一种鲁棒的图像小波变换模拟编码传输方法

王 哲 张晓林 陈 雷

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在复杂度和延迟受限或者可变信道条件下,由于通信系统的一体化设计,信源信道联合编码(JSCC, Joint Source-Channel Coding)技术的应用有助于改善传统的分离结构系统.针对带宽功率限制模拟信道,提出了一种结合了小波变换编码和香农映射信源信道联合编码的静止图像模拟编码传输方法;并基于更加合理的考虑了信道噪声的重建图像失真估计,提出了相应的联合优化带宽分配算法.仿真及分析表明,由于信源信道的联合优化及具有模拟编码传输的特点,该方法表现出良好的编码传输性能,且编解码复杂度和延迟小;同时在信道失配情况下表现出的柔性降级/改善特性有助于提高可变信道条件下系统的鲁棒性和信道带宽利用率.

关 键 词: 图像编码; 图像通信; 小波变换; 鲁棒性; 子带编码

中图分类号: TN 919.8

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)06-0703-04

Robust image communication system based on wavelet transform analog coding

Wang Zhe Zhang Xiaolin Chen Lei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: For the applications with complexity and delay limit or in varying channel condition, joint source-channel coding (JSCC) helps to improve the conventional tandem communication system since the integrative system design. For bandwidth and power-limited analog channel, an analog coding and transferring method of image which combines wavelet transform and Shannon mapping JSCC was proposed, and based on more rational distortion estimation in consideration of channel noise, an algorithm for jointly optimum channel bandwidth allocation was developed. Simulations and analysis show that, because of the joint source-channel optimization and the capacity of taking the advantage of analog coding and transferring, the image communication system performs well and has small coding/decoding complexity and delay, and it also exhibits the properties of gracefully degradation and improvement with channel mismatch that are helpful to improve the system robustness and bandwidth efficiency in varying channel condition.

Key words: image coding; image communication systems; wavelet transforms; robustness; subband coding

图像信号包含有极其丰富的信息,图像通信所传输的信息量也远大于其它通信方式,系统复杂度和带宽利用率问题突出.目前绝大部分图像通信系统都是基于香农分离理论[1]的分离结构系统,而且根据香农的分离理论可证明:对固定的信源信道,信源编码和信道编码可以分别设计,而性能没有任何损失.分离结构设计在给系统设计带来方便的同时,也造成了一些不可避免的固有缺点,如复杂度及延迟大,门限效应等等[2].因此在有限复杂度和延迟限制或可变信道条件下,信源编码、信道编码之间的联合是直观和自然的,即信源信道联合编码(JSCC, Joint Source-Channel Coding).同时越来越多的事实也证明,对模拟信源的无线通信来说,JSCC技术是一种很有前途的

收稿日期: 2007-06-05

作者简介: 王 哲(1980-),男,陕西镇安人,博士生, wangzhebuaa@163.com.

实现方案,这都有赖于它能够应付可变的信号质量以及达到传输率理论极限的能力.

基于带宽功率限制模拟信道和静止图像信源,本文提出了一种静止图像模拟编码传输方法.该方法结合了数字图像压缩编码和模拟编码传输的优点,实现了图像的模拟压缩编码,且编码和带宽优化分配过程体现了信源、信道的联合优化.仿真和分析表明该图像模拟编码传输方法性能优良,编解码复杂度和延迟小,且具有柔性降级/改善特性,有助于提高可变信道下传输效率和信道带宽利用率.

1 信道模型及信源的模拟编码传输

信源通常会产生模拟信号,如视频和音频信号,理论上携带有无限的信息量;另外所有的信道媒质也是模拟的,但实际上通常的做法是通过终端设备而将信道等效建模为一个数字链路[3].与上述做法不同,本文将信道建模为一个带宽功率限制的时间离散幅度连续加性高斯白噪声模拟信道,有零均值、信号独立的加性高斯白噪声,信道质量由信道信噪比 C_{SNR} 定量描述.该模型更符合实际信道情况,可等效看作模拟波形信道与调制/解调器的联合.

对于上述信道,香农在文献[1]中证明,已知信道带宽 B,且 C_{SNR} 为 S/N 时,其信道容量为

$$C = B\log_2[1 + S/N] \quad \mathrm{bit/s} \qquad (1)$$

从其证明过程中还可知,如果对信源进行连续幅度的脉冲幅度调制和传输,且当信道信号具有零均值高斯分布时则系统可达该信道容量[13].另外从式(1)中还可看到,当信道质量(C_{SNR})下降时,该编码方法仍能达到相应条件下的信道容量;而且由于连续幅度的信道信号携带了无限的信息量,因此当信道质量有所提高时,相应地可由接收信道信号获得更多的互信息量,重建信源质量也会相应提高,即其在可变信道条件下仍能达到相应信道条件下的信道容量.这是一个信源信道联合模拟编码传输的理想特例,但其反映出该模拟编码传输所具有的柔性降级/改善特性将有助于提高可变信道条件下通信系统的传输效率和带宽利用率.

2 香农映射和变换压缩编码的引入

2.1 香农映射 JSCC 编码方法

香农在文献[1]中的另一个重要观点即是通信过程的几何解释.按照该几何通信理论,一个带宽 W、持续时间 T 的模拟信号可表示为 $2WT$ 维信号空间中的一个点.因此分离结构通信系统的信源压缩编码可以解释为从 $2W_1T_1$ 维信源消息空间到实际维度 D 消息空间的降维映射,信道编码则是从 D 维消息空间到 $2WT$ 维信道信号空间的增维映射[1].

基于前述信源信道模型,不同于分离结构通信系统,图1所示香农映射用以特指从信源消息空间 $\boldsymbol{R}^L$ 到信道信号空间 $\boldsymbol{R}^K$(编码器)和从信道信号空间到信源消息空间(解码器)的直接映射;由于可直接从信源消息编码得到模拟信道信号,因此也称之为模拟编码,被看作是一种纯粹的信源信道联合编码技术.其中增维香农映射可引入维度冗余保护信源消息,减小信道噪声的失真影响;降维香农映射则可实现带宽压缩[4].

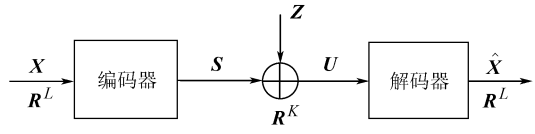


图1 香农映射 JSCC 通信系统模型

在信源和信道条件已知的情况下,最优香农映射一般很难解算得到.因此通常都在一些近似和简化假设的基础上得到信源信道联合优化的次最优香农映射机.目前已经设计出了多种次最优香农映射机,并已应用到可视通信中[3-6],表现出一定优势.

2.2 变换压缩编码的引入

对于图像信源,理论上也存在一个最优香农映射可使重建图像失真最小.但当信源消息维度或信道信号维度很大时,最优编解码器将会非常复杂且很难得到.因此对图像的模拟编码传输来说压缩编码是一个阻碍.另一方面,传统数字图像通信系统一般首先采用信源压缩编码(如 JPEG2000[7-8]),通过去除冗余以有效降低传输带宽.借鉴数字图像压缩编码的经验,一种复杂度有限,并从工程角度考虑可实现的图像模拟编码传输方法应将图像变换压缩编码引入,并与较低维度香农映射 JSCC 编码方法相结合以达到图像模拟压缩编码的目的,获得更高的编码传输效率.

3 图像的小波变换模拟编码传输

图像经过二维小波变换之后,被分解为不同频率、不同方向的若干子带,为利用人类视觉特性进一步提高编码效率提供了条件.直观地,类似数字图像小波变换压缩编码,基于小波变换并结合香农映射进行图像模拟压缩编码时可根据不同变换域图像样本失真对重建图像失真贡献的大小而

区分其重要性,并相应分配不同的带宽:重要的样本多分配带宽,不重要的样本少分配带宽甚至丢弃,以达到压缩信源带宽和提高信道带宽利用率的目的.因此采用上述方法进行图像模拟压缩编码就是要在准确的失真估计基础上,根据压缩率要求优化分配带宽,使重建图像失真最小.

本文定义压缩率 R 为编码后信道信号样本数和原图像样本数之比,因此对 $m \times n$ 尺寸的图像编码得到的信道信号样本数应为 $m \times n \times R$.

3.1　小波变换和失真估计

为更好地进行带宽的优化分配,提供更多可能的编码压缩率且使复杂度有限,类似 JPEG2000,该编码器将小波变换图像各子带进一步划分为若干包含多个相邻变换域样本的码块 B_i,例如 8×8尺寸.码块 B_i 的失真引起的重建图像失真记为 D_i,同时假设各码块的失真贡献是加性的,则重建图像总失真为

$$D = \sum_i D_i \qquad (2)$$

如果以均方差为失真度量,则有

$$D_i = \omega_{b_i}^2 \sum_{k \in B_i} (\hat{s}_i[k] - s_i[k])^2 \qquad (3)$$

式中,$s_i[k]$为属于码块 B_i 的样本;$\hat{s}_i[k]$为该样本的量化表示;$\omega_{b_i}^2$表示码块 B_i 所属子带 b_i 的小波基函数的 $L2$ 范数[8-9].根据小波变换理论:如果小波变换基函数正交或者每个样值的量化误差互不相关,则式(2)、式(3)近似成立,但这两个条件通常都不能满足[9].尽管如此,本文及 JPEG2000 中采用的 Daubechies 9/7双正交小波滤波器有近似正交的基函数,且对多幅图像的实验也表明采用式(2)、式(3)可准确地估计重建图像总失真.

3.2　信道带宽的优化分配

前述失真估计隐含假设信道无干扰,更合理的重建图像失真估计应该同时将信道噪声的失真影响考虑在内,因此式(3)应改写为

$$D_i = \omega_{b_i}^2 \sum_{k \in B_i} (\hat{s}_i[k] + N_i[k] - s_i[k])^2 \qquad (4)$$

其中 $N_i[k]$表示信道噪声引起的重建样本失真,是一个随机变量.对式(4)取数学期望得每个码块的平均重建失真为

$$E(D_i) = E\left[\omega_{b_i}^2 \sum_{k \in B_i} ((q_i[k] + N_i[k])^2)\right] \qquad (5)$$

其中 $q_i[k] = \hat{s}_i[k] - s_i[k]$表示量化误差.当码块的所有样本都属于同一个子带,则有

$$E(D_i) = \omega_{b_i}^2 \cdot E\left[\sum_{k \in B_i} ((q_i[k] + N_i[k])^2)\right] \qquad (6)$$

已知编码方法和信道噪声,由上式可准确估计每个码块引起的平均重建图像失真[4-5].特别地,对丢弃不编码的码块,有 $q_i[k] = s_i[k]$, $N_i[k] = 0$

相应地,重建图像平均总失真应为

$$E(D) = \sum_i E(D_i) \qquad (7)$$

由上可知,它表示的是考虑了信道噪声影响的更加合理和准确的重建图像平均总失真估计.

为便于带宽优化分配,定义质量层 Q_i (i= 1, 2, 3, 4, 5)为包含若干码块的集合,其中 1~4质量层所属码块分别采用 1/2, 1/1, 2/1, 4/1香农映射编码,Q_5 中的码块丢弃不编码.其中 1/2增维香农映射编码用于保护重要的码块样本;而 2/1, 4/1降维香农映射编码,包括对 Q_5 质量层样本的丢弃不编码为信源带宽压缩提供了可能.

根据上述重建图像失真估计方法和质量层划分,本文采用如下算法进行带宽的优化分配:

1)给定压缩率 R,并将所有码块归入质量层 Q_5;

2)对每个质量层进行功率归一化;

3)根据式(7)估算每个码块引起的重建图像平均失真 $E(D_i)$;

4)将平均失真最大的码块归入上个质量层;

5)比较当前压缩率和 R,小于 R 则返回 2),否则,结束.

上述失真估计和带宽优化分配方法与 EBCOT(Embedded Block Coding with Optimized Truncation)等信源编码方法的本质区别在于其失真估计和带宽优化分配过程都考虑了信道噪声的影响,体现了信源信道的联合优化,实现了通信系统的一体化设计.

3.3　信源模型及附加信息

广义高斯分布信源模型被用于香农映射编码器的优化设计[4-5].实验和仿真表明,虽然质量层 Q_1 由于包含更多的 LL子带码块而与广义高斯分布存在一定偏差,但它仍能很好地对各质量层样本幅度分布建模.此外质量层分类表和各质量层归一化功率作为解码必需的附加信息需在编码压缩后采用强纠错能力的信道编码确保其准确无误地传输到接收端.

由上述可知,本文的编码传输方法将分离结构通信系统的信源编码、信道编码和星座映射通过香农映射编码一个步骤完成,这意味着更小的复杂度和延迟,体现了信源信道联合编码的特点.另外由于信源、信道编码的分离设计,传统分离结

构通信系统在信道质量降低时不可避免门限效应,且在信道质量改善时通信质量也不会相应提高,因而在可变信道条件下对提高带宽利用率显得无能为力;而前述编码传输方法则由于信源信道的联合优化和通信系统的一体化设计而避免了门限效应,因而具有更好的系统鲁棒性,且由于兼具模拟编码传输的特点,即其信道信号携带了超过标称信息量的信息,因此在信道质量改善时重建信源质量也会相应提高,即具有柔性降级/改善[4]特性,这将有助于提高可变信道条件下的系统鲁棒性和带宽利用率.

4 仿真结果及分析

假设信道有单位平均功率(1W)限制,以三层小波变换为例,并采用文献[4-5]中所述次最优香农映射编码方法.如图2所示是设计信道信噪比 C_{SNRd} 为20 dB时,不同压缩率 R 的重建图像平均峰值信噪比(PSNR, Peak Signal to Noise Ratio).且为便于比较,定义一个平均分配带宽的编码器,即信道带宽被平均分配给质量层 Q_i (i=1, 2, 3, 4),如图中虚线所示.

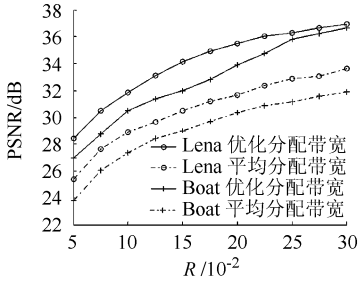


图2 不同压缩率下重建图像平均 $PSNR$ (C_{SNRd} = 20 dB)

图2中,该编码器性能良好,前述考虑了信道噪声的失真估计和信源信道联合的带宽优化分配算法可有效提高编码器性能.且与文献[3]中编码方法比较可知,在相似的编码复杂度情况下本文所述编码传输方法性能更优,尤其在压缩率 R > 0.2时重建图像平均 PSNR 可以提高 2~3 dB.

如前所述,通信系统的一体化设计和模拟编码传输的特点有助于改进系统的柔性降级/改善特性.图3是 C_{SNRd} 为20 dB时,在不同的实际信道信噪比条件下本文的图像编码传输方法得到的重建图像平均 PSNR.可见,随着信道质量的下降,重建图像质量缓慢下降;在信道质量有所改善时,重建图像质量也相应提高.因此该编码传输方法可以有助改善可变信道条件下的信道带宽利用率.

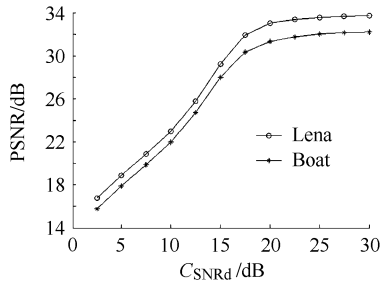


图3 信道时配情况下重建图像 $PSNR$ (R = 0.125)

5 结束语

本文介绍的小波变换图像模拟压缩编码传输方法基于香农几何通信理论,引入了图像小波变换编码并结合香农映射 JSCC 编码方法实现了图像的模拟压缩编码传输,利用了小波变换编码和模拟编码传输的各自优点,表现出良好的压缩编码效率和传输性能;且编码和带宽优化分配过程体现了信源信道的联合优化,一体化设计克服了传统分离结构通信系统的一些固有缺点,且编解码复杂度和延迟小,具有柔性降级/改善特性.

参考文献 (References)

[1] Shannon C E. Communication in the presence of noise[J]. Proceeding of IEEE, 1949, 37(1): 10-21

[2] Ramstad T A. Shannon mapping for robust communication[J]. Telektronikk, 2002, 98(1): 114-128

[3] Lervik J M, Ramstad T A. Robust image communication using subband coding and multilevel modulation[C]//Proc IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Signal Processing. NJ: IEEE, 1997, 4: 3889-3902

[4] Wang Zhe, Zhang Xiaolin, Chen Lei. Analog error-control coding based on dimension-expanding Shannon mapping for robust image communication[C]//Proc IEEE Int Conf on Multimedia and Expo. NJ: IEEE, 2007: 723-726

[5] Vaishampayan V A. Combined source-channel coding for band-limited waveform channels[D]. Maryland: Department of Electrical Engineering, University of Maryland College Park, 1989

[6] Fuldseth A, Ramstad T A. Bandwidth compression for continuous amplitude channels based on vector approximation to a continuous subset of the source signal space[C]//Proc IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Signal Processing. NJ: IEEE, 1997, 4: 3093-3096

[7] ISO/IEC 15444-1. JPEG2000 image coding system[S]

[8] Taubman D S, Marcellin M W. JPEG2000图像压缩基础,标准和实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2002: 127-138
Taubman D S, Marcellin M W. JPEG2000: image compression, fundamentals, standards and practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 127-138(in Chinese)

[9] Taubman D S. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(7): 1158-1170

(责任编辑:娄 嘉)