



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 多用户大规模LDPC-SM-MIMO联合分层消息传递检测

邹鑫, 张顺外

引用本文

邹鑫, 张顺外. 多用户大规模LDPC-SM-MIMO联合分层消息传递检测[J]. 计算机科学, 2023, 50(11): 327-332.

ZOU Xin, ZHANG Shunwai. [Joint Layered Message Passing Detection for Multi-user Large-scale LDPC-SM-MIMO System](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(11): 327-332.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### [一种新的基于子连接结构的混合预编码算法](#)

New Hybrid Precoding Algorithm Based on Sub-connected Structure

计算机科学, 2022, 49(5): 256-261. <https://doi.org/10.11896/jsjx.210300138>

### [LDPC自适应最小和译码算法及其FPGA实现](#)

LDPC Adaptive Minimum Sum Decoding Algorithm and Its FPGA Implementation

计算机科学, 2021, 48(6A): 608-612. <https://doi.org/10.11896/jsjx.200800134>

### [基于物理层安全的空间调制系统天线选择算法](#)

Antenna Selection for Spatial Modulation Based on Physical Layer Security

计算机科学, 2020, 47(7): 322-327. <https://doi.org/10.11896/jsjx.190600133>

### [大规模MIMO室外无线光通信系统中基于分段高斯近似的最大似然盲检测算法](#)

Maximum Likelihood Blind Detection Algorithm Based on Piecewise Gaussian Approximation for Massive MIMO Outdoor Wireless Optical Communication Systems

计算机科学, 2020, 47(3): 255-260. <https://doi.org/10.11896/jsjx.190200310>

### [基于查找表的ADMM译码算法中量化算法优化研究](#)

Study on Optimization of Quantization Algorithm in ADMM Decoding Algorithm Based on Lookup Table

计算机科学, 2019, 46(11): 328-333. <https://doi.org/10.11896/jsjx.181001871>

# 多用户大规模 LDPC-SM-MIMO 联合分层消息传递检测

邹鑫 张顺外

南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003

(1178733921@qq.com)

**摘要** 对于多用户大规模空间调制多输入多输出(Spatial Modulation Multiple Input Multiple Output, SM-MIMO)系统,消息传递检测(Message Passing Detection, MPD)是常用的检测算法,但其复杂度较高。针对该问题,引入基于分层消息传递机制的分层MPD(Layered MPD, LMPD)算法以加快算法收敛速度,降低算法复杂度。进一步,将低密度奇偶校验码(Low-density Parity-check, LDPC)与SM-MIMO系统相结合,提出联合LMPD-BP(Joint LMPD Belief Propagation, JLMPD-BP)算法,LMPD算法可利用BP算法反馈的概率信息,提升系统检测性能。理论分析与仿真结果表明:与传统MPD算法相比,LMPD算法在不损失误码率性能的前提下可加快算法收敛速度,当信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)为4 dB时,MPD算法需3次迭代才能达到收敛,而LMPD算法仅需2次迭代即可收敛;同时,通过与LDPC码结合,JLMPD-BP算法极大地降低了系统误码率,如在迭代次数为(2, 2, 2)、SNR=2 dB时,与迭代次数为(4, 4, 0)的LMPD-BP算法相比,JLMPD-BP算法的误码率由 $10^{-2}$ 降至 $5 \times 10^{-3}$ 。

**关键词:** 分层消息传递检测;空间调制;大规模MIMO;LDPC码;置信度传播

**中图分类号** TN929.5

## Joint Layered Message Passing Detection for Multi-user Large-scale LDPC-SM-MIMO System

ZOU Xin and ZHANG Shunwai

College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract** Message passing detection(MPD) is the most commonly used detection algorithm in multi-user large-scale spatial modulation multi-input multi-output(SM-MIMO) systems, but the traditional MPD algorithm is still complex. To overcome this problem, the layered MPD(LMPD) algorithm is used to accelerate the convergence speed of the algorithm. Then, low-density parity-check(LDPC) codes are combined with SM-MIMO systems, and a joint LMPD-belief propagation(JLMPD-BP) algorithm in which the LMPD can use the feedback information of BP decoding is proposed to further improve the system detection performance. Theoretical analysis and simulation results show that, compared with the traditional MPD algorithm, the LMPD algorithm accelerates the convergence speed of the algorithm without losing the bit error rate(BER) performance. For example, when the signal-to-noise ratio is 4 dB, LMPD algorithm need only 2 iterations, while MPD algorithm need 3 iterations. At the same time, thanks to the great advantages of LDPC codes, JLMPD-BP algorithm greatly reduces BER of the system. When the iteration number is (2, 2, 2) and SNR=2 dB, compared with LMPD-BP algorithm with iteration (4, 4, 0), the BER of JLMPD-BP algorithm decreases from  $10^{-2}$  to  $5 \times 10^{-3}$ .

**Keywords** Layered message passing detection, Spatial modulation, Large-scale MIMO, Low-density parity-check code, Belief propagation

## 1 引言

多用户大规模空间调制指多个用户通过空间调制(Spatial Modulation, SM)技术与部署的大规模天线基站进行

通信<sup>[1-2]</sup>。大规模天线大大提升了系统的频谱效率、能量效率及可靠性。此外,SM技术<sup>[3-4]</sup>将一组发送的比特信息分为两部分,一部分经过传统调制,另一部分选择天线序号,用于发送信息。因此,系统可以有效避免信道间干扰以及实现良好

到稿日期:2022-09-13 返修日期:2023-06-09

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究项目(20KJB510034);南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室开放研究基金(JZNY202112);南京邮电大学国自基金孵化项目(NY219073)

This work was supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions(20KJB510034), Open Research Fund of Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology(Nanjing University of Posts and Telecommunications), Ministry of Education(JZNY202112) and NUPTSF(NY219073).

通信作者:张顺外(swzhang@njupt.edu.cn)

的数据传输速率。文献[5]的研究表明,多用户 SM-MIMO 的性能明显优于传统多用户 MIMO 系统。也因 SM 技术,相对于传统多用户 MIMO 系统,SM-MIMO 系统可以实现较低复杂度的检测算法。文献[6]将最大似然检测(Maximum Likelihood Sequence Detection, ML)用于空间调制系统,虽可获得最佳检测性能,但随着发送接收天线数目的增加,其计算复杂度呈指数级增长,复杂度依然很高。文献[7]在最小均方误差检测(Minimum Mean Square Error, MMSE)基础上研究了有序最近相邻搜索的 MMSE 检测(Ordered Nearest Neighbor Search MMSE, NNS-MMSE),具有较好的检测性能,但其涉及矩阵求逆过程,系统的计算负担大大增加。文献[8]提出了一种应用于大规模多用户 SM-MIMO 的消息传递检测(MPD)算法,与 ML 检测相比,MPD 以一定的检测性能损失为代价大大降低了算法复杂度。与 MMSE 检测相比,其不涉及矩阵求逆,算法复杂度低,且性能远远优于 MMSE 检测。因此,MPD 算法被广泛应用于 SM-MIMO 系统检测中。

低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check, LDPC)是由 Gallager 于 1963 年提出的一类具有稀疏校验矩阵的线性分组码<sup>[9]</sup>,它几乎适用于所有信道,因此一直是编码界的研究热点<sup>[10-12]</sup>。其性能逼近香农极限、编解码简单、时延小等特点非常适合高速信息传输系统。LDPC 译码方法主要为置信度传播译码(Belief Propagation, BP)算法。文献[13]中提出了概率域 BP 检测算法,其原理是基于 Tanner 图,图中每个节点独立工作,通过信息算法在变量节点和校验节点之间前后传递来更新信息直到算法结束。

LDPC 码常常与 MIMO 系统结合<sup>[14-15]</sup>,因此高性能、高效率的检测方案是 LDPC-MIMO 系统研究的关键。传统的 LDPC-MIMO 检测方法是将 MIMO 检测与 LDPC 译码当成两个独立模块,二者检测互不影响,该方案实现简单,但性能有限。为解决该问题,文献[16]和文献[17]提出了一种基于因子图的联合检测译码算法,信息在 MIMO 检测与 LDPC 译码之间互相传递,使得算法中信息更加可靠,降低了错误译码概率,从而提升了系统性能。

文献[18]利用分层消息传递机制对 LDPC 码进行分层译码,改变变量节点和校验节点的信息相互传递顺序。译码过程分层进行,当某层完成信息更新后,立刻将信息传给下一层。而传统译码算法需经过多次迭代概率消息才趋于稳定。分层消息传递能够在译码过程中使用最新更新信息,直接提升算法收敛速度,减少译码迭代次数从而降低整体算法所需的计算复杂度。

鉴于分层消息传递机制以及联合迭代的优势,首先,将分层消息传递机制引入 MPD 算法中,提出了分层 MPD(Layered MPD, LMPD)算法;然后,将 LDPC 与 SM-MIMO 系统相结合,进一步提出了一种联合 LMPD-BP(Joint LMPD-BP, JLMPD-BP)检测算法;最后,分别对 LMPD 算法、LMPD-BP 算法以及 JLMPD-BP 算法性能进行数值仿真研究。

## 2 LDPC-SM-MIMO 系统

多用户 LDPC-SM-MIMO 系统如图 1 所示,  $K$  个用户

基于 SM 技术向同一基站传输信息,每个用户配置了  $n_i$  根发送天线,基站配置了  $N$  根大规模的接收天线。为进一步提升可靠性,系统采用 LDPC 对信源信息编码。每个用户一个时隙发送  $B = \lfloor \log_2 |\mathbb{A}| \rfloor + \lfloor \log_2 n_i \rfloor$  个比特,  $\mathbb{A}$  表示调制符号集,系统一个时隙可传输  $K \times B$  比特。

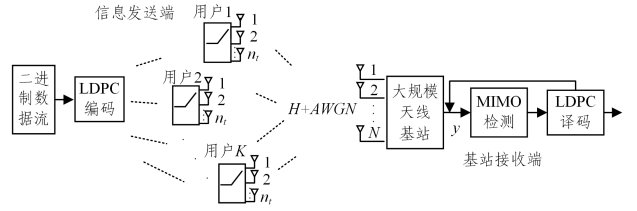


图 1 多用户大规模 LDPC-SM-MIMO 系统模型

Fig. 1 Multi-user large-scale LDPC-SM-MIMO system model

LDPC-SM-MIMO 系统对信源信息进行 LDPC 编码得到长度为  $C$  的码字  $\mathbf{c}$ ,再由  $K$  个用户经过分布式处理均匀发送给基站。因此,基站接收端需接收  $T = C / (K \times B)$  个时隙的信息才能接收到一个完整的码字  $\mathbf{c}$ 。

每个用户 SM-MIMO 具体实现如图 2 所示。

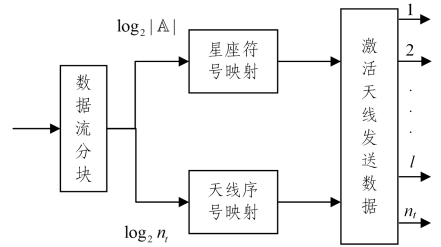


图 2 空间调制示意图

Fig. 2 Diagram of spatial modulation

假定系统一个时隙发送的信息为  $\mathbf{x} \triangleq [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_K^T]^T$ ,其中  $\mathbf{x}_k$  表示第  $k$  个用户发送的信息,  $\mathbf{x}_k \in \mathbb{S}_{n_i, \mathbb{A}}$ ,  $\mathbb{S}_{n_i, \mathbb{A}}$  为用户发射信息符号集。 $\mathbf{x}_k$  中的调制信息以及选择天线序号所需的比特均属于待传输码字  $\mathbf{c}$ 。

$$\mathbb{S}_{n_i, \mathbb{A}} = \{s_q : q = 1, \dots, n_i \times |\mathbb{A}|\} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } s_q = [0, \dots, 0, s_l, 0, \dots, 0]^T, s_l \in \mathbb{A}$$

$\mathbf{H}$  为  $N \times Kn_i$  矩阵,表示系统信道增益,其元素服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布。基站接收信息为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ ,  $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_N]^T$ 。  $n_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) 是均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的复高斯随机变量。基站接收  $T$  个时隙的信息后,进行联合检测译码。

## 3 LDPC-SM-MIMO 系统检测算法

为解决多用户大规模 SM-MIMO 系统中的 MPD 算法复杂度较高的问题,本文在 MPD 算法基础上,提出了 LMPD 算法以加快算法收敛速度。进一步将 LDPC 码的 BP 译码与 SM-MIMO 的 LMPD 检测算法相结合,提出联合 JLMPD-BP 算法以提升系统性能。

### 3.1 LMPD 算法

传统 MPD 检测算法迭代示意图如图 3 所示,其中  $K$  个用户表示为变量节点  $v_k$  ( $1 \leq k \leq K$ ),  $N$  个接收天线表示为

观测节点  $w_i (1 \leq i \leq N)$ 。在该算法中,下一次迭代所需的信息都需要等待上一次迭代完毕后才能进行更新,因此在一次迭代检测过程中不能利用最新传递的可靠信息,这就降低了译码算法收敛速度,需要更多的迭代次数才能正确译码。

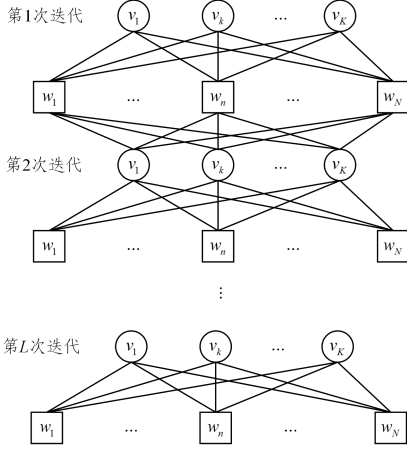


图3 MPD算法迭代因子图

Fig. 3 Iterative tanner graph of MPD algorithm

分层消息传递机制在一次迭代过程中对因子图进行分层检测,将  $N$  个检测节点分为  $N$  层。其改变了变量节点和校验节点信息相互传递的顺序,使检测过程分层进行,当某层完成信息更新,立即将更新后的信息传递给下一层。

在一次迭代过程中,分层消息传递机制示意图如图4所示。

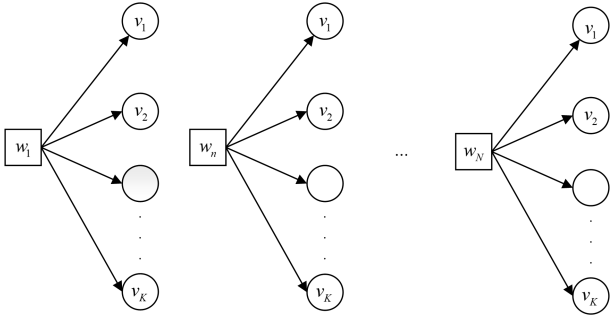


图4 分层消息传递机制示意图

Fig. 4 Diagram of layered MPD

LMPD算法的具体步骤如下:

1) 初始化。令变量节点的初始化对数似然比  $\alpha$  为 0, 观测节点的初始化对数似然比  $\beta$  为 0, 即:

$$\alpha_{ki}(s_q) = \ln \frac{p(s_q)}{p(s_q)} = 0 \quad (3)$$

$$\beta_{ik}(s_q) = 0 \quad (4)$$

其中,  $\alpha_{ki}(s_q)$  和  $\beta_{ik}(s_q)$  分别表示变量节点传递给观测节点的似然比信息以及观测节点传递给变量节点的似然比信息。

2) 分层更新。基站将接收的对数似然比信息传递给观测节点,并计算第一层的观测节点似然比,即:

$$\alpha_{ki}^{l-1}(s_q) = \alpha_k^{l-1}(s_q) - \beta_{ik}^{l-1}(s_q) \quad (5)$$

$$\beta_{ik}^l(s_q) = \frac{2h_{i,[k]}(y_i - \mu_{ik}^{l-1})(s_q - s_0) - h_{i,[k]}^2(s_q - s_0^2)}{2(\sigma_{ik}^2)^{l-1}} \quad (6)$$

其中,  $l$  代表第  $l$  次迭代,  $\mu_{ik}$  和  $\sigma_{ik}^2$  分别表示其他用户对第  $k$  个用户干扰的均值及方差,分别表示为:

$$\begin{aligned} \mu_{ik} &= \mathbb{E} \left[ \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{h}_{i,[j]} \mathbf{x}_j + n_i \right] \\ &= \sum_{j=1, j \neq k}^K \sum_{s \in S_{n_i, A}} p_{j,i}(s) \mathbf{h}_{i,[j]} s \\ &= \sum_{j=1, j \neq k}^K \sum_{s \in S_{n_i, A}} p_{j,i}(s) s_l H_{i,(j-1)n_i+l_i} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ik}^2 &= \text{Var} \left( \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{h}_{i,[j]} \mathbf{x}_j + n_i \right) \\ &= \sum_{j=1, j \neq k}^K \sum_{s \in S_{n_i, A}} p_{j,i}(s) |s_l H_{i,(j-1)n_i+l_i}|^2 - \sum_{s \in S_{n_i, A}} p_{j,i}(s) \\ &\quad |s_l H_{i,(j-1)n_i+l_i}|^2 + \sigma^2 \end{aligned} \quad (8)$$

3) 一个观测节点运算结束后,即第一层处理完成,更新对应的似然值,重复步骤2,继续处理下一个观测节点,具体更新如下:

$$\alpha_k^l(s_q) = \alpha_{ki}^{l-1}(s_q) + \beta_{ik}^l(s_q) \quad (9)$$

4) 当所有层处理完毕后,即完成一次迭代,继续重复上述步骤直到达到最大迭代次数。

LMPD算法与MPD算法的主要区别在于  $\alpha_{ki}(s_q)$  的计算,MPD算法中,

$$\alpha_{ki}^{(l)}(s_q) = \sum_{\tau=1, \tau \neq i}^N \beta_{ik}^{(\tau)}(s_q) \quad (10)$$

假设LMPD算法中,计算一次  $\beta_{ik}^l(s_q)$ ,  $\alpha_{ki}^{l-1}(s_q)$ ,  $\alpha_k^l(s_q)$  的复杂度分别为  $Q_1, Q_2, Q_3$ 。MPD算法中,计算一次  $\beta_{ik}^l(s_q)$  和  $\alpha_{ki}^{l-1}(s_q)$  的复杂度分别为  $Z_1$  和  $Z_2$ 。其中,  $Q_1$  与  $Z_1$  复杂度相同,  $Q_2$  和  $Q_3$  分别对应一次减法和一次加法,  $Z_2$  对应  $N-1$  次加法。由此可以得出,在一次迭代过程中LMPD与MPD算法的复杂度分别为:

$$C_{\text{LMPD}} = K \times N \times (n_i \times |\mathbb{A}|) (Q_1 + Q_2 + Q_3) \quad (11)$$

$$C_{\text{MPD}} = K \times N \times (n_i \times |\mathbb{A}|) (Z_1 + Z_2) \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可以得出,在一次迭代过程中,LMPD算法的复杂度略低于MPD算法的复杂度。同时,与MPD算法相比,LMPD算法收敛速度更快,它通过更少的迭代次数就能达到与MPD同样的检测性能,故复杂度更低。

### 3.2 JLMPD-BP检测算法

LDPC码的BP译码算法<sup>[13]</sup>首先初始化变量节点,然后每个变量节点通过校验节点相连的边将概率传递给校验节点,校验节点计算完信息后,又将更新的信息回传给变量节点,变量节点根据更新后的信息做一次判决,判断该码字是否是许用码字,即完成一次迭代过程。若不满足校验方程,则继续上述迭代过程,直到找到许用码字或到最大迭代次数,终止译码过程。

进一步将LDPC码的BP译码与SM-MIMO的LMPD检测算法相结合,提出联合JLMPD-BP算法,以进一步提升系统性能。

用户使用SM技术将编码码字  $\mathbf{c}$  在  $T$  个时隙内传输到基站。单个用户每个时隙传输  $B = F + R$  个比特,其中前  $F = \log_2 n_i$  个比特用于选择发送天线,后  $R = \log_2 |\mathbb{A}|$  个比特用于信息调制。基站端接收到  $T$  个时隙的信息后,立即对接收信息进行LMPD检测,检测结束后将得到的概率信息作为LDPC译码器输入,进行BP译码;而BP译码结束后,再将所得概率信息作为LMPD检测器算法输入进行检测。JLMPD-BP算法联合迭代实现如图5所示。

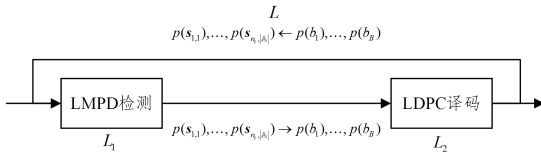


图5 JLMPD-BP联合迭代示意图

Fig. 5 Joint iteration diagram of JLMPD-BP algorithm

由于SM技术将 $B$ 个比特分为两部分,分别映射到发送天线和调制信息中,因此在LDPC码译码前,需将LMPD检测所得的概率信息进行概率转换,以此得到编码码字 $c$ 每个比特的概率。同样,在LDPC码译码结束后,传入LMPD时,也需进行概率转换以得到用户发送信息符号集中每个向量元素的概率。

#### 1) LMPD算法到BP算法处的概率转换

由用户的发送天线数 $n_t$ 以及采用的调制阶数 $|A|$ 可知,用户发送的信息向量集元素个数为 $q = n_t \cdot |A|$ ,为突显信息向量与天线序号以及调制符号之间的关系,将式(1)改写为:

$$S_{n_t, |A|} = [s_{1,1}, \dots, s_{n_t, a}, \dots, s_{n_t, |A|}] \quad (13)$$

其中, $s_{n_t, a}$ 表示选择第 $n$ 根发送天线以及第 $a$ 调制符号的发送向量。

经过LMPD检测后,得到的信息为 $q$ 个向量概率信息,即

$$p = [p(s_{1,1}), \dots, p(s_{n_t, a}), \dots, p(s_{n_t, |A|})] \quad (14)$$

需将上述所得概率信息转换至对应的 $B$ 个比特中。由于这些比特中,天线选择需 $F$ 比特,信息调制需 $R$ 比特,因此,概率转换规则如下:

$$p(F_n) = \sum_{a=1}^{|A|} p(s_{n_t, a}) \quad (15)$$

$$p(R_a) = \sum_{n=1}^{n_t} p(s_{n_t, a}) \quad (16)$$

其中, $p(F_n)$ 表示前 $F$ 个比特选择第 $n$ 根天线的概率,且 $\sum_{n=1}^{n_t} p(F_n) = 1$ ;  $p(R_a)$ 表示后 $R$ 个比特对应第 $a$ 个调制符号的概率,且 $\sum_{a=1}^{|A|} p(R_a) = 1$ 。

经过 $T$ 个时隙后,可以得到编码码字 $c$ 所有比特的概率信息,将其作为BP译码的输入。

#### 2) BP算法到LMPD算法处的概率转换

BP译码结束后,可以得到对应编码码字 $c$ 的概率信息,比特之间相互独立,因此用户发射符号集元素概率可由式(17)得出:

$$p(s_{n_t, a}) = p(F_n) \cdot p(R_a) \quad (17)$$

将其作为LMPD算法的输入。

JLMPD-BP算法具体实现如算法1所示。

#### 算法1 JLMPD-BP算法

1. 初始化  $\alpha_k(s_q) = 0, \beta_{i,k}(s_q) = 0$ , // LMPD算法初始化输入
2. for  $l = 1 : L$  // 联合迭代开始
3. LMPD算法开始
  - 式(3)–式(9) // LMPD算法
4. 进行概率转换
  - 式(15)、式(16) // 概率转换结束,得到BP译码的输入

#### 5. BP译码开始

BP算法<sup>[13]</sup>

#### 6. 进行概率转换

式(17) // 概率转换结束,得到LMPD算法的下一轮输入

#### 7. end for

#### 8. 判决输出

作为比较基准,LMPD算法与BP译码被当成独立的单元进行检测迭代,将没有联合迭代的算法记为LMPD-BP算法。在该算法中,LMPD算法检测结束后,将信息向量对应的概率信息转换成比特概率信息,再作为BP检测输入进行译码,译码结束后无须将BP检测结果反馈回LMPD算法中。LMPD算法1次迭代复杂度为 $C_{LMPD}$ ,记BP译码1次迭代复杂度为 $C_{BP}$ , $L_1$ 表示LMPD算法的迭代次数, $L_2$ 表示BP译码算法的迭代次数, $L$ 表示联合迭代次数,则JLMPD-BP算法复杂度为:

$$C_{JLMPD-BP} = L \times (L_1 \times C_{LMPD} + L_2 \times C_{BP}) \quad (18)$$

## 4 仿真结果与分析

本章通过仿真分析比较LMPD算法、LMPD-BP算法及JLMPD-BP算法的性能。在多用户大规模LDPC-SM-MIMO系统中,信道为瑞利衰落信道,其增益服从均值为0、方差为1的复高斯分布,系统采用BPSK调制方式。LDPC码为正规LDPC码,码长为1024,码率为1/2,行重 $d_r = 6$ ,列重 $d_c = 3$ ,采用概率BP译码。 $(L_1, L_2, L)$ 表示JLMPD-BP算法中的迭代次数,其中 $L_1$ 表示LMPD算法的迭代次数, $L_2$ 表示BP译码算法的迭代次数, $L$ 表示联合迭代次数; $(L_1, L_2, 0)$ 则表示LMPD-BP算法中的迭代次数。

### 4.1 LMPD算法误码率与收敛速度仿真

本节研究LMPD算法的BER性能以及收敛速度。用户数 $K = 16$ ,发送天线数 $n_t = 2$ ,基站接收天线数 $N = 64$ 。LMPD和MPD算法迭代次数均为5次。

图6比较了LMPD算法与MPD算法的BER性能。信噪比为0~4 dB时,LMPD与MPD算法的性能几乎相同,这是因为在低信噪比下,噪声干扰比较严重,导致性能并未出现明显差异。信噪比大于4 dB时,差异逐渐显现,LMPD的BER性能略优于MPD算法。如 $BER = 10^{-4}$ 时,LMPD比MPD算法的性能高出约0.2~0.3 dB。

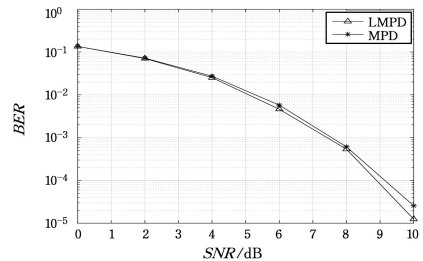


图6 LMPD与MPD算法的BER比较

Fig. 6 BER comparison of LMPD and MPD algorithms

图7比较了LMPD算法与MPD算法的收敛速度。在信噪比为4 dB与8 dB的情况下,MPD算法在第3次迭代时收敛,LMPD算法在第2次迭代时收敛。且收敛之前,LMPD

算法的性能要优于 MPD 算法。如在第 2 次迭代,信噪比为 8 dB 时,系统 BER 由  $2.7 \times 10^{-3}$  下降到  $5.8 \times 10^{-4}$ 。这表明了分层传递消息机制能有效加快算法收敛速度,且在未收敛前对性能有极大提升。

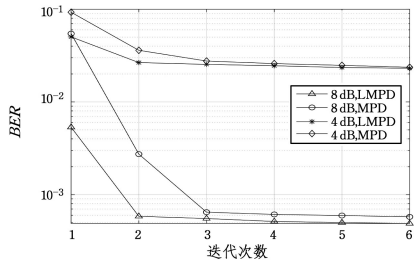


图 7 LMPD 与 MPD 算法的收敛速度比较

Fig. 7 Convergence speed comparison of LMPD and MPD algorithms

#### 4.2 迭代次数对 JLMPD-BP 算法的误码率仿真

本节研究 JLMPD-BP 算法的 BER 性能,分析迭代次数对算法性能的影响。用户数  $K=16$ ,每个用户发送天线数  $n_t=2$ ,基站接收天线数  $N=64$ 。

图 8 比较了 JLMPD-BP 算法中不同迭代次数对系统误码率的影响。在  $BER=10^{-3}$  时,迭代次数为 (1,1,3) 与 (1,1,2) 相比,系统能获得大约 1 dB 的性能增益。在  $BER=10^{-4}$  时,迭代次数为 (2,2,3) 与 (2,2,2) 相比,系统能获得大约 0.5 dB 的性能增益。表明联合迭代次数的增加能明显提升系统性能,充分发挥出 LMPD 和 BP 译码算法联合检测的译码优势。从图中还可以看出,算法内部迭代次数也会影响系统 BER 性能。如信噪比为 3.5 dB 时,迭代次数为 (1,1,2) 与 (2,2,2) 相比,系统误码率从  $3.8 \times 10^{-3}$  下降到  $2 \times 10^{-5}$ 。说明适当增加算法内部迭代次数,对系统性能也有极大提升。

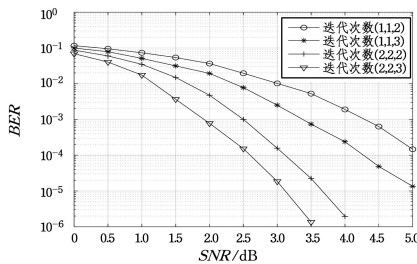


图 8 迭代次数对 JLMPD-BP 算法 BER 的影响

Fig. 8 Effect of iteration numbers on BER of JLMPD-BP algorithm

#### 4.3 不同用户数、发送天线和接收天线下系统误码率仿真

本节研究 LDPC-SM-MIMO 系统在不同用户数、发送天线数以及接收天线数下的 BER 性能。用户数为 8 和 16,用户发送天线数为 2 和 4,接收天线为 64 以及 128,迭代次数为 (1,1,2)。

从图 9 可以看出,当用户发送天线均为  $n_t=2$ 、接收天线  $N=64$ 、误码率  $BER=10^{-3}$  时,8 个用户的系统比 16 个用户的系统能多获得大约 3.5~3.7 dB 的性能增益。这是因为用户数较少时,用户与用户之间干扰较少,检测算法能发挥出更优性能。当用户数均为  $K=16$ 、接收天线  $N=64$ 、误码率  $BER=10^{-2}$  时,用户发送天线  $n_t=2$  的性能比  $n_t=4$  要大多约 1.5 个 dB。主要原因是天线数较多,干扰也较大,导致了

性能降低。当用户数均为  $K=16$ 、发送天线  $n_t=4$ 、信噪比为 4.5 dB 时,接收天线  $N=128$  与  $N=64$  相比,误码率从  $10^{-2}$  下降到  $2.4 \times 10^{-4}$ 。这是因为基站接收天线越多,系统能够获得的分集增益也越高,算法性能也因此得以提升。

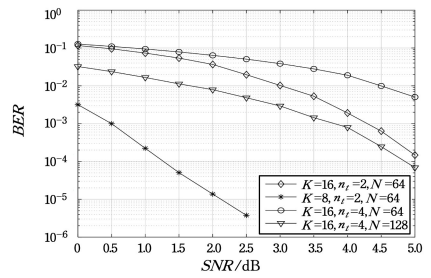


图 9 LDPC-SM-MIMO 系统在不同条件下的 BER 比较

Fig. 9 BER comparison of LDPC-SM-MIMO system under various conditions

#### 4.4 JLMPD-BP 与 LMPD-BP 算法误码率及复杂度比较

本节比较 JLMPD-BP 与 LMPD-BP 算法的 BER 性能。用户数  $K=16$ ,每个用户发送天线数  $n_t=2$ ,基站接收天线数  $N=64$ 。

图 10 比较了 JLMPD-BP 与 LMPD-BP 算法在不同迭代次数下的 BER 性能。在低信噪比 0~1.5 dB 时,JLMPD-BP 算法与 LMPD-BP 算法的性能差距不大,但 JLMPD-BP 的迭代次数为 (2,2,2) 时,其性能明显更优。随着信噪比增加,两者的性能差距逐渐显现。在迭代次数较少时,JLMPD-BP 性能要低于 LMPD-BP 算法。如 JLMPD-BP 迭代次数为 (1,1,2)、LMPD-BP 迭代次数为 (2,2,0)、信噪比为 4.5 dB 时,系统误码率从  $5.3 \times 10^{-4}$  降低到  $2.9 \times 10^{-5}$ 。这是由于 JLMPD-BP 算法内部迭代次数较少,算法迭代后的概率信息可靠性较低,虽然 BP 译码反馈后的概率信息被反馈回 LMPD 算法中,但联合迭代后的信息仍不够可靠。随着迭代次数的增加,与 LMPD-BP 算法相比,JLMPD-BP 性能优势逐渐体现出来。如 JLMPD-BP 迭代次数为 (2,2,2)、LMPD-BP 迭代次数为 (4,4,0)、 $BER=10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  以及  $10^{-5}$  时,系统均能获得大约 0.2~0.3 dB 的性能增益。这是因为内部迭代次数足够多,即内部迭代后所得的概率信息可靠性高。此外,在联合迭代中,LMPD 还能利用 BP 译码反馈的可靠信息进一步提升整体信息可靠性,因此 JLMPD-BP 性能更佳。

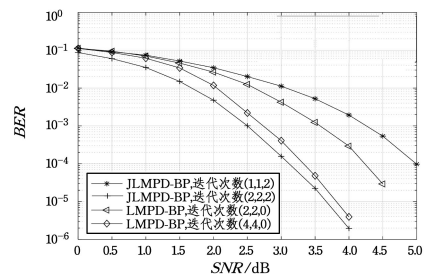


图 10 JLMPD-BP 与 LMPD-BP 算法的 BER 比较

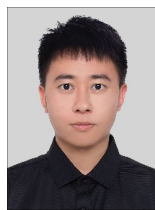
Fig. 10 BER comparison of JLMPD-BP and LMPD-BP algorithms

**结束语** 本文针对多用户大规模 SM-MIMO 系统,在 MPD 检测算法基础上,引入基于分层消息传递机制的

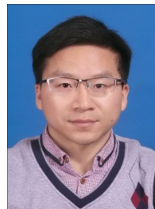
LMPD 算法, 研究表明 LMPD 算法能够在不损失性能的前提下, 有效加快算法的收敛速度, 如在信噪比为 8 dB 时, 要达到  $BER = 10^{-3}$ , LMPD 只需 2 次迭代, 而 MPD 需 3 次迭代。与传统 SM-MIMO 系统相比, 本文方法通过与 LDPC 码结合, 充分发挥了 LDPC 码的优势, 并进一步提出了联合 JLMPD-BP 检测算法, 系统性能得到极大提升。研究结果表明 JLMPD-BP 算法可以通过联合迭代提升算法中信息的可靠性, 其性能优于 LMPD-BP 算法, 且随着内部迭代次数或联合迭代次数的增加, JLMPD-BP 算法性能优势愈加明显, 如当信噪比为 3.5 dB, 迭代次数由 (1, 1, 2) 变为 (2, 2, 2) 时, 系统误码率从  $5 \times 10^{-3}$  降到  $2 \times 10^{-5}$ 。

## 参考文献

- [1] YU X, HU Y, GUI G, et al. Performance Analysis of Uplink Massive Multiuser SM-MIMO System With Imperfect Channel State Information[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(10): 6200-6214.
- [2] LI Q, YU X, XIE M, et al. Performance analysis of uplink massive spatial modulation MIMO systems in transmit-correlated Rayleigh channels [J]. China Communications, 2021, 18(2): 27-39.
- [3] MAO T, WANG Q, WANG Z. Spatial modulation for terahertz communication systems with hardware impairments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 4553-4557.
- [4] GOUDEL I, PSOMAS C, KRIKIDIS I. Spatial-modulation-based techniques for backscatter communication systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 10623-10634.
- [5] SERAFIMOSKIL N, SINANOVIC S, DI RENZO M, et al. Multiple access spatial modulation [J]. EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking, 2012, 2012(1): 1-20.
- [6] JEGANATHAN J, GHRAVEB A, SZCZECINSKI L. Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(8): 545-547.
- [7] ZHENG J. Low-complexity detector for spatial modulation multiple access channels with a large number of receive antennas [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(11): 2055-2058.
- [8] NARASIMHAN T L, RAVITEJA P, CHOCKALINGAM A. Large-scale multi-user SM-MIMO versus massive MIMO [C] // 2014 IEEE Information Theory and Applications Workshop (ITA). San Diego, CA, USA, 2014: 1-9.
- [9] GALLAGER R. Low-density parity-check codes [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21-28.
- [10] ZHANG S W. LDPC-Coded Cooperation: Performance Studies and Codes Design [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [11] ZHANG Y, PENG K, CHEN Z, et al. Construction of rate-compatible raptor-like quasi-cyclic LDPC code with edge classification for IDMA based random access [J]. IEEE Access, 2019, 7: 30818-30830.
- [12] GHAFARI F, LE K. An Enhanced Check-Node Architecture for 5G New Radio LDPC Decoders [C] // 2021 28th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS). IEEE, 1-6.
- [13] CHEN J, FOSSORIER M P C. Near optimum universal belief propagation based decoding of low-density parity check codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(3): 406-414.
- [14] JING S, YANG J, ZHOU H, et al. Layered graph-merged detection and decoding of non-binary LDPC coded massive MIMO systems [C] // 2017 51st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2017: 1084-1088.
- [15] JING S, YANG J, WANG Z, et al. Algorithm and architecture for joint detection and decoding for MIMO with LDPC codes [C] // 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2017: 1-4.
- [16] NARASIMHAN T L, CHOCKALINGAM A, RAJAN B S. Factor graph based joint detection/decoding for LDPC coded large-MIMO systems [C] // 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2012: 1-5.
- [17] NARASIMHAN T L, CHOCKALINGAM A. Detection and decoding in large-scale MIMO systems: A non-binary belief propagation approach [C] // 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2014: 1-5.
- [18] HOCEVAR D E. A reduced complexity decoder architecture via layered decoding of LDPC codes [C] // IEEE Workshop on Signal Processing Systems, 2004. IEEE, 2004: 107-112.



**ZOU Xin**, born in 1997, postgraduate. His main research interests include massive multiple input multiple output and low-density parity-check codes.



**ZHANG Shunwai**, born in 1987, associate professor. His main research interests include advanced channel coding and cooperative communications.

(责任编辑: 何杨)