

基于哈夫曼编码的关联成像算法的图像传输机理研究

张雷洪, 叶华龙

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 在图像传输过程中存在信道噪声干扰、频谱资源紧张和误码率较高等问题, 限制了图像传输质量和效率, 降低了信道的可靠性, 研究能够在降低图像传输信息量的同时提高传输图像的分辨率, 进而提高信道的可靠性和安全性。**方法** 通过在最有效地利用哈夫曼编码信道传输能力的前提下, 尽可能多地降低信息传输中的误码率, 综合信道编码的冗余信息和关联成像传输信道信息。**结果** 提高了传输信号的可靠性, 保证了数据的传输质量, 实现了稳定快速通信。**结论** 该研究基于信道编码关联成像的图像传输机理, 充分利用了哈夫曼编码的无损数据压缩特性, 在降低图像传输信息量的同时提高了传输图像的分辨率, 进而提高了信道的可靠性和安全性。

关键词: 关联成像; 信道编码; 图像传输

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)05-0244-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.034

Image Transmission Mechanism Based on the Algorithm of Huffman Coding and Ghost Imaging

ZHANG Lei-hong, YE Hua-long

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the information amount of image transmission when improving the resolution of the transmitted image, so as to improve the reliability and security of the channel, since channel noise interference, spectrum resource shortage and high error rate in the process of image transmission limit the quality and efficiency of image transmission and reduce the reliability of the channel. On the premise of making the most effective use of the transmission capacity of the Huffman coding channel, the error rate in information transmission was reduced as much as possible to integrate the channel coding redundant information and ghost imaging transmission channel information. The reliability of transmission signal was improved, data transmission quality was guaranteed, and stable and fast communication was realized. This work studies the image transmission mechanism based on channel coding ghost imaging, and makes full use of the lossless data compression characteristics of Huffman coding to improve the resolution of the transmitted image while reducing the information content of the transmitted image, so as to improve the reliability and security of the channel.

KEY WORDS: ghost imaging; channel coding; image transmission

随着我国综合国力的日益增强和科技水平的不断提升, 在图像传输领域, 要想获得清晰的图像, 将图像数据快速可靠地传输到计算机中, 就需要设计高

速的图像数据传输系统^[1-2]。在图像传输过程中需要先将图像数据信号进行编码, 然后传输到处理单元后进行解码^[3]。关联成像是近几年发展起来的一种新型

收稿日期: 2018-10-20

作者简介: 张雷洪 (1981—), 男, 上海理工大学副教授, 主要研究方向为压缩感知重构算法、关联成像算法以及高光谱重构算法。

高分辨率成像技术^[4-8]。现有的图像传输模型并没有充分利用信道的冗余信息,不能更好地保证数据传输质量,不能实现高速精准的图像编码传输功能。信道编码理论的核心是提高系统的可靠性^[9]。随着编码技术的发展,人们开展了很多工作来提高图像传输的效率。王防修、刘春红等^[10]提出一种哈夫曼编码的改进算法,算法以哈夫曼编码的编码原理为基础,只需要使用一维数组即可以实现,对完成编码的计算机语言没有任何限制。田端财、殷晓丽等^[11]介绍了基于哈夫曼编码图像压缩技术的原理、算法、过程,验证了算法的合理性和可行性。HOWDHURY R A, KAYKOBAD M, KING I 等^[12]则在用于重建 Huffman 树的信息表中,除了保存必需的在 Huffman 树中依次出现的叶结点符号外,只保存环形叶结点的符号(带 2 个外部结点)的编码。HASHEMIAN R^[13]提出从单边 Huffman 表(singleside grown Huffman table, SGHT)提取浓缩 Huffman 表(condensed Huffman table, CHT)的方法,同时采用了一种新的译码技术来使译码所需信息量进一步减少。董培良、俞日龙、廖天康等^[14]提出一种新的解码算法,其能一次性读入多位码流,以使绝大部分码字能一次性地读入,并立即解码。林嘉宇、刘茨等^[15]提出一个关于 Huffman 编码的注记,由于该算法使得编码后码流中 0, 1 码元的分布概率(趋向)均等,因而改善了码流的信道传输性能。PING G, KOLIOS M C, YUAN X 等^[16]提出通过对图像传输提取重构优化进而提高图像编码传输的效率。以上方法只是在图像编码传输的基础上做了适当改进,并没有充分结合信道编码的冗余功能和关联成像的高速精准传输功能,不能更好地保证数据传输质量,不能实现高速精准的图像编码传输功能。文中研究基于哈夫曼编码关联成像的图像传输,主要目的为在最有效地利用哈夫曼信道传输能力的前提下,尽可能多地降低信息传输中的误码率,综合信道编码的冗余信息和关联成像传输信道信息,提高传输信号的可靠性,保证数据传输质量,实现稳定快速通信。

1 关联成像

关联成像又称鬼成像,它是利用量子纠缠特性或空间强度关联获取物体成像的一种新型成像方法,通过高阶关联利用 2 个探测器测量 2 个光路的光强分布再进行关联运算获得物体信息,原理见图 1。

关联成像实验首先使用的是双光子纠缠光源,后来经理论推导和实验模拟证明了经典赝热光场也可以实现关联成像。实验中一个重要的器件为液晶空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM),它放置在探测光路,通过控制输送给空间光调制器一系列相位随机图片反射出的时间上相互独立的光束打到要

成像的物体;桶状探测器放置在最后,收集经过物体衍射后总的光强,实验装置见图 2。

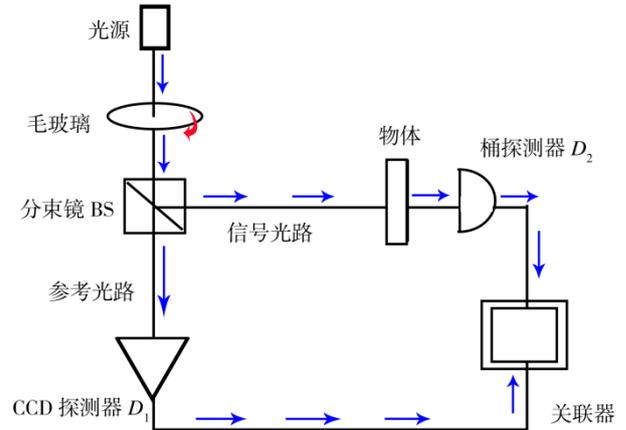


图 1 关联成像原理
Fig.1 Principle of ghost imaging

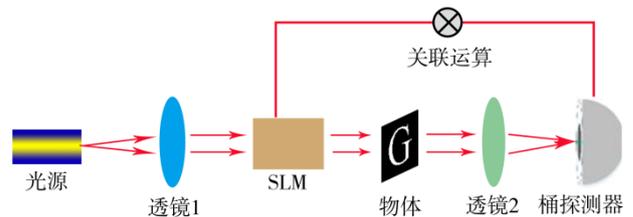


图 2 基于 SLM 的计算鬼成像实验装置
Fig.2 Experimental device for calculating ghost imaging based on SLM

这里假设 $\phi_i(x,y)$ 服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布。当一束空间相关的单色激光垂直照射在空间光调制器 SLM 上时, SLM 只对光的相位进行调制,而且是根据输入的相位图片进行调制,其中光场分布为 $\{I_i(x,y)\}$ 。经 SLM 之后产生的随机光斑照射在待成像物体 $T(x,y)$ 上,物体衍射的光强值由点探测器收集计算得到光强值为 B_i 。根据菲涅尔传播函数得到计算公式为:

$$B_i = \int dx dy I_i(x,y) \times T(x,y) \tag{1}$$

$$I_i(x,y) = |E_{in}(x,y) \exp[j\phi_i(x,y)] \otimes h_z(x,y)| \tag{2}$$

式中: $h_z(x,y)$ 为传播一段距离 z 时的菲涅尔衍射函数; \otimes 为卷积运算。然后利用关联函数恢复出物体的原始信息,该过程的表达式为:

$$T_{GI}(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_i - \langle B \rangle) I_i(x,y) \tag{3}$$

关联成像作为一项全新的光学成像技术,其成像理论逐步完备,实验和应用也不断突破。关联成像可以达到传统成像所无法实现的效果,在反射成像、远程探测、强噪声背景成像方面具有广阔的发展前景。关联成像算法是一个统计特征提取过程,因此成像所需探测时间比较长。文中将信道编码和关联光学成像算法结合,大大简化了计算工作量。同时相同的计算条件下,能够改善成像的质量。针

对于传输图像，其像素点由不同数值组成，容易在传输过程中产生误差，引入二进制编码，实现图像用 0 和 1 表示，引入阈值判断，实现精确重构，完成图像编码传输。

2 信道编码

信道编码是重要的通信纠错方法，为改善可见光通信的信道译码性能，提高信息传输效率，降低译码复杂度，这里将哈夫曼编码加入到关联成像中，结合哈夫曼编码的原理以改善成像质量^[17]。哈夫曼编码 (Huffman Coding)，亦称最佳编码、熵编码，适用于无损耗的数据压缩^[18]。哈夫曼编码是可变字长编码 (VLC) 的一种。 Huffman 于 1952 年提出一种编码方法，该方法完全依据字符出现概率来构造异字头的平均长度最短的码字，一般就叫做 Huffman 编码 (有时也称为霍夫曼编码)。

哈夫曼编码定理：在可变长编码中，如果码字可变长度严格按照信号中符号出现概率大小的相反顺序排列，则平均码字长度一定小于其他符号顺序排列方式的平均码字长度。哈夫曼编码算法如下所述 (见图 3)。

- 1) 按概率大小将图像灰度等级从小到大排序。
- 2) 给 2 个概率最小的灰度等级分别配以 0 和 1 这 2 个码元，将 2 个最小概率相加成新的概率，再与剩下的概率重新排序。
- 3) 在新的概率集合中，重复步骤 2)，直至概率集合中概率为 1 的情况出现。
- 4) 从根节点开始读取码元，直到最后一个“1”，将路线上遇到的“0”和“1”从低到高排序后，即可

进行二进制编码的码字。

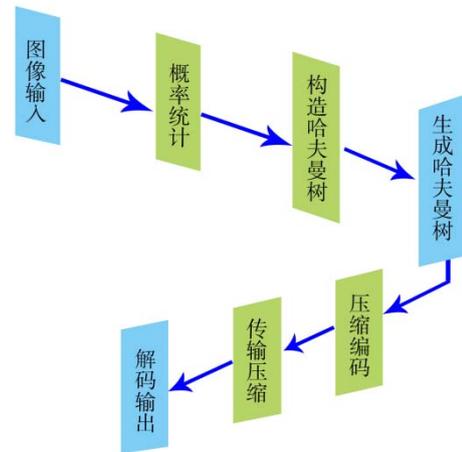


图 3 哈夫曼编译码系统流程
Fig.3 Flow chart of Huffman coding and decoding system

哈夫曼编码是广泛地用于数据文件压缩的十分有效的编码方法。其压缩率通常在 20% ~ 90%之间。哈夫曼编码有多种方式表示文件中的信息，若用 0，1 码表示字符的方法，即每个字符用唯一的一个 0，1 串表示。

3 基于哈夫曼编码关联成像的图像传输机理研究

3.1 图像传输机理

这里研究的基于哈夫曼信道编码关联成像算法的信息传输流程见图 4。研究通过关联成像实现高速精准的图像编码传输。

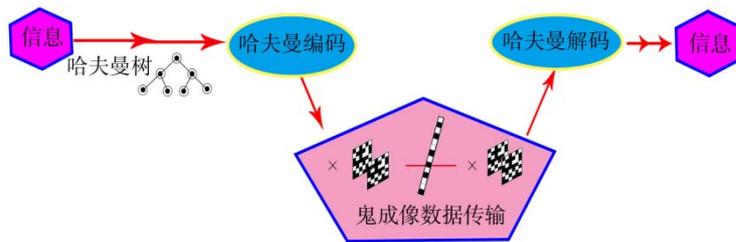


图 4 基于信道编码关联成像算法的信息传输流程
Fig.4 Information transmission process based on channel coding association imaging algorithm

这里作为传输信号的图像，其像素点本身是由不同的数值表示，为保证传输过程中的精准及鲁棒性，将不同大小的数值转变二进制，实现不同的图像用 0 和 1 编码表示。将编码后的图像通过光纤传输到接收方，接收方利用桶探测器接收传输的信息，完成传输过程。通过对基于哈夫曼信道编码关联成像的图像传输机理的研究，充分利用哈夫曼编码的无损耗数据压缩特性和关联成像的高速精准传输功能，在降低图像传输信息量的同时提高传输图像的分辨率，进而提高信道的可靠性和安全性，解决目前成像算法可行性不

足、还原度不高等问题。

3.2 实验仿真

根据哈夫曼编码的原理，把 G 图的二维像素矩阵转换成一维向量进行压缩编码，然后经过传输压缩，在解码输出的过程中结合关联成像，最后就可重构出效果图像。对原始图像分别进行基于信道编码的关联成像和传统关联成像 2 种不同方法，对效果图像进行对比，仿真结果见表 1。从仿真结果中可以看到，前者得到的效果图像更加接近原始图像。

表 1 不同采样率下的效果
Tab.1 Effect under different sampling rates

采样率/%	信道编码+关联成像 (GI)	关联成像 (GI)
15		
35		
55		
75		
95		

3.3 结果分析

通过将哈夫曼编码技术与关联成像结合,进一步解决了关联成像对物体细节还原度不高等问题,文中结合了哈夫曼编码技术和关联成像,通过对基于哈夫曼编码的关联成像机理的研究,利用 Matlab R2018a 软件仿真实验。选取的实验对象大小为 64×64 的二值图像 (G)。实验仿真从可行性、比特误码率和可靠性方面来进行分析验证。

3.3.1 可行性

可行性指把哈夫曼编码与关联成像结合起来恢复原始的图文信息的情况。基于哈夫曼编码的关联成像算法的可行性,这里主要通过相关系数来分析。相关系数是研究变量之间线性相关程度的量,是用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标。这里相关系数用 C_c 表示, C_c 值越大,相关程度越大,效果图像清晰度越好,该方案可行性越好。像素相关系数计算见式 (4),其中, x 和 y 分别表示图像中相邻 2 个像素点的像素值, C_c 为相邻 2 个像素点的相关系数。

$$\left\{ \begin{aligned} E(x) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ D(x) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E(x))^2 \\ \text{cov}(x, y) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E(x))(y_i - E(y)) \\ C_c &= \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x)}\sqrt{D(y)}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

表 2 不同算法的相关系数对比
Tab.2 Comparison of correlation coefficient under different algorithms

C_c 值	信道编码+GI/%	GI/%
0	19	32
1	81	68

由表 2 可知,基于哈夫曼编码的关联成像算法下效果图像的相关系数为 1 的达到 81%,而传统的关联成像方法下效果图像相关系数为 1 的只有 68%,则基于哈夫曼信道编码的关联成像算法下效果图像明显比传统的关联成像方法下效果图像相关系数大。由于相关系数越大,效果图像清晰度越好,则说明该方案的效果图像清晰度更高,证明该方案在可行性评价指标方面更有效。

3.3.2 比特误码率

数字信号在传输过程中不可避免地会产生差错,如在传输过程中受到外界的干扰而使传送的信号发生畸变等,当受到的干扰或信号畸变达到一定程度时,就会产生差错(如传送的信号是 1,而接收到的是 0;反之亦然)。比特误码率(Bit Error Ratio, BER)是指一定时间内收到的数字信号中发生差错的比特数与同一时间收到的数字信号总比特数之比,也可以叫做“误比特率”。比特误码率是衡量数据在规定时间内数据传输精确性的指标。

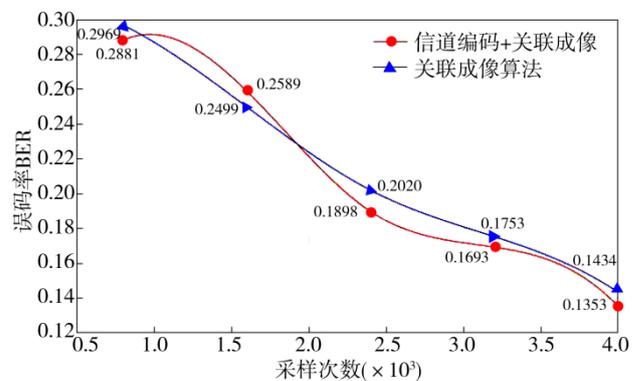


图 5 不同方法下 BER 实验值曲线
Fig.5 BER experimental value curve under different methods

在图 5 中圆点线代表基于信道编码的关联成像算法中不同采样下效果图像 BER 值变换情况,三角形线代表传统的关联成像算法中不同采样下效果图像 BER 值变换情况。由图 5 中线条变化趋势可知,基于信道编码的关联成像算法的效果图像 BER 值总体上来看比传统信道编码方法的效果图像 BER 值低,效果图像的质量较好,比较接近原始图像信息;随着采样次数增多,误码率逐渐降低,并且当采样次数达到 4000 之后,基于信道编码的关联成像算法效果图像 BER 值为 0.1353,效果图像更接近原始图像。这

些实验结果说明该方案的效果图像具有更好的质量,证明该方案在比特误码率衡量指标方面更有效。

3.3.3 可靠性

为了客观评价文中方案的图像质量,更好地描述系统的不确定性,这里通过文中方案与关联成像算法来对比进行分析。信息熵的概念首先由美国工程师香农(C.E.Shannon)在1948年提出,该概念能够表示系统含有的信息量。香农信息论证明,信息熵是无失真编码的理论极限,低于此极限的无失真编码方法是不存在的,这是熵编码的理论基础。如今,信息熵已经引入到图像处理技术中,在图像领域,熵值反映图像像素值的分布,与像素值大小无关。

$$H(x) = E[l(x_i)] = E[\log_2 1/p(x_i)] = -\sum p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

式中: H 单位为比特/字符; x 为随机变量; $P(x)$ 为输出概率函数。变量的不确定性越大,熵也就越大,把它搞清楚所需要的信息量也就越大。信息熵能够直接表现出图像所包括信息量的多少,信息熵 H 值越小,说明系统越有序,信息熵 H 值越大,说明图像所包括信息量越多,图像质量越高。这里通过对2种方法分别在不同采样次数下的信息熵进行评估分析。

表3 不同采样次数下的信息熵 H 对比

Tab.3 Comparison of information entropy H under different sampling times

采样次数	信道编码+GI	GI
800	5.6613	5.4914
1600	5.0017	4.7543
2400	4.6297	4.0668
3200	3.6024	3.3281
4000	3.1174	2.971

由表3可知,随着采样次数的增加,信息熵 H 值呈下降趋势,如在“信道编码+GI”中可以看到,采样次数为800时的 H 值为5.6613,采样次数为4000时的 H 值为3.1174;在“GI”中可以看到,采样次数为800时的 H 值为5.4914,采样次数为4000时的 H 值为2.9710。即无论是在哪一种方法下,都是随着采样次数越大, H 值越小,系统越有序,图像质量越高。整体来看,基于信道编码关联成像算法的效果图像信息熵 H 比单一的关联成像算法大,如当采样次数为2400时,基于信道编码关联成像算法的效果图像信息熵 H 为4.6297,而关联成像算法下的效果图像信息熵 H 为4.0668,则图像所包括信息量较多,图像质量较高。这些实验结果说明文中方案不仅系统有序,而且效果图像具有更好的质量,证明文中方案在信息熵评价指标方面更有效。

4 结语

文中提出基于哈夫曼编码的关联成像算法,并对其信号传输机理进行了研究,解决了目前成像算法可行性不足、复杂物体细节还原度不高等问题,突破了传统关联成像的限制。在哈夫曼信道编码的过程中结合关联成像,关联成像具有能实现高分辨率超快信号传输的性质,其零存整取的原则以及具有传统的经典成像所没有的“非域性”这一特性能够大大降低误码率,提高运行效率,同时利用哈夫曼编码的无损压缩特性,进一步实现高速精准的图像编码传输。关联成像相比传统成像而言具有极强的抗干扰能力,因此能够提高系统的纠错能力和传输信号的可靠性,降低误码率。在哈夫曼信道编码的基础上采用关联成像的方式,这种基于哈夫曼编码的安全可靠通信方法是一种编码域的抗干扰、抗截获通信方式,它通过信道编码的无损压缩,在保证系统可靠性的同时,提高了编码被攻击者破译的难度,大大提高了基于信道编码通信系统的安全性。该图像传输方法能够实现图像上高质量重构,克服传统成像的安全性能问题,加大破译者的难度,还可进一步推广和应用到光纤通信中,具有更为普遍的实用价值和理论意义。

参考文献:

- [1] 龙吟,朱珂,丁凯,等.天地一体化互联网络中航天器网关的设计及实现[J].航天器工程,2016,25(1):77—83.
LONG Yin, ZHU Ke, DING Kai, et al. Design and Implementation of Spacecraft Gateway in Integrated Space-ground Network[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(1): 77—83.
- [2] 武建亮,姜照昶,王文彦,等.航天测控动态数传数据模拟器的实现[J].无线电工程,2017,47(8):18—21.
WU Jian-Liang, JIANG Zhao-chang, WANG Wen-yan, et al. The Implement of Dynamic Data Transfers Simulation on Aerospace TT&C System[J]. Radio Engineering, 2017, 47(8): 18—21.
- [3] WANG T. Research on Image Coding Based on Rate Distortion Optimization[J]. Intelligent Computer and Applications, 2017(3): 95—98.
- [4] 王凯,黎全,林惠祖,等.基于遗传算法的空间光调制器鬼成像研究[J].光学学报,2016,36(2):230—234.
WANG Kai, LI Quan, LIN Hui-zu, et al. Ghost Imaging with Spatial Light Modulator Based on Genetic Algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 230—234.
- [5] 赵鑫,喻虹,陆荣华,等.X光傅里叶变换关联成像赝热光源研究[J].光学学报,2017(5):93—101.

- ZHAO Xin, YU Hong, LU Rong-hua, et al. Research on Pseudo-Thermal Source of X-Ray Fourier-Transform Ghost Imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017(5): 93—101.
- [6] 施展, 樊祥, 程正东, 等. 赝热光场的统计特性及其关联成像理论[J]. *光电子·激光*, 2016, 34(11): 184—189.
- SHI Zhan, FAN Xiang, CHENG Zheng-dong, et al. Photon Statistics of Pseudo-thermal Light and Its Theory of Correlated Imaging[J]. *Journal of Optoelectronics·laser*, 2016, 34(11): 184—189.
- [7] 康祎, 张雷洪. 基于压缩感知关联成像的目标检测技术[J]. *光学仪器*, 2017, 39(6): 1—6.
- KANG Yi, ZHANG Lei-hong. The Technology of Target Detection Based on Compressive Ghost Imaging[J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(6): 1—6.
- [8] KATKOVNIK V, ASTOLA J. Compressive Sensing Computational Ghost Imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2012, 29(8): 1556.
- [9] AGUERRI I E, GUNDUZ D. Joint Source-Channel Coding With Time-Varying Channel and Side-Information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(2): 736—753.
- [10] 王防修, 刘春红. 一种哈夫曼编码的改进算法[J]. *武汉轻工大学学报*, 2016, 35(1): 88—91.
- WANG Fang-xiu, LIU Chun-hong. An Improved Algorithm of Huffman Encoding[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2016, 35(1): 88—91.
- [11] 田端财, 殷晓丽. 基于哈夫曼编码的图像压缩技术研究[J]. *科技资讯*, 2009(8): 29—30.
- TIAN Duan-cai, YIN Xiao-li. Study on Image Compression Technology Based on Huffman Coding[J]. *Science and Technology Information*, 2009(8): 29—30.
- [12] CHOWDHURY R A, KAYKOBAD M, KING I. An Efficient Decoding Technique for Huffman Codes[J]. *Information Processing Letters*, 2002, 81(6): 305—308.
- [13] HASHEMIAN R. Condensed Table of Huffman Coding, a New Approach to Efficient Decoding[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2004, 52(1): 6—8.
- [14] 董培良, 俞日龙, 廖天康, 等. 一种快速霍夫曼解码算法及其软硬件实现[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2002, 41(2): 165—169.
- DONG Pei-liang, YU Ri-long, LIAO Tian-kang, et al. A Fast Huffman-Decoding Algorithm and Its Implementation of Software and Hardware[J]. *Journal of Fudan University*, 2002, 41(2): 165—169.
- [15] 林嘉宇, 刘荧. 关于 Huffman 编码的一个注记[J]. *电子学报*, 2003, 31(4): 602—604.
- LIN Jia-yu, LIU Ying. A Note on Huffman Coding[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(4): 602—604.
- [16] PING G, KOLIOS M C, YUAN X. Delay-encoded Transmission and Image Reconstruction Method in Synthetic Transmit Aperture Imaging[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2015, 62(10): 1745.
- [17] QINGPING Y U, SHI Z. Research of Channel Coding Techniques in 5G Communications[J]. *Radio Communications Technology*, 2018(1): 1—8.
- [18] 杨雨薇, 张亚萍, 李幸刚. 一种改进的 JPEG 图像压缩编码算法[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(6): 32—39.
- YANG Yu-wei, ZHANG Ya-ping, LI Xing-gang. An Improved JPEG Image Compression Coding Algorithm[J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2016, 36(6): 32—39.