

基于 SPECK 和 Turbo 码的鲁棒图像传输

单承赣 李晓莉

(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘要 针对信源与信道编码各自的特点, 提出了一种基于 SPECK (set partitioned embedded block coder) 算法和 Turbo 码相结合的信源信道联合编码方案。由于图像经 SPECK 算法编码后的数据流对信道噪声非常敏感, 所以可采用此方案来提高图像对信道错误的鲁棒性。该方案通过 SPECK 算法来产生具有不同容错性的子流, 信道编码采用删余 Turbo 码, 用不同码率的信息流来对这些子流进行非平等保护, 以改善数据流抗信道差错的整体性能。这种方案充分利用了信源编码后的数据流的特性, 从而使误码率与码长达到了一个较好的平衡。实验结果表明, 该方案不仅能够在较高的压缩比下, 使解码图像具有较高的峰值信噪比, 并且由于 Turbo 码的优异性能, 使得图像在较低信噪比条件下进行传输仍具有较强的鲁棒性。

关键词 图像编码 分割嵌入式模块编码算法 信源信道联合编码 不平等差错保护 Turbo 码

中图分类号: TN919.81 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)01-0134-07

Robust Image Transmission Using SPECK and Turbo-codes

SHAN Cheng-gan, LI Xiao-li

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract This paper presents a joint source-channel coding scheme based on SPECK and revises turbo codes according to the characteristic of source and channel coding. The purpose of this scheme is to improve the robustness of the image. Source coding in this paper adopts image coding based on wavelet. This scheme uses SPECK to generate diverse fault tolerant substream. Punctured Turbo codes are used for channel coding. Channel coding adopts unequal error protection (UEP) for the compressed data with different channel coding rates according to the importance for reconstruction. This scheme utilizes the property of compressed data which source has coded and gets better balance between bit error rate and code length. The experimental results show that the proposed scheme can get high PSNR (peak signal noise ratio) in high compression ratio and provide strong robustness to the image in low SNR because of the superior performance of Turbo-codes.

Keywords image coding, set partitioned embedded block coder (SPECK), joint source channel coding, unequal error protection (UEP), Turbo codes

1 引言

与以前的图像压缩编码方法相比, 嵌入式零树小波 (embedded zerotree wavelet, EZW) 算法^[1]的提出, 显著改善了图像压缩编码的性能。由 Asad 和 Pearlman 提出的 SPECK (set partitioned embedded

block coder) 算法^[2]是建立在 EZW 和 SPIHT (set partitioning in hierarchical trees)^[3]算法基础上的一种改进方法。由于 SPECK 算法充分利用了小波变换后同一子带中不重要系数的相关性, 因此它对静止图像有较好的率失真特性, 并且计算复杂度低。然而由于它在有噪信道中的抗噪性能却很差, 因此, 适当降低它的性能来改善其容错性是必要的。

收稿日期: 2004-10-25; 改回日期: 2005-05-12

第一作者简介: 单承赣 (1942 ~), 男, 合肥工业大学教授。1965 年于南京航空学院无线电系雷达专业毕业。现主要研究领域为多媒体信号传输与处理。E-mail: jsdzshan@yahoo.com.cn

长期以来,信道编码都是在信源编码的所有比特都同等重要的假设上进行的,而不考虑信源编码的数据特性。其原因之一是因为按照香农信息编码理论中的观念,信源编码与信道编码可以分离进行;另一个主要原因是由于以前的图像压缩方法是对图像进行分块压缩,因此在对其进行信道编码时,很难区分出数据中哪些是对重建图像起主要作用的数据,而随着小波变换算法的发展和零树编码的提出,有针对性的纠错编码成为可能。用小波变换和基于小波变换的 SPECK 算法编码后所生成的压缩数据流是渐进的,由于它们具有这样的特性,即对图像重建作用较大的重要数据位于数据流的前面,其对差错也相对敏感,因而,针对差错敏感程度不同的信息,采用不同的信道编码方案能够帮助改善整个系统的差错控制,同时也可达到误码率与码长较好的平衡。

信道编码采用删余 Turbo 码,它可以提供很强的纠错能力。Turbo 码^[4]不仅可以在译码复杂性和码率之间达到较好的平衡,而且 Turbo 码在高噪声的应用环境中的性能比以往其他的信道编码性能优越,而删余的 Turbo 码^[5,6]则很适合用于对图像压缩后的数据进行非平等的纠错保护。

2 基于 SPECK 和 Turbo 码的编码方法

图像的信源编码是为了压缩数据,即通过减少数据冗余量来使得图像能更快地传输到目的地,同时要保证重建图像质量,而信道编码则通过适当增加冗余量来提高纠错性能。信源信道联合编码的优越性在于,由于它可使信道编码只增加少量的纠错码就可以达到较好的纠错性能,因此可以提高传输效率。

本文所提出的信源信道联合编码是基于

SPECK 信源编码和 Turbo 码的信道编码。之所以采用 SPECK 信源编码与 Turbo 码的信道编码来进行联合编码,是由两者的特性决定的:一方面由于 SPECK 算法所得的码流是渐进的,它可利用块形式的集合来对小波变换后的图像信息中的重要信息(低频信息)进行优先编码,这可使得图像的重要信息集中在码流的前面,因而信道编码时,很容易分别对重要信息和非重要信息进行不同的保护;另一方面, SPECK 算法是利用块形式的集合来进行重要性比较,由于其比较结果隐含定义了算法的执行路径,因此对差错较敏感,但是由于其是基于块形式的集合,块间是独立编码的,因而在传输发生误码时,只有误码所在的块受到影响,而且由于 Turbo 码的纠错能力非常强,因而两者的结合可使得最后的比特流几乎与原始的 SPECK(没有用算术编码)算法有相同的率失真性。

对于 SPECK 渐进压缩图像数据,可根据其对重建图像的重要程度不同,用低码率的 Turbo 码来对压缩数据中的重要信息进行信道编码保护,而对非重要数据采用高码率的 Turbo 码进行信道编码保护,即采用不平等的差错保护策略。在译码的时候,则对不同码率的比特流采用相应不同的迭代次数,尽可能减少重要信息的误码率,同时加快译码的速度。联合编码的原理图如图 1 所示,其中, X 为原始图像, $\hat{x}$ 为重建图像, LIB (location information bitstream) 为位置信息比特流,也就是重要信息, VIB (value information bitstream) 为值信息比特流,也就是非重要信息。

2.1 所用的小波变换方法

在基于小波变换的图像编码中,小波变换方法的选择对于图像压缩的质量很重要,本文中采取的是一种比较新的 FLWT(fast lifting wavelet transform)

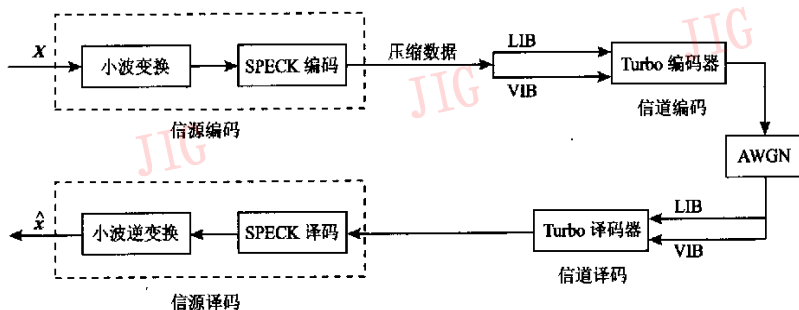


图1 信源信道联合编码系统框图

Fig. 1 Joint source-channel coding system structure

方法^[7],它能够比较快地实现小波变换,即首先将每一次变换信号分成一个高频和一个低频子带,然后进行二次抽样。FLWT 方法不需要额外的内存,它是直接在原始图像的内存中进行变换,而且算法只涉及到整数的加减运算,其不仅实现速度快,并且其反变换只需要简单地改变操作次序,同时将“+”与“-”互换即可。

2.2 比特流的分类以及头语法

SPECK 比特流中的比特根据它们在比特流中的位置不同而具有不同的容错性,且比特流中比特的重要性是递减的,即重要的比特位于比特流的前面。这种特性使得在一个比特流中实现不同段的 UEP(unequal error protection)成为可能。进行 UEP 的一种方法是将比特流分成不同长度的子比特流(以下简称子流),以不断降低对它们的保护,但是由于这种方法没有考虑到不同比特的特性,因此不能利用 SPECK 比特流的渐进特性。本文中采用的方法由于是将信源编码后的比特流进行分类,并在不同类的边界处改变信道编码的速率,因而只需要告知接收端信道编码速率变换的位置即可,与提供不同子比特流长度相比,其提供层数数目所使用的比特数更少。

SPECK 算法采用比特位平面进行图像编码,每个比特位平面执行以下两个过程:首先是排序过程(sorting pass),它用来确定小波系数符号值以及重要小波系数的位置信息;接下来的是精细过程(refinement pass),它用来传送重要系数精细的值。仿真显示,重要小波系数的位置信息对原图像的重构来说是非常重要的,如果出错的话,将会导致错误扩散,而影响后续的译码,因而本文中将在排序过程中产生的位置信息比特作为 LIB,而将精细过程中产生的比特和排序过程中形成的符号比特一起作为 VIB,由于 VIB 中的比特错误不会扩散,即使出错,对重构图像的影响也相对较小,因而,可将原始 SPECK 数据流分解成 LIB 和 VIB 两个子流,LIB 中存放的是重要信息,而 VIB 中存放的是非重要信息。

对 SPECK 比特流进行两类分解后,在解码端,解码器需要一些头信息比特来确定什么时候怎样汇合到来的子流。头信息包含对每一帧大小、每类比特所占帧数以及对每类比特流所采用的信道编码码率的说明,这些参数如果发生误码,则会使译码器无法对序列进行正确译码,由于这部分信息对译码来

说是非常重要的,因此将其放在 LIB 前端,以便对其进行重点保护。

2.3 Turbo 码技术

Turbo 码编码器是由两个递归系统卷积(recursive systematic code, RSC)编码器和一个交织器组成,两个码率均为 $R = 1/2$ 的 RSC 编码器可通过交织器分隔开,用于分别对输入的数据进行并行处理(如图 2 所示)。编码器 1 直接对信息序列进行编码,而编码器 2 的输入数据则是经过交织器交织后的信息序列。此编码器属于系统编码器,因为信息位可直接传送到信道入口,而且与两个系统码编码器得到的两个校验序列可经适当组合后通过信道,所以该编码器可取得较大压缩比。由于交织器的作用是对码元去相关,它可使编码后的子码具有较大的码距,因而 Turbo 码的纠错能力得到显著改善。

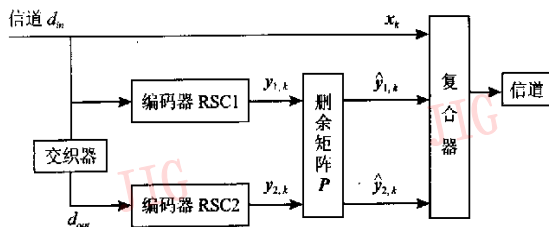


图2 Turbo码编码器结构框图

其中 d_k 为信息位, $y_{1,k}$ 和 $y_{2,k}$ 是校验位, $\hat{y}_{1,k}$ 和 $\hat{y}_{2,k}$ 是经过删余后的校验位

Fig.2 Turbo-encoder structure, where d_k is the information bit, $y_{1,k}$ and $y_{2,k}$ are two parity bits, $\hat{y}_{1,k}$ and $\hat{y}_{2,k}$ are punctured parity bits

Turbo 码译码器的基本结构如图 3 所示。它由两个软输入软输出(soft-input and soft-output, SISO)译码器 DEC1 和 DEC2 组成,而交织器则与编码器中所使用的交织器相同。译码器 DEC1 通过对 RSC1 编码器的分量码进行最佳译码来产生信息序列 U 中每一比特的似然比信息,并将其中的“新信息”经过交织送给 DEC2,而译码器 DEC2 则将此信息作为先验信息,在对 RSC2 编码器的分量码进行最佳译码时,首先产生关于交织后的信息序列中每一比特的似然比信息;然后将其中的“外信息”经过解交织送给 DEC1,进行下一次译码,这样,经过多次迭代,DEC1 或 DEC2 的外信息就趋于稳定,即似然比渐进逼近于对整个码的最大似然译码;最后对此似然比进行硬判决,即可得到信息序列 U 的最佳估值。整个译码过程可以看作是两个子译码器一次

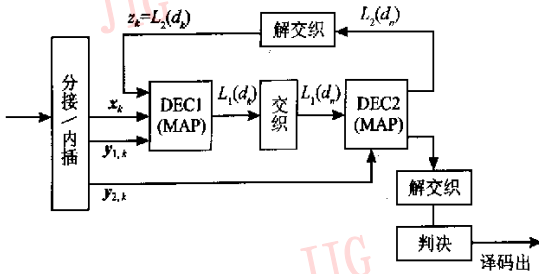


图3 Turbo码译码器结构框图

Fig.3 Turbo-decoder structure

次的信息交换与迭代译码(类似于涡轮机的工作原理,故得名 Turbo 码)的过程。

本文中的 Turbo 译码采用的是 MAP(maximum a posterior)算法。本文将 $y_{1,k}, y_{2,k}$ 交替作为信息序列 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_N\}$ 的校验位, $u_k = 0, 1$, 这里设编码器输出的码序列为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k, \dots, c_N\}$, 该序列采用 BPSK(binary phase shift key)调制, 经过离散高斯无记忆信道并加入噪声后, 接收端接收的序列为 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_N\}$, $r_k = (2u_k - 1 + p_k, 2c_k - 1 + q_k)$ 。 p_k, q_k 是相互独立且均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯随机变量。

2.4 差错保护

因为图像的大部分能量集中在低频, 所以一旦误码发生在这些信息中, 则将会导致重建图像质量急剧下降, 甚至根本无法重建图像。前面已提及在进行 SPECK 编码时可以通过对小波变换后的图像数据做稍许的改动来得到两个具有不同容错性的子流 LIB 和 VIB, 这也是充分考虑了 SPECK 比特流特性后所做出的改进, 因为这样就可以按照它们不同的重要性对它们进行不平等的差错保护。

本文中修改的 Turbo 码就是为了实现此目标,

图2中所示的 Turbo 码编码器就是采用两个码率均为 $R = 1/2$ 的 RSC 来对第 k 个信息比特 u_k 附加两个校验比特 $y_{1,k}, y_{2,k}$, 其中 $y_{2,k}$ 是通过第 k 个信息比特 u_k 经过交织后产生的, 其输出结果为 $u_k, y_{1,k}, y_{2,k}, \dots$ 。此时所得的 Turbo 码的码率 $R = 1/3$, 但是如果令编码器 RSC1 以及编码器 RSC2 的校验比特流乘以一个删余矩阵 $P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, 就产生了在编码器 RSC1、RSC2 间轮流取值的效果, 即输出结果为 $u_k, y_{1,k}, u_{k+1}, y_{2,k+1}, u_{k+2}, y_{1,k+2}, \dots$ 。此时, 所得的 Turbo 码的码率 $R = 1/2$ 。

由上所述, 本文中所采取的差错保护如下: 对 LIB, 因为其对重建图像比较重要, 所以用码率 $R = 1/3$ 的 Turbo 码对其进行重点编码, 而对于 VIB, 因为差错不会在其中扩散, 所以只需用码率 $R = 1/2$ 的删余 Turbo 码来进行保护就足够了。另外, 由于 Turbo 码的译码过程是在译码中利用附加信息在两个译码器间进行多次迭代, 因此在迭代计算收敛之前, 应尽可能地增加迭代次数, 这样才可以减小误码率, 但由于迭代又是造成延时的主要因素, 所以降低误码率和减小延时在一定程度上是相互制约的。由于对重要信息和非重要信息采用了不同的 Turbo 码进行编码, 因而可以在其译码时分别采用不同的迭代次数进行译码, 本文中对 LIB 译码时进行了 8 次迭代, 尽可能地纠正错码, 以减小重要信息的出错率, 而对 VIB 则只进行 5 次迭代, 以加快译码速度, 减少延时。

3 仿真与结果分析

为验证本文提出的 UEP 方法的效果, 用标准的 $256 \times 256 \times 8$ Lena 图像(图 4(a))及 $256 \times 256 \times 8$ 分辨率的 Goldhill 图像(图 5(a))来对本文提出的



(a) 原始 Lena 图像 (256 × 256)

(b) EEP 编码重建图像
 $R = 1/2, E_b/N_0 = 1.0 \text{ dB}$,
 $\text{iter} = 8, \text{PSNR} = 30.333 \text{ dB}$ (c) UEP 编码重建图像
 $R = 1/3 \sim 1/2, E_b/N_0 = 1.0 \text{ dB}$,
 $\text{iter} = 8 \sim 5, \text{PSNR} = 34.434 \text{ dB}$ (d) UEP 编码重建图像
 $R = 1/3 \sim 1/2, E_b/N_0 = 0.7 \text{ dB}$,
 $\text{iter} = 8 \sim 5, \text{PSNR} = 26.567 \text{ dB}$

图4 不同编码方法所获得的图像

Fig.4 Images obtained with different coding method

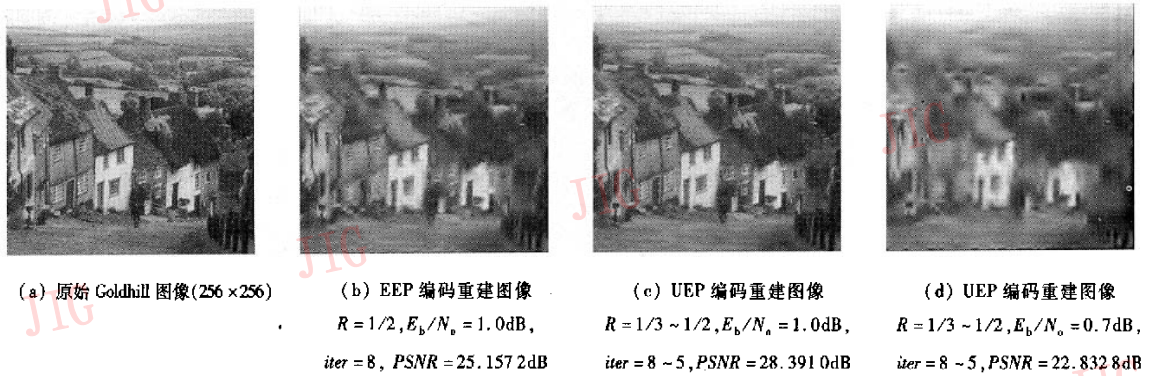


图 5 不同编码方法所获得的图像

Fig. 5 Images obtained with different coding method

注:图中 $R=1/3 \sim 1/2$ 表示重要信息码率为 $1/3$,非重要信息码率为 $1/2$, $iter=8 \sim 5$ 表示重要信息译码迭代次数为 8 ,非重要信息译码迭代次数为 5 。

方法进行仿真实验。小波变换采用 FLWT 方法,并采用 FBI9-7 小波基^[8],变换次数为 8 ,信源编码采用的是 SPECK 算法(没有加算术编码),压缩比为 $16:1$,信道编码的 Turbo 码是采用 RSC(37,21)编码器,实验中的模拟信道传输采用的是 AWGN 信道,即对传输数据加入高斯白噪声。

仿真实验时,首先对每幅图像进行等差错保护

(equal error protection,EEP),EEP 采用码率 $R=1/2$ 的 Turbo 码进行信道编码,在信噪比为 1.0dB 时,进行了多次实验,并将数据分为 18 帧,译码交织最大次数 $iter$ 采取 8 次,结果发现,各帧的误码率是随机的,而当错误发生在前面几帧时,图像根本无法重建。表 1、表 2 为 EEP 实验所得到的各帧误码率的其中两组。表 1 显示在实验时由于前几帧没有发生

表 1 Lena 和 Goldhill 图像经 EEP 编码后,在 $E_b/N_0=1.0\text{dB}$,码率 $R=1/2$,译码最大交织次数 $iter$ 为 8 次时各帧误比特率(bit error rate,BER)

Tab.1 BER of each frame for Lena and Goldhill given by EEP encoding with $E_b/N_0=1.0\text{dB}$, rate $R=1/2$ and interleaving 8 decoding

图像	帧序列								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lena	0	0	0	0	0	0	0	0	0.051
Goldhill	0	0	0	0	0	0.006	0	0	0
帧序列	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Lena	0	0	0	0	0	0	0	0.004	0
Goldhill	0	0	0	0	0	0	0.047	0	0

表 2 Lena 和 Goldhill 图像经 EEP 编码后,在 $E_b/N_0=1.0\text{dB}$,码率 $R=1/2$,译码最大交织次数 $iter$ 为 8 次时,各帧误比特率

Tab.2 BER of each frame for Lena and Goldhill given by EEP encoding with $E_b/N_0=1.0\text{dB}$, rate $R=1/2$ and interleaving 8 decoding

图像	帧序列								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lena	0.079	0	0	0	0	0	0	0	0
Goldhill	0.003	0	0	0.056	0	0	0	0	0
帧序列	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Lena	0	0	0	0	0	0	0	0	0.020
Goldhill	0	0	0.047	0	0	0	0	0	0

错码,因此可以重建图像(见图 4(b)及图 5(b)),而表 2 则显示由于第 1 帧发生误码,故图像无法重建。

本文所提出的 UEP 方法对重要信息 LIB(包括头信息及位置信息)采用码率 $R = 1/3$ 的 Turbo 码进行编码,而对图像非重要的数据 VIB(包括符号和值信息)则采用码率 $R = 1/2$ 的 Turbo 码进行编码,并在不平等保护解码中对重要信息采用 8 次迭代,而对非重要信息只进行 5 次迭代,由于这样的处理保证了前几帧重要信息的准确性,因此不会产生 EEP 编码中无法重建图像的问题。实验中前 13 帧数据

为 LIB,而后 5 帧数据为 VIB。表 3 为 UEP 编码的实验结果,图 4(c)及图 5(c)为其重建图像。

另外,在 $E_b/N_0 = 0.7\text{dB}$ 时(E_b 代表平均到每个比特上的信号能量, N_0 表示噪声的功率谱密度),对 EEP 和 UEP 分别进行了实验,实验结果显示,采用 EEP 编码在码率为 $R = 1/2$ 时,无法重建图像;而 UEP 编码,由于对重要数据采用码率为 $R = 1/3$ 的 Turbo 码进行了重点保护,因而可以还原出图像的大致信息,表 4 为 UEP 编码的实验结果,图 4(d)及图 5(d)为 UEP 编码重建图像。

表 3 Lena 和 Goldhill 图像经 UEP 编码后在 $E_b/N_0 = 1.0\text{dB}$ 时,各帧误比特率

Tab. 3 BER of each frame for Lena and Goldhill given by UEP encoding with $E_b/N_0 = 1.0\text{dB}$

图像	帧序列								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lena	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Goldhill	0	0	0	0	0	0	0	0	0
帧序列	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Lena	0	0	0	0	0.002	0	0	0	0.001
Goldhill	0	0	0	0	0	0	0	0.025	0

表 4 Lena 和 Goldhill 图像经 UEP 编码后在 $E_b/N_0 = 0.7\text{dB}$ 时,各帧误比特率

Tab. 4 BER of each frame for Lena and Goldhill given by UEP encoding with $E_b/N_0 = 0.7\text{dB}$

图像	帧序列								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lena	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Goldhill	0	0	0	0	0	0	0	0	0
帧序列	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Lena	0	0	0	0	0	0.067	0.055	0.066	0.052
Goldhill	0	0	0	0	0	0.001	0.039	0.097	0.004

从实验结果可以看出,无论是采用主观感觉对图像质量进行评测,还是采用客观的数学描述(峰值信噪比 (peak signal noise ratio, PSNR)),不平等差错保护在高噪声信道传输后所重建的图像均明显优于同等差错保护重建的图像。

4 结 论

本文将 SPECK 算法做了稍许的改动,产生了对

信道错误有不同容错特性的子流,这样就可以根据 UEP 方案应用 Turbo 码做更有效的保护。依靠比特的语法设计不仅保持了 SPECK 码流的嵌入特性,而且通过对 SPECK 的码流进行分解,使得对信道编码的差错控制更具有针对性,从而改善了 SPECK 算法的整体抗噪性。本文提出的信源信道联合编码方案,不仅使得解码图像能在较高的压缩比下具有较高的峰值信噪比,而且能够在变化的噪声环境中进行更稳健更可靠地传输。

参考文献 (References)

- 1 Shapiro Jerome M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445 ~ 3462.
- 2 Asad Islam, Pearlman William A. An embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder [A]. In: proceedings of SPIE Vision Communication and Image Processing [C], San Jose, CA, USA, 1999, 3653: 294 ~ 305.
- 3 Amir Said, Pearlman William A. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243 ~ 250.
- 4 Berrou C, Clavier A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo codes [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications [C], Geneva, Switzerland, 1993, 28: 1064 ~ 1070.
- 5 HE Jia-li, Costello D J, et al. On the application of turbo codes to the robust transmission of compressed images [A]. In: Proceedings of the International Conference on Image Processing [C], Washington, DC, USA, 1997, 3: 559 ~ 562.
- 6 PENG Zhi-shi, HUANG Yi-fang, Costello D J. Turbo codes for image transmission-a joint channel and source decoding approach [J]. IEEE Journal, Selected Areas in Communications, 2000, 18(6): 868 ~ 879.
- 7 Sweldens W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelet [R]. Technical Report 1995; 6, Industrial Mathematics Initiative, Department of Mathematics, University of South Carolina, USA, 1995.
- 8 Calderbank A R, Daubechies I. Wavelet transforms that map integers to integers [J]. Applied and Computation Harmonic Analysis, 1998, 5(3): 332 ~ 367.