多径信道下图像的信源信道联合编码调制传输

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: 针对多径衰落信道提出了一种基于小波变换并结合 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)自适应调制的图像传输方法和信源信道联合带宽功率优化分配算法. 给出了编码传输方法结构, 对有噪信道下基于小波变换的图像编码传输实现和失真估计问题及多误码率 OFDM 自适应调制比特功率优化分配问题进行了建模和分析, 使得信源量化编码与 OFDM 调制能够方便地结合起来, 并进一步得到了相应的信源信道联合优化带宽功率分配方法. 仿真和分析表明, 该方法实现了多径信道下图像的信源信道联合编码调制传输, 编解码复杂度和延迟小, 且信源信道联合优化的带宽功率分配可有效提高信道资源利用效率.

关 键 词: 图像通信; 小波变换; 正交频分复用; 自适应调制

中图分类号: TN 919.8

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)11-1371-04

Image transmission over multipath fading channel using joint source channel coding modulation

Wang Zhe Zhang Xiaolin Chen Lei

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

Abstract: For multipath fading channel, an image transmission method which combines wavelet transform and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) adaptive modulation was proposed, and the algorithm for joint source channel optimal allocation of channel bandwidth and power was presented as well. Following the presentation of system structure, the problems such as the implementation and distortion estimation of image transmission based on wavelet transform over noisy channel, and optimal bit-power allocation for multi bit error rate (BER) OFDM adaptive modulation were modeled and analyzed, modeling and analysis facilitate the combination of source quantization coding and OFDM adaptive modulation, and a joint source channel optimal bandwidth and power allocating algorithm was also developed. Simulations and analysis show that the image transmission using joint source-channel coding modulation over multipath fading channel can be achieved with small coding complexity and delay, and performance can be improved due to joint source-channel optimal allocation of bandwidth and power.

Key words: image communication systems; wavelet transforms; orthogonal frequency division multiplexing; adaptive modulation

多径衰落信道下进行图像传输, 由于信道环境复杂及传输数据量大, 带宽和功率资源利用率问题突出. 研究和实践表明, 在有限复杂度和延迟条件限制下, 信源信道联合编码/调制技术有助于获得更高的系统容量和传输性能[1]. 在相关方法中, 由于可将图像分解为多个独立的有不同重要性的子信源, 子带变换便于和带宽功率的优化分配等技术相结合实现图像的信源信道联合编码调制传输; 主要有两种实现途径: 信源编码与信道编码相结合和信源编码与调制相结合[2]. 可知经过

收稿日期: 2008-10-23

基金项目: 北京市重点学科资助项目 (XK100070525)

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

调制解调或信道编解码,各子信源实际上是经过了不同精度的信源量化编码和不同抗信道噪声保护的传输.截至目前,已经出现了多种基于该结构的图像信源信道联合编码调制传输方法,但大都限于二进制对称信道(BSC, Binary Symmetric Channel)或平坦衰落噪声信道[2-5];对多径衰落信道,文献[6]中讨论了结合香农映射和多载波调制实现图像的信源信道联合编码调制传输的相关问题及影响性能的几个因素,但没有给出具体的编码方法和实验结果.总结起来该方法主要存在以下困难:需要多种维度比例关系的香农映射编解码器,复杂度低且性能优异的香农映射编解码方法设计困难,且还没有一种简便的方法能将香农映射和多载波调制有效结合起来.另一方面,多径衰落信道下的OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)数字自适应调制(adaptive modulation)技术的研究已相对成熟.本文将在信源信道联合编码调制和OFDM自适应数字调制等相关技术研究的基础上,讨论多径信道下基于子带变换,结合OFDM自适应调制的信源信道联合图像编码调制传输方法的实现.

1 信道模型和编码传输方法结构

考虑有最大平均发射功率限制的多径块衰落信道,其离散时间模型可用信道冲激响应序列 $h(\tau, t)$ 表示,其中 t 表明它是一个时变序列;基于块衰落假设,在一定时间间隔可认为信道冲激响应保持不变;另外传输信号受加性高斯白噪声序列 $n(k)$ 干扰,是引起信道传输误码的主要原因;同样地也假设通过反馈链路发射端可知信道状态信息,包括信道冲激响应和信噪比.

图1所示是基于OFDM自适应调制链路的图像信源信道联合编码调制传输方法框图.这是一个信源编码与调制相结合的方案:图像信源 S 首先经过子带变换(如小波变换)和去直流,被分解为 N_S 个子带或称子信源(近似满足广义高斯分布[6]),且经全通(all pass)滤波各子信源被转换成高斯分布,这有助于提高编码性能和改善重建图像的主观质量[4];再进行功率归一化得到多个有不同样本数 L_n 的单位方差高斯分布子信源 S_n $(n=1, \cdots, N_S)$ 构成的原图像变换域表示;带宽功率优化分配单元根据变换域信源统计特性和信道状态信息为各子信源优化分配量化码率 r_n 和传输误码率 E_n,并确定OFDM子载波集合划分和各子载波的调制比特和功率;据此对各子信源进行量化编码,二进制量化索引被直接映射为QAM(Quadrature Amplitude Modulation)符号,并以一定的功率调制到指定的子载波;接收端则进行相应的逆过程得到重建子信源和重建图像.在该方法中通过简单的步骤即可由信源编码得到信道调制信号以及由调制信号解码重建信源,编解码复杂度和延迟小.

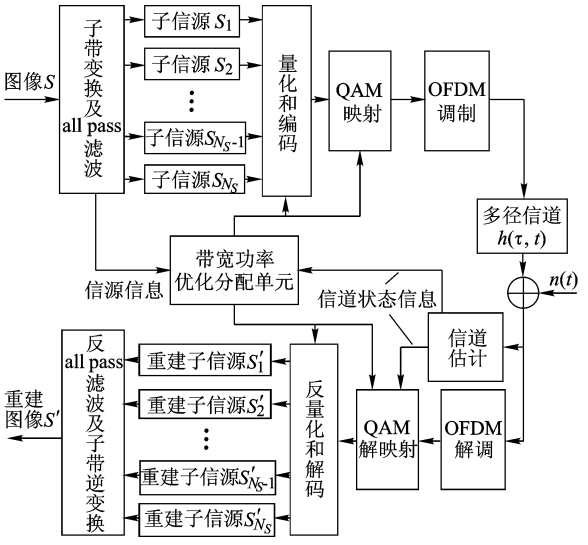

图1 多径信道下图像的信源信道联合编码调制传输方法

2 最小失真传输分析

基于前述方案在带宽功率限制多径信道实现图像最小失真传输,需要考虑有噪信道下图像的编码传输实现及失真估计,以及OFDM自适应调制链路的比特功率优化分配问题.以下分别讨论.

2.1 有噪信道下信源的编码传输及失真估计

称带宽功率优化分配单元确定的 N_S 个子信源的量化码率和误码率组合为一个量化编码方案,表示为 $P=\{(r_1, E_1), \cdots, (r_{N_S}, E_{N_S})\}$,特别地量化码率为0,即 $(r_n, E_n)=(0, 1)$,表示对应子信源被丢弃不编码.假设接收端某一次接收到的是存在一定失真的重建子信源 $S'_n(n=1, \cdots, N_S)$ 和图像 S',以Daubiches 9/7双正交小波变换为例,均方误差为失真度量,则重建图像总失真 D 为各重建子信源失真 D_n 的加权和[5]:

$$D=\sum_{n=1}^{N_S} w_n \cdot D_n \tag{1}$$

其中非负的加权系数 w_n 由小波基函数的L2范数决定,定量反映了各子信源重要性的差别.

具体考虑各子信源的量化编码传输.经调制解调,各子信源量化索引码字等效经过BSC传输;文献[7]中详细讨论了该信道条件下统计信源的信源信道联合优化量化编码方法,本文以优

化索引分配量化 (IAQ, Index Assignment Quantization)方法为例: IAQ 基于 LBG (Linde Buzo Gray)[8]量化器,并应用模拟退火算法优化分配量化索引使得一定传输误码率条件下平均总失真最小.由于 LBG量化器的重建码书是相应编码区的质心,因此经 IAQ编码传输第 n个子信源平均总失真 $E(D_n)$为平均量化失真 $E(D_n^S)$和平均信道失真 $E(D_n^C)$之和[7].

$$E(D_n) = E(D_n^S) + E(D_n^C) \tag{2}$$

其中 $E(D_n^S)$仅与量化码率 r_n有关, $E(D_n^C)$则由 BSC信道误码率 (BER, Bit Error Rate)决定.

同样地,对式 (1)的重建图像失真求统计平均,并将式 (2)代入,得重建图像平均总失真 $E(D)$和各子信源平均失真 $E(D_n)$仍满足加性关系,即有

$$E(D) = \sum_{n=1}^{N_S} w_n \cdot E(D_n) = \sum_{n=1}^{N_S} w_n \cdot E(D_n^S) + \sum_{n=1}^{N_S} w_n \cdot E(D_n^C) \tag{3}$$

根据式 (2)、式 (3),每个子信源失真和重建图像失真都由信源量化失真和信道失真两部分组成.由于离散的量化码率,量化失真非连续;但由于允许信道失真存在,总失真理论上连续,因此从统计平均的角度可认为信源信道联合编码可等效实现任意码率的量化编码传输.

2.2 多径信道下的 OFDM 自适应调制

OFDM多载波调制可将多径传播引起的频率选择性衰落信道转换为若干独立的平坦衰落子信道,因此能有效地对抗多径衰落;并且还易与自适应调制技术相结合,根据各子信道不同的传输特性优化分配调制方式和发射功率,便于避开严重衰落子信道,提高功率和带宽利用率[1,9].

因此,为适应多径信道,该方法最大不同在于采用了 OFDM多载波调制,并通过子信道集合划分和自适应调制将原多径衰落信道等效转换成多个并列的不同码速率和误码率的数字信道,以便于和基于子带变换的信源量化编码相结合.编码方案 P为各子信源分配了不同的量化码率和传输误码率,相应地同时有多个码率-误码率自适应调制需求,此时的比特功率分配可建模为多误码率的 OFDM自适应调制问题.

令第 n个子信源的量化码率为 r_n和传输误码率为 E_n,因此误码率 E_n的调制码率为

$$R_n = r_n \cdot L_n \tag{4}$$

多个子信源则有 N_S个码率和误码率组合,即

$$(R_n, E_n) \quad n = 1, 2, \cdots, N_S \tag{5}$$

那么,多误码率固定速率自适应调制的最优比特功率分配可建模为下述最优化问题:

$$\min \quad P_T = \sum_{i=1}^{N_C} p_i$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i\in U_k} b_i = R_n, \ \sum_{i\in U_n} e_i = E_n,$$

$$U_k \cap U_j = \varnothing, \ j, k = 1, 2, \cdots, N_S, \text{且 } j \neq k;$$

$$b_i \geq 0, \ p_i \geq 0, \ \forall i = 1, 2, \cdots, N_C \tag{6}$$

其中, P_T为最大发射功率限制; N_C为 OFDM子载波数目; b_i, p_i和 e_i分别为第 i个子载波上的调制比特数、功率和误码率; U_n为对应 N_S个码率-误码率的子载波集合,且每个载波集合内的调制误码率相同,因此有 $U_k \cap U_j = \varnothing (j \neq k)$.

令各子载波采用 QAM调制,文献[10]中给出了一种实用的低复杂度比特功率优化分配方法.

3 信源信道联合编码参数优化

前面讨论了有噪信道下图像的信源信道联合量化编码传输及失真估计;另外多误码率 OFDM自适应调制问题的建模使信源编码和 OFDM调制能够方便地结合起来.本节将进一步讨论带宽功率限制信道下最小失真传输的编码参数优化问题.

3.1 优化问题分析

这是一个多自由度优化问题,且信道冲激响应和信源统计特性都随机变化,但基于前述模型分析可知:

首先,式 (3)表明重建图像平均总失真由平均量化失真和平均信道失真共同组成,显然量化码率越大、误码率越小,重建图像失真越小,但更高的量化码率对应更高的调制码率,更低的误码率对应更高的信噪比间隔[9-10]和额外的调制功率.在带宽功率限制条件下,调制码率增加信噪比间隔必定减少;反之,信噪比间隔增加.因此随着调制码率增加,量化失真逐渐减小,信道失真逐渐增加,总失真则是随调制码率的开口向上的 U形函数,其最小值应是调制码率和信噪比间隔的最佳折中.

其次,假设已知各子信源量化码率 r_n,则平均量化失真确定,此时使平均总失真最小等效于使得信道失真最小,这依赖于在总发射功率限制下为各子信源优化分配传输误码率 E_n,或等效的 QAM调制信噪比间隔 Γ_n,可采用如下方法得到.

1) 为各子信源分配最低信噪比间隔 Γ_1',或

对应最大误码率 E_1',并估计平均信道失真 $E(D_n^C)$ $n=1,2,\cdots,N_S$;

2) 计算将各子信源提高一个信噪比间隔等级需要增加的功率 ΔP_n 及平均信道失真减小量 ΔD_n^C,找到 $\Delta P_n/\Delta D_n^C$ 最小的子信源,将其信噪比间隔提高一个等级;

3) 计算此时的平均发射功率 P',如果 $P' \geq P_T$,则结束;否则返回第 2)步.

根据多误码率自适应调制方法[10]可知,总调制码率确定时各子信源调制信噪比间隔的改变不影响比特分配结果,同时子信源平均信道失真通过查询事先离线计算的失真-误码率表即可得到,采用上述方法很容易得到误码率的优化分配结果.

最后,还注意到子载波集合划分是多误码率自适应调制比特功率分配过程的一个副产品.

3.2 信源信道联合优化带宽功率分配

综上所述,多径信道条件下的信源信道联合图像编码调制传输的优化编码参数可采用如下步骤得到,包括编码方案 P 的确定,以及对应多个子信源的 OFDM 子信道集合划分和子信道比特功率的优化分配.

1) 初始化所有子信源的量化码率为 0,即 $P=\{(0,1),\cdots(0,1)\}$,估计各个子信源平均失真 $E(D_n)$及平均重建图像总失真 $E(D)$;

2) 找到引起重建图像量化失真最大的子信源 n,将其量化码率增加 1,即 $r_n=r_n+1$;

3) 采用上节的方法优化分配误码率给各个子信源及确定多载波调制各子信道比特和功率;

4) 估计此时的重建图像总失真 $E(D)'$;

5) 如果 $E(D)'<E(D)$,更新码率和误码率分配为当前状态,且 $E(D)=E(D)'$,返回第 2)步;否则,结束.

编码方案 P 及各子信源功率、直流分量等解码必需的边信息需要可靠地传输到接收端,但相对地该部分数据量很小,通常忽略不计.

前述方法还可以进一步简化:当各子信源量化码率很低时,分配给各子信源的误码率都很低,此时信道失真可以忽略,即重建失真都由量化失真引起;等效地可先以某一高信噪比间隔得到总调制码率,并忽略信道失真为各子信源优化分配量化码率,这可根据率失真函数的凸壳性质快速得到[11],此时即对应的是不考虑信道失真的图像编码传输;然后再将其作为初始量化码率,执行前述带宽功率优化分配方法. 实验表明这样可有效减小计算量,特别是在高信道信噪比时.

4 仿真及分析

仿真以 MT-2000 室外或室内步行测试环境抽头延迟信道模型 B 为测试信道[12]. 针对该信道模型,给出相应的 OFDM 系统参数见表 1.

表 1 仿真系统采用的 OFDM 系统参数

项目	数值
采样间隔 /μs	0.1
子载波数目	1 024
子载波调制方式	0-, 4-, 16-, 64-, 256-QAM
IFFT/FFT 长度	1 024
循环前缀样值数	64
OFDM 符号周期 /μs	102.4 + 6.4 = 108.8
子载波间隔 /kHz	9.765 6
总带宽 /MHz	10

令图像经过 4层 Daubiches 9/7小波变换, 13个子信源采用一维 LBG标量量化,并限定最高量化码率为 8;且由仿真实验得知在高 BER 条件下的优化索引分配结果在低 BER 条件下的性能损失很小,因此采用固定的码字分配以简化编解码过程和减少额外的编码信息;假设采用连续 64个 OFDM 符号传输图像,期间信道条件的变化可以忽略,即对应固定或者慢速移动条件下的接收,每个子带的调制比特平均分配给这些符号. 以 512×512灰度图像为例,图 2所示是 Lena和 Boat测试图像在不同信道信噪比时的平均重建图像峰值信噪比 (PSNR, Peak Signal-to-Noise Ratio),根据失真估计得到的平均重建图像 PSNR 估计以及不考虑信道失真的重建图像 PSNR. 由仿真可知,前述失真估计方法能够准确地估计重建图像平均失真,即使有自适应调制比特量化的影响估计误差也不超过 0.3 dB. 同时,虽对系统做了一些简化,但该方法仍可达到较好的传输性能;且相比于不考虑信道失真的图像编码传输,信源信道联合编码和带宽功率的优化分配可以明显提高传输质量和信道资源利用效率,特别是在低信噪比条件下.

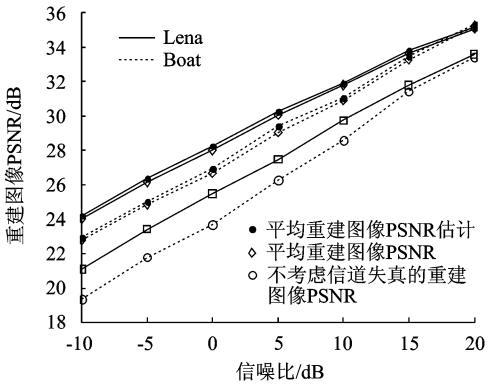

图 2 接收重建图像 PSNR 信噪比对比曲线

(下转第 1412页)

systems[C]// IEEE Aerospace Conference. Snowmass: Institude of Electic and Electronic Engineer, 1999, 2: 451 - 466

[2] Salour M M, Bellamy J C. A WDM optical network for avionics [C]//Avionics Fiber-Optics and Photonics, IEEE Conference. USA: [s n.], 2005: 13 - 14

[3] Habiby S F. Advances in WDM LAN standards development for aerospace applications[C]//Avionics Fiber-Optics and Photonics, IEEE Conference. 2006: 20 - 21

[4] Reardon C, Profumo J, George A D. Comparative simulative analysis of WDM LANS for avionics platforms [C]//Military Communications Conference. Washington: [s n.], 2006: 1 - 7

[5] Harres D N. Current state and future direction for military aircraft fiber optics networks[C]//Digital Avionics Systems Conference. Indianapolis: DASC, 2003: 6. B. 2 - 6. 1 - 8

[6] Jessop C N, Jenkins R B, Voigt R J. Routing in an optical local area network using wavelength conversion[C]//Avionics Fiber-Optics and Photonics, IEEE Conference. 2006: 24 - 25

[7] Mifdaoui A, Frances F, Fraboul C. Full duplex switched ethernet for next generation "1553B"-based applications[C]//Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium. 2007: 45 - 56

[8] Boyer M, Fraboul C. Tightening end to end delay upper bound for AFDX network calculus with rate latency FIFO servers using network calculus[C]//Factory Communication Systems. 2008: 11 - 20

[9] Fan Cen, Tao Xing. Real-time performance evaluation of line topology switched ethernet[J]. International Journal of Automation and Computing, 2008, 5(4): 376 - 380

[10] Cruz R L. A calculus for network delay, part i: Network elements in isolation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1): 114 131

[11] Le Boudec, Thiran P. A short tutorial on network calculus I: fundamental bounds in communication networks[C]//Circuits and Systems, the 2000 IEEE International Symposium. 2000: 93 - 96

[12] 胡晓娅,朱德森,汪秉文. 基于网络演算的交换式以太网实时特性分析[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(1): 22 - 24
Hu Xiaoya, Zhu Desen, Wang Bingwen. Real-time performance evaluation in switched ethernet by network calculus[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(1): 21 - 24 (in Chinese)

(编 辑:娄 嘉)

(上接第 1374页)

5 结 论

综上所述,本文提出的子带变换和 OFDM 自适应调制相结合的图像分级编码传输方法实现了多径衰落信道下图像的信源信道联合编码调制传输,结构简单,编解码复杂度和延迟小;仿真表明基于其数学模型分析得到的信源信道联合优化带宽功率分配算法可有效提高带宽功率利用率.

参考文献 (References)

[1] Alouini M S, Goldsmith A J. Capacity of fading channels with channel side information[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1997, 43: 1986 - 1992

[2] Zheng Haitao, Liu K J Ray. The subband modulation: a joint power and rate allocation framework for subband image and video transmission[J]. IEEE Trans on Circuits and System for Video Technology, 1999, 9(5): 823 - 838

[3] Ruf M J, Modestino J W. Operational rate-distortion performance for joint source and channel coding of images[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(3): 305 - 320

[4] Cai Jianfei, Chen Changwen. Robust joint source-channel coding for image transmission over wireless channels[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 10(6): 962 - 966

[5] 王哲,张晓林,陈雷. 一种鲁棒的图像小波变换模拟编码传输方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(6): 703 - 706
Wang Zhe, Zhang Xiaolin, Chen Lei. A robust image communication system based on wavelet transform analog coding [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 24(6): 703 - 706 (in Chinese)

[6] Tor A Ramstad, The marriage of subband coding and ofdm transmission [C]// Proc 6th Baiona Workshop on Signal Processing in Communications. Baiona, Spain: IEEE CS, 2003

[7] Nariman Farvarin. A study of vector quantization for noisy channels[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1990, 36(4): 799 - 809

[8] Linde Y, Buzo A, Gray R M. An algorithm for vector quantizer design[J]. IEEE Trans on Communication, 1980, 28: 84 - 95

[9] 刘凯明. OFDM系统中的自适应调制技术研究[D]. 北京:北京邮电大学电信工程学院, 2006
Liu Kaiming. Adaptive modulation techniques in OFDM systems [D]. Beijing: School of Telecomunications, Beijing University of Posts and Telecommunivation, 2006 (in Chinese)

[10] 王哲,张晓林. 多误码率固定速率 OFDM 自适应调制比特功率分配方法[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 1261 - 1265
Wang Zhe, Zhang Xiaolin. Bit and power allocation of multiple bit error rate OFDM adaptive modulation [J]. Signal Processing, 2009, 25(8): 1261 - 1265 (in Chinese)

[11] Westerink P H, Biemond J, Boekee D E. An optimal bit allocation algorithm for subband coding [C]//Proc International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. New York, USA: IEEE CS, 1988

[12] Recommendation ITU-R M. 1225, Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000, annex 2[S]

[13] Cioffi J M. A multicarrier primer[R]. ANSI TIE 1. 4, 1991

(编 辑:娄 嘉)