

一种综合源编码和信道编码的图像编码方案*

顾炜 胡波 凌熨亭

(复旦大学电子工程系计算机辅助测试室, 上海, 200433)

摘要 提出了一种新的综合源编码和信道编码的图像编码传输方案, 对于波变换后各个子带采用基于统计特性的变系数定长 (VCFL) 编码后选择不同码率的 RCPC (码率兼容的删除卷积码, Rate Compatible Punctured Convolutional code) 信道编码以提供不同程度的差错保护 (UEP) 并进行传输. 在给定传输的总比特数的情况下, 通过一种优化算法使方案的总体失真最小. 模拟结果表明新方案压缩比高, 在较高的传输误码率情况下, 表现出良好的抗误码能力.

关键词 变系数定长 (VCFL) 编码, 子波变换, 码率兼容删除卷积码 (RCPC), 不同程度差错保护 (UEP).

A SCHEME OF SOURCE-CHANNEL IMAGE CODING

GU Wei HU Bo LING Xie-Ting

(CAT Laboratory, Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract A new wavelet-based joint source-channel image coding scheme was proposed. For each subband, the statistical variable-coefficient fixed-length (VCFL) coding algorithm was applied, then different rate-compatible punctured convolutional (RCPC) code was used before transmission to provide unequal error protection (UEP). Given the total transmission bits, an optimal algorithm was used to minimize the total distortion. Simulation results show that the proposed scheme has higher compression ratio and performs well on channels with high bit error rate (BER).

Key words variable-coefficient fixed-length (VCFL) coding, wavelet transform, rate-compatible punctured convolutional (RCPC) code, unequal error protection (UEP)

引言

随着信息时代的到来, 如何有效、可靠地传输图像数据, 已成为一个重要研究课题. Shannon 信息论的基本结论是源编码和信道编码可以分别考虑, 这从信息论角度是正确的, 只要源的熵小于信道容量, 就存在一种源编码和信道编码分开考虑的方案使信息以任意小的误码率在信道上传输. 在这一基本结论的基础上, 分别独立发展了许多源编码和信道编码方法. 但是, Shannon 的理论对源编解码和信道编解码算法的延迟和复杂度没有限制, 即可以是任意的延迟和复杂度, 这在实际应用中往往无法做到. 因此, 在实际应用中综合考虑源编码和信道编码往往能取得更好的效果. 许多学者提出了各种各样的综合源编码和信道编码调制的图像编码方案, 包括信道优化矢量量化 (COVQ)^[7]、子波系数通过全通滤

波器进行源整形 (source reshaping) 的方案^[3]、对子波系数使用各种信道编码 (如卷积码、RCPC 编码) 的方案^[2,4]等.

基于统计特性的 VCFL 编码方法^[1]具有压缩比大、抗误码能力强于变长编码、编码算法简单的优点. 通过加奇偶校验位、双向解码等措施提高了算法的抗误码能力, 但在传输误码率较高时, 效果不很理想.

本文提出的图像编码方案, 对子波变换各子带系数量化后采用以下两种源编码方式之一: 方式 1 为基于统计特性的 VCFL 编码; 方式 2 为量化系数不再进一步源编码. 基于统计特性的 VCFL 编码在符号概率分布比较平均时, 与其它变长编码一样压缩效果不明显, 同时数据经过 VCFL 编码后抗误码能力有所下降, 因此方案中增加了源编码方式 2. 图像经源编码后选择不同码率的 RCPC 编码以提供不

* 复旦大学科学技术青年基金 (批准号 EX86301) 资助项目
稿件收到日期 2001-08-14, 修改稿收到日期 2001-11-09

* The project supported by Science and Technology Youth Foundation
of Fudan Univ. (No. EX86301)
Received 2001-08-14, revised 2001-11-09

同程度的差错保护(UEP)并在信道上传输.在给定传输总比特数的情况下,通过优化算法来控制各种编码参数,使整个图像编码方案的总体失真最小.在二进制对称信道(BSC)上的模拟结果表明这一方案具有更强的抗误码能力.

1 图像编码传输方案

我们的图像编码传输方案如图 1 所示.变换编码采用子波变换,不采用离散余弦交换(DCT),这是因为在高压缩比时 DCT 存在明显的方块效应,严重影响图像的主观效果.对于子波各子带系数量化后采用两种源编码方式,即使用和不使用 VCFL 编码两种,在编码时通过优化算法,对每一子带选择最佳的源编码方式.源编码后对各子带分别用不同的 RCPC 编码器编码并进行传输.解码时使用硬判决 Viterbi 译码.

信道编码采用 RCPC 编码^[5],RCPC 编码是一种卷积编码,特点是编码器由一个母卷积码编码器和一个删除(puncturing)器组成,同一组 RCPC 编码器的母卷积码编码器完全相同,仅删除(puncturing)器所使用的删除表(puncturing table)不同,通过删除表的不同可灵活地调节编码码率,实现不同程度的差错保护,图像经子波编码后各子带数据具有不同的重要性,对差错保护的要求不同,而 RCPC 编码的特点,正是使之适合于对子带数据进行信道编码并传输.

我们的方案中采用的 RCPC 编码器是文献[5]中的编码器,母卷积码的码率为 1/4,约束长度为 4,生成矩阵为[10011;11101;10111;11011].删除周期(Puncture period)为 8,通过删除表的不同可实现一组编码器,对应的码率分别为 8/9、8/10、8/12、8/14、8/16、8/18、8/20、8/22、8/24、8/26、8/28、8/30、

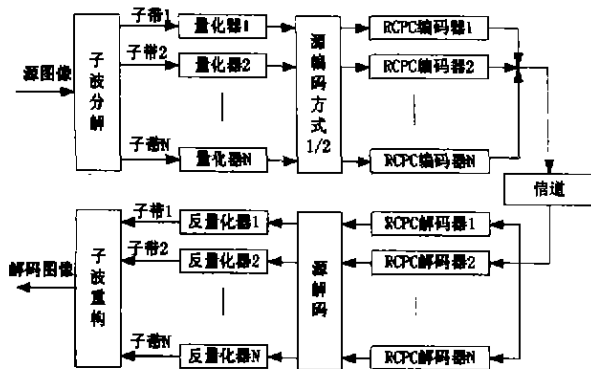


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure

8/32.

2 失真度分析

整个方案的总失真由源编码失真和信道编码失真两部分组成,一般可假设源失真 D_s 和信道失真 D_c 正交,即总失真可表示为 $D = D_s + D_c$,源失真和信道失真可表示为

$$D_s = \sum_{i=1}^N D_{s,i}(q_i),$$

$$D_{s,i}(q_i) = \sum_{n=0}^{N_i-1} D(x_{i,n}, Q_{q_i}^{-1}(Q_{q_i}(x_{i,n}))), \quad (1)$$

$$D_c = \sum_{i=1}^N D_{c,i}(q_i, s_i, l_i). \quad (2)$$

其中, N 为子带数; q_i 为各子带量化比特; $D_{s,i}(q_i)$ 为第 i 子带的量化失真; N_i 为第 i 子带的系数数目; $x_{i,n}$ 为第 i 子带的系数; $Q_{q_i}(x_{i,n})$ 为 $x_{i,n}$ 经 q_i 比特量化后的结果; $D(a, b)$ 为平方误差; l_i 代表所选择的 RCPC 编码器,数值取为 1、2、4、6、8、10、12、14、16、18、20、22、24,分别对应不同码率的 RCPC 编码器 8/9、8/10、8/12、8/14、8/16、8/18、8/20、8/22、8/24、8/26、8/28、8/30、8/32; s_i 代表所选择的源编码方式,对源编码方式 1 和源编码方式 2, s_i 分别为 1、2; $D_{c,i}(q_i, s_i, l_i)$ 为第 i 子带信道编码失真,可表示为 $D_{c,i}(q_i, s_i, l_i) = P(s_i, l_i) \times I_i(q_i, s_i)$. $D_{c,i}(q_i, s_i, l_i)$ 具体计算分两种情况.

2.1 VCFL 编码后子带信道编码失真 $D_{c,i}(q_i, 1, l_i)$

设第 i 子带的系数经过量化和 VCFL 编码后得到 B_i 个码 $b_{i,n}$, $b_{i,n}$ 对应的字典内容为 $C(b_{i,n})$. 对于变系数定长(VCFL)编码,在发送的码为 $b_{i,n}$ 而收到的码为 a_i ($a_i \neq b_{i,n}$) 的情况下,不能简单地解码成 $C(a_i)$, 因为 $C(a_i)$ 和 $C(b_{i,n})$ 所代表的量化后系数的长度可能不同,解码成 $C(a_i)$ 会造成后续解码发生整个位移,严重影响图像解码质量.在基于统计特性的 VCFL 编码^[1]中,我们通过加奇偶校验位、双向解码等措施,可以检测出码的差错并得到 $\bar{C}(b_{i,n})$ 的长度,则可对该差错码解码成 $\bar{C}(b_{i,n})$, $\bar{C}(b_{i,n})$ 满足两个条件:(1) $\bar{C}(b_{i,n})$ 长度与 $C(b_{i,n})$ 相同;(2) $\bar{C}(b_{i,n})$ 所包含的符号都为概率表中概率最大的符号.第 i 子带信道编码失真可表示为

$$D_{i,n}(q_i, 1, l_i) = \sum_{n=0}^{B_i-1} \{D(Q_{q_i}^{-1}(\bar{C}(b_{i,n}))),$$

$$Q_{q_i}^{-1}(C(b_{i,n}))\} [1 - P_{1,l_i}(b_{i,n} | b_{i,n})] \quad (3)$$

其中, $P_{1,l_i}(b_{i,n}|b_{i,n})$ 为发送码 $b_{i,n}$ 正确收到 $b_{i,n}$ 的概率. 由于 $P_{1,l_i}(b_{i,n}|b_{i,n})$ 只与码的长度、采用的 RCPC 编码器 l_i 有关, 而与具体的 $b_{i,n}$ 值无关, $D_{i,n}(q_i, 1, l_i)$ 可进一步表示为

$$D_{i,n}(q_i, 1, l_i) = P(1, l_i) \times I_i(q_i, 1) \\ = [1 - P_{1,l_i}(b_{i,n}|b_{i,n})] \sum_{n=0}^{B_i-1} \{D(Q_{q_i}^{-1}(\bar{C}(b_{i,n})), \\ Q_{q_i}^{-1}(C(b_{i,n}))), \quad (4)$$

$$P(1, l_i) \triangleq 1 - P_{1,l_i}(b_{i,n}|b_{i,n}), \quad (5)$$

$$I_i(q_i, 1) \triangleq \sum_{n=0}^{B_i-1} D(Q_{q_i}^{-1}(\bar{C}(b_{i,n})), \\ Q_{q_i}^{-1}(C(b_{i,n}))). \quad (6)$$

其中, $P(1, l_i)$ 为在源编码方式 $1, l_i$ RCPC 编码器下码的差错概率; $I_i(q_i, 1)$ 为第 i 子带在 q_i 量化比特、源编码方式 1 时的重要度, 只与源编码有关而与信道编码无关, 反映了第 i 子带数据对误码的敏感程度.

2.2 不需 VCFL 编码的子带信道编码失真 $D_{c,i}(q_i, 2, l_i)$

采用源编码方式 2 时, 第 i 子带的系数经过均匀量化后得到的 $N_i \times q_i$ 比特进行传输, 每一个系数 $x_{i,n}$ 得到 q_i 个比特, 这 q_i 个比特的重要性不同, 高位的比特重要性大, 低位的比特重要性小. 设各子带的量化范围为 $|\Delta_i|, i=1, \dots, N|$, 则在第 i 子带中表示系数 $x_{i,n}$ 的 q_i 个比特中, 最高位比特出错引起的编码失真为 $(\Delta_i/2)^2$, 次高位引起的编码失真为 $(\Delta_i/4)^2$, 依次类推. 于是, 平均每比特出错引起的编码失真为

$$\bar{D}_{i,b} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^{q_i} (\Delta_i/2^i)^2 = \frac{1}{q} \frac{1 - \left(\frac{1}{4}\right)^{q_i}}{3} \Delta_i^2. \quad (7)$$

信道编码失真可表示为

$$D_{c,i}(q_i, 2, l_i) = P(2, l_i) \times N_i \times q_i \times \bar{D}_{i,b} \\ = P(2, l_i) \times I_i(q_i, 2) \quad (8)$$

$$I_i(q_i, 2) \triangleq N_i \times q_i \times \bar{D}_{i,b} \\ = N_i \times \frac{1 - \left(\frac{1}{4}\right)^{q_i}}{3} \Delta_i^2. \quad (9)$$

其中, $P(2, l_i)$ 为在源编码方式 $2, l_i$ RCPC 编码器下比特的差错概率, $I_i(q_i, 2)$ 为第 i 子带在 q_i 量化比特、源编码方式 2 时的重要度, 只与源编码有关而与信道编码无关, 反映了第 i 子带数据对误码的敏感程度.

3 优化算法

整个方案中需要优化的编码参数有各子带的量化比特数 q_i 、源编码方式 s_i 、各子带的编码后数据传输所采用的 RCPC 编码方式 l_i . 具体算法如下.

设对第 i 子带的子波系数进行源编码, 在量化比特数 q_i 、源编码方式 s_i 的情况下, 得到的总比特数为 $|R_i(q_i, s_i)|, i=0, 1, \dots, N|$, 经过 RCPC 编码后的总比特数为 $|R_i(q_i, s_i) \cdot (P + l_i)/P|, i=0, 1, \dots, N|$. 优化算法的目标为在给定 BSC 信道的比特差错概率 p 及在信道上传输的总比特数 R_{budget} 的情况下, 选择参数 $\{q_i, s_i, l_i, i=0, 1, \dots, N\}$, 使总失真最小, 即

$$\min \sum_{i=1}^N D_i(q_i, s_i, l_i) \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^N R_i(q_i, s_i, l_i) \leq R_{\text{budget}}, \quad (10)$$

$$D_i(q_i, s_i, l_i) = D_{c,i}(q_i) + P(s_i, l_i) \\ * I_i(q_i, s_i),$$

$$R_i(q_i, s_i, l_i) = R_i(q_i, s_i) \cdot (P + l_i)/P.$$

要进行优化必须先计算出在源编码方式 s_i, l_i 的 RCPC 编码下的差错概率 $P(s_i, l_i)$, 对两种源编码方式, $P(1, l_i)$ 为码的差错概率而 $P(2, l_i)$ 为比特差错概率, 我们取 VCFL 编码的码长为 32 比特, 则它们之间的关系 $P(1, l_i) = 1 - (1 - P(2, l_i))^{32}$.

数据经过 RCPC 编码后在 BSC 信道上传输的比特差错概率可表示为^[9]

$$P(2, l_i) \leq \frac{1}{P} \sum_{d=d_{\text{min}}}^{\infty} c_d P_d, \\ P_d = \begin{cases} \sum_{k=(d+1)/2}^d \binom{d}{k} p^k (1-p)^{d-k}, & d \text{ 为奇} \\ \sum_{k=d/2+1}^d \binom{d}{k} p^k (1-p)^{d-k} + \\ \frac{1}{2} \binom{d}{d/2} p^{d/2} (1-p)^{d/2}. & d \text{ 为偶} \end{cases} \quad (11)$$

其中, P 为 RCPC 编码的删除周期 (Puncture period); c_d 为 RCPC 码错误权重 (error weight), 对于固定的 RCPC 编码器, c_d 也为固定的; P_d 为选择距离为 d 的错误路径的概率; P 为 BSC 信道的比特差错概率.

优化算法的具体求解方法^[6]如下: 设优化问题

$$\min \sum_{i=1}^N D_i(q_i, s_i, l_i) + \lambda R_i(q_i, s_i, l_i) \quad \lambda > 0 \quad (12)$$

的解为 $\{q_i^*(\lambda), s_i^*(\lambda), l_i^*(\lambda)\}$, 选择适当的 λ' , 可以使 $\sum_{i=1}^N R_i\{q_i^*(\lambda'), s_i^*(\lambda'), l_i^*(\lambda')\}$ 等于或接近 R_{budget} , 则无约束优化问题(12)的解 $\{q_i^*(\lambda'), s_i^*(\lambda'), l_i^*(\lambda')\}$ 即为有约束优化问题(10)的解. 选择 λ 时我们先确定一个大的范围 Δ_λ , 再使用二分法逐步缩小范围直到 Δ_λ 小于给定精度 $\epsilon_\lambda > 0$, 此时的 λ 即为 λ' . 求优化问题(10)的解需要计算 $\lceil \log_2(\Delta_\lambda/\epsilon_\lambda) \rceil$ 次优化问题(12). 求解优化问题(12)时可以分别对各子带求优化, 每一子带可能的 $\{q_i, s_i, l_i\}$ 组合的数目为 $n(q_i) \cdot n(s_i) \cdot n(l_i)$, 其中 $n(q_i), n(s_i), n(l_i)$ 分别为 q_i, s_i, l_i 可能取值的数目, 比如源编码方式 s_i 只能取方式 1、方式 2, 即 $n(s_i) = 2$. 最终, 优化算法的计算复杂度为

$$O(\lceil \log_2(\Delta_\lambda/\epsilon_\lambda) \rceil \cdot n(q_i) \cdot n(s_i) \cdot n(l_i)), \quad (13)$$

与子带数目及 q_i, s_i, l_i 可能取值的数目和 λ 的搜索次数成正比, 为线性复杂度.

4 模拟结果

我们采用标准静态图像 512×512 lena 像, 经过 5 阶子波变换分解为 16 个子带并分别进行均匀量化, 子波变换采用 Antonini 的 7/9 抽头滤波器^[8]. 模拟结果为在主频为 500M 的计算机上 20 次模拟的平均值, 总结如下.

(1) 我们对 3 种编码方法比较了解码图像的 PSNR 与压缩码率之间的关系. 方法 1, 即我们提出的方法, 通过优化算法对图像经子波变换后各子带系数采用不同码率的 RCPC 编码; 方法 2, 对各子带

系数不进行 RCPC 编码(码率为 8/8), 直接进行传输; 方法 3, 对所有子带系数均使用码率为 8/20 的 RCPC 编码. 误比特率为 0.01 的 BSC 信道上的模拟结果见图 2, 可以看出我们的方法效果最好, 方法 2 的解码图像的 PSNR 很低, 可见不进行信道编码直接在误码率很高的信道上传输图像是不可行的.

(2) 我们对 1.0bpp(比特每像素)、0.5bpp、0.25bpp 3 种不同压缩码率下, 解码图像的 PSNR 与 BSC 信道误码率之间的关系进行了模拟, 结果见图 3, 可以看出我们的方法抗误码能力很强, 在误码率达到 0.1 时, 仍具有较高的 PSNR.

(3) 文献[2]对分级零树(SPIHT)图像子波压缩算法进行了抗误码方面的改进, 信道编码使用卷积码. 表 1 为在误码率为 0.001 的 BSC 信道上传输 512×512 lena 像的模拟结果(单位为 dB), 可以看出我们的方法略好于文献[2]的方法.

(4) 文献[3]提出一种综合源编码和信道编码的方案(RJSCC), 子波系数量化前先通过全通滤波器进行源整形(source reshaping), 信道编码使用 RCPC 码. 表 2 给出了 BSC 信道上 512×512 lena 像模拟结果(单位为 dB). A-RJSCC 为文献[3]中的方法, 文献[3]同时也给了 A-OJSCC 和 A-RQ 两种方法的结果. 从表中可以看出我们的方法要优于其他 3 种方法.

(5) 我们方案的编码时间约为 6 s, 解码时间约为 1 s, 对不同的压缩比编解码时间略有差别. 为了提高编解码速度以提高算法的实用性, 在编码时可以根据各子带系数的统计特性减少每一子带编码参数 $\{q_i, s_i, l_i\}$ 组合的数目, 如对低频子带 s_i , 只能用方式 2, q_i 只能取 4~8, 对频率高一些的子带 s_i 只能

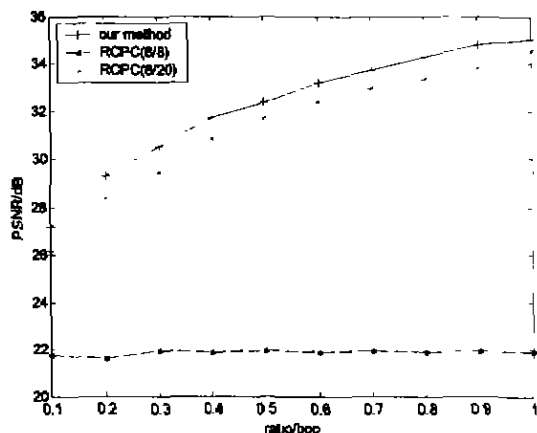


图 2 PSNR 与压缩码率的关系(误码率为 0.01)

Fig. 2 PSNR vs. rate (BER = 0.01)

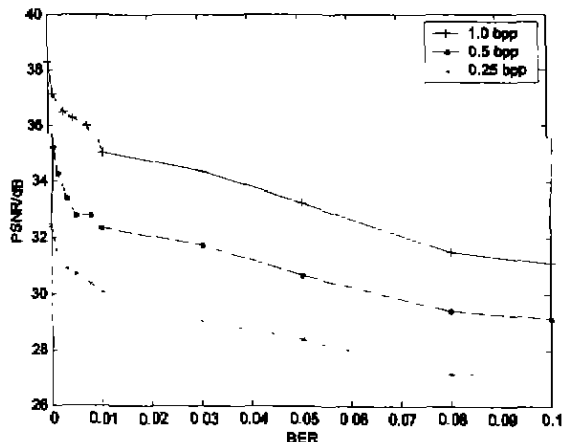


图 3 PSNR 与误码率的关系

Fig. 3 PSNR vs. BER (bit error rate)

表1 误码率为0.001的BSC信道结果
Table 1 Results over BSC with BER = 0.001

码率 (bpp)	SPIHT	全部混 合编码	部分混 合编码	分级混 合编码	本文 方法
0.25	16.72	30.70	30.84	30.83	30.538
0.5	17.11	33.71	33.861	33.874	34.286

表2 512 * 512 lena 像在 BSC 信道上结果
Table 2 Results of transmitting 512 * 512 lena over BSC

码率 (bpp)	方法	误 码 率				
		0	10^{-3}	10^{-2}	0.05	10^{-1}
1	A-RJSCC	36.22	35.85	34.07	32.74	31.26
	A-OJSCC	33.80	33.52	32.35	30.73	28.94
	A_RQ	36.72	36.02	33.57	N/A	25.40
	本文方法	38.30	37.17	35.06	33.28	31.11
0.5	A-RJSCC	33.02	32.78	31.94	30.29	28.68
	A-OJSCC	31.21	30.64	30.03	28.53	27.33
	A_RQ	33.45	33.00	31.42	N/A	24.82
	本文方法	35.24	34.29	32.36	30.68	29.13
0.25	A-RJSCC	30.40	30.20	29.43	27.94	26.85
	A-OJSCC	28.93	28.59	28.04	26.87	25.79
	A_RQ	30.73	30.34	29.24	N/A	24.12
	本文方法	32.46	31.54	30.09	28.41	27.22

为方式1, q_i 只能取3~6, 而对频率最高的子带 s_i 只能为方式1, q_i 只能取0~2, 这样可立即使编码速度提高3~4倍, 对于固定的静态图像, 我们还可以预先计算子波变换和各子带在不同 s_i 、 q_i 下的源编码失真和重要度, 在传输图像前仅需针对不同信道和压缩比要求计算误码率并解参数优化问题, 这样可大大减少编码时间. 在解码时, 可进一步优化删除卷积码的维特比译码程序来提高解码速度.

5 总结

本文提出了一种新的图像编码方案, 对图像进行子波变换后, 对各个子带分别采用基于统计特性的变系数定长(VCFL)编码, 编码后的数据根据重要性使用不同的RCPC编码并进行传输, 通过优化

算法来控制不同的编码参数, 以使整个图像编码方案的失真最小. 在BSC信道上的模拟结果表明采用新方案压缩比高, 抗误码能力强, 在BSC信道误码率较高时仍表现出良好的性能. BSC信道模型可以用来描述许多实际信道, 如卫星信道、深空信道、经过比特交织的无线信道等, 因此我们的图像编码方案具有较强的实用性.

REFERENCES

- [1] GU Wei, HU Bo, LING Xie-Ting, *et al.* An efficient and robust scheme of image-coding. *J. Infrared Millim. Waves* (顾伟, 胡波, 凌熿亭, 等. 一种高效的抗误码能力强的图像编码方案. *红外与毫米波学报*), 2001, 20(3): 189—193
- [2] WANG Yi-Ming, ZHAO Xing-Tao, CAO Jian-Xin. A wavelet image hybrid algorithm with error-correcting functions. *Acta Electronica Sinica* (汪一鸣, 赵星涛, 曹建新. 具有纠错能力的小波图像混合编码. *电子学报*), 2000, 28(9): 112—113
- [3] Jianfei Cai, Chang Wen Chen. Robust joint source-channel coding for image transmission over wireless channels. *IEEE Trans on CSVT*, 2000, 10(6): 962—966
- [4] Sherwood P G, Kenneth Zeger. Error protection for progressive image transmission over memoryless and fading channels. *IEEE Trans on Communications*, 1998, 46(12): 1555—1559
- [5] Joachim Hagenauer. Rate-compatible punctured convolutional codes(RCPC codes) and their application. *IEEE Trans on Communications*, 1988, 36(4): 389—400
- [6] Shoham Y, Gersho A. Efficient bit allocation for an arbitrary set of quantizers. *IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990, 38: 327—336
- [7] Farvardin N, Vaishampayan V A. On the performance and complexity of channel-optimized vector quantizers. *IEEE Trans on Information Theory*, 1991, 37: 155—160
- [8] Antonini M, Barlaud M, Mathieu P. Image Coding Using Wavelet Transform. *IEEE Trans on Image Processing*, 1992, 1: 205—220
- [9] Proakis J G. *Digital Communications* (third edition). New York: McGraw-Hill, 1995