

基于旋转准正交空时分组码的 LDPC 编码性能

辛亮^{1,2}, 柏鹏², 彭卫东², 林志国^{1,2}

(1.空军工程大学装备管理与安全工程学院,陕西西安,710051;

2.空军工程大学综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心,陕西西安,710051)

摘要 为了提高空时分组码在多输入多输出通信系统的性能,提出一种新的准正交空时分组码,并且结合星座旋转设计和交织技术。通过星座旋转准正交空时分组码,以牺牲一定解码的简单性,来避免当天线数目大于2时,正交空时分组码码率下降的缺点;并与LDPC码进行级联编码,来降低系统误码率及提高系统的可靠性要求。多输入多输出通信系统可以很好地解决多径效应,获得很高的分集增益。仿真结果表明:与没有经过星座旋转的准正交空时分组码系统相比较,这种新的编码方法可以有效地降低误码率,提高系统的性能。在误码率 10^{-5} 时,CR-QOSTBC级联LDPC码与QOSTBC级联LDPC码相比有1.8 dB的信噪比改善,CR-QOSTBC级联LDPC码相对于未级联LDPC码的QOSTBC在 10^{-3} 时有5.3 dB性能提升。

关键词 MIMO;旋转准正交空时分组码;LDPC码;交织

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.06.016

中图分类号 TN929.5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)06-0072-05

A Study of LDPC Combined CR-QOSTBC Encoding Performance

XIN Liang^{1,2}, BAI Peng², PEN Wei-dong², LIN Zhi-guo^{1,2}

(1. Equipment Management and Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Synthetic Electronic Information System and Electronic Countermeasure Technology Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to improve the performance of the space-time block codes in multiple input and multiple output communication system, this paper proposes a new kind of quasi-orthogonal space-time block codes (QOSTBC) combined with the constellation rotation. Through the constellation rotation quasi-orthogonal space-time block codes (CR-QOSTBC), a certain decoding of simplicity can sacrifice themselves to avoid the bit rate decreased when the number of orthogonal space-time block codes (OSTBC) is greater than 2 to encode with LDPC code. The multiple input and multiple output communication system can be used to solve the problem of the multipath effect, and obtain high diversity gain. The simulation results show that this new kind of coding method can effectively reduce the bit error rate, and can also improve the performance of the system compared with the QOSTBC system without the constellation rotation. When the bit error rate is 10^{-5} , the CR-QOSTBC combined LDPC can improve by 1.8 dB compared with the QOSTBC

收稿日期: 2014-02-19

基金项目: 陕西省重点实验室基金资助项目(201102Y02)

作者简介: 辛亮(1989-),男,甘肃白银人,硕士生,主要从事通信与信息系统研究.E-mail: xin_liang1@163.com

引用格式: 辛亮, 柏鹏, 彭卫东, 等. 基于旋转准正交空时分组码的 LDPC 编码性能[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2014, 15(6): 72-76. XIN Liang, BAI Peng, PEN Weidong, et al. A Study of LDPC Combined CR-QOSTBC Encoding Performance[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(6): 72-76.

combined LDPC. When the bit error rate is 10^{-3} , the CR-QOSTBC combined LDPC can improve by 5.3 dB compared with the QOSTBC.

Key words: MIMO; CR-QOSTBC; LDPC- Codes; interweave

随着 MIMO 系统的出现,多径传播问题已经转变为对通信系统有益的因素^[1-2]。MIMO 系统利用了随机衰落和可能的时延扩展来提高传输速率,研究的关键放在如何提高系统的增益,因此研究的重点在于空时编码技术,并且提出了许多新的研究方法。空时编码技术已经变为当今通信领域中的热点方向。它有 3 种构成形式:空时分层码(LSTC)、空时网格码(STTC)和空时分组码(STBC),STBC 是基于空间复用的技术,其他 2 种是基于发射分集的技术。在它们当中,STBC 具有高分集增益和比较简单的编译码方法,应用前景最好。空时编码是一种有效的分集方式,正交空时分组码的符号之间相互正交,可以获得最大的分集增益,当发射天线大于 2 时,对于复数星座条件下而言,全速率正交空时分组码编码结构不存在,得不到码率为 1 的传输^[3-6]。

在正交空时分组码基础上,本文提出了一种新的准正交空时分组码(QOSTBC),这种新的准正交空时分组码不具有局部 Alamouti 码的特征。并且在这个基础上应用星座旋转的方法。由于错误矩阵 $D(C^i, C^j) = C^j - C^i$, C^j 和 C^i 是空时编码矩阵 C 下的任意两个码字,且 $C^j \neq C^i$,分集增益等于错误矩阵的秩与接收天线的乘积。在 1 个星座调制下,当发射天线为 N ,接收天线为 M 时,由于 QOSTBC 所有的符号都来自同 1 个星座,速率为 1 的复正交编码矩阵 C 达不到满分集增益 NM 。本文星座旋转准正交空时分组码(CR-QOSTBC)利用符号来自不同的 2 个星座,错误矩阵可以得到满秩,就可以达到满分集增益。

这种 CR-QOSTBC 通过星座的旋转,能够获得满分集增益和最大码传输速率。将 LDPC 码与这种 CR-QOSTBC 级联并且运用交织技术,通过建立系统模型,仿真得出 CR-QOSTBC 与 LDPC 码级联具有更好的误码率性能,这对新一代通信系统的发展具有深远的意义。

1 系统模型

准正交空时分组码牺牲一定的码元符号间的正交性,来获取最大的信息传输码率。旋转准正交空时分组码是将调制的星座图变为 2 个或者多个。本文设定信号映射的星座图为 2 个 (S_1, S_2),发射信号 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$,其中 (x_1, x_4) 属于 S_1 ,

(x_2, x_3) 属于 S_2 。调制输出信号为 $X = (x_1 e^{j\theta}, x_2, x_3, x_4 e^{j\theta})$,经过交织技术处理,然后经过信道编码。现有比较好的信道编码方式有 Turbo 码和 LDPC 码,本文采用的是 LDPC 码,最后经过空时编码将信号发射出去。接收端接收到来自于发射端发出的信号,经过空时译码,译码采用最大似然成对译码,经过 LDPC 译码,经过解交织后输出信号,最后将接收信号判决输出^[7]。

由于通信技术的发展,对于可靠性的要求也越来越高,特别是无线通信领域。由于信号传输的过程中存在干扰,使得信号失真。本文用信道编码来纠正信道中随机产生的错误,来提高通信的质量。但仅利用信道编码技术,对于传输过程中的突发性干扰就需要借助于很长的码字,这样增加了系统的复杂性,还会产生很大的时延。这个问题就需要交织技术来解决,交织技术可以将聚集的误码分散,使得误码更加分散化,发挥信道编码的优势。图 1 为级联 LDPC 编码的原理框图。

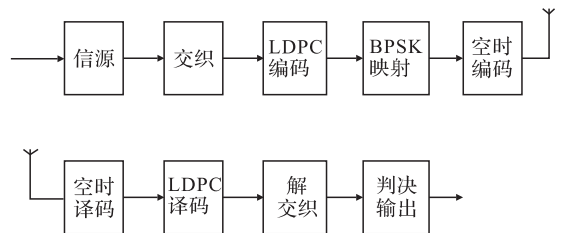


图 1 基于旋转准正交的 LDPC-空时编码框图
Fig.1 LDPC combined CR-QOSTBC encoding

2 旋转星座准正交空时分组码

2.1 准正交空时分组码

假定通信系统发射端有 N_T 根天线,接收端有 N_R 根天线,其传输模型定义为: $\mathbf{Y} = \sqrt{\rho/N_T} \mathbf{X} \mathbf{H} + \mathbf{W}$,其中 ρ 为每根接收天线上的平均符号能量噪声比。 $\sqrt{\rho/N_T}$ 来保证每根发射天线分配相同的发射功率, T 为发送码字的时隙数。 \mathbf{W} 为 $T \times N_R$ 维噪声矩阵, $\mathbf{Y} \in C^{T \times N_R}$ 为码元接收矩阵,其元素 $y_{p,q}$ 为第 q 根天线在 p 时刻的接收信号。在接收端的判决统计量为: $\|\mathbf{Y} - \sqrt{\frac{\rho}{N_T}} \mathbf{X} \mathbf{H}\|_F^2$, $\|x\|_F$ 为 F 范数,译码器选择使判决统计量取值最小的码字输出。由于是准正交空时分组码,不符合完全正交性,要用成对

符号差错概率分析,根据调制星座图得到最佳的译码输出。

2.2 新型准正交空时分组码的编码方法

下面给出一种新的准正交空时分组码,发射天线数目为4,接收天线数目为1,发射信号 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$,这种编码方式没有局部 Alamouti 码的特征^[8],编码矩阵为:

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ -x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 \\ x_3^* & x_4^* & -x_1^* & -x_2^* \\ x_4^* & -x_3^* & x_2^* & -x_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

这种准正交空时分组码的特点:

$$\mathbf{X}_{m \times n}^H \mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} m & n & 0 & 0 \\ -n & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & -n \\ 0 & 0 & n & m \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $m = \sum_{i=1}^4 |x_i|^2$, $n = x_1^* x_2 - x_1 x_2^* + x_3 x_4^* - x_3^* x_4$ 。

2.3 新型旋转星座准正交空时分组码的编码方法

本文设定信号映射的星座图为2个,分别是 S_1 和 S_2 ,其中 $S_2 = S_1 e^{j\theta}$,发射信号 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$,其中 (x_1, x_2, x_3, x_4) 属于 S_1 、 $(x_1 e^{j\theta}, x_4 e^{j\theta})$ 属于 S_2 ,调制输出信号 $X = (x_1 e^{j\theta}, x_2, x_3, x_4 e^{j\theta})$ 。在上面提出的准正交空时分组码的前提下,设计了新的旋转星座准正交空时分组码。这种基于 CR-QOSTBC 编码矩阵可以表示为:

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_1 e^{j\theta} & x_2 & x_3 & x_4 e^{j\theta} \\ -x_2 & x_1 e^{j\theta} & x_4 e^{j\theta} & -x_3 \\ x_3^* & (x_4 e^{j\theta})^* & (-x_1 e^{j\theta})^* & -x_2^* \\ (x_4 e^{j\theta})^* & -x_3^* & x_2^* & (-x_1 e^{j\theta})^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_{m \times n}^H \mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} m & n & 0 & 0 \\ -n & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & -n \\ 0 & 0 & n & m \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $m = \sum_{i=1}^4 |x_i|^2$ 、 $n = (x_1 x_2^* e^{j\theta})^* - (x_1 x_2^* e^{j\theta}) + (x_3^* x_4 e^{j\theta})^* - (x_3^* x_4 e^{j\theta})$,矩阵 $\mathbf{X}_{m \times n}^H \mathbf{X}_{m \times n}$ 是满秩的,相比与 QOSTBC 是能够达到满分集。

2.4 旋转星座准正交空时分组码译码方法

以这种新型旋转准正交空时分组码为例,其中 $x_m = x_1 e^{j\theta}$, $x_n = x_4 e^{j\theta}$,建立其数学模型:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m & x_2 & x_3 & x_n \\ -x_2 & x_m & x_n & -x_3 \\ x_3^* & x_n^* & -x_m^* & -x_2^* \\ x_n^* & -x_3^* & x_2^* & -x_m^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 r_1, r_2, r_3, r_4 为在时隙 $t = 1, 2, 3, 4$ 时接收天线接收到的信号, h_1, h_2, h_3, h_4 为信道传输参数, n_1, n_2, n_3, n_4 为噪声。对式(3)进行变换 $\mathbf{R} = \mathbf{\Omega X} + \mathbf{n}$,可得:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3^* \\ r_4^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \\ h_2 & -h_1 & -h_4 & h_3 \\ -h_3^* & -h_4^* & h_1^* & h_2^* \\ -h_4^* & h_3^* & -h_2^* & h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ x_2 \\ x_3 \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3^* \\ n_4^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

假设 $v_i (1, 2, 3, 4)$ 为编码矩阵 $\mathbf{X}_{m \times n}$ 的第 i 行,由(1)式可得:

$\langle v_1, v_3 \rangle = \langle v_1, v_4 \rangle = \langle v_2, v_3 \rangle = \langle v_2, v_4 \rangle = 0$,其中 $\langle v_i, v_j \rangle$ 为 v_i 和 v_j 的内积, $\langle v_1, v_2 \rangle = \langle v_3, v_4 \rangle \neq 0$ 。根据最大似然准则,解码过程为:

$$\min_{(x_m, x_2, x_3, x_n) \in S} \| \mathbf{R} - \sqrt{\frac{\rho}{N_T}} \mathbf{X}_{m \times n}^H \mathbf{n} \|_F^2 = \min f_{m2}(x_m, x_2) + \min f_{3,n}(x_3, x_n) \quad (7)$$

式中 S 为调制星座图中的点。接收端的最大似然译码简化为 f_{m2} 和 $f_{3,n}$ 最小值的和,是对 x_m, x_2 和 x_3, x_n 的联合译码^[9]:

$$f_{m2}(x_m, x_2) = \underset{(x_m, x_2) \in S}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 (|x_m|^2 + |x_2|^2) - 2\operatorname{Re}((h_1 r_1^* + h_2 r_2^*) x_m) + (-h_3 r_3^* + h_4 r_4^*) x_m^* + (h_2 r_1^* + h_1 r_2^*) x_2 + (h_3 r_4^* - h_4 r_3^*) x_2^* + (h_1 h_2^* + h_2 h_1^* - h_4 h_3^* - h_3 h_4^*) (x_m x_2^* + x_2 x_m^*) \quad (8)$$

$$f_{3n}(x_3, x_n) = \underset{(x_3, x_n) \in S}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 (|x_3|^2 + |x_n|^2) - 2\operatorname{Re}((h_3 r_1^* + h_4 r_2^*) x_3 + (h_1 r_3^* - h_2 r_4^*) x_3^* + (h_3 r_2^* + h_4 r_1^*) x_n + (h_2 r_3^* - h_1 r_4^*) x_n^* + (h_1 h_2^* + h_2 h_1^* - h_4 h_3^* - h_3 h_4^*) (x_3 x_n^* + x_n x_3^*)) \quad (9)$$

最大似然成对译码解出 x_m, x_2, x_3, x_n ,其中 (x_2, x_3) 用原始星座映射解调、 (x_m, x_n) 用旋转后的星座进行映射解调求得 (x_1, x_4) 。

3 交织

交织是指一串数据序列在一一对应的条件下进行数据的位置重排过程,其逆过程就是解交织过程,就是接收端将信息序列进行位置的还原,让数据变为发射端中交织以前的顺序。交织实际上是一种信道改造技术^[10]。

假设交织器中输入为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$,

式中 $x_i \in \{0,1\}$ 、 $1 \leq i \leq N$ 。序列经过交织后,得到一个二进制输出序列: $x = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_N)$, 式中 $\tilde{x} \in (0,1)$ 、 $1 \leq i \leq N$ 。

序列中 x 的码元和序列 \tilde{x} 的码元完全一样,只是顺序不一样。如果把交织前和交织后的序列看成 2 个大小都是 N 的集合,那么 $x \rightarrow \tilde{x}$ 是一一对应的关系。定义集合 M 如下: $M = (1,2, \dots, N)$, 交织器可以定义为 $I(M \rightarrow M): j = I(i)$ 、 $i, j \in M$, 其中 i 和 j 分别为输入序列 x 和输出序列 \tilde{x} 的数据在序列中的位置。

交织器主要分为 3 种形式:矩阵分组式、伪随机式和半伪随机式。由于本文是序列较短的短码,对于实时性要求高,伪随机数之间的相关性较大,采用矩阵分组式交织器。这样可以使得突发性错误变为随机错误,错误码元的个数在 LDPC 纠错码的范围之内,提升了通信系统的传输可靠性。

4 仿真结果和性能分析

CR-QOSTBC 解决了 QOSTBC 不能获得最大分集增益的缺陷,同时提高了误码率性能。并且 CR-QOSTBC 保持了 QOSTBC 较低的译码复杂度和码元的全速率传输,2 个系统的编码复杂度都很低且相同。为了更好地分析 CR-QOSTBC 和 QOSTBC 的误码率性能,通过仿真给出了误码率对比。本文是对 4 根发射天线、1 根接收天线的多天系统仿真,分别采用 QPSK 和 BPSK 的星座调制方式,假设信道为准静态平坦瑞利信道,在一帧内的信道参数是恒定的,并且是已知的。图 2 是 CR-QOSTBC 和 QOSTBC 分别在 QPSK 和 BPSK 调制方式下的误码率性能比较。图 3 是 CR-QOSTBC 和 QOSTBC 分别级联 LDPC 信道编码在 BPSK 调制方式下的误码率性能对比。

如图 2 所示,在 BPSK 调制下,误码率 10^{-4} 时,CR-QOSTBC 较 QOSTBC 信噪比大约有 3 dB 提升;在 QPSK 调制下,当误码率 10^{-3} 时,CR-QOSTBC 较 QOSTBC 信噪比大约好 2dB。旋转准正交空时分组码性能要比准正交空时分组码有很好的性能改善,并且没有增加译码的复杂度。

图 3 是 CR-QOSTBC 和 QOSTBC 分别级联 LDPC 信道编码,在 BPSK 调制方式下的误码率性能对比,其中 LDPC 码采用列重为 3,行重为 5,码字信息位长度为 256,码率为 1/2 的准循环 LDPC 码^[11]。译码采用归一化最小和算法^[12],最大迭代

次数为 50 次,调制方式 BPSK 时,最佳星座旋转角度为 $\pi/2$ 。在误码率 10^{-5} 时,CR-QOSTBC 级联 LDPC 码与 QOSTBC 级联 LDPC 码相比有 1.8 dB 的信噪比改善,CR-QOSTBC 级联 LDPC 码相对于未级联 LDPC 码的 QOSTBC 在 10^{-3} 时有 5.3 dB 性能提升。

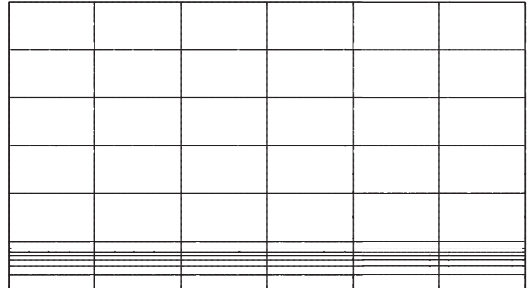


图 2 不同调制方式下性能比较

Fig.2 Performance of different modulation

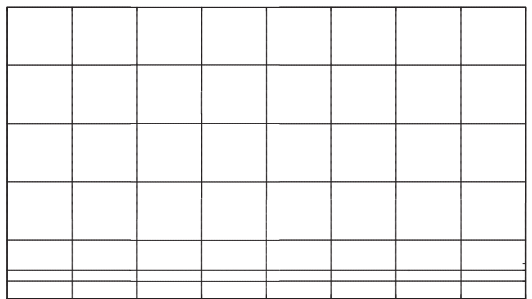


图 3 级联 LDPC 误码率性能曲线

Fig.3 The cascade LDPC ber performance curve

5 结语

本文提出一种新的准正交空时分组码,并且提出基于这种 QOSTBC 的星座旋转准正交空时分组码。利用对星座图的旋转,它同时满足了满速率和满分集的条件,并且有效地减小了符号间的干扰。采用交织和级联 LDPC 码能够使得空时编码通信系统具有很好的通信可靠性,本文提出的方法很好地解决了多径传输的问题。当然对于准正交空时分组码可以值得进一步研究,比如改进最大似然译码,简化译码复杂度;还可以将先进的信道编码和空时编码级联来提高误码率精度。总之空时编码技术在未来的通信中有着广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 尚宇,张伟岗,包涛. MIMO-OFDM 系统中的空时编码技术的研究[J]. 西北工业大学学报, 2012, 32(7):

- 554-556.
- SHANG Yu, ZHANG Weigang, BAO Tao. Study on the MIMO-OFDM system of space time coding technology [J]. Journal of northwestern polytechnical university, 2012, 32(7): 554-556.(in Chinese)
- [2] 刘玉广, 罗宁, 马华林, 等. 级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统研究 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(3): 78-82.
- LIU Yuguang, LUO Ning, MA Linhua, et al. Study on cooperative MIMO system combined LDPC code [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2013, 14(3): 78-82.(in Chinese)
- [3] Lee I, Kim D. Achieving maximum spatial diversity with decouple-and-forward relaying in dual-hop OST-BC transmissions [J]. IEEE trans wireless Commun, 2010, 9(3): 921-925.
- [4] Ren Pinyi, Pei Bin, Wang Yichen. A low complexity decoding algorithm for orthogonal space time block codes in frequency selective fading channels [J]. Journal of electronics & information technology, 2009, 31(6): 1376-1380.
- [5] Bhatangar M, Hjrungnes A, Song L. Double-differential orthogonal space-time block codes for arbitrarily correlated rayleigh channels with carrier offsets [J]. IEEE trans wireless commun, 2010, 9(1): 145-155.
- [6] Azzam L, Ayanoglu E. A novel maximum likelihood decoding algorithm for orthogonal space-time block codes [J]. IEEE trans commun, 2009, 57(3): 606-609.
- [7] 何业军, 朱光喜. Turbo 乘积码与空时分组码的结合研究 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5): 33-35.
- HE Yejun, ZHU Guangxi. Based on the space-time block codes and turbo product codes [J]. Journal of huazhong university of science and technology: natural science edition, 2005, 33(5): 33-35.(in Chinese)
- [8] 李正权, 沈连丰. 旋转星座下匙孔信道的四元素正交空时分组码研究 [J]. 信号处理, 2010, 26(4): 619-625.
- LI Zhengquan, SHEN Lianfeng. Constellation rotation of four elements in keyhole channel orthogonal STBC research [J]. Signal processing, 2010, 26(4): 619-625.(in Chinese)
- [9] 董宇. 准正交空时分组码的自适应正交化设计 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(12): 2882-2887.
- DONG Yu. Adaptive orthogonal space-time block codes [J]. Journal of system simulation, 2010, 22(12): 2882-2887.(in Chinese)
- [10] 孙鹏, 李道本. 空时交织码 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(8): 1075-1079.
- SUN Peng, LI Daoben. Interleaved space time code [J]. Beijing university of aeronautics and astronautics, 2012, 38(8): 1075-1079.(in Chinese)
- [11] Fossorier F. Quasi-cyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2014, 50(8): 1788-1793.
- [12] Wey C L, Shieh M D, Lin S Y. Algorithms of finding the first two minimum values and their hardware implementation [J]. IEEE trans. circuits Sst I reg papers 2008, 55(11): 3430-3437.

(编辑: 姚树峰)