

# 基于多元 Huffman 的 PDMA 视频传输系统模型

李树锋, 宿宝心, 余昕

(中国传媒大学信息与通信工程学院, 北京 100024)

**摘要:** 新型多媒体业务的蓬勃发展为当前网络资源分配带来了巨大的挑战。非正交多址技术(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)在未来无线视频多播中的应用有很大的研究价值。NOMA通过信号的叠加传输和频谱复用方式,提高了系统的接入能力和频谱资源利用率。为了解决视频数据业务的激增与频谱资源的稀缺之间的矛盾,本文设计了基于压缩编码的图样分割多址(Pattern Division Multiple Access, PDMA)视频传输系统模型。通过综合考虑PDMA的多阶调制及其传输特性,本文提出了基于PDMA传输的多元 Huffman(multivariate Huffman, mHuffman)编码,旨在提升资源利用率,减少频谱资源的消耗。仿真结果表明,在mHuffman-PDMA系统模型中进行视频数据传输,可以大大降低系统的误码率,节省传输时间,提升传输效率。

**关键词:** NOMA; PDMA; 视频; 多元 Huffman; 压缩编码

**中图分类号:** O422 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4793(2022)01-0023-06

## PDMA video transmission system model based on multivariate huffman coding

LI Shufeng, SU Baoxin, YU Xin

(School of information and communication engineering, Communication University of China, Beijing 100024, China)

**Abstract:** The rapid development of new multimedia services has brought great challenges to the current network resource allocation. Non-orthogonal multiple access (NOMA) has aroused research interest for its potential use in the future wireless video multicast. By means of signal superposition transmission and spectrum multiplexing, NOMA improves the access capability and spectrum resource utilization of the system. In order to solve the contradiction between the proliferation of video data services and the scarcity of spectrum resources, we propose a pattern division multiple access (PDMA) video transmission system model based on video compression coding. By comprehensively considering the multi-order modulation of PDMA, we also propose a multivariate Huffman coding (mHuffman) based on the transmission characteristics of PDMA, which aims to improve the resource utilization and reduce the consumption of spectrum resources. The simulation results show that the transmission of video data in the mHuffman-PDMA system model can greatly reduce the bit error rate (BER), save transmission time, and improve the transmission efficiency.

**Key words:** NOMA; PDMA; video; multivariate Huffman; compression coding

## 1 引言

随着移动网络的密集部署和一些新兴多媒体业务的大力发展,视频和图像已逐渐成为文化消费的主流。由于视频数据传输需要占用较大的信道容量<sup>[1]</sup>,传输过程中容易产生信号干扰。数据服务激增与频谱资源稀缺之间的矛盾给当前的网络资源分配带来了巨大的挑战<sup>[2]</sup>。因此,压缩编码在应对大量数据传输的问题中尤为重要。压缩编码技术在通信数据传输、文件数据存储、图像信息隐藏和提取等方面已得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。压缩过程可分为有损压缩和无损压缩。Huffman算法是一种经典的无损压缩算法,被认为是接近压缩比上限的最佳编码方法之一。文献[4]提出了在已知部分信源概率时,获得哈夫曼码可达到的最小冗余的严格下界的方法。文献[5]通过哈夫曼编码设计可变长度前缀码,以不同的概率激活发射天线。

非正交多址技术(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)是未来移动通信系统中的一项关键技术,它通过信号的叠加传输和频谱复用方式为不同信道条件下的用户提供服务,提高了系统的接入能力和频谱资源利用率,有效满足网络中数亿设备的连接需求<sup>[6]</sup>。图样分多址<sup>[7]</sup>(Pattern Division Multiple Access, PDMA)技术是一种具有发射端和接收端联合优化设计的新型NOMA。在发射端,多个用户的信号通过PDMA图样映射到同一时域、频域和空间域资源,进行多路复用传输。在接收端,采用SIC检测算法或置信传播(Belief propagation, BP)检测算法进行多用户检测<sup>[8]</sup>。目前,NOMA和视频传输的结合受到了广泛关注<sup>[9-11]</sup>。因此,本文将PDMA技术的传输特性与视频传输相结合,可以同时为多个用户传输不同的数据,从而提高传输效率,节省传输时间。

由于视频传输数据量很大,不仅在PDMA系统的传输过程中占用大量内存,而且增加了符号间干扰,直接影响接收端信号的检测复杂性和恢复精度,因此需要对传输数据进行压缩和编码。与其他无损压缩编码相比,Huffman编码更适合于概率分布不均匀的码源。因此,本文主要研究了基于多元Huffman编码(multivariate Huffman, mHuffman)的PDMA视频传输,它可以降低编码长度,同时降低传输效率。

本文的主要贡献总结如下:

1) 本文设计了一种基于PDMA的视频压缩编码(VCC-PDMA)传输系统模型,对视频帧的灰度值进行压缩和编码,以减少传输的数据量,从而提高频谱资源的利用率,节省传输时间,提高系统的整体性能。

2) 本文提出了一种结合PDMA传输特性的mHuffman编码。根据PDMA的调制顺序设置m元Huffman编码,并且编码码字相应地扩展成多个独立符号以对应于PDMA传输。

本文的其余部分组织如下。第二节介绍了VCC-PDMA系统模型。第三节介绍了mHuffman压缩编码算法。第四节通过仿真,详细讨论了该设计方案的性能。最后,本文在第五节中总结了全文。

## 2 系统模型

PDMA上行链路传输框架如图1所示。PDMA根据图样将传输的数据映射到一组资源上,以实现不同的传输分集顺序。PDMA图样定义了从传输数据到资源组的映射。资源组可以由时域、频域、空域资源或这些资源的任意组合组成。多个用户的数据可以通过不同的PDMA图样复用到同一资源组,实现非正交传输。通过分配具有不同分集顺序的PDMA图样,可以实现用户之间不同的传输分集顺序<sup>[12]</sup>。



图1 PDMA上行传输框架

PDMA 技术的基本思想是基于发射端和接收端的联合设计。在发射端,PDMA 编码器根据图样矩阵将多用户信号叠加映射到相应的资源块(Resource block, RB),并生成 PDMA 调制向量。

对应的图样矩阵可以表示为:

$$G_{PDMA}^{[3 \times 6]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

图 2 中展示了基于 PDMA 的视频压缩编码系统模型。在多个信道下给多个用户传输不同视频信息时,先读取视频帧数量为  $L$ ,然后将每一帧转化成二维图像。令  $s_{kl}$  表示第  $k$  个信道传输视频的第  $l$  个帧的二维图像信号。再对  $s_{kl}$  进行灰度处理得到灰度信息  $e_{kl}$ ,再对其进行压缩编码。

$K$  个用户复用  $N$  个 RB 的 PDMA 图样矩阵用  $F_{PDMA}^{[N \times K]}$  表示,  $F_{PDMA}^{[N \times K]} = [f_1, f_2, \dots, f_K]$ 。假设 PDMA 传输系

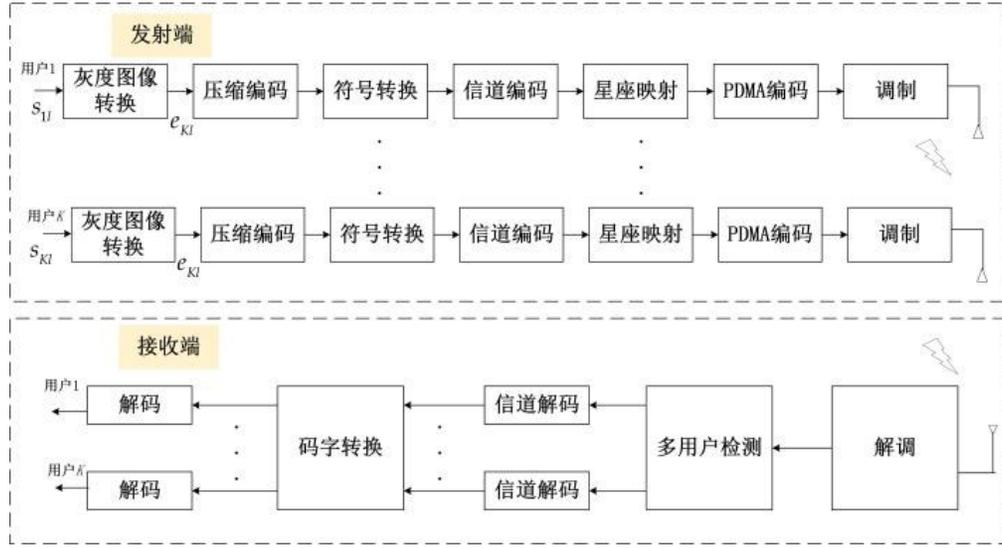


图 2 基于 PDMA 的视频压缩编码系统模型

统中有  $K$  个用户,用户数据通过不同的特征图样  $f_k$  映射到  $N$  个 RB 上。传输第 1 个帧时,用户  $k$  的 PDMA 调制向量  $v_{kl}$  为

$$v_{kl} = f_k x_{kl}, \quad 1 \leq k \leq K \quad (2)$$

其中,  $f_k$  是维度为  $N \times 1$  的二进制向量。  $x_{kl}$  为第  $k$  个信道传输视频的第  $l$  个帧经过 VCC 后长度为  $d$  的传输信号,

$$x_{kl} = [x_{kl}^1, x_{kl}^2, \dots, x_{kl}^d] \quad (3)$$

基站接收到的第 1 帧信号可以表示为:

$$y_l = \sum_{k=1}^K \text{diag}(h_k) v_{kl} + n \quad (4)$$

其中,  $n$  表示干扰和噪声,服从  $n \sim CN(0, N_0 I_N)$ ,  $h_k$  表示用户  $k$  的信道响应,  $\text{diag}(h_k)$  表示对角线元素为  $h_k$  的对角矩阵,上式经过化简可以表示为:

$$y_l = H x_l + n \quad (5)$$

其中,  $x_l = [x_{1l}, x_{2l}, \dots, x_{kl}]^T$ ,  $H$  表示  $K$  个用户复用在  $N$  个 RB 上的等效信道响应矩阵。

$$H = H_{CH} \odot F_{PDMA}^{[N \times K]} \quad (6)$$

$H_{CH} = [h_1, h_2, \dots, h_K]$  为  $K$  个用户与基站之间的瑞利信道响应矩阵。所以公式(5)可具体表示为:

$$\begin{aligned} y_l &= H_{CH} \cdot F_{PDMA}^{[N \times K]} x_l + n \\ &= [h_1, h_2, \dots, h_K] \cdot F_{PDMA}^{[N \times K]} [x_{1l}, x_{2l}, \dots, x_{kl}]^T + n \end{aligned} \quad (7)$$

### 3 压缩编码

#### 3.1 Huffman 编码

Huffman 编码是一种常见的二进制无损压缩编码方式。Huffman 的编码过程大致可以分为两步。首先对灰度图像数据进行扫描,计算出不同像素出现的概率。其次构造 Huffman 树。根据符号出现的概率分配不同的码字,出现概率更大的符号将获得更短比特的码字,以此提高数据压缩率和传输效率。同时将所有码字与像素符号一一对应组成 Huffman 码表,在接收端通过码字与像素<sup>[13]</sup>的对应关系实现源图像数据的还原。算法过程描述如下:

**Algorithm1: Huffman 压缩编码**

- Step1: 扫描原图像, 将每个像素符号作为一个节点, 统计每种字符出现的概率
- Step2: 合并两个概率最低的节点作为一个新节点
- Step3: 节点的左分支标记为代码“0”, 右分支标记为代码“1”
- Step4: 计算 Step2 中合并后两个节点的概率之和
- Step5: 执行 Step2 ~ Step4
- Step6: 在完成 Huffman 树的构造后, 读取每个符号对应的码字, 生成 Huffman 码表, 并计算平均码长、压缩率等所需数据

**3.2 mHuffman 编码**

在实际的编码过程中, 由于在不同的图像中像素符号出现的概率分布是不同的, 并且只有当信息源各符号出现的概率很不平均的时候, Huffman 编码的效果才明显。在与 PDMA 结合传输过程中, 需要将编码序列的每个码字按顺序展开成一个单个码元组成的长序列进行传输, 数据量依旧很大, 不仅耗费时间也不利于接收端的多用户检测。其次由于 Huffman 是二进制编码, 需要根据 PDMA 调制阶数对传输数据进行进制转换, 过程繁琐且不易操作。

因此为了提升压缩率, 降低总码元数量, 并且简化传输过程, 本文设计了基于 PDMA 传输特性的多元 Huffman 编码, 根据 PDMA 的调制阶设置多元 Huffman 编码元数  $m$ , 不仅可以节省掉进制转换的步骤还可以进一步缩短码长, 节省传输时间的同时也有利于接收端的多用户检测, 利于传输。

在进行 mHuffman 编码时, 统计中出现的  $t$  个字符及其出现的概率分别为, 其中,

$$p_1 + p_2 + \dots + p_t = 1 \quad (8)$$

信源缩减次数  $\alpha$  可以表示为

$$\alpha \approx \frac{n-m}{n-1} + 0.5 \quad (9)$$

由于信源符号的个数需要满足

$$t^0 = (m-1)\alpha + m \quad (10)$$

当  $t < t^0$  时, 可以在概率  $p$  的最后补充一些概率 0, 补零个数  $\varepsilon$  可以表示为

$$\varepsilon = t^0 - t = (m-1)\alpha + m - t \quad (11)$$

此时概率可以表示为

$$p = [p, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{\varepsilon}] \quad (12)$$

将信源符号按照出现的概率升序排序, 合并  $m$  个

概率最低的节点作为一个新节点  $\mu^1$ , 和概率为  $p^1$ 。节点的分支分别标记为用“0”, “1”, ..., “ $m-1$ ”。用  $\mu^1$  和  $p^1$  替代上述  $m$  个符号重新进行排序。合并  $w$  次后的信源符号的个数为

$$\sigma = t^0 - wm + w \quad (13)$$

重复上述过程, 直到  $\sigma = 1$ , 并获得每个字符对应的码字。最后, 编码序列的每个码字按顺序展开并排列成由单个符号组成的长序列以供传输。平均代码长度公式如下:

$$\ell_{ave} = \sum_{i=1}^m p_i \ell_i \quad (14)$$

其中  $\ell_i$  是对应于 Huffman 代码表中第  $i$  个字符的编码长度。

压缩比由下式给出:

$$\theta = \frac{\ell_{cc}}{\ell_{ori}} \quad (15)$$

其中,  $\ell_{ori}$  是依次转换为单个符号的原始二进制码字的长度,  $\ell_{cc}$  是依次转换为单个符号的 mHuffman 代码的码字长度。

mHuffman-PDMA 算法过程描述如下:

**Algorithm2: mHuffman 压缩编码**

- Step1: 扫描原图像, 将每个像素符号作为一个叶子节点, 统计每种字符出现的概率
- Step2: 设置所需元数  $m$ , 计算所需信源符号, 在概率  $p$  后补零并排序
- Step3: 用字符“0”, “1”, ..., “ $m-1$ ”分别代表概率最小的  $m$  个信源符号, 并将其合并为一个新的信源符号  $\mu^1$ , 概率和为  $p^1$
- Step4: 在树中添加一个  $\mu^1$  和  $p^1$  的节点
- Step5: 重复 step3~4, 直至所有信源符号参与
- Step6: 完成 Huffman 树的构造, 读取每个符号对应的码字, 生成 Huffman 表, 并计算平均码长、压缩率等所需数据
- Step7: 将编码后的序列的每个码字按顺序展开, 排列成一个单个码元组成的长序列

例如, 表 1 中有 6 个不同的符号。根据每个符号的概率, 得到了对应的 Huffman 编码序列和 4Huffman 编码序列, 并构建 Huffman 树, 如图 3 和图 4 所示。

表 1 编码序列

符号	A	B	C	D	E	F
概率	0.05	0.07	0.10	0.15	0.30	0.33
Huffman	0000	0001	001	01	10	11
4Huffman	01	02	03	1	2	3

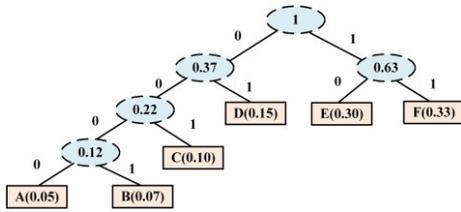


图3 由表1中的数据生成的 Huffman 树

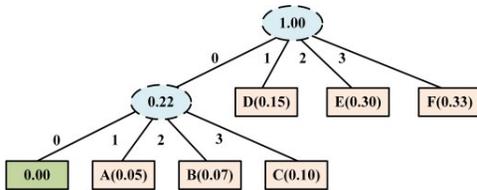


图4 由表1中的数据生成的 4Huffman 树

在 mHuffman PDMA 系统模型中,当不同的视频传输给  $K$  个用户时,首先将多个视频帧转换为二维图像,然后将每个图像信号  $s_{kl}$  转换为灰度值以获得  $e_{kl}$ ,然后压缩编码以获得  $e'_{kl}$ 。

为了便于与 PDMA 的组合传输,需要将压缩码字进一步扩展成多个单独的符号  $a_{kl}$  序列。 $a_{kl}$  的长度是  $d_{kl}$ 。例如,在第  $l$  帧的传输中,由于不同数据编码后的符号数量不一定相同,因此有必要通过零填充获得相同长度的传输信号。

$$d_l = \max(d_{1l}, d_{2l}, \dots, d_{Kl}) \quad (16)$$

其中  $d_l$  表示第  $l$  帧信号的长度。零填充后的传输信号由以下公式给出:

$$b_{kl} = [a_{kl}, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{(d_l - d_{kl})}] \quad (17)$$

mHuffman PDMA 系统模型中传输的第  $l$  个视频帧的信号  $x_l$  公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_{1l}^1 & x_{1l}^2 & \dots & x_{1l}^{d_{1l}} \\ x_{2l}^1 & x_{2l}^2 & \dots & x_{2l}^{d_{2l}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{Kl}^1 & x_{Kl}^2 & \dots & x_{Kl}^{d_{Kl}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

## 4 仿真结果分析

仿真中涉及的参数值如表2所示。

表2 仿真参数

仿真参数	数值
信道模型	瑞利信道
用户数- $N$	2
资源数- $K$	3
过载率	150%

图样矩阵	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
调制方式	BPSK/QPSK/8PSK
调制阶数	2/4/8
迭代次数	10

为了验证本文提出的 mHuffman 视频压缩算法的有效性,本文截选了分辨率不同的三段视频进行传输,帧速率为 30 帧/s。在 3 个视频中各随机选取一个帧,分别采用 Huffman、4Huffman 与 8Huffman 压缩算法,比较了平均码长、压缩率和时间比,

$$p_t = \frac{t_{\text{nHuffman}}}{t_{\text{Huffman}}} \quad (19)$$

从表3中的数据可以看出,当发射源信号相同时, mHuffman 的编码效率远远高于传统 Huffman 编码。在不同的视频分辨率条件下,编码效率没有明显变化。

表3 Huffman 与多元 Huffman 视频帧压缩数据比较

Video	Size	编码方式	平均码长 $l_{\text{ave}}$	压缩率 $\theta$	时间比 $p_t$
Video1	240 × 160	Huffman	6.58	0.83	1
		4Huffman	3.97	0.49	0.67
		8Huffman	2.62	0.35	0.32
Video2	960 × 540	Huffman	6.34	0.82	1
		4Huffman	3.95	0.48	0.65
		8Huffman	2.58	0.32	0.32
Video3	1024 × 600	Huffman	6.31	0.81	1
		4Huffman	3.96	0.49	0.67
		8Huffman	2.51	0.32	0.31

在图5中,本文比较了行程编码<sup>[14]</sup>(Run Length Encoding, RLE)、Huffman、4Huffman 和 8Huffman 编码结合 PDMA 传输的视频数据压缩算法的性能。从图5的数据可以看出,当使用 8Huffman 编码时,误码率(Bit Error Rate, BER)更小。在发送相同的信号时,由于 mHuffman 压缩后的符号数较少,码间干扰减少,有利于接收端的多用户检测,因此性能更好。

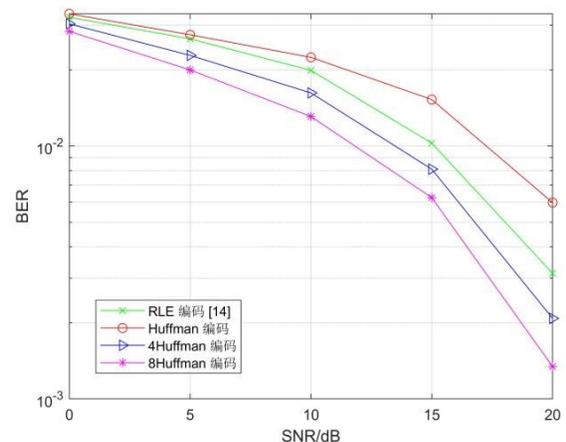


图5 不同压缩编码算法的 BER 性能

在图6中,本文比较了Huffman、4Huffman和8Huffman压缩算法的平均峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)性能。可以看出,在相同的信噪比条件下,随着m的增加,峰值信噪比增加。因此,在系统模型中,结合使用mHuffman编码可以减少图像失真,提高系统的传输质量。

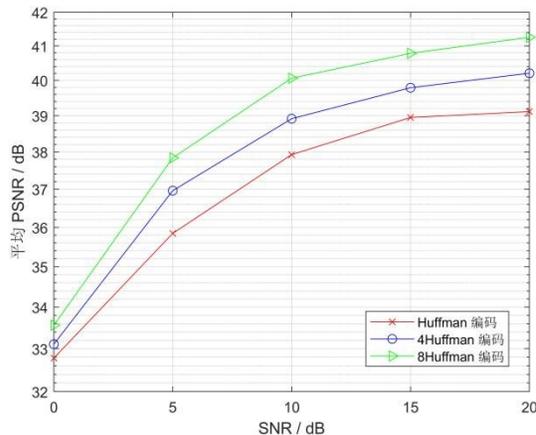


图6 不同压缩编码算法的PSNR性能

图7展示了在8Huffman PDMA视频压缩传输系统模型中,3个用户传输的视频帧在发射端和接收端的灰度图像。可以看出,传输前后图像的灰度差异很小,能够满足传输的需要。



图7 8Huffman PDMA 发射端和接收端的灰度图像

## 5 结论

本文将视频传输与PDMA技术相结合,结合PDMA的传输特性,提出了一种mHuffman编码,在提高资源利用率的同时降低了频谱资源的消耗,提高了传输效率。首先,本文比较了Huffman和mHuffman对不同视频帧编码的数据,mHuffman的平均码长和压缩率明显优于Huffman。同时,本文计算了传输相同视频数据时mHuffman-PDMA和Huffman-PDMA之间的延迟。m-Huffman编码可以显著缩短传输时间。其次,对基于PDMA的视频压缩编码系统模型在不同压缩编码算法下的传输性能进行了仿真。仿真结果表明,mHuffman-PDMA的误码率最小。最后,

本文比较了发送端和接收端mHuffman-PDMA传输的视频帧的灰度图像,可以看到灰度图像没有明显的差异。

## 参考文献 (References) :

- [1] G Liu, Z Wang, J Hu, Z Ding and P Fan. Cooperative NOMA Broadcasting/Multicasting for Low-Latency and High-Reliability 5G Cellular V2X Communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7828-7838.
- [2] H Lu, M Zhang, Y Gui and J Liu. QoE-Driven Multi-User Video Transmission Over SM-NOMA Integrated Systems[J]. in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(9): 2102-2116.
- [3] 丁琳琳, 李正道, 纪婉婷, 宋宝燕. 基于改进哈夫曼编码的大规模动态图可达查询方法[J]. 电子学报, 2017, 45(02):359-367.
- [4] I Blanes, M Hernández-Cabrero, J Serra-Sagrístà and M W Marcellin. Lower Bounds on the Redundancy of Huffman Codes With Known and Unknown Probabilities[J]. in IEEE Access, 2019, 7: 115857-115870.
- [5] W Wang and W Zhang. Huffman Coding-Based Adaptive Spatial Modulation. in IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(8):5090-5101.
- [6] L Dai, B Wang, Y Yuan, S Han, C-I I, and Z Wang. Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Commun Mag, 2015, 53(9):74-81.
- [7] 陆音, 陈继荣, 卞皓伟, 朱洪波. 新型机会式NOMA协作多播方案[J]. 通信学报, 2020, 41(11):141-150.
- [8] 周立, 茅振东, 彭木根, 刘喜庆. CPF-OFDM PDMA下行传输方案[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(05): 14-20. DOI:10.13190/j.jbupt.2020-273.
- [9] M Zhang, H Lu, F Wu and C W Chen. NOMA-Based Scalable Video Multicast in Mobile Networks With Statistical Channels [J]. in IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(6): 2238-2253.
- [10] X Jiang, H Lu, C W Chen and F Wu. Receiver-driven Video Multicast over NOMA Systems in Heterogeneous Environments [C]. Paris, France: IEEE INFOCOM 2019 -IEEE Conference on Computer Communications, 2019: 982-990.
- [11] Q Zheng and H Shan. Design of Cooperative NOMA for Live Video Broadcast[C]. Hangzhou, China: 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2018:1-6.
- [12] X Zhang, S Kang and X Fu. Pattern Division Multiple Access Featuring Amplify-and-Forward Relaying in an Uplink Network [J]. in IEEE Access, 2020, 8: 85656-85663.
- [13] 王兆丽, 肖春霞, 王梅娟, 蒋园园, 董会. 哈夫曼编码在图像无损压缩中的应用[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(S1): 200-202.
- [14] F Ercal, M Allen and H Feng. A systolic image difference algorithm for RLE-compressed images[J]. in IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2000, 11(5):433-443.

编辑:龙学锋,李树锋