

一种改进的基于有限域的准循环 LDPC 码设计方法

徐 华

(盐城师范学院 物理科学与电子技术学院,江苏 盐城 224002)

摘 要: 结合有限域方法和具有简单递归编码特性的 Tam 结构,提出了一种新的准循环 LDPC 码构造方法.该方法首先利用有限域方法构造出校验矩阵,并得到其相应的指数矩阵,接着采用具有 Tam 结构的校验矩阵对应的二元基矩阵,两者进行掩膜运算(mask),得到新的指数矩阵,最后构造出的准循环 LDPC 码兼具有有限域方法的良好纠错特性和 Tam 结构的简单递归编码特性.仿真结果表明,所提方法构造的准循环 LDPC 码的 BER(Bit Error Rate)性能要优于 Tam 码和 802.16e 码.

关键词: 准循环 LDPC 码;有限域方法;简单递归编码

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)10-0147-04

Quasi-Cyclic LDPC Codes Design Based on an Improved Finite Field Method

XU Hua

(School of Physics and Electronics Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, China)

Abstract: This paper proposed a novel QC-LDPC code construction method which combined the finite field method and Tam structure with simple recursive encoding structure. We first construct a parity check matrix by the finite field method, and obtain its corresponding exponent matrix. Then, we use the binary base matrix with the Tam structure to mask with the above exponent matrix. Consequently, a new exponent matrix can be constructed. Finally, a H matrix can be constructed, which is with both the good performance by the finite field method and the simple recursive structure. Simulation results show that the BER of proposed QC-LDPC code is better than the Tam code and 802.16e code.

Key words: QC-LDPC code; Finite Field Method; Simple Recursive Encoding

1 引言

准循环 LDPC(Quasi-Cyclic LDPC, QC-LDPC)码由于其校验矩阵由循环矩阵堆砌而成,易于硬件实现且便于进行性能分析,有着重要的应用潜力,目前面向实际应用的 LDPC 码大部分都属于 QC-LDPC 码,如 802.16e 标准,802.11n 标准等均采用了 QC-LDPC 码作为其系统中的纠错编码.

近几年来 Shu Lin 教授课题组提出了基于有限域(Finite Field)的 QC-LDPC 码设计方法^[1-5],该方法设计的 QC-LDPC 码显示了良好性能,部分 QC-LDPC 码的性能即使在长码长时甚至也能超出

随机构造的 LDPC 码,说明了有限域方法设计 QC-LDPC 码的巨大潜力.

相对于快速的并行译码而言,LDPC 码的编码一般需要通过生成矩阵进行,相对较为复杂,直接采用校验矩阵进行编码更能满足实际应用的需要.802.16e 标准中的准循环 LDPC 码将校验矩阵分为信息部分和校验部分,校验部分采用了一种近似的下三角形式,这种方法有效减低了编码复杂度. Tam 为了进一步降低 QC-LDPC 码的编码复杂度,提出了一种新的 QC-LDPC 码的校验矩阵结构^[5]. 该结构同样将矩阵分为信息部分和校验部分,校验部分则提出了一种新的近似下三角结构,利用这种结构,

收稿日期: 2013-11-29; 修回日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(11175152);江苏省高校自然科学研究项目(13KJB510038)

QC-LDPC 码的编码能够以简单递归的方式实现, 编码复杂度大为降低, 同时性能也优于 802.16e 码, 但是该文献并没有给出具体的 Tam 结构准循环 LDPC 码的构造方法. 文献[6]中提出了一种优化搜索 Tam 结构准循环 LDPC 码的方法.

本文将有限域方法和 Tam 结构相结合, 提出了一种新的 QC-LDPC 码设计方法, IFF (Improved Finite Field) 设计方法.

2 基于有限域方法的 QC-LDPC 码设计

QC-LDPC 码的有限域设计方法中矩阵扩展及定位矢量表达是关键^[1]. 考虑有限域 $GF(q)$ 以及相应的本原元素 α , $GF(q)$ 中 $q-1$ 个非零元素可以由 α^i 表示, 而 α^i 的定位矢量可以表示为 $z(\alpha^i) = (z_0, z_1, z_2, \dots, z_{q-2})$, 其中第 i 个元素是 1, 其余是 0, 该矢量的所有元素对应着 $GF(q)$ 的 $(q-1)$ 个非零元素.

有限域 $GF(q)$ 中 $(q-1) \times (q-1)$ 大小的矩阵 W 由下式表示.

$$W = \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_{q-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha^0 - 1 & \alpha - 1 & \cdots & \alpha^{q-2} - 1 \\ \alpha - 1 & \alpha^2 - 1 & \cdots & \alpha^{q-1} - 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha^{q-2} - 1 & \alpha^{q-1} - 1 & \cdots & \alpha^{2(q-1)} - 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在式(1)的基础上, 获得式(1)第 i 行的垂直矩阵扩展 W_i , 如下式所示.

$$W_i = \begin{bmatrix} w_i \\ \alpha w_i \\ \vdots \\ \alpha^{q-2} w_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

得到式(2)所示的矩阵 W_i 后, 由 $w_{ij}, \alpha w_{ij}, \dots, \alpha^{q-2} w_{ij}$ 的定位矢量构造出 A_{ij} , 其中 w_{ij} 为零, 则 A_{ij} 为零矩阵, 而 w_{ij} 非零时, 则 A_{ij} 为循环移位矩阵.

接着在 A_{ij} 的基础上, 构造出大小为 $(q-1)^2 \times (q-1)^2$ 的 $H^{(1)}$ 矩阵如式(3)所示, 其中的每个元素为零矩阵或者循环移位矩阵, 其大小为大小 $(q-1) \times (q-1)$.

$$H^{(1)} = \begin{bmatrix} A_{00} & A_{01} & \cdots & A_{0,q-2} \\ A_{10} & A_{11} & \cdots & A_{1,q-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{q-2,0} & A_{q-2,1} & \cdots & A_{q-2,q-2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

得到 $(q-1)^2 \times (q-1)^2$ 的 $H^{(1)}$ 矩阵后, 可以根据具体的码长、码率要求在其中选择相应的行和列构造出 QC-LDPC 码的 H 矩阵.

有限域方法构造的 QC-LDPC 码的 H 矩阵, 其最短长度环的环长最少是 6 (6girth), 即消除了长度为 4 的最短长度环 (4girth), 而矩阵中长度为 4 的最短长度环的存在会使得码的性能严重下降, 其他有限域设计方法的细节可参见文献[1].

3 改进的有限域 QC-LDPC 码设计方法

3.1 Tam 结构 QC-LDPC 码

Tam 将 QC-LDPC 码的 H 矩阵分为两个部分^[6], 信息部分 H_I 和校验部分 H_P , 具体如下式表示:

$$H_{ML \times NL} = [(H_I)_{ML \times KL} | (H_P)_{ML \times ML}] \quad (4)$$

其中 $L \times L$ 为相应子矩阵的大小.

而 H 矩阵的校验部分 H_P 具有式(5)的形式,

$$H_P = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{1,K+1} & I & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{2,K+1} & h_{2,K+2} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{ij}^{a_{ij}} & h_{M-3,K+1} & h_{M-3,K+2} & \cdots & h_{M-3,N-3} & I & 0 \\ I & h_{M-2,K+1} & h_{M-2,K+2} & \cdots & h_{M-2,N-3} & I & I \\ P_{ij}^{a_{ij}} & h_{M-1,K+1} & h_{M-1,K+2} & \cdots & h_{M-1,N-3} & 0 & I \end{bmatrix}_{ML \times ML} \quad (5)$$

式中, h_{ij} 为 QC-LDPC 码 H 矩阵的子矩阵, $0 \leq i \leq M-1, 0 \leq j \leq N-1$.

Tam 提出的这种结构, 使得 QC-LDPC 码的编码可以直接利用 H 矩阵, 以一种简单的递归形式得到信息比特的校验位, 编码复杂度大大降低.

具体的递归编码过程总结如下^[6].

待发送的信息位被分为 K 个部分, $d_0, d_1, d_2, \dots, d_{K-1}$, 相应的可以获得 M 个校验比特矢量 $p_0, p_1, p_2, \dots, p_{M-1}$, 具体计算过程如下,

(1) H 矩阵的第零行

$$\sum_{k=0}^{K-1} h_{0,k} d_k + p_1 = 0 \quad (6)$$

(2) H 矩阵的第一行

$$\sum_{k=0}^{K-1} h_{1,k} d_k + h_{1,K+1} p_1 + p_2 = 0 \quad (7)$$

(3) H 矩阵的第 i 行

$$\sum_{k=0}^{K-1} h_{i,k} d_k + \sum_{k=K+1}^{K+i} h_{i,k} p_{k-K} + p_{i+1} = 0 \quad (8)$$

式中, $i = 2, 3, \dots, M-4$.

根据式(3)~(5),可以得到 M 个校验比特矢量 p_1, p_2 和 $p_i, i = 2, 3, \dots, M-4$. H 矩阵最后三行的计算步骤可参见文献[6].

由式(3)~(5)可见,校验比特可以直接通过 H 矩阵,以简单的递归方式即可获得,得到校验比特后直接和信息位可以组成编码码字,编码过程要比传统方式简单的多,且易于硬件实现.

需要说明的是,要能够通过式(3)~(5)的简单递归方式得到校验比特,QC-LDPC 码的 H_p 必须保持式(2)的形式,即简单编码结构.

3.2 基于 IFF (Improved Finite Field) 的 QC-LDPC 码设计方法

在有限域方法设计的基础上,结合 Tam 结构可以进行简单递归编码的特性,提出了一种基于 IFF 的 QC-LDPC 码设计方法.

设计过程框图如图 1 所示.

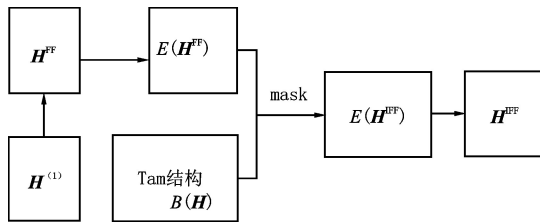


图 1 设计过程框图

图中, H^{FF} 为基于有限域方法构造的指定大小的校验矩阵, $E(H^{FF})$ 为其相应的指数矩阵, $E(H^{IFF})$ 为基于 IFF 方法构造的指数矩阵, H^{IFF} 为其相应的校验矩阵, $B(H)$ 为矩阵 H 对应的基矩阵,即指数矩阵中的非零元素用“1”替换,与零元素一起组成了 H 矩阵对应的基矩阵.

IFF 设计方法具体如下所示,假设需要构造的目标校验矩阵大小为 $ML \times NL$,其中 $L \times L$ 为相应子矩阵的大小.

(1)根据式(1)构造矩阵 W ,其大小为 $(q-1) \times (q-1)$;

(2)在矩阵 W 的基础上,根据式(2),构造其对应的垂直扩展矩阵 W_i ,矩阵大小为 $(q-1)^2 \times (q-1)^2$;

(3)在构造出的 W_i 基础上,依据其各行的定位矢量构造出矩阵 A_{ij} ;

(4)依据式(3)构造出校验矩阵 $H^{(1)}$,其大小为 $(q-1)^2 \times (q-1)^2$;

(5)按照目标矩阵的要求,在 $H^{(1)}$ 中选择 ML 行及 NL 列,构造出校验矩阵 H^{FF} ,其大小为 $ML \times NL$;

(6)在 H^{FF} 的基础上,得到其对应的指数矩阵 $E(H^{FF})$,其大小为 $M \times N$;

(7)构造如(4)、(5)所示的具有 Tam 结构的校验矩阵 H ,其大小为 $ML \times NL$,接着得到其对应的指数矩阵 $E(H)$,然后指数矩阵中的非零元素对应设置为 1,零元素不变,则可以得到相应的基矩阵 $B(H)$, $B(H)$ 的大小为 $M \times N$.

(8)在指数矩阵 $E(H^{FF})$ 和 Tam 结构基矩阵 $B(H)$ 的基础上,两者的对应元素相乘,进行 mask 运算^[1],即 $B(H)$ 中零元素的位置得到新的指数矩阵 $E(H^{IFF})$,其大小为 $M \times N$;

(9)根据 $E(H^{IFF})$,再构造出其相应的校验矩阵 H^{IFF} ,其大小为 $ML \times NL$.

据此构造得到的校验矩阵 H^{IFF} ,一方面保留了有限域方法构造的准循环 LDPC 码的优异特性,另一方面又具有了 Tam 结构的易编码特性.

4 数值仿真和分析

仿真中的通信系统采用了 BPSK(Binary Phase Shift Keyword)调制方式,信道为 AWGN(Additive White Gaussian Noise)信道,LDPC 码的译码算法采用 BP(Belief Propagation)译码算法,最大的译码迭代次数为 50 次.

具体仿真框图如图 2 所示.

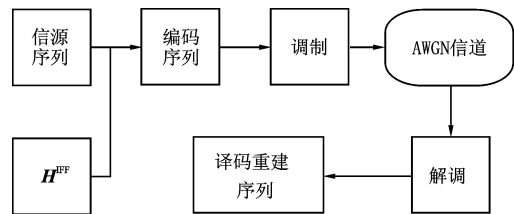


图 2 通信系统仿真框图

仿真中,首先随机生成待传输的信源序列,然后直接利用图 1 构造出的校验矩阵进行编码,得到编码序列,经过 BPSK 调制后,在接收端进行解调、译码后得到重建的信源序列.

具体参数还包括,仿真中考虑在有限域 $GF(2^5)$ 中构造相应矩阵,即 $q=32$,则 $H^{(1)}$ 矩阵的大小为 $31^2 \times 31^2$. 根据图 1 所示,需要构造的 Tam 结构校验矩阵对应的基矩阵 $B(H)$ 大小为 12×24 ,其中包括大小均为 12×12 的 $B(H_I)$ 和 $B(H_P)$,具体如式(9)和(10)所示.

对应 $B(H)$ 的大小,则图 1 中 $E(H^{FF})$ 的大小应同样为 12×24 ,又因为 $H^{(1)}$ 矩阵的子矩阵大小为 31×31 ,因此根据子矩阵的大小和指数矩阵 $E(H^{FF})$

的大小,可知矩阵 $\mathbf{H}^{\text{FF}}$ 的大小为 $(12 \times 31) \times (24 \times 31) = 372 \times 744$.

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{B}_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

依据本文提出的 IFF 构造方法,得到最终的校验矩阵 $\mathbf{H}^{\text{FF}}$,其大小为 372×744 ,即对应的 QC-LDPC 码的码长为 744,而码率为 $1/2$. $\mathbf{H}^{\text{FF}}$ 和 $\mathbf{H}^{\text{FF}}$ 相比,保留了有限域方法构造的 QC-LDPC 码的优良特性,同时也有了 Tam 结构的 QC-LDPC 码的简单递归编码特性.具体的 BER(Bit Error Rate)性能如图 3 所示.

图 3 中给出了三种 QC-LDPC 码在 AWGN 信道下的 BER 性能,分别为 IFF 码(本文提出的 IFF 方法构造的 QC-LDPC 码)、Tam 码文献[6]给出的 QC-LDPC 码以及 802.16e 标准中的 QC-LDPC 码($1/2$ 码率,子矩阵大小为 96×96 ,码长为 2304).

从图 3 中可以看出,三种 QC-LDPC 码中,IFF 码具有最好的性能,Tam 码比 802.16e 码的性能稍好.需要说明的是,IFF 码的码长要小于 Tam 码和 802.16e 码的码长,尽管如此,IFF 码仍然获得了优于这两种 QC-LDPC 码的 BER 性能.

5 结束语

本文以有限域方法和 Tam 提出的简单递归编码结构的准循环 LDPC 码为基础,提出了一种改进

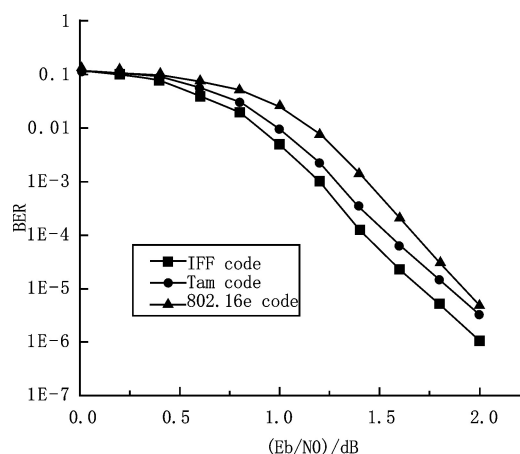


图 3 IFF 码和 Tam 码、802.16e 码的 BER 性能比较

的有限域方法设计准循环 LDPC 码,IFF 方法.仿真结果证实了 IFF 方法的良好 BER 性能.

本文仿真中仅给出了一种示例,对于大小为 31×31 的 $\mathbf{E}(\mathbf{H}^{\text{FF}})$, $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ 还可以和其不同的行列进行 mask 运算,得到更多的 QC-LDPC 码.另外,本文的有限域方法仅考虑了 $\text{GF}(2^5)$,当 q 取其他值时的有限域构造出的校验矩阵用于本文的 IFF 方法中可以构造出更多的 IFF 码.

本文提出的 IFF 设计方法得到的 QC-LDPC 码具有很好的硬件实现性及 BER 性能,在未来的移动通信及无线传感网中有着重要的应用潜力.

参考文献:

- [1] L Lan, L Zen, Y Y Tai, et al. Construction of quasi-cyclic LDPC codes for AWGN and binary erasure channels: A finite field approach[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2007, 53(7): 2429-2458.
- [2] Zeng L, Lan L, Tai Y Y, et al. Constructions of non-binary quasi-cyclic LDPC codes: a finite field approach [J]. IEEE Trans Commun, 2008, 56(4): 545-554.
- [3] Song S, Zhou B, Lin S, et al. A unified approach to the construction of binary and nonbinary quasi-cyclic LDPC codes based on finite fields[J]. IEEE Trans Commun, 2009, 57(1): 84-93.
- [4] Kang J, Huang Q, Zhang L, et al. Quasi-cyclic LDPC codes: an algebraic construction [J]. IEEE Trans Commun, 2010, 58(5): 1383 - 1396.
- [5] Zhang K, Lin S, Ghaffar K A. Quasi-cyclic LDPC codes on cyclic subgroups of finite fields [J]. IEEE Trans. Commun, 2011, 59(9): 2330-2336.
- [6] 徐华. 一种简单递归编码结构的 QC-LDPC 码优化设计[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(1): 34-38.

(下转第 155 页)

表 1 抗随机噪声攻击测试结果

噪声攻击强度	本文算法		传统算法	
	Bunny	Dragon	Bunny	Dragon
0.5%	0.968	0.950	0.966	0.943
1%	0.924	0.917	0.920	0.909
3%	0.785	0.762	0.727	0.712
5%	0.782	0.718	0.714	0.702

从表 1 可知,本文算法的 Cor 值均大于阈值 0.7,说明,针对缩小图像本文算法完全可以抵抗各种噪声的攻击,而传统算法的 Cor 值明显低于本文算法,其抗噪声攻击性能不如研究算法。

(2) 抗剪切攻击性能测试. 在保证两个起始点不变条件下,对 Bunny 和 Dragon 三维网格缩小图像模型进行剪切,最高率剪切为 25%,它们的测试结果见表 2. 从表 2 可知,当前剪切率小于 20%,本文算法的 Cor 值均大于阈值 0.7,这表明此时本文算法完全可以抵抗各种剪切攻击,当剪切率大于 25%时,相关系数 Cor 小于阈值,防伪水印算法的抗攻击性较差,但通常情况,剪切率不会超过 25%,同时本文算法性能要明显优于传统算法。

表 2 抗剪切攻击测试结果

剪切率	本文算法		传统算法	
	Bunny	Dragon	Bunny	Dragon
5%	0.860	0.778	0.737	0.734
10%	0.779	0.705	0.721	0.718
20%	0.734	0.725	0.706	0.708
25%	小于阈值	小于阈值	小于阈值	小于阈值

5 结束语

针对当前三维网格缩小图像防伪水印算法存在的不足,本文提出了一种考虑图像缩小后特征萎缩的防伪水印算法. 仿真结果表明,本文算法可以抵抗各种攻击,抗攻击性较强,且具有良好的不可见性,并通过对传统防伪水印算法进行对比,验证了本文三维网格缩小图像防伪水印算法的优越性,具有较

好的实用价值.

参考文献:

- [1] 金聪. 防伪理论与技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [2] 王新宇, 詹永照. 3D 模型防伪研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(27): 25-29.
- [3] 张静, 郑国勤. 基于几何特征的三维网格缩小图像防伪算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(4): 740-747.
- [4] 张琴, 向辉, 孟祥旭. 基于复数小波域的图形防伪水印方法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(4): 494-498.
- [5] 李淑敬, 李林国. 一种 DCT 变换的三维网格缩小图像物体盲防伪水印方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(27): 81-83.
- [6] 顾耀林, 李林国, 李淑敬. 基于小波变换的三维网格缩小图像物体盲防伪水印方案[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(1): 263-265.
- [7] Li L, Zhang D, Pan Z G, et al. Watermarking 3D mesh by spherical parameterization [J]. Computers & Graphics, 2004, 28(6): 981-989
- [8] 金振训, 金津镇, 钱杰, 等. 一种嵌入式系统解码的高压缩比无损图像压缩算法[J]. 科技通报, 2013, 9(29): 130-132.
- [9] 陈业纳, 徐则同. 无线传感器网络最小连通覆盖的节能算法[J]. 计算机仿真, 2014, 31(3): 324-327.
- [10] 魏志成, 戴居丰, 李昊. 基于遗传算法的图像防伪[J]. 计算机工程, 2007, 33(17): 146-148.
- [11] 孙媛媛, 胡敏. 一种三维网格缩小图像模型零防伪水印算法[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(3): 170-172.

作者简介:

王明蓉 女, (1977-), 硕士, 讲师. 研究方向为数字图像处理.

(上接第 150 页)

- [7] Tam W M, Lau F, Tse C K. A class of QC-LDPC codes with low encoding complexity and good error performance[J]. IEEE Commun Lett, 2010, 14(2): 169-171.

作者简介:

徐华 男, (1975-), 博士, 副教授. 研究方向为信道编码、协作通信及压缩感知等.