

基于 JPEG2000 和 WIPC-LDPC 的 联合信源信道编码

郭 锐 刘济林

(浙江大学信电系, 杭州 310027)

摘 要 提出了一种联合信源信道编码(JSCC)方案。首先,构造了一种具有重量递增奇偶校验矩阵的非规则 LDPC 码(WIPC-LDPC),实现非规则 LDPC(Irregular LDPC)码比特节点按列重递增的顺序排列。然后,针对 JPEG2000 码流分层结构的特点,把不同质量层的 JPEG2000 码流成功地映射到 WIPC-LDPC 不同度数的比特节点上,以达到对不同重要级别码流的不等错误保护(UEP),从而达到优化重建图像质量和视觉效果的目的。仿真结果表明,与采用随机构造校验矩阵的非规则 LDPC 码进行等错误保护(EEP),以及采用 RCPC、RS 码进行不等错误保护的 JPEG2000 码流相比,JSCC 方案提高了重建图像的 PSNR,改善了重建图像的主观视觉效果。

关键词 联合信源信道编码 JPEG2000 非规则 LDPC 不等错误保护 等错误保护

中图法分类号: TN919.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2008)06-1048-06

JSCC Based on JPEG2000 and WIPC-LDPC

GUO Rui, LIU Ji-lin

(Information Science and Electronic Engineering Department of Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Utilizing the characteristic of JPEG2000 code stream format, a joint source channel coding (JSCC) scheme was proposed in this paper. A novel irregular LDPC with weight-increasing parity-check (WIPC) matrix (WIPC-LDPC) was first put forward, which can simply realize unequal error protection (UEP) characteristic. Then the different significant JPEG2000 code streams were coded by weight-increasing parity-check (WIPC) irregular LDPC with dissimilar degree bit nodes to realize UEP scheme. Simulation results show that the proposed JSCC can realize robust image transmission and outperforms other JSCC schemes proposed before.

Keywords JSCC, JPEG2000, Irregular LDPC, UEP, EEP

1 引言

联合信源信道编码(JSCC)是目前无线图像通信领域中常用的一种传输编码方案,因能够提供高的传输效率和传输质量而被广泛采用^[1,2]。其中一类重要的 JSCC 是把信源信息按照重要性级别分成不同部分,在信道编码时对不同部分实行不等错误保护(UEP)^[3]。JPEG2000 作为一种新的图像压缩

标准,能够提供按质量分层的码流结构、支持渐进图像传输^[4],近年来受到越来越多的关注。文献[5]、[6]分别研究了采用 RCPC 码、RS 码进行不等错误保护的 JPEG2000 码流的性能,但是 RCPC 码、RS 码的纠错能力有限,而且需要产生不同速率的码字,编码器实现起来比较复杂。

另一方面,低密度奇偶校验码(LDPC)能够获得接近 Shannon 限的性能^[7,8],广泛应用于信道编码领域。除了能够获得接近 Shannon 限的独特性能

基金项目: 国家重大自然科学基金项目(60534070);浙江省科技厅重点国际科技合作项目(2005C14008)

收稿日期: 2006-08-28; **改回日期:** 2006-11-08

第一作者简介: 郭 锐(1980 ~),浙江大学信息与通信工程专业博士研究生。主要研究方向为图像处理、图像、多媒体通信等。E-mail:

hbsygr@yahoo.com.cn

外,非规则 LDPC 中高度数比特节点 (bit node) 比低度数的比特节点具有更强的纠错能力。因此采用非规则 LDPC 码不同度数的比特节点对 JPEG2000 码流进行不等错误保护具有很大的研究价值。然而,在随机构造校验矩阵的非规则 LDPC 中,高度数比特节点的位置很难确定。在对信息矢量进行系统编码的时,不能保证重要的信息被非规则 LDPC 的高度数比特节点提供重点保护,限制了非规则 LDPC 码 UEP 功能的应用。

因此,本文采用一种具有重量递增奇偶校验矩阵的非规则 LDPC 码 (WIPC-LDPC),把非规则 LDPC 码比特节点按列重增加的顺序排列;然后根据 JPEG2000 分层的码流结构,把不同重要级别的码流成功地映射到 WIPC-LDPC 不同度数的比特节点上,实现对不同重要级别信源信息的不等程度的错误保护。系统传输方案如图 1 所示。

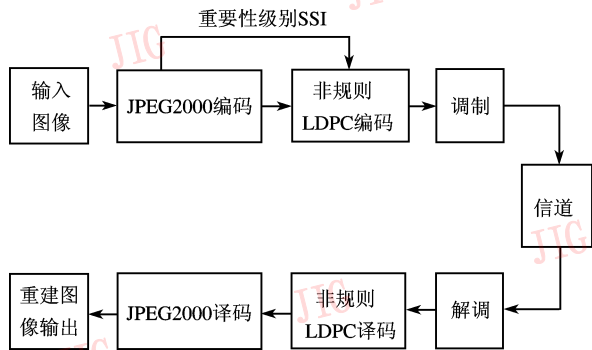


图 1 无线图像传输方案框图

Fig. 1 Diagram of image wireless transmission

2 JPEG2000 码流结构概述

JPEG2000 是一种最新的静止图像压缩标准,它提供了一个质量可以分级的压缩码流结构^[4]。在编码时,首先将原始图像划分成若干个互相不重叠的矩形数据单元,称为片(Tile)。然后对每个片成分进行正向 DC 电平位移。然后根据编码参数,决定是否需要进行图像分量变换。接着对每个片成分进行小波变换,得到不同分辨率的小波子带系数。分别对小波系数选取适当的量化步长进行量化。然后在经过基于优化截取的嵌入式码块编码 (EBCOT)后输出压缩的 JPEG2000 码流。编码后的码流结构如图 2 所示。

其中,最外面一层是 Tile 结构,这些互不重叠

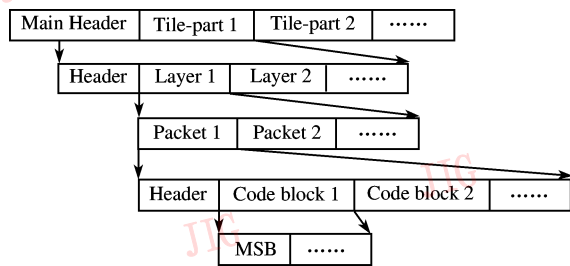


图 2 JPEG2000 码流结构

Fig. 2 Structure of JPEG2000 Code Stream

的 Tile 按顺序排列。每一个 Tile 里面由几个位流层 (Layer) 组成。位流层是按重要性大小排列的,排在前面的对重建图像质量贡献大于后面的,因此较后面的重要。每个位流层又是由许多个包 (Packet) 组成,包的排列也是排在前面的比排在后面的含有更多的信息。每个包中又嵌套了一些码块位流 (Code block)。每个码块中又是由量化后小波系数的不同位平面 (MSB) 组成,位平面是按重要性大小排列的,排在最前面的是最重要的位平面,最后的为最不重要的位平面。因此,可以看到 JPEG2000 码流是按对重建图像的贡献分层排列的;在同一层中,也满足排在前面的包较之后面的包对重建图像更重要的特点。

3 WIPC-LDPC 码设计

3.1 LDPC 码性能分析

LDPC 码是一种线性分组码,每一个 LDPC 码的奇偶检验矩阵 H 都对应一个双向图,在双向图上比特节点表示校验矩阵的列,校验节点 (check node) 代表校验矩阵的行。按列或行重相等与否,LDPC 码分为规则 LDPC 和非规则 LDPC。一个 $n = 10, j = 2, k = 4$ 的规则 LDPC 码的奇偶检验矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

其对应的双向图如图 3 所示。

对于非规则 LDPC 码而言,奇偶检验矩阵中,各行各列中非零元素的个数不要求相等,也就是说比特点和校验点的度数不是固定不变的。非规则 LDPC 码的列及行的码重分布可以用下面两个多项式来表示^[9]:

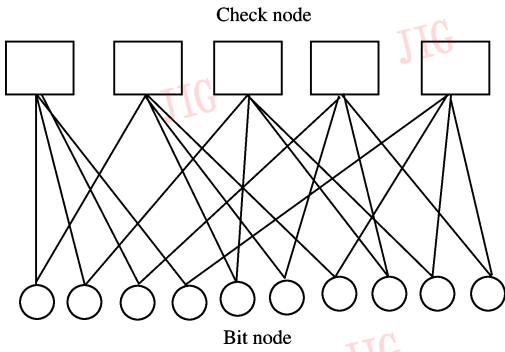
图 3 LDPC 码的 H 对应的双向图

Fig. 3 Parity check of LDPC code

$$\begin{cases} \lambda(x) = \sum_{i=1}^{d_v} \lambda_i x^{i-1} \\ \rho(x) = \sum_{i=1}^{d_r} \rho_i x^{i-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, λ_i 和 ρ_i 分别代表从比特点和校验点出发的度为 i 的边所占的百分比; d_v 和 d_r 分别表示比特点和校验点中的最大度数。如果比特点个数是 N , 校验点个数是 M , 则在双向图上度数为 i 的比特点和校验点的个数分别为

$$\begin{cases} N \frac{\lambda_i/i}{\sum_{j=2}^{d_v} \lambda_j/j} = N \frac{\lambda_i/i}{\int_0^1 \lambda(x) dx} \\ M \frac{\rho_i/i}{\sum_{j=2}^{d_r} \rho_j/j} = M \frac{\rho_i/i}{\int_0^1 \rho(x) dx} \end{cases} \quad (2)$$

非规则 LDPC 码的译码过程和规则 LDPC 码一样, 采用概率迭代算法^[10]。在迭代译码过程中, 度数高的比特节点的错误比低度的比特节点优先得到纠正, 并且由于高度数的比特节点能够从邻近的校验节点得到更多的信息。所以, 非规则 LDPC 码错误保护的能力随着比特节点度数的增加而加强^[11]。这就是非规则 LDPC 码的 UEP 特性。

3.2 WIPC-LDPC 的构造

按照式(1)两个多项式随机构造校验矩阵的非规则 LDPC 码, 比特节点度数的分布是随机的。因此, 编码时, 不能保证重要的信息比特一定映射到度数高的比特节点上, 限制了非规则 LDPC 码 UEP 功能的应用。如果能够找到一种校验矩阵, 比特节点的度数分布是按规律排列, 这个问题就能得到解决。基于此, 采用了把随机构造的校验矩阵按列重递增的顺序重新排列的方法, 得到一个新的列重递增

(WIPC) 校验矩阵。即矩阵的第 1 列对应于度最低的比特点, 最后一列对应于度最高的比特点。对重排后校验矩阵进行系统编码, 可以成功地实现重要信息到非规则 WIPC-LDPC 高度比特点的映射。具体实现如下^[12]:

首先, 对校验矩阵 H 进行分解:

$$H = [A | B]$$

式中, H 为 $M \times N$ 矩阵, A 为 $M \times M$ 矩阵, B 为 $M \times K$ 矩阵, $K = N - M$ 为信息比特点个数。假设 A 是可逆的, 则经过初等变换, H 可表示为

$$H = [I | A^{-1}B]$$

式中, I 为单位矩阵, 相应的生成矩阵为

$$G = [(A^{-1}B)^T | I]$$

如果已知信息比特矢量为 S , 则编码后的码字为

$$x = G^T \cdot S = [A^{-1}BS | S]^T$$

设 $c = A^{-1}BS$, 则 $x = [c | s]$, 则校验矩阵 H 与码字 x 的关系为

$$H \cdot x = [A | B] \cdot [c | s]^T = 0$$

在 $GF(2)$ 上, 上式变为

$$Ac + Bs = 0$$

如果 A 不可逆, 需要对校验矩阵 H 的列进行相应的调整^[12]。从上述变换可见, 校验矩阵的右侧对应于信息矢量, 如果能够把重要的信息比特放在信息矢量 S 的右侧, 校验矩阵采用 WIPC 矩阵, 则重要信息比特刚好映射到高度数比特节点, 从而实现了重要信息的高级别保护。

4 基于 WIPC-LDPC 的 JSCC 实现

如上文所述, WIPC-LDPC 码可以实现比特节点按度数的规律排列; JPEG2000 码流具有按质量分层排列的特点, 并能够提供各层码流的重要级别信息 (SSI)。因此, 可以把 JPEG2000 码流分层的特点和 WIPC-LDPC 码联合起来, 实现无线图像渐进传输。

假设 JPEG2000 码流按对重建图像的贡献分成 M 层。其中第 1 层具有最高的重要级别, 后面几层的重要性依次降低。WIPC-LDPC 的信息节点具有 M 个不同度数, 每个度数的信息节点数分别为 N_1, N_2, \dots, N_m , 其中, N_1 这些信息节点对应的度数最大, N_m 这些信息节点对应的度数最小, 则编码分以下两步:

(1) 按图 4 所示, 重新排列 JPEG2000 码流, 组

成新的信息矢量 S 。首先从第 1 层码流由前往后取 N_1 个比特,然后从第 2 层码流由前往后取 N_2 个比特...,从第 M 层由前往后取 N_m 个比特按照如下的顺序组成一个信息矢量。即第 1 层的码流比特放在最后面,最后一层的码流比特放在最前面。

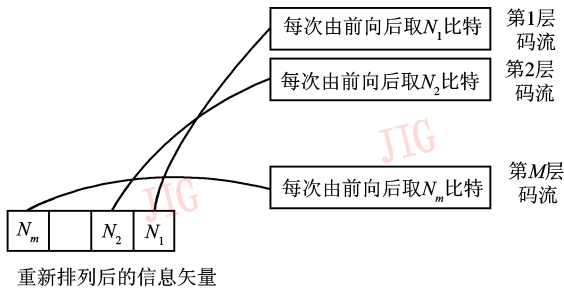


图 4 信息矢量排列方法

Fig. 4 The arrangement of information vector

循环以上的过程,当某一层的数据比特取完后,继续按照重要的信息比特放在信息矢量的后面的原则在相邻层取数据,直到把所有的码流比特都按照上述的结构组成信息矢量。

(2)对排列后的信息矢量 S 进行系统编码。按照 $x = G^T \cdot S = [A^{-1}BS | S]^T$ 完成信息矢量 S 到编码码字 x 的编码。

5 仿真结果

选择应用程序 Kakadu JPEG2000 V4.0.3^[13] 作为实验中的图像编解码程序,用 Matlab 仿真了不同的保护方式对 JPEG2000 码流的性能。采用标准的 512×512 的 8bit 灰度图像 Lena 在 BPSK 调制的两径瑞利信道上进行仿真(时延分别为 0 和 $40\mu s$,衰落系数分别为 0.2 和 0.7。Doppler 频移为 10Hz 到 200Hz)。JPEG2000 编码器设置为只用一个 Tile,无分量(no component),信源编码分 3 层,码块(code block)尺寸大小为 64×64 ,小波分解级数为 3。

实验中比较了以下几种编码方案的性能。

- (1)采用不同速率的 RS 码进行不等错误保护的 JPEG2000 码流;
- (2)采用不同速率的 RCPC 码进行不等错误保护的 JPEG2000 码流;
- (3)采用随机构造校验矩阵的非规则 LDPC 码进行等错误保护的 JPEG2000 码流;
- (4)采用 WIPC-LDPC 码进行不等错误保护的 JPEG2000 码流。

实验中各种码的参数如表 1 所示。

表 1 实验中所采用各种码字的参数

Tab. 1 Parameter of each code in experiment

码层	方案			
	基于 RS 的 UEP	基于 RCPC 的 UEP	基于非规则 LDPC 的 EEP	基于 WIPC-LDPC 的 UEP
第 1 层	RS(255,191)	(2,1,7) RCPC 码	随机	对应于度数 50 的比特节点
第 2 层	RS(255,233)	(3,2,7) RCPC 码	随机	对应于度数 20 的比特节点
第 3 层	RS(255,239)	(4,3,7) RCPC 码	随机	对应于度数 3 的比特节点

RS 码采用 $GF(2^8)$ 的一组码字 RS(255,191)、RS(255,233)、RS(255,239);RCPC 码是由 (2,1,7) 母码通过凿空生成的一簇码,生成多项式为 8 进制 (133,171);非规则 LDPC 码的参数选择如下:码长 8 192 比特,码率为 0.5。其列多项式为

行多项式为

$$\rho(x) = 0.867 8x^{14} + 0.132 2x^{15}.$$

RS, RCPC 都采用软判决译码。LDPC 译码时,采用 BP 译码算法,迭代次数都是 50 次。

首先仿真了实验中各种码字在瑞利衰落信道上的性能。如图 5 所示,可以看到非规则 LDPC 码的

性能明显优于其他两类码字,且 WIPC-LDPC 码中,高度数的比特节点的性能要优于低度的节点的性能,LDPC 码的平均性能也优于 RCPC 和 RS 码。

由 2.2 节的分析可知,通过对由 $\lambda(x)$ 随机生成的矩阵进行初等变换,得到具有列重递增校验矩阵的非规则 LDPC 码(WIPC-LDPC)后,具有如下的特点。

- (1)开始的 4 096 比特是校验比特。
- (2)紧接着的 2 560 比特,对应于度数为 3 的比特特点。
- (3)后面的 1 024 比特,对应于度数为 20 的比特特点。

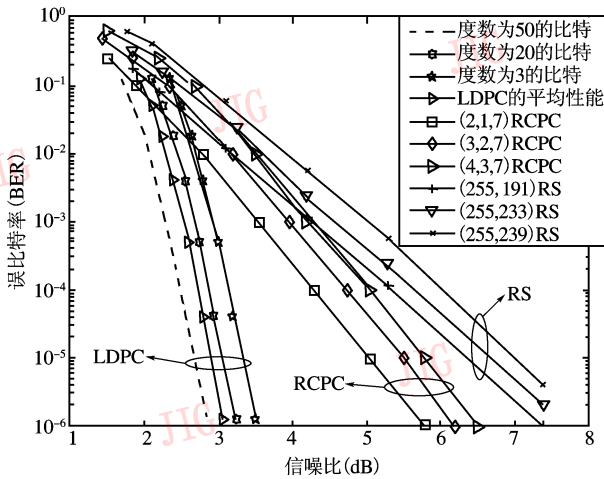


图 5 实验中各种码字在瑞利信道上的误比特性能比较
Fig. 5 BER performance of each Code in raley channels

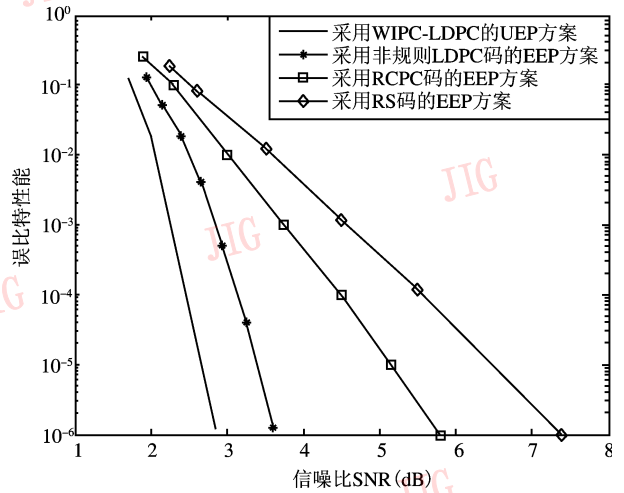


图 6 各种方案的重建图像的误比特率特性比较
Fig. 6 BER Performance of reconstruction image

(4)最后的 512 比特,对应于度数为 50 的比特特点。

编码时,按照所述的编码方法,首先,把 JPEG2000 码流排列成信息矢量,然后再进行系统编码。在接受端,执行相反的操作,重组出原始的码流,再进行 JPEG2000 的译码。

图 6 给出了实验中 4 种编码传输方案重建图像的误比特率随信道信噪比的变换情况,图 7 比较了 4 种编码传输方案的重建图像在不同 SNR 时峰值信噪比 (PSNR)。

从图 6、图 7 可以清楚地看到,在 4 种方案中,基于 WIPC-LDPC 进行不等错误保护的联合信源信道编码具有最好的误比特和 RSNR 性能,这是因为对 JPEG2000 码流中重要的码流进行了重点的保护,使这些重要的码流发生错误的概率大大减少,从而提高了重建图像的质量,所以基于 WIPC-LDPC 编码的性能要优于基于随机构造的非规则 LDPC 进行等错误保护的方案;另一方面,由于非规则 LDPC 码具有接近香农限的良好性能,所以,基于 WIPC-LDPC 进行不等错误保护方案的性能要优于基

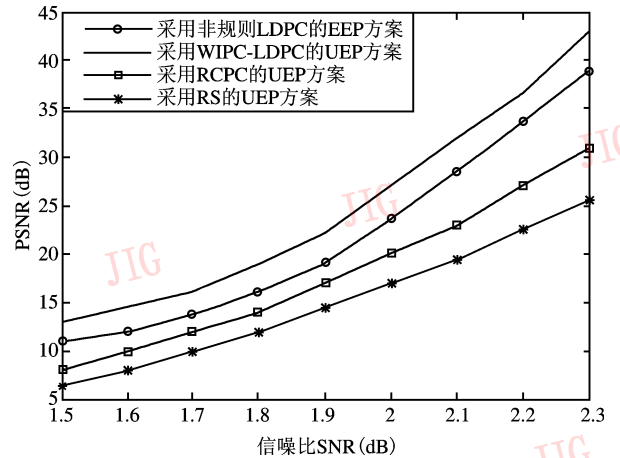


图 7 UEP 和 EEP 方案中,重建图像的 PSNR 和 SNR 曲线图
Fig. 7 PSNR vs SNR of reconstruction image

于 RCPC 和 RS 码的不等错误保护方案。而且随着信噪比的增加,这种优势有所加强。

作为一个特例,图 8 给出了在信噪比 SNR 为 2.2dB 时,各种编码方案重建图像的主观视觉效果。从图 8 可以清楚地看出,基于 WIPC-LDPC 的 UEP 方案具有最佳的重建质量。

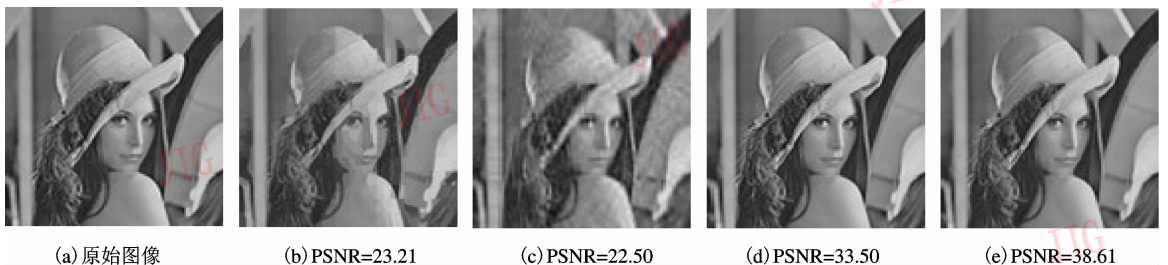


图 8 各种方案下重建图像 PSNR 比较 (SNR = 2.2dB)

Fig. 8 PSNR of reconstruction image

6 结论

提出了一种基于JSCC的无线图像传输编码方案,该方案联合使用了JPEG2000压缩编码和具有重量递增校验矩阵的非规则LDPC码(WIPC-LDPC)。JPEG2000码流具有按质量分层的结构;WIPC-LDPC不仅具有高度数的比特比低度数比特特点具有更强的纠错能力的特点,而且还能实现校验矩阵中比特节点度数的规则排列,方便了UEP功能的实现。把JPEG2000编码和WIPC-LDPC结合起来,对不同层的码流进行不同级别的错误保护,实现了JPEG2000码流的渐进可靠传输。仿真实验结果表明,本文提出的方案,不仅优于采用随机构造校验矩阵的非规则LDPC码进行等错误保护的方案,也优于基于RCPC,RS码进行不等错误保护的方案。

参考文献 (References)

- 1 Tanabe N, Farvardin N. Subband image coding using entropy coded quantization over noisy channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1992, **10**(6): 926 ~ 943.
- 2 Zheng H, Liu K. The subband modulation: A joint power and rate allocation framework for subband image and video transmission[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1999, **9**(8): 823 ~ 838.
- 3 Sherwood P, Zeger K. Progressive image coding for noisy channels [J]. IEEE Signal Processing Letter, 1997, **7**(7): 188 ~ 191.
- 4 ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1855 [S]. JPEG 2000 Part I: Final Draft International Standard (ISO/IEC FDIS15444-1)
- 5 Chu T L, Liu Z M, Xiong Z X, *et al.* Joint UEP and layered source coding with application to transmission of JPEG-2000 coded images [A]. In: Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference [C], San Antonio, Texas, USA, 2001, **3**: 2036 ~ 2039.
- 6 Sanchez V S, Mandal M K. Robust transmission of JPEG2000 images over noisy channels [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2002, **48**(8): 451 ~ 456.
- 7 Mackay D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, **45**(2): 429 ~ 431.
- 8 Chung S Y, Forney G D. On the design of low density parity check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit [J]. IEEE Communication Letters, 2001, **5**(2): 58 ~ 60.
- 9 Richardson T J, Shokrollahi M A, Urbanke R L. Design of capacity approaching irregular low-density parity-check codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, (47): 619 ~ 637.
- 10 Leby M G, Mitzenmacher M. Improved density parity check codes using irregular graphs [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, **47**(2): 585 ~ 598.
- 11 Jiang Hai-ning, Luo Han-wen, Tian Ji-feng. LDPC based differential unitary space-frequency coding for MIMO-OFDM systems [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2005, **6**(6): 607 ~ 612.
- 12 Ma Yu-ming, Yuan Dong-feng, Yang Xiu-mei. Research on unequal error protection of irregular LDPC codes [J]. Journal on Communications, 2005, **26**(11): 132 ~ 137. [马玉明,袁东风,杨秀梅. 非规则LDPC码的不等错误保护性能研究[J]. 通信学报, 2005, **26**(11): 132 ~ 137.]
- 13 Kakadu Software Implementation of the JPEG2000 Standard. Available [EB/OL]. <http://www.kakadusoftware.com>, 2005-3-24.