络出版日期:2021-09-26

基金项目:国家自然科学基金 (61861045).

作者简介:方太彬 (1998-), 男, 湖南人, 硕士生, 主要研究物理层网络编码. E-mail: 3288430672@qq.com.

^{**} 通信作者: 唐 猛 (1979-), 男, 云南人, 博士, 副研究员, 主要研究无线通信、网络编码. E-mail: tangmeng@ynu.edu.cn.

(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)和二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)联合调制的物理层网络编码系统模型,设计了系统中继节点的解调映射规则和译码映射算法.在实验中对PNC系统在不同功率分配比下的性能进行分析,得到最优功率分配方案.实验仿真结果表明,在最优的功率分配比下,联合 LDPC 码的非对称调制PNC 系统能够有效改善信号传输的误码率性能.

1 系统模型

1.1 非对称双向中继信道模型 本文基于3节点 双向中继通信系统展开研究,系统通信过程包括上 行阶段和下行阶段,节点包括2个源节点A、B和 1个中继节点R.而在实际通信场景中,系统的信 道条件是动态变化的,根据信道条件不相等的情况, 可分为阶段非对称、下行非对称、上行非对称以及 节点非对称^[16].

本文以上行非对称信道为例展开分析.如图 1 所示,在上行非对称通信模型中,上行阶段节点 A 到中继 R 和节点 B 到中继 R 两条信道的噪声不同, 即 $n_{AR} \neq n_{BR}$,其中 n_{AR} 、 n_{BR} 分别为节点 A、B 到中 继 R 的信道噪声.下行阶段的信道条件完全相同, 即中继 R 到节点 A、B 间的信道噪声均为 n_{R} .文中 假定上行阶段节点 A 到中继 R 的信道条件较优, 采用 QPSK 调制,节点 B 到中继 R 的信道条件较 差,采用 BPSK 调制,即 QPSK-BPSK 调制.下行阶 段的信道条件较优,采用 QPSK 调制进行实验仿真.





在上行非对称通信模型中,各节点的调制星座 图如图 2 所示. A 节点初始信息流的每个符号含 有 2 个比特 {00,01,10,11},经 QPSK 调制后得到 {1+*i*,1-*i*,-1+*i*,-1-*i*},其星座图如图 2(a)所示; B 节 点初始信息流的每个符号只含有 1 个比特 {0,1}, 经 BPSK 调制后得到 {1,-1},其星座图如图 2(b)所 示; A、B 节点的初始信息流通过理想信道后在中 继 R 叠加后的星座图如图 2(c)所示.

通信系统两端采用不同的调制方式时,中继



R 将调制后的信息流进行叠加,对叠加结果进行解 调映射,然后通过广播发送到目的节点.在下行阶 段,目的节点按照设计的规则进行比特异或,实现 通信系统两端的信息交互.

1.2 QPSK-BPSK 调制下联合 LDPC 码的 PNC 系统模型 在双向中继通信系统中,基于 QPSK-BPSK 调制的物理层网络编码系统联合 LDPC 码的上、下行阶段模型框图分别如图 3 和图 4 所示.



上行阶段: 节点 A、B 分别将信息长度为 2K 和 K 的初始信息流 $S_A \in \{0,1\}^{2K}$ 和 $S_B \in \{0,1\}^K$ 与 $K \times N$ 维的生成矩阵相乘, 进行 LDPC 编码, 即可得 到信息长度为 2N 和 N 的信息流 $C_A \in \{0,1\}^{2N}$ 和 $C_B \in \{0,1\}^N$. 根据调制方式的星座图, 节点 A 将 $C_A \in \{0,1\}^{2N} \to C_A \in \{00,01,10,11\}^N$, 再对 C_A 进行 QPSK 调制, 得到 $X_A \in \{1+i,1-i,-1+i,-1-i\}^N$; 节点 B 的信息流 C_B 经 BPSK 调制后得到 $X_B \in \{1,-1\}^N$. X_A 和 X_B 通过加性高斯白噪声信道传输至中继 R, 中继 R 收到的信息流 Y_R 为 $X_A \times X_B$ 和信道噪声的 叠加, 即:

$$Y_{\rm R} = X_{\rm A} + X_{\rm B} + n_{\rm AR} + n_{\rm BR}.$$
 (1)

中继 R 将接收到的叠加值 $Y_{\rm R}$ 采用对数似然 比置信传播(Log Likelihood Ratio Belief Propagation, LLR-BP)算法进行译码,得到映射结果 $S_{\rm R} \in$ {0,1,2,3}^{2K}.

下行阶段:中继 R 将映射结果转化为二进 制数据,得到 $S_{R} \in \{00,01,10,11\}^{2K}$,再对 S_{R} 进行 LDPC 编码和 QPSK 调制,得到 $X_{R} \in \{1+i,1-i,-1+i,$ $-1-i\}^{N}$,其中所用的 LDPC 码与上行阶段一致.目 的节点接收到中继节点 R 广播的信息流 X_{R} 后分 别进行 LLR-BP 译码,得到信息流 $S_{RA} \in \{00,01,10,$ $11\}^{2K}$ 和 $S_{RB} \in \{00,01,10,11\}^{2K}$,然后将 S_{RA} 、 S_{RB} 与 初始信息流 S_{A} 、 S_{B} 按照设计的规则进行比特异或 得到交换信息 S'_{B} 、 S'_{A} ,至此系统两端完成信息交 互过程.其中 S'_{B} 为 B 端所发送的信息, S'_{A} 为 A 端 所发送的信息.

2 系统中继映射方案

2.1 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统映射方案 表 1 为非对称调制下 PNC 系统的中继映射方案.其中 S_A 、 S_B 分别为节点 A、B 发送的初始信息流, X_A 、 X_B 分别为 S_A 、 S_B 经过信道编码和调制后的信息 流,中继接收值 Y'_R 为系统两端对初始信息流采用 QPSK-BPSK 调制通过理想信道后在中继节点得到 的叠加结果,对应中继接收矩阵 M,如式(2)所示. Y'_{R1} 、 Y'_{R2} 分别表示 Y'_R 的实部和虚部. PNC 映射值 S_R 由系统两端的初始信息流进行比特异或得到, 即 $S_A \oplus S_B$ (将 S_B 低位补零扩展成两位: 0 → 00, 1 → 10),对应 PNC 映射矩阵 G,如式(3)所示.根据 映射方案将 S_R 转换为二进制数据,其中 S_{RH} 、 S_{RL}

|--|

Tab. 1 The relay mapping scheme of PNC system under asymmetric modulation

$S_{\rm A}$	$S_{\rm B}$	$X_{\rm A}$	$X_{\rm B}$	$Y'_{\rm R}$	$Y'_{\rm R1}$	$Y'_{\rm R2}$	$S_{\rm R}$	$S_{\rm RH}$	$S_{\rm RL}$
00	0	1+j	1	2+ <i>j</i>	2	1	0	0	0
00	1	1+j	-1	j	0	1	2	1	0
01	0	1 <i>—j</i>	1	2- <i>j</i>	2	-1	1	0	1
01	1	1 <i>—j</i>	-1	-j	0	-1	3	1	1
10	0	-1+j	1	j	0	1	2	1	0
10	1	-1+j	-1	-2+j	-2	1	0	0	0
11	0	-1-j	1	−j	0	-1	3	1	1
11	1	-1-j	-1	-2-j	-2	-1	1	0	1

表示 S_R 的高位和低位.根据表1中的初始信息、 调制后信息、中继接收和 PNC 映射可以得到 QPSK-BPSK 调制下 PNC 系统的中继解调映射 方案.

$$M = \begin{bmatrix} 2+j & 2-j & j & -j \\ j & -j & -2+j & -2-j \end{bmatrix},$$
 (2)

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
(3)

矩阵 *M* 与矩阵 *G* 中的值为一一对应关系,并 根据行列坐标形成映射关系.即当中继接收的值为 -*j* 时,得到矩阵 *M* 中对应-*j* 的行列坐标(1,4)、(2, 2),然后得到矩阵 *G* 中相应位置的值 *G*(1,4)=*G*(2, 2)=3,从而实现映射关系.

中继 R 得到叠加结果后,根据最小距离算法 划分判决区域.首先计算中继收到的实际叠加信息 与矩阵 *M* 中每个值的欧式距离,得到其中的最小 值,将叠加值判决为欧氏距离最小值在矩阵 *M* 中 所对应位置的值,得到对应值在矩阵 *M* 中的行列 坐标 (*m*,*n*)(*m* = 1,2; *n* = 1,2,3,4),然后根据行列坐 标与矩阵 *G* 进行映射,得到唯一确定的 PNC 映 射值.

在下行阶段,由于系统两端交换的初始信息流 长度不相等,因此需要在目的节点设计相应的规则 将解调映射结果与初始信息流进行比特异或得到 交换信息,实现系统两端的信息交互.

A 节点: 初始信息流的奇数位和 PNC 映射值 的奇数位进行比特异或得到交换信息.

B节点:初始信息流和 PNC 映射值的奇数位 进行比特异或得到交换信息的奇数位; PNC 映射 值的偶数位与 0 进行比特异或得到交换信息的偶 数位.

2.2 系统在不同功率分配比下的分析 针对上行 非对称通信模型,为充分发挥 PNC 系统的性能优势,减少系统功率浪费,带功率分配的 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统在中继 R 接收到的叠加值为:

$$W_{\rm R} = P_{\rm A}X_{\rm A} + P_{\rm B}X_{\rm B} + n_{\rm AR} + n_{\rm BR},\tag{4}$$

其中, P_A 、 P_B 分别表示 A、B节点发送信号的功率. 下行阶段中继节点发送信号的功率为 P_R ,当 $P_A = P_B = P_R$ 时,表示系统等功率分配.

不考虑信号衰落等问题,系统经过功率分配比为 $r = P_A/P_B$ 的非对称调制后,得到的调制信号分别为 $X'_A = P_A X_A, X'_B = P_B X_B$.在没有信道噪声的影

响下,中继 R 接收到两路叠加信号 $W'_{R} = X'_{A} + X'_{B} = P_{A}X_{A} + P_{B}X_{B}$,此时系统得到新的中继接收矩阵 M',为:

 $M' = \begin{bmatrix} P_1 + jP_A & P_1 - jP_A & -P_2 + jP_A & -P_2 - jP_A \\ P_2 + jP_A & P_2 - jP_A & -P_1 + jP_A & -P_1 - jP_A \end{bmatrix}, (5)$ 其中, $P_1 = P_A + P_B, P_2 = P_A - P_B$. PNC 映射矩阵 **G** 保持不变.

同理,矩阵 M' 与矩阵 G 中的值为一一对应关系,并根据行列坐标形成映射关系,再根据最小距离算法划分判决区域,得到带功率分配的 PNC 系统中继解调映射方案.

2.3 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统 实例 图 5 为 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统的一个实例. 上行阶段: A 节点发送信息 $S_A = 01$, 经 QPSK 调制得到 $X_A = 1 - j$; 同时 B 节点发送信息 $S_B = 1$, 经 BPSK 调制得到 $X_B = -1$, 将两个调制信息发送到中继 R, 叠加后得到 $Y_R = -j$, 根据映射方案得到映射结果 $S_R = 3$.

下行阶段: 中继 R 将映射结果 $S_R = 3$ 经 QPSK 调制后得到 $X_R = -1 - j$, 分别广播到 A、B 节点, 解 调得到 $S'_R = 11$, 并与初始信息按规则进行比特异 或分别得到 $S'_A = 0 \oplus 1 = 1$, $S'_B = 10 \oplus 11 = 01$.





2.4 QPSK-BPSK 调制下联合 LDPC 码的 PNC 系统译码算法 在 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统中引 人 LDPC 码只会改变初始信息流的长度,不会改变 其结构.同理,根据表 1 中的实部信息与高位信息、虚部信息与低位信息——对应的关系,可以得到 QPSK-BPSK 调制下联合 LDPC 码的 PNC 系统中继节点的译码映射方案.根据映射方案可以将式(1) 表示为复数形式,即:

$$Y_{\rm R} = Y_{\rm R1} + j \times Y_{\rm R2}. \tag{6}$$

中继接收值的实部信息 *Y*_{R1} 与 A、B 节点的初 始信息流都相关,而中继接收值的虚部信息 *Y*_{R2} 与 B 节点的初始信息流不存在相关性,只与 A 节点的 初始信息流相关.因此在上行阶段进行编码时,需 要将 A 节点的初始信息流分为奇数位和偶数位两 路信号,分别进行 LDPC 编码,然后合成一路信号 进行调制,再与 B 节点处理后的信息在中继 R 进 行叠加,以保证中继接收值与初始信息流的相 关性.

中继 R 得到叠加信息后,由于系统采用非对称调制,使用 LLR-BP 算法进行译码时,需要根据中继接收值与初始信息流的相关性,分别计算中继

接收值实部和虚部的初始软信息.

根据文献 [17-18], 在加性高斯白噪声信道中 采用 LLR-BP 译码算法, 实部 Y_{R1} 的初始软信息为:

$$L_{\rm R1} = \ln \left(\frac{\frac{1}{4} e^{-\frac{(Y_{\rm R1}+2)^2}{2\sigma^2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{(Y_{\rm R1}-2)^2}{2\sigma^2}}}{\frac{1}{2} e^{-\frac{(Y_{\rm R1})^2}{2\sigma^2}}} \right).$$
(7)

虚部 Y_{R2} 的初始软信息为:

$$L_{\rm R2} = \ln \left(\frac{e^{-\frac{(Y_{\rm R2}-1)^2}{2\sigma^2}}}{e^{-\frac{(Y_{\rm R2}+1)^2}{2\sigma^2}}} \right) = \frac{2Y_{\rm R2}}{\sigma^2}.$$
 (8)

将实部和虚部的初始软信息输入译码器后分 别得到实部和虚部译码映射后的信息流 S_{RH} 和 S_{RL} , 再将两者合成一路信号, 即 $S_{\text{R}}(2 \times m - 1) =$ $S_{\text{RH}}(m), S_{\text{R}}(2 \times m) = S_{\text{RL}}(m)(其中 m = 1, 2, 3, \dots, K),$ 得到 PNC 映射值 S_{R} .

在下行阶段,对 PNC 映射值进行 LDPC 编码、 QPSK 调制后,通过广播发送到目的节点,并对接 收到的信息流进行 LLR-BP 译码,此时目的节点端 的初始软信息与中继接收值虚部的初始软信息相 等,将初始软信息输入译码器后得到译码映射结果 *S*_{RA}、*S*_{RB},其中 *S*_{RA}为节点 A 收到的信息, *S*_{RB}为 节点 B 收到的信息.

在系统中引入 LDPC 码同样不会影响目的节 点接收映射结果.同理,在下行阶段 QPSK-BPSK 调制下联合 LDPC 码的 PNC 系统与 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统在目的节点的比特异或规则相同.

A节点的比特异或规则为:

$$S'_{\rm B}(k) = S_{\rm A}(2 \times k - 1) \oplus S_{\rm RA}(2 \times k - 1).$$
 (9)

B节点的比特异或规则为:

$$\begin{cases} S'_{A}(2 \times k - 1) = S_{B}(k) \oplus S_{RB}(2 \times k - 1), \\ S'_{A}(2 \times k) = 0 \oplus S_{RB}(2 \times k), \end{cases}$$
(10)

其中, k = 1,2,3,…,K.

3 系统性能仿真分析

本节使用 Matlab 开发平台进行仿真,实验假 设系统两端交互的信息具有良好的同步性,传输信 道为标准加性高斯白噪声信道,不考虑信号衰落等 问题,仿真时节点 A 总数据量为 24 000 比特,信道 编码采用码长为 256,有效信息位长 224 的 LDPC 码,LLR-BP 译码算法的最大迭代次数为 40 次.

3.1 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统仿真 图 6 为上 行非对称信道下采用 QPSK-BPSK 调制的 PNC 系 统的误比特率(Bit Error Rate, BER)性能.在 0~6 dB 低信噪比区域内,系统 BER 曲线的减小量不到 10⁻¹数量级,变化较为平缓;在 6~12 dB 信噪比区 域内,随着信道条件转好,系统的 BER 值也从 10⁻¹ 数量级降到 10⁻³,变化趋势明显.虽然节点 A、B 两 端采用不同的调制方式,但 A 到 B 端、B 到 A 端两



图 6 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统 BER 性能 Fig. 6 The BER performance of QPSK-BPSK-PNC system

条端到端的 BER 性能曲线仅存在略微区别,整体 变化趋势基本一致,因此在后续仿真中,只选取 A 到 B 端的 BER 性能进行比较.





综上所述, NC 系统比 PNC 系统的误码率性能 较优, 但是在双向中继信道中采用 NC 技术完成一 次信息交互需要 3 个时隙, 而采用 PNC 技术只需 要 2 个时隙. 因此系统以一定的误码率性能为代价, 采用 PNC 技术的系统吞吐量能够提高 50%.

3.3 BPSK调制、QPSK-BPSK调制、QPSK调制 下PNC系统仿真 图 8 为基于 BPSK调制、QPSK 调制和 QPSK-BPSK调制的 PNC系统的 BER 性能. 从曲线整体变化看, BPSK-PNC系统端到端误码率性能较优, QPSK-BPSK调制 PNC系统端到端误码率性能较差. 从信噪比与误码率性能之间的相互关系看, 在 0~4 dB 低信噪比区域内, 3 个 PNC系统的 BER 性能相差较小,在4 dB 以上的高信噪比区域, 在 BER 为 10⁻³ 数量级时, QPSK-PNC系统的性能 比 BPSK-PNC 系统和 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统 的性能分别损失约 2.9、1 dB;在 BER 为 10⁻⁴ 数量 级时, QPSK-PNC 系统的性能比 BPSK-PNC 系统 和 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统的性能分别损失约 5、3 dB.



图 8 BPSK 调制、QPSK-BPSK 调制与 QPSK 调制下 PNC 系统 BER 性能

Fig. 8 The BER performance of BPSK-PNC, QPSK-BPSK-PNC and QPSK- PNC system

在图 8 中, 对 3 种 PNC 系统的传输性能进行 对比可知, QPSK-PNC 系统一次信息交换可传输 4 个比特数据, 其传输效率最高, BER 性能最差. BPSK-PNC 系统一次仅传输 2 个比特, 传输效率最 差, BER 性能最好. 而 QPSK-BPSK-PNC 系统一次 可传输 3 个比特, 相比 BPSK-PNC 系统而言, 传输 效率有 50% 的提升, BER 性能介于前两者之间. 当 信噪比优于 13 dB 时, QPSK-BPSK-PNC 系统的 BER 性能, 与 QPSK-PNC 系统相比, 有 7.6% 以上 的改善.

3.4 不同功率分配比下 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统仿真 图 9 为在不同功率分配方案下 QPSK-BPSK 调制的 PNC 系统的 BER 性能. 通过对图 9 中 6 条 BER 性能曲线的比较, 当功率分配比值在 1 附近时, BER 性能曲线相差较小. 当系统功率分 配比为 0.25、0.5、0.75、1、2、4 时, 信噪比分别约 在 19.3、14.4、12.4、11.9、15.7、21.6 dB 时 BER 性 能达到 10⁻³ 数量级. 通过对不同功率比下的 PNC 系统误码率性能对比, 当系统功率分配比为 1 时, 系统的 BER 性能最优.

3.5 QPSK-BPSK 调制下联合 LDPC 码的 PNC 系统方真 图 10 为 QPSK-BPSK 调制 PNC 系统与



图 9 不同功率分配比下的 QPSK-BPSK 调制 PNC 系 统 BER 性能

Fig. 9 The BER performance of QPSK-BPSK-PNC system under different power allocation

QPSK-BPSK 调制下联合 LDPC 码的 PNC 系统 BER 性能.在 0~10 dB 低信噪比区域内,此时信道条件 较差,加入信道编码前后的两个 PNC 系统 BER 性 能曲线变化趋势较为缓慢且极其接近,通过调整 LDPC 码的参数也不能很好地改善系统的 BER 性 能.当信噪比大于 10 dB 时,此时信道条件较优, BER 性能随着信噪比的增大呈现出联合 LDPC 码 的 PNC 系统 BER 性能较优的趋势. QPSK-BPSK 调制 PNC 系统与 QPSK-BPSK 调制下联合 LDPC 码的 PNC 系统分别约在 11.2、12 dB 时, BER 性能 达到 10⁻³ 数量级,联合 LDPC 码的 PNC 系统比 PNC



Fig. 10 The BER performance of PNC system before and after joint LDPC code

系统的 BER 性能提升约 0.8 dB.

根据上述分析, PNC 技术会导致一定的性能 损失, 但是可以通过采用信道编码技术来改善系统 的 BER 性能, 减小性能损失. 因此 QPSK-BPSK 调 制下联合 LDPC 码的 PNC 系统在保证吞吐率性能 的同时, 能够进一步改善系统的 BER 性能.

4 结语

在物理层网络编码系统中,针对上行非对称信 道,在源节点两端采取 QPSK-BPSK 调制,中继节 点制定解调映射算法,并在目的节点设计比特异或 规则,解决了终端进行异或时位数不相等的问题, 从而实现系统两端的信息交互过程.相较于传统对 称调制方案,在保证系统传输效率的前提下,采用 QPSK-BPSK 调制的 PNC 系统能够改善系统的信 息传输性能.而在功率优化分配方案下加入 LDPC 编码,能够进一步改善系统的误码率性能.

本文仅以上行非对称信道条件展开分析,而在 实际通信过程中信道条件是复杂多变的.因此,接 下来的研究将采用更高效的调制技术和功率分配 策略,以应对复杂多变的信道条件,进一步提升系 统传输的有效性与可靠性.

参考文献:

- [1] Ahlswede R, Li S R, Yeung R W, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1 204-1 216. DOI: 10.1109/18. 850663.
- [2] Zhang S L, Liew S C, Lam P P. Hot topic: Physical-layer network coding[C]// Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Los Angeles, CA, USA, 2006: 358-365.
- [3] Zhang H Y, Zheng L, Cai L. Design and analysis of heterogeneous physical layer network coding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 15(4): 2 484-2 497. DOI: 10.1109/TWC.2015.2504471.
- [4] Zhang X H, Hasna M O, Ghrayeb A. An adaptive transmission scheme for two-way relaying with asymmetric data rates[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(3): 1 477-1 491. DOI: 10.1109/TVT.20 15.2413992.
- [5] Arunachala C, Buch S D, Rajan S. Wireless bidirectional relaying using physical layer network coding with heterogeneous psk modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2 335-2 344. DOI:

10.1109/TVT.2017.2771325.

- [6] Chen Q Z, Yang T. On linear physical-layer network coding with non-identical modulation[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2021: 1-7. DOI: 10.1109/WCNC49053.2021. 9417472.
- [7] Peng T, Wang Y, Burr A G, et al. An adaptive optimal mapping selection algorithm for pnc using variable qam modulation[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 8(2): 412-415. DOI: 10.1109/LWC.2018.2874 052.
- [8] Li B, Ding X, Yang H, et al. Physical-layer network coding scheme over asymmetric rayleigh fading twoway relay channels[J]. Mobile Networks & Applications, 2017, 23(1): 80-85. DOI: 10.1007/s11036-017-0884-z.
- [9] 唐猛,陈建华,张艳,等. 基于分层调制的物理层网络编码研究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(10): 2 568-2 574. DOI: 10.11999/JEIT151470.
 Tang M, Chen J H, Zhang Y, et al. Physical-layer network coding based on hierarchical modulation[J].
 Journal of Electronics and Information Technology, 2016, 38(10): 2 568-2 574.
- [10] Tang M, Chen J H, Zhang Y, et al. Performance analysis for physical-layer network coding with hierarchical modulation[C]// IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), Beijing, China, 2016: 33-37. DOI: 10.1109/ICCSN.2016. 7586682.
- [11] Zhang H, Lei Z, Lin C. Design and analysis of hierarchical physical layer network coding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(12): 7 966-7 981. DOI: 10.1109/TWC.2017.2755017.
- [12] Awny S N, Jebur B A, Tsimenidis C C, et al. End-to-End performance of a 4/16-QAM hierarchical modulation scheme over rician fading channels[C]// Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, London, UK, 2020: 1-6. DOI: 10.1109/PIMRC48278.2020.9217323.
- [13] Chen S X, Zou W X, Zhou Z, et al. Relay denoising mapping approach design and performance analysis for heterogeneous physical-layer network coding with highorder modulation[J]. IET Communications, 2020, 14(10): 1 571-1 580. DOI: 10.1049/iet-com.2019.0386.
- [14] 唐猛. 基于分层调制的物理层网络编码在非对称双向 中继信道中的性能研究[D]. 昆明: 云南大学, 2017.
 Tang M. Performance analysis on physical layer network coding with hierarchical modulation in asymmetric channels[D]. Kunming: Yunnan University, 2017.

- [15] Bao J R, Lin Y X, Liu C, et al. Optimized antenna selection and adaptive power allocation for physical layer network coding with selective soft-message-forward cooperation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 92 342-92 351. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2994046.
- [16] Li B, Wang G, Chong P H J, et al. Performance of physical-layer network coding in asymmetric two-way relay channels[J]. China Communications, 2013, 10(10): 65-73. DOI: 10.1109/CC.2013.6650320.
- [17] 张亚鹏, 唐猛, 李海华, 等. 物理层网络编码与 LD-PC 码联合系统设计及性能优化[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2020, 42(1): 28-35. DOI: 10.7540/j.ynu. 20190226.

Zhang Y P, Tang M, Li H H, et al. Joint design and performance optimization of physical-layer network coding and LDPC code[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2020, 42(1): 28-35.

[18] 唐猛,李海华,谢灵运,等.多中继物理层网络编码系统加密设计及安全性能研究[J].云南大学学报:自然科学版,2021,43(4):652-662.DOI:10.7540/j.ynu.20200431.

Tang M, Li H H, Xie L Y, et al. Multi-relay physical layer network coding based on encryption technology and security performance analysis[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2021, 43(4): 652-662.

Design and performance analysis of physical-layer network coding system under asymmetric modulation

FANG Tai-bin, TANG Meng^{**}, CHEN Qing-hao, CHEN Jian-hua, ZENG Guo-feng (School of Information Science & Engineering, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: For asymmetrical channels, using the same modulation method at both ends of the communication system to send signals will cause problems such as high bit error rate and waste of transmission power. In the proposed scheme, a physical layer network coding scheme based on asymmetric modulation is designed. Firstly we propose the system model of the scheme and formulate the demodulation mapping rules at the relay node. Then we analyze the system under different power allocation ratios. Finally, we introduce the LDPC code as channel coding in the system, and design the corresponding decoding mapping scheme. Numerical results show that under asymmetric channel conditions, compared with the traditional symmetric modulation scheme, the decoding accuracy of asymmetric modulation scheme is improved by 7.6%.

Key words: asymmetric modulation; Physical-layer Network Coding (PNC); Low-Density Parity-Check (LDPC) codes; power allocation