

5G SCMA 无线网络中视频跨层传输

赵敏丞¹ 李阳阳² 赵大伟¹ 张 义³

- (1. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068;
2. 中国电子科学研究院, 北京 100041;
3. 中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘要: 稀疏码多址接入是一种新的非正交多址接入技术, 它能有效地提高未来 5G 网络的频谱利用率。但是随着新型视频业务不断涌现, 视频业务对带宽的需求也不断增长, 如何在无线环境下高效地传输视频仍然是很大的挑战。为了提高视频业务在未来 5G 无线通信系统的传输质量, 对 SCMA 上行链路的视频传输优化进行了研究。基站获取了用户将发送视频业务的率失真特性, 并根据无线信道情况和特定的编码本向每个用户分配无线子载波, 使得系统的传输性能最优。本优化问题可以归纳为二进制整数规划问题并用 L-W 贪婪算法解决此问题。通过在 MATLAB 上的仿真验证该方法能有效提高视频的传输质量。

关键词: 5G; SCMA; 资源分配; 功率控制; 跨层; 视频

中图分类号: TN919.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-5692(2018)02-121-06

Cross-layer Video Transmission over 5G SCMA Network

ZHAO Min-cheng¹, LI Yang-yang², ZHAO Da-wei¹, ZHANG Yi³

- (1. The 20th Research Institute of CETC, Xi'an 710068, China;
2. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China;
3. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: Sparse code multiple access is a new non-orthogonal multiple-access technique which can improve spectral utility of 5G wireless network. However, the bandwidth requirement for the new type of video service is growing, improving the video transmission over the future wireless environment is still a challenge. In order to improve the video transmission performance in the future 5G wireless system, the video transmission optimization method over the uplink SCMA system is proposed in this work. The base station obtains the requested video distortion-rate relationship from the video client, according to the wireless channel condition and a specific codebook, it will allocate wireless subcarriers to maximize the video transmission performance. The optimizing problem is a summarized as a mixed binary integer programming problem and solved using a L-W greedy method. Simulation results show that the proposed algorithm greatly improves the video transmission performance.

Key words: 5G; SCMA; Resource Allocation; Power Control; Cross-Layer; Video

收稿日期: 2018-02-28 修订日期: 2018-04-01

基金项目: 装备预研中国电科联合基金项目(6141B08020101); 中国电子科学研究院创新基金(17109701)

0 引言

近年来移动互联网的快速发展,移动业务的迅猛增长使得 5G 通信需要满足大量接入和高频谱效率等多方面要求。同时流媒体应用集视频、音频、图文于一体,它被广泛应用于娱乐、教育、医疗健康、媒体广播等诸多领域,其引发的网络通信将占用大量的网络资源。4G 正交频分多址接入(OFDMA,orthogonal frequency division multiplexing access)已经不能满足移动业务对高带宽的要求,为了解决这个难题,研究者提出了大量新型非正交多址接入方式,例如:稀疏码多址接入(SCMA,Sparse Code Multiple Access)^[1]、多用户共享接入(MUSA,Multi-user Shared Access)^[2]和模式分配多址接入(PDMA,Pattern Division Multiple Access)^[3]等。其中,SCMA 是 5G 提高频谱效率的热门备选方案。

为了优化 SCMA 上行链路中视频业务的传输质量,笔者提出了一种基于视频业务特性感知的 SCMA 接入方法。基站根据用户所发送视频业务的码率失真关系,结合无线信道情况和 SCMA 的码本向每个用户分配无线子信道,使得系统中用户发送的视频质量最佳。本优化问题可以归纳为二进制整数规划问题,并用 L-W 贪婪算法解决此问题。仿真结果证明所提出优化方法有效提高 5G SCMA 上行链路的视频传输质量。

1 相关工作

1.1 无线视频跨层传输

在多用户通信系统中,无线链路的资源分配决定无线接入速率,无线带宽对视频的传输至关重要。如果带宽分配不合理,无论如何动态调整视频码率,其传输质量仍难以得到改善。对视频传输友好的资源分配策略需要考虑视频质量、用户体验等诸多因素。大量的研究者^[4-6]都结合视频业务特性,设计更合理的无线资源分配策略。文献[4]在应用层计算每个视频分组丢失造成的失真值,并把这个失真值作为分组重要性的依据,失真值越大表示视频分组越重要。然后根据每个用户窄带信道的信噪比,分别以视频质量和公平性最优为目标分配无线资源。文献[5]则建立了估计 AVC 视频的端到端失真模型,然后采用纳什均衡的策略来分配无线资源,

达到视频传输质量最优的目标。文献[6]则额外考虑了视频抖动对用户观感的影响,并根据无线信道和无线资源的情况,采用动态递归和贪婪的方法优化视频码率的选择。

1.2 SCMA

SCMA 是华为提出的一种新型非正交多址接入技术,它将 OFDM 与 CDMA 结合,即在每个时频资源上以码分的方式叠加更多用户,以满足未来 5G 大容量、海量连接低延时接入等需求。SCMA 是基于低密度扩频(LDS)技术^[1]。LDS 是一种特殊的 CDMA 序列设计方法,它使得较长的扩频码中包含少量的非零元素。如图 1 所示,SCMA 与 LDS 不同之处在于,它将调制映射和扩频相结合,直接用设计的码本对数据进行编码,得到调制后的符号。因此 SCMA 的码本设计可以看作稀疏扩频和多维调制的联合优化。通过重组低维调制星座图可以使得相同用户在不同子载波上的码字不同,通过调整星座图角度可以使得不同用户的码本不同^[7]。由于 SCMA 采用了低密度扩频的结构,可以采用低复杂度的消息传递算法(Message Passing Algorithm,MPA)在接收端进行解码。

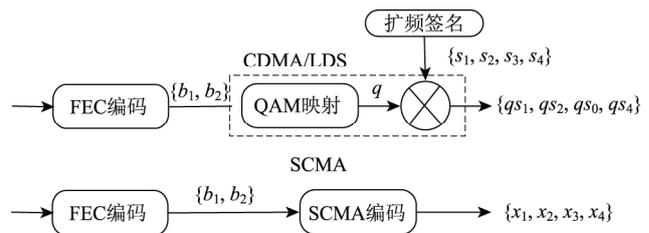


图 1 SCMA 原理示意图

2 视频特征感知的 SCMA 资源分配

2.1 系统模型描述

如图 2 所示,假设在一个单蜂窝 SCMA 上行链路中,若干用户 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 发送不同视频流,并将所发送视频流的“质量-速率”关系通告给基站。其“质量-速率”关系可以表示为:

$$UG_i(R_i) = a_i \lg(b_i R_i + c_i) + d_i \quad (1)$$

其中 UG_i 表示视频 i 的质量, a_i, b_i, c_i 和 d_i 是视频特征参数,不同视频 i 的特征参数不同。 R_i 表示用户的无线接入速率。基站将系统无线带宽分成若干子载波 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。假设每个 SCMA 层代表一个用户,则基站最多为用户分配 J 个码本。每个码

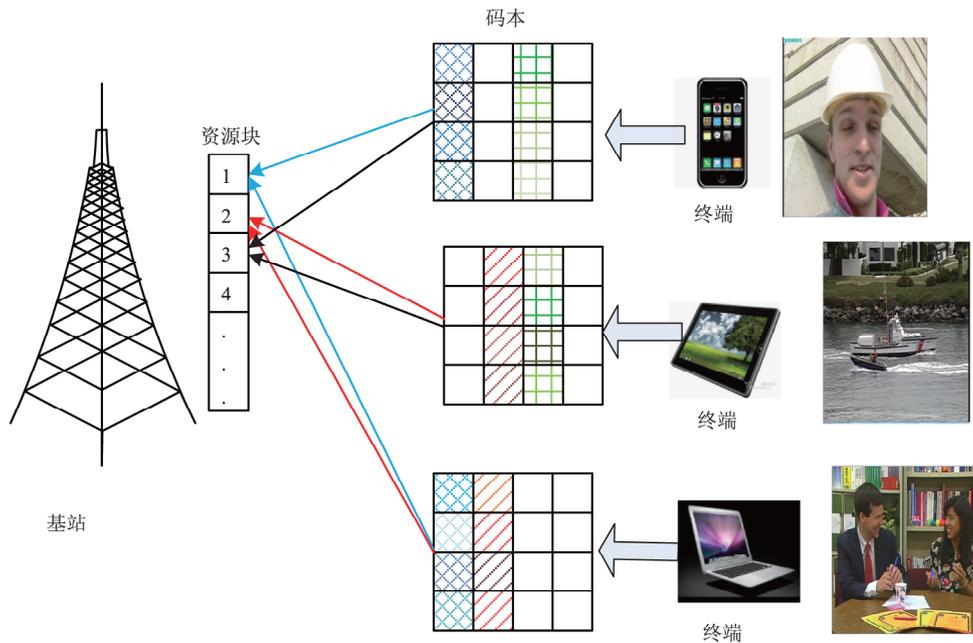


图 2 基于无线 SCMA 的视频跨层传输系统

本包含 M 个长度为 K 的码字, 每个码字中包含 d_v 个非零元素。用户发送的 $\log_2 M$ 比特信息映射可映射为对应码本的稀疏码字。假设基站可以获得所有用户全部的信道状态信息 (CSI, Channel State Information), 并根据分配的码本和用户视频的特征关系为不同用户分配无线资源。

2.2 问题建模

在小区中, 每个用户发送的视频数据都被映射为对应码本上的稀疏码, 所有 N 个 SCMA 层的数据都多路复用到 K 个共享子载波上。基站在子载波 SC_k 上接收的信号可以表示为:

$$y_k = \sum_{n=1}^N h_{kn} x_{kn} + n_k \quad (2)$$

其中 h_{kn} 表示用户 n 在子载波 k 上的信道系数, x_{kn} 表示用户 n 在子载波 k 上传输的码字信息, $n_k \sim CN(0, \sigma_n^2)$ 表示在子载波 k 上的高斯白噪声。

根据 SCMA 资源分配原则, 一个子载波最多可以分配给 d_f 个用户, 一个用户同时最多可以在 d_v 个子载波上发送数据, d_f 和 d_v 满足 $d_f = \binom{K-1}{d_v-1}$ 。

本系统最多支持的 SCMA 层数为 $J = \binom{K}{d_v}$, 即同一时隙内最多能为 J 个用户分配无线资源。用户 n 在所有子载波上的速率和可以表示为:

$$R_n = \sum_{k=1}^K x_{kn} r_{kn} =$$

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} \log_2 \left(1 + \frac{\beta p_{kn} |h_{kn}|^2}{\sigma_k^2 + I_{kn}} \right) \quad (3)$$

$$x_{kn} \in \{0, 1\} \quad (4)$$

$x_{kn} = 1$ 表示将资源 k 分配给用户 n , $x_{kn} = 0$ 则表示资源 k 没有分配给用户 n 。 r_{kn} 表示用户 n 在子载波上的传输速率, 假设基站和手机采用 $M-QAM$ 调制解调方式, 取 $\beta = \frac{1.5}{-ln(5BER)}$ 。假设手机对 SCMA 不同层分配的发送功率相同。在相同子载波中, 信道较差的用户 n 受到其它信道较好用户所发送信号的干扰 I_{kn} , 可以计算为:

$$I_{kn} = \sum_{m \in \{N_k | |h_{km}|^2 > |h_{kn}|^2\}} p_{km} |h_{km}|^2 \quad (5)$$

由公式 (1) 和 (2) 可以计算每个用户可发送的视频质量为:

$$UG_n = a_n \lg \left(b_n \sum_{k=1}^K x_{kn} \log_2 \left(1 + \frac{\beta p_{kn} |h_{kn}|^2}{\sigma_k^2 + I_{kn}} \right) + c_n \right) + d_n \quad (6)$$

在 SCMA 资源分配中, 一个子载波最多可以分配给 d_f 个用户, 即表示为:

$$\sum_{n=1}^N x_{kn} \leq d_f \quad \forall k \in K \quad (7)$$

并且一个用户同时最多可以从 d_v 个子载波上发送数据, 即满足:

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} \leq d_v \quad \forall n \in N \quad (8)$$

手机的发射功率不能超过额定值 P , 因此还需

要满足:

$$\sum_{k=1}^K p_{kn} \leq P \quad p_{kn} \geq 0 \quad \forall n \in N \quad (9)$$

因此视频特征感知的 SCMA 资源分配问题可以表示为:

$$\max \sum_{n=1}^N a_n \lg(b_n \sum_{k=1}^K x_{kn} \log_2(1 + \frac{\beta p_{kn} |h_{kn}|^2}{\sigma_k^2 + I_{kn}}) + c_n) + d_n$$

subjectto: Eq. (9) (10)

视频特征感知的 SCMA 资源分配问题等价于从如图 3 所示的矩阵中选择若干个值(这些值表示用户在不同子载波上传输的数据量) ,使得用户发送视频的质量最佳,且必须满足每行最多选择 d_v 个数,每列最多选择 d_f 个数。

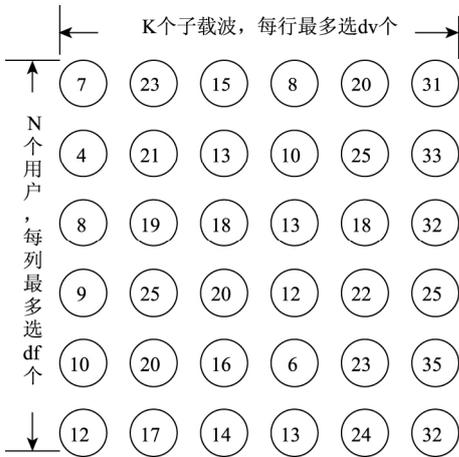


图3 视频特征感知的 SCMA 资源分配问题

2.3 L - W 贪婪算法

视频特征感知的 SCMA 资源分配问题可以归纳为二进制整数规划问题,此类问题一般可以采用拉格朗日对偶方法得到最优解,但是由于此问题的导数方程难以计算,无法获得最佳值,因此笔者采用 L - W 贪婪算法寻求问题的次优解。为了简化此问题的求解,将手机功率在不同 SCMA 层上平均分配。结合图 3 的描述,所推荐 L - W 贪婪算法具体步骤如下:

Step 1: 基站根据不同用户更新的平均接入速率、用户发送视频流的质量 - 速率关系和信道质量,计算资源 k 分配给用户 n 时,用户 k 可发送视频的质量增益值,从而获得类似图 3 的矩阵。

Step 2. 从第一列中未加入标记集合的数中选择 L 个最大的数作为标记集合 Φ 的数,所选择数所

在行中加入标记集合 Φ 的数不大于 d_v ,且满足第一列在标记集合 Φ 中的数不大于 d_f 。

Step 3. 从第一列中在标记集合 Φ 的数中选择最小的 W 个数,组成集合 Ψ ,如果集合 Ψ 中的数 ψ 所在行中未加入标记集合 Φ 最大的数 φ 比 ψ 大,则用未加入标记集合的数 φ 替代 ψ 加入标记集合 Φ 。

Step 4. 逐列依次进行 2、3 两步操作,直到满足每行最多选择 d_v 个数,每列最多选择 d_f 个数。

Step 5. 所选的标记集合 Φ 中的数即为资源分配的结果。

其中第 3 步从标记集合 Φ 中回退 W 个数是为了使得贪婪算法能求出更优化的结果。 $L - W$ 贪婪算法的计算复杂度为 $O(\lfloor \frac{d_f}{L} \rfloor WNK^2 \log_2(N \log_2(K)))$,如果 L 越小和 W 越大,算法的计算复杂度也就越大。当 $W = 0$ 时,由于在第 3 步中不用查找 ψ 所在行中未加入标记集合 Φ 的最大数,因此算法的计算复杂度降低为 $O(\lfloor \frac{d_f}{L} \rfloor NK \log_2(N))$ 。

3 仿真结果及分析

在 MATLAB 仿真平台中,对移动环境下的 OFDMA + 比例公平(PF)、SCMA + 随机分配和 SCMA + L - W 贪婪算法进行对比,其中 L - W 选取了 1 - 0, 2 - 1, 4 - 2, 6 - 0 这四个取值。无线网络仿真具体参数如表 1 所示。在 SCMA 环境中 d_v 取 3 d_f 取 6。

表 1 仿真参数

仿真参数	数值
子载波数	8
子载波带宽	180 kHz
路径损耗模型	128.1 + 37.6 * Dist
衰落模型	瑞丽衰落
天线模型	全向
噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz
调制方式	M - QAM
协议栈	RTP/UDP/IP

同时采用 JSVM 工具来对 CIF 视频“News”, “Hall”, “Foreman”进行编码。帧速率设置为 25 帧/秒,GoP 设置为 16。如图 4 所示,对视频流采样可以获取相应的码率 - 失真样本点,结合公式(1)描绘出其码率失真曲线。将仿真程序运行 500 次,得到以下仿真结果。

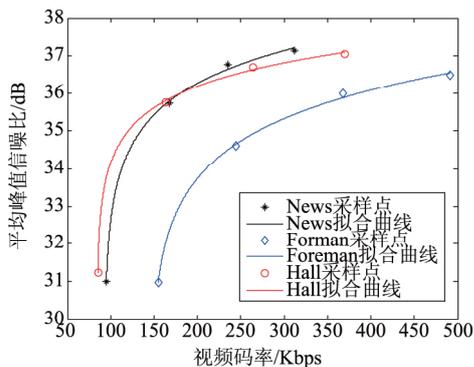


图 4 视频业务特征函数

图 5 分别表示用户数量不同的情况下, 传输系统总吞吐量、用户平均吞吐量和用户发送视频的平均

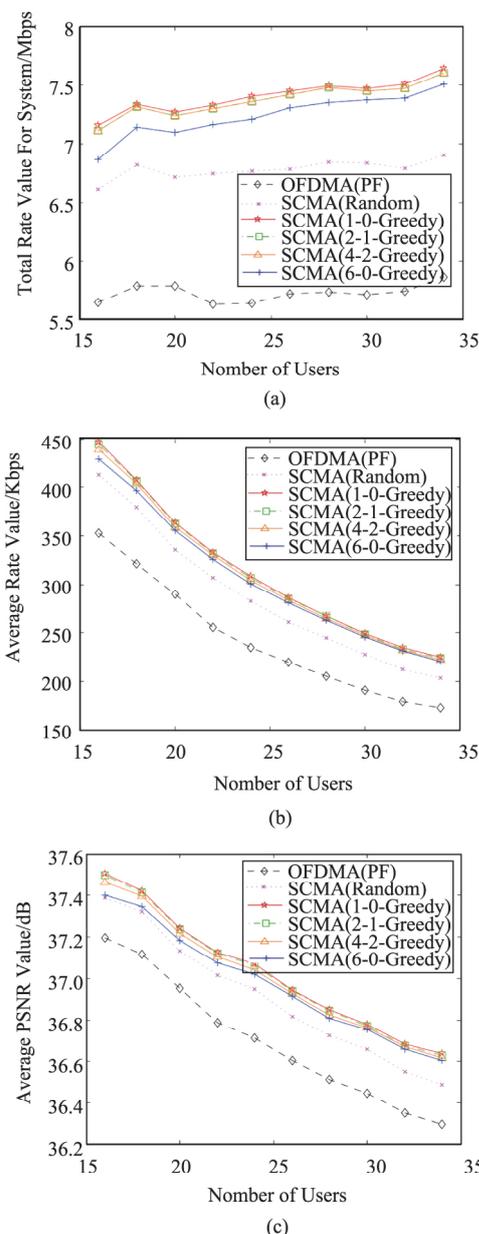


图 5 (a) 系统总吞吐量; (b) 用户平均速率; (c) 用户发送视频的平均质量

均质量。可以看出 SCMA + L - W 贪婪算法具有最好的传输性能, SCMA + 随机分配效果次之, OFDMA + PF 效果最差。在 SCMA 环境下, 随着用户数的增多, 系统的总吞吐量仍缓慢上升, 因为通过码分的方式, 系统可以传输更多用户数据。另外用户平均发送速率和发送视频的平均质量随着用户数的增加逐步降低。

图 6 展示了选取不同 L - W 值时, 贪婪算法的平均计算时间和用户发送视频的平均质量。可以看出 L - W 选取 6 - 0 时, 算法运行时间最短, 视频质量最差。L - W 选取 1 - 0 时, 用户发送视频的平均质量最佳, 需要的运行时间也较少。2 - 1 和 4 - 2 贪婪算法的视频质量和运行时间性能适中。因此在后续的结果中, 仅呈现 SCMA 1 - 0 贪婪算法的效果。

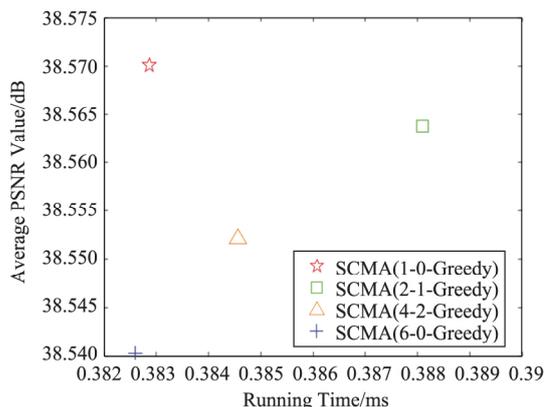


图 6 采用不同参数时, 用户发送视频的平均质量和算法运行时间的关系

图 7 分别表示用户数为 34 时, 用户平均接入速率和所发送视频平均质量的累计分布图。可以看出在 SCMA 环境下, 每个用户的接入速率和发送的视频质量都较高。与其它两种方法相比, 采用 L - W 贪婪算法可以获得最佳的效果。

4 结 语

为了提高视频业务在未来 5G 无线通信系统的传输质量, 对 SCMA 上行链路的视频传输优化进行了研究。基站获取了用户发送的视频业务率失真特性, 根据无线信道情况和特定的编码本向每个用户分配无线子载波, 使得系统的传输性能最优。本优化问题可以归纳为二进制整数规划问题, 并用 L - W 贪婪算法解决此问题。通过在 MATLAB 上的仿真验证该方法能显著提高视频的传输质量。但是仍有许多问题需要解决: 首先, 采用的解决方法将手机功率平均分配给不同 SCMA 层上, 没有考虑

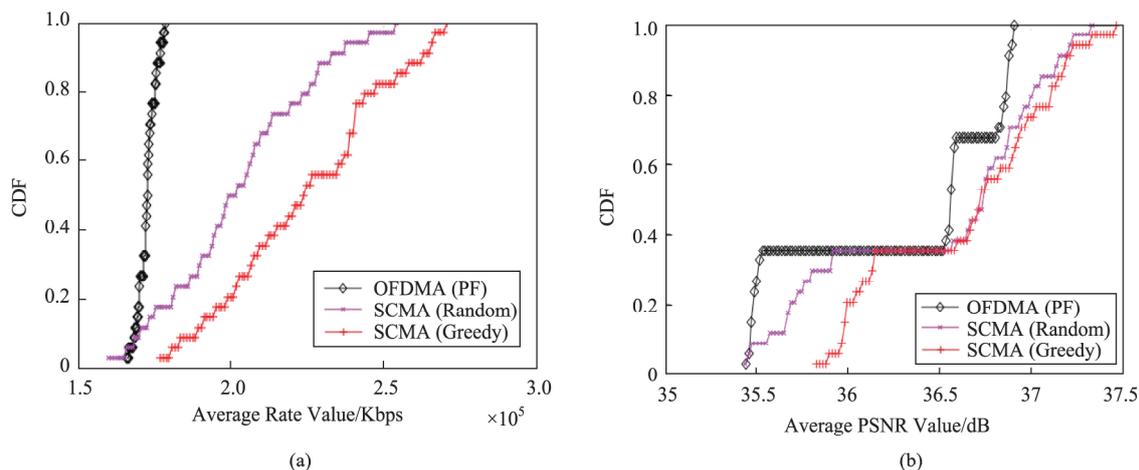


图7 用户数为34时 (a) 用户平均速率的累计分布图 (b) 用户所发送视频平均质量的累计分布图

功率控制;其次,笔者采用贪婪算法求出问题的次优解,可以通过深化理论研究,进一步考虑如何优化求解算法。这些问题都需要在未来的研究工作中解决。

参考文献:

- [1] Nikopour H, Baligh H. Sparse code multiple access [C]. IEEE, International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2013: 332-336.
- [2] Yuan Z, Yu G, Li W, et al. Multi-User Shared Access for Internet of Things [C]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), 2016: 1-5.
- [3] Chen S, Ren B, Gao Q, et al. Pattern Division Multiple Access—A Novel Nonorthogonal Multiple Access for Fifth-Generation Radio Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 3185-3196.
- [4] Li F, Ren P, Du Q. Application-Driven Cross-Layer Approaches to Video Transmission over Downlink OFDMA Networks [C]. In Proc. IEEE Global Communications Conference (Globecom), Honolulu, HI, USA, 2009: 1-6.
- [5] Lu Z, Wen X, Zheng W, et al. Gradient projection based QoS driven cross-layer scheduling for video applications.

[C]. In IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Barcelona, Spain, 2011: 1-6.

- [6] Chen J, Mahindra R, Amir Khojastepour M, et al. A scheduling framework for adaptive video delivery over cellular networks [C]. In Proc. ACM the international conference on Mobile computing and networking (Mobicom), Miami, FL, USA, 2014: 389-400.
- [7] Taherzadeh M, Nikopour H, Bayesteh A, et al. SCMA Codebook Design [C]. IEEE, Vehicular Technology Conference (VTC), 2014: 1-5.

作者简介



赵敏丞(1986—)男,陕西人,博士研究生,工程师,主要研究方向为无线视频传输;

E-mail: mczhao@bupt.edu.cn

李阳阳(1987—)男,江苏人,博士研究生,工程师,主要研究方向为网络空间安全和移动互联网;

赵大伟(1985—)男,山东人,博士研究生,工程师,主要研究方向为信号处理;

张义(1986—)男,湖北人,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为互联网优化。