

课题名称：时延限制下缓冲中继系统的传输策略及性能研究

申请人：乔德礼

依托单位：华东师范大学

Transmission Strategies and Performance of Buffer-Aided Relay Systems under Delay Constraints

## 简介

中继的协作通信可以提高系统覆盖率及吞吐量，是现有及下一代通信系统的关键组成部分。现有中继系统传输策略的设计大多未考虑中继的缓冲，最新研究发现结合中继处缓冲的传输策略可显著提升系统吞吐量，而相关研究很少考虑到时延的影响。另一方面，时延是下一代无线通信系统服务质量的关键性能指标之一，统计意义上的时延限制对于保证服务质量有着重要的指导意义。因此，本项目拟结合信息论，有效容量及凸优化理论分析时延受限下的缓冲中继系统，实现以下目标：

- 1) 提出分析时延限制下缓冲中继系统的系统吞吐量的方法，完善对此类系统的认识；
- 2) 基于统计时延特性的分析，提出优化系统传输的方法，设计提高系统吞吐量的资源分配算法；
- 3) 基于分析缓冲中继系统能效及安全通信的新方法，设计提高能效及安全通信速率的传输策略。

本项目的研究成果将为缓冲中继系统的研究与应用提供新思路及理论依据。

Cooperative transmissions with relays can improve system coverage and throughput, and hence is a key ingredient of current and next generation wireless systems. However, transmission strategies of existing research rarely take into account the buffers at the relays. Recent studies have demonstrated that transmission strategies incorporating the buffer at the relay can significantly improve the system throughput, albeit the impact of delay is rarely investigated. On the other hand, delay is one of the key performance indicators (KPI) for providing quality of service (QoS) in next generation wireless systems, and statistical delay constraints can be instrumental in QoS provisioning. Hence, in this project, we incorporate information theory, effective capacity and convex optimization for analyzing the transmission strategies and performance of buffer-aided relay systems under delay constraints. We intend to achieve the following goals:

- 1) We propose a framework for the analysis of achievable throughput for better understanding of such systems;
- 2) We design resource allocation algorithms to optimize the throughput based on the characterizations of statistical delays of the buffers;
- 3) Based on the characterized energy efficiency and secure communications, we design transmission strategies maximizing the total energy efficiency and secrecy throughput.

Through this study, we will provide new ideas and theoretical basis of the research and applications of buffer-aided relay systems.

# 报告正文

## (一) 立项依据与研究内容

### 1、项目的立项依据

#### (1) 研究意义

协作通信是现有(4G)及未来通信系统(5G)非常重要的组成部分[2]。协作通信是通过一些节点作为中继来实现的,中继节点与其他节点共享自有的传输资源从而帮助彼此的信息传输。一般情况下,中继接收,处理然后转发信源节点的信息,进而提高信源与目标节点间的传输性能。关于中继系统的经典信息论研究已持续了几十年,并且论证了中继通信的多种好处,比如中继的协作可以提高系统覆盖率以及系统容量[2]。同时提出了很多中继传输技术,如放大转发(Amplify-and-Forward, AF)、解码转发(Decode-and-Forward, DF)等。**所提传输技术多不考虑中继处缓冲,性能受限于中继处接收及发送信道的较差信道**,如DF两跳系统(two-hop)的吞吐量决定于信源与中继链路以及中继与目标链路信道容量的较小者[3]。而最新研究发现,在不考虑时延限制的情况下,**结合中继的缓冲可以设计新的中继传输技术从而有效提升系统性能**,如半双工两跳缓冲中继系统中,任意时刻选择信源与中继链接或中继与目标链接中更大信道容量的链接可显著提升系统吞吐量[9],结合缓冲的链路选择技术可提升系统的安全通信性能[10],而半双工多跳缓冲中继系统中,任意时刻选择多个中继结合网络编码的传输同样可显著提升系统吞吐量[11]。

但是,结合中继处的缓冲也有可能导致端到端节点间通信时延的增加[12]。另一方面,随着智能手机、平板电脑的普及,在线视频、社交及购物等应用的广泛使用,移动数据流量呈爆炸式增长。根据思科 2015 年发布的最新流量及趋势统计显示,移动流量持续爆炸式增长,其中移动视频占比已超过一半[1]。对于诸如移动视频、在线语音等即时服务来说,提供可接受的服务质量(Quality of Service, QoS)是至关重要的。其中时延是关键指标[2],对于此类内容配送服务来说,过长的时延是用户不能忍受的,满足服务所需的时延限制是下一代无线通信系统(5G)设计中的主要性能指标之一[2]。因此,对于时延限制下的缓冲中继系统所能带来的益处还需要深入的研究。

然而,针对时延限制下的此类缓冲中继系统的研究还很少。尽管无线衰落信道下

的信息论分析对于无线通信系统的传输策略设计及性能极限提供了很有意义的参考，但是经典信息论的分析建立在没有时延限制的基础上，现有的研究大多不考虑时延的影响[7]。为了明确时延限制下的无线通信系统传输策略及系统性能，人们提出了多种方法。比如时延约束容量(delay-limited capacity)[6]，指的是在任意衰落条件下都可以达到的吞吐量，是一种确定性的服务保障。而无线信道的随机性、并发性等会使用户的即时数据速率波动很大，提供确定性的时延限制会使用户的平均数据速率显著降低，以瑞利衰落(Rayleigh fading)信道为例，时限约束容量为零，亦即无法提供任何数据服务。另一方面，人们也考虑了平均的时延[5]，建立在对缓冲中队列长度的平均值的分析之上。该方法在应用于单跳缓冲的问题上可以得到很有参考意义的解决方案，比如功率与平均时延的折中关系，然而在实际应用到多跳的系统时会使问题过于复杂而得不到简单、明确的结论。比如针对最简单的半双工两跳系统 (two-hop)，假设信源和中继都存在缓冲时，即使是简单的开关信道[13]，考虑平均时延的问题建模都非常复杂，很难得到明确的系统吞吐量。

与此相对的是统计时延限制，亦即限制时延超过某一上限的概率。人们提出了有效容量理论[4]，在满足统计时延限制的条件下，有效容量为系统可以支持的最大吞吐量，结合离开缓冲的服务数据的有效带宽，即离开缓冲的数据量占用的资源，系统吞吐量可以得到简单实用的表达式。自有效容量理论提出之后，世界各国大量的专家学者和研究机构开始对其进行广泛而深入的研究，被认为是保证时延服务质量的一种重要方法[8]。本项目中，为了针对广义上的衰落信道以及更为复杂的传输策略如叠加编码(superposition coding)进行深入研究，我们将结合有效容量理论和信息论来降低问题的复杂度，进而得到可用于系统设计的信息。然而，在结合有效容量理论和信息论用于缓冲中继系统时仍然有很多实际问题亟需解决，尤其是以下几个方面：

- a) 无线信道的随机性导致离开信源缓冲及进入中继缓冲的数据速率是可变的，而且在复杂传输及缓冲策略下两者并不等价，如何表示复杂缓冲中继系统不同传输策略下不同链路上的有效带宽是具有挑战性的。
- b) 有效容量理论在分析时延特性时，与进入缓冲的到达数据的有效带宽以及离开缓冲的服务数据的有效带宽是密切关联的。在缓冲中继系统中，满足时延限制需要针对系统中所有信息流所经过的所有信源以及中继的缓冲联合分析，缺乏此类分析的理論。
- c) 缓冲中继系统中，针对传输策略或资源分配的调整应最大化系统吞吐量或安全通信

速率,或者最小化系统的能耗,但是此类系统在端到端时延限制下的吞吐量还不清楚。

综上所述,缓冲中继系统中考虑时延限制的传输策略与性能研究具有现实的理论意义和应用价值,相关分析存在着许多问题与困难,有很大的研究、发展空间,而以上所述问题也是此类系统后续的主要研究方向。因此,迫切需要对此类系统的深入研究,从而对有效利用中继处的缓冲形成更多认识,并对下一代通信系统的设计提供参考。

## (2) 国内外研究现状及分析

有效容量理论[4]的提出是为了得出在满足一定统计时延服务质量的情况下,无线通信系统所能支持的最大数据速率。通过对到达及离开缓冲的数据的有效带宽进行分析,可以得到满足统计时延限制的有效容量的明确表达式。随后,越来越多的专家学者和研究机构应用有效容量理论到无线通信领域的研究[8],主要研究成果如下:

**单跳系统传输策略。**Musavian 等[14]结合有效容量理论和信息论,针对点到点的通信系统,考虑 Nakagami-m 衰落信道,提出了统计时延限制下能效最优的功率分配算法。该文章发现,统计时延限制下能效最优的功率分配与系统的内部电路损耗相关,而不考虑时延限制的系统的传输策略则与内部电路损耗无关。Balasubramanian 等[15]考虑下行系统,结合有效容量理论对统计时延受限的视频传输问题进行了分析,提出了最大化总的视频传输质量的调度及资源分配策略。Ozmen 等[16]研究了统计时延限制下信源为随机到达时,系统所能支持的平均吞吐量,并对系统能效进行了分析。该文章指出统计时延限制下,信源的随机性及突发性将显著降低系统吞吐量,而衰落信道相比相关性很大的信道来说可进一步提高系统吞吐量。**国内众多大学及研究机构的学者也同样关注应用有效容量理论到无线通信领域的研究**,如西安电子科技大学、西安交通大学、北京航空航天大学、上海交通大学、清华大学等,在明确时延限制下的传输策略方面做出了诸多成果。比如 Wang 等[17]研究了认知无线网络中满足主用户统计时延限制时次用户的传输策略,结合凸优化方法设计了次用户在平均及峰值功率限制下的最优资源分配算法。结果指出在主用户统计时延限制比较宽松时,次用户可以用更多的传输功率从而达到更高的传输速率,而在统计时延限制比较严格时,次用户需降低其传输功率来满足主用户的统计时延限制,所能达到的传输速率相对更小些。She 等[18]结合有效容量理论考虑了信源随机到达下的 MIMO-OFDM 系统中的

资源分配问题。通过分析功率与统计时延限制的关系，把初始优化问题转化为可求解的子问题，提出了基于缓冲长度的资源分配算法，可显著提升系统能效。左加阔等[33]结合有效容量理论，分析了认知 OFDMA 系统时延限制下的功率分配问题。通过把优化问题转化为一个优化目标为拟凹函数的一维优化问题和一个有效容量最大化问题，提出了可进一步提升系统能效的资源分配算法。曹家燕等[34]通过有效容量和信息论的结合，提出一种 OFDMA 下行网络中基于不同业务服务质量的资源分配算法。算法针对实时会话业务特性，在保持实时会话业务有效容量不变的基础上，把有效容量最大化问题转换为最小化传输功率，从而提高文件传输业务的功率，进而提升系统整体有效容量。彭喆等[35]结合有效容量理论对时变信道下多用户系统进行建模，提出基于有效容量的多用户功率分配算法。李建东等[36]结合有效容量理论针对异构无线网络中不同业务的时延限制和网络资源不确定性问题，提出一种联合时延限制和资源预测的网络选择策略。该传输策略相比不考虑时延限制的注水算法性能提升一倍以上，明确了时延限制对异构无线网络选择策略的影响。

不过，以上分析均考虑了单跳系统，亦即用户的数据流直接通过信源发送给目标，如点到点、认知无线电、下行多用户等，研究发现**统计时延限制的引入显著改变了最优的传输策略，且提升了系统的性能**，如吞吐量、能效等。即使是多用户系统，如下行、上行等，不同的缓冲彼此之间均假设是相互独立的，因此有效容量的理论分析简化为每个用户缓冲单独的分析，所采用的信息论、凸优化等理论工具为后续研究提供了很好的借鉴。

**中继系统传输策略。**对于经典中继系统模型来说，也就是中继处假设无缓冲，有效容量理论可与信息论给出的信道容量分析很好的结合。Harsini 等[19]结合有效容量理论对中继系统中自适应调制和编码 (Adaptive Modulation and Coding, AMC) 传输进行了优化，提出了统计时延限制下有效容量最大的 AMC 策略。Zhang 等[20]研究了放大转发的多跳系统的传输策略问题，提出了统计时延限制下最优的功率分配算法。Wang 等[21]针对协作认知无线电系统，结合有效容量理论，提出了基于主用户的时延限制的最优的时隙分配算法，研究指出主用户的时延限制会同时显著影响次用户的性能。Hu 等[22]考虑解码转发的多中继两跳系统，分析了不同协作 ARQ (Automatic Repeat reQuest)策略下的系统能效，并提出了不同策略下的有效容量的近似表达式，并提出了进一步提升系统能效的协作 ARQ 技术。**国内相关方面的研究也有很多**，比如 Lin 等[23]对统计时延限制下双向中继系统进行了分析，得到了最大化用户有效容

量区间的资源分配算法。文章结合了有效容量理论和信息论,对不同的双向中继策略分别考虑,得到了相应的最优传输策略,可显著提升系统性能。Wang 等[24]研究了多中继系统中时延限制下认知无线电传输的功率分配问题,文章指出在时延限制下,最多只有两个中继可用于传输。Cheng 等[25]分析了无线网络中谱效与能效的优化传输问题,对于单中继系统,传输策略的设计建模基于目标有效容量,找到信源和中继的平均功率及相应的功率分配算法。文章中提出的分离信源到目标及中继到目标的信道单独考虑的思想可以用于后续的研究。黄高飞等[38]结合有效容量理论对 OFDM 解码转发的经典单中继系统进行建模,设计了最大化系统容量的子载波配对与功率分配算法。算法显示,结合了时延限制的子载波配对和功率分配方案可以显著提升系统性能。

上述文献考虑的中继系统均假设中继处不存在缓冲,也有文献考虑中继存在缓冲作为后续的研究方向,如[19],然而相关的分析还很少。

**缓冲中继系统传输策略。**中继通信中,中继处存在的缓冲对于潜在的传输策略调整具有很大的利用价值,以解码转发(DF)为例,中继不存在缓冲时,数据传输的速率取决于中继链路的最差信道状态[3],而缓冲中继系统则可以更有效的利用好的信道状态,如[13]所考虑的利用开关信道传输的模型。Khalek 等[26]分析了半双工多跳系统中时延限制下能效最优的传输方案。文章假设信源及所有中继处的统计时延特性相同,把最小化能耗问题转化为固定有效容量前提下,最小化加权的传输时间问题,从而得出最优的传输时间分配策略。Khan 等[27]针对两跳缓冲中继系统下的资源分配问题,假设信源缓冲与中继缓冲统计时延相等,得出了此种情况下的功率分配算法,核心思想在于把系统吞吐量的优化问题转化为统计时延的优化问题,进而采用凸优化的方法求解。Li 等[28]考虑了 LTE 系统中两跳缓冲中继下的资源分配问题,通过分析系统吞吐量与不同链路统计时延的关系,提出了最大化不同链路最小有效容量的优化问题,通过凸优化方法求解出了相应的次优资源分配算法。研究发现,该算法在更为严格的时延限制下的性能损失很小。Qiao (乔德礼) 等[30]在只考虑信源和中继的统计时延限制,不考虑端到端的时延特性时,得到了两跳系统的有效容量的明确表达式,通过理论及数值分析发现在一定条件下,中继更为苛刻的统计时延限制并不会对系统的吞吐量造成影响,从而为不同缓冲上的统计时延特性的调整进而最大化有效容量提供了理论基础。杜清河等[29]考虑了两跳缓冲中继系统中的资源分配问题,假设信源及中继处的统计时延特性相同,提出了在满足端到端时延限制下最小化所需传输功率

的资源分配算法。黄高飞等[38]针对 OFDMA 中继系统的下行链路,考虑了信源及中继处存在缓冲,基于 M-LWDF(Modified-Largest Weighted Delay First)算法提出了一种结合信道状态和缓冲状态的资源分配算法,该算法可提高系统吞吐量,并降低系统中断概率。

综上所述,我们发现现有时延限制下缓冲中继系统的分析还很少。在本项目研究中,该项目申请人将考虑端到端的统计时延,针对不同场景下的复杂缓冲系统,提出对不同传输策略下信源及中继的缓冲的统计时延特性进行深入分析的方法,得到在满足端到端的统计时延限制下的系统有效容量,亦即系统吞吐量,进而设计提高谱效、能效及安全通信速率的传输策略。初步分析已得到三节点缓冲中继系统下的系统吞吐量[31],并结合时延限制提出了一种新的中继选择传输技术,所提技术可以进一步提高系统的吞吐量。同时针对点到点时延限制下能效[32],提出了基于时延限制的中间变量分析方法,对于后续分析提供了理论参考。

## 参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014 – 2019.
- [2] A. Osseiran, et al., “Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 5, pp. 26 – 35, May 2014.
- [3] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 50, no. 12, pp. 3062 – 3080, Dec. 2004. (Google Scholar 引用次数: 10764)
- [4] D. Wu and R. Negi, “Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 2, no. 4, pp. 630 – 643, Jul. 2003. (Google Scholar 引用次数: 758)
- [5] R. A. Berry and R. G. Gallager, “Communication over fading channels with delay constraints,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 48, no. 5, pp. 1135 – 1149, May 2002. (Google Scholar 引用次数: 636)
- [6] S. V. Hanly and D. N. C. Tse, “Multiaccess fading channels-part II: delay-limited capacities,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 7, pp. 2816 – 2831, Nov. 1998. (Google Scholar 引用次数: 464)
- [7] A. Ephremides and B. Hajek, “Information theory and communication networks: an



- unconsummated union,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 6, pp. 2416 – 2434, Oct. 1998. (Google Scholar 引用次数: 354)
- [8] X. Zhang, W. Cheng, and H. Zhang, “Heterogeneous statistical QoS provisioning over 5G mobile wireless networks,” IEEE Network, vol. 28, no. 6, pp. 46 – 53, Nov. 2014.
- [9] N. Zlatanov and R. Schober, “Buffer-aided relaying with adaptive link selection-fixed and mixed rate transmission,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 59, no. 5, pp. 2816 – 2840, May 2013.
- [10] J. Huang and A.L. Swindlehurst, “Buffer-aided relaying for two-hop secure communication,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 14, no. 1, pp. 152 – 164, Jan. 2015.
- [11] Z. Tian, Y. Gong, G. Chen, Z. Chen, and J. Chambers, “Buffer-aided link selection with network-coding in multi-hop networks,” IEEE Trans. Vehi. Technol., vol. PP, no. 99, pp. 1 – 1, 2015.
- [12] N. Zlatanov, A. Ikhlef, T. Islam, and R. Schober, “Buffer-aided cooperative communications: opportunities and challenges,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 4, pp. 146 - 153, Apr. 2014.
- [13] Y. Cui, V. K. N. Lau, and E. Yeh, “Delay optimal buffered decode-and-forward for two-hop networks with random link connectivity,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 61, no. 1, pp. 404 – 425, Jan. 2015.
- [14] L. Musavian and T. L. Ngoc, “Energy efficient power allocation over Nakagami-m fading channels under delay-outage constraints,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 13, no. 8, pp. 4081 – 4091, Aug. 2014.
- [15] A. A. Khalek, C. Caramanis, and R. W. Heath Jr., “Delay-constrained video transmission: quality-driven resource allocation and scheduling,” IEEE J. Sel. Topics Sig. Proc., vol. 9, no. 1, pp. 60 – 75, Jan. 2015.
- [16] M. Ozmen and M.C. Gursoy, “Wireless throughput and energy efficiency with random arrivals and statistical queueing constraints,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol. PP, no. 99, pp. 1 – 1, 2015.
- [17] Y. Wang, P. Ren, Q. Du, and L. Sun, “Optimal power allocation for underlay-based cognitive radio networks with primary user's statistical delay QoS provisioning,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 14, no. 12, pp. 6896 – 6910, Dec. 2015.
- [18] C. She, C. Yang, and L. Liu, “Energy-efficient resource allocation for MIMO-OFDM systems serving random sources with statistical QoS requirement,” IEEE Trans. Commun., vol. 63, no. 11, pp. 4125 – 4141, Nov. 2015.



- [19] J. S. Harsini and M. Zorzi, "Effective capacity for multi-rate relay channels with delay constraint exploiting adaptive cooperative diversity," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 11, no. 9, pp. 3136 – 3147, Sep. 2012.
- [20] X. Zhang and J. Tang, "Power-delay tradeoff over wireless networks," IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 9, pp. 3673 – 3683, Sep. 2013.
- [21] Y. Wang and K.J.R. Liu, "Statistical delay QoS protection for primary users in cooperative cognitive radio networks," IEEE Commun. Letters, vol. 19, no. 5, pp. 835 – 838, May 2015.
- [22] Y. Hu, J. Gross, and A. Schmeink, "QoS-constrained energy efficiency of cooperative ARQ in multiple DF relay systems", IEEE Trans. Vehi. Technol., vol. PP, no. 99, pp. 1 – 1, 2015.
- [23] C. Lin, Y. Liu, and M. Tao, "Cross-layer optimization of two-way relaying for statistical QoS guarantees," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 31, no. 8, pp. 1583 – 1596, Aug. 2013.
- [24] Y. Wang, P. Ren, and F. Gao, "Power allocation for statistical QoS provisioning in opportunistic multi-relay DF cognitive networks," IEEE Sig. Proc. Letters, vol. 20, no. 1, pp. 43 – 46, Jan. 2013.
- [25] W. Cheng, X. Zhang, and H. Zhang, "Joint spectral and power efficiencies optimization for statistical QoS provisionings over SISO/MIMO wireless networks," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 31, no. 5, pp. 903 – 915, May 2013.
- [26] A. A. Khalek and Z. Dawy, "Energy-efficient cooperative video distribution with statistical QoS provisions over wireless networks", IEEE Trans. Mobile Comp., vol. 11, no. 7, pp. 1223 – 1236, July 2012.
- [27] K. Phan, T. Le-Ngoc, and L. Le, "Optimal resource allocation for buffer-aided relaying with statistical QoS constraints," IEEE Transactions on Communications, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2016.
- [28] Y. Li, L. Liu, H. Li, J. Zhang, and Y. Yi, "Resource allocation for delay-sensitive traffic over LTE-Advanced relay networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 14, no. 8, pp. 4291 – 4303, Aug. 2015.
- [29] Q. Du and C. Zhang, "Queuing analyses and statistically bounded delay control for two-hop green wireless relay transmissions," Concurrency And Computation: Practice And Experience, vol. 25, no. 9, pp. 1050-1063, Jun. 2013.
- [30] D. Qiao (乔德礼), M. C. Gursoy, S. Velipasalar, "Effective capacity of two-hop wireless communication systems," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 59, no. 2, pp. 873 – 885, Feb. 2013.

- [31] D. Qiao (乔德礼), “Effective capacity of full-duplex buffer-aided relay systems with selection relaying,” IEEE Transactions on Communications, vol. 64, no. 1, pp. 117-129, Jan. 2016.
- [32] D. Qiao (乔德礼), “The impact of statistical delay constraints on the energy efficiency in fading channels,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2015.
- [33] 左加阔, 赵力, 邹采荣, “时延服务质量约束下的高能效功率分配算法,” 东南大学学报(自然科学版), vol. 45, no. 4, pp. 635 – 640, July 2015.
- [34] 曹家燕, 邱玲, “一种基于有效容量的混合业务资源分配算法,” 中国科学院大学学报, vol. 31, no. 5, pp. 685 – 690, Sep. 2014.
- [35] 彭喆, 卢汉成, 洪佩琳, “具有时延约束的功率分配方法,” 中国科学院大学学报, vol. 31, no. 4, pp. 543 – 547, July 2014.
- [36] 李建东, 姜建, 刘鑫一, “采用时延限制和资源预测的异构无线网络选择策略,” 西安交通大学学报, vol. 48, no. 2, pp. 74 – 79, Feb. 2014.
- [37] 黄高飞, 罗丽平, 张广驰, 唐冬, 秦家银, “具有时延 QoS 保证的 OFDM 中继系统子载波配对与功率分配算法,” 电子学报, vol. 41, no. 2, pp. 335 – 339, Feb. 2013.
- [38] 黄高飞, 郑晖, 唐冬, “OFDMA 中继系统下行链路资源分配算法研究,” 系统仿真学报, vol. 24, no. 11, pp. 2314 – 2318, Nov. 2012.

## 2、项目的研究内容、研究目标,以及拟解决的关键问题。

### (1) 研究内容

现有中继系统的研究很少考虑时延限制及中继处的缓冲,传输策略的设计没有有效利用中继的缓冲。在本项目中,我们主要考虑解码转发中继,将明确时延限制下缓冲中继系统的吞吐量,结合缓冲设计新的传输策略以及资源分配算法,并通过数值仿真评价和比较所设计的策略及算法的性能,为实际系统的设计提供理论依据及参考。

- 1) 不同传输策略下缓冲中继系统的系统吞吐量分析。与现有大多研究不同的是,本研究同时考虑信源及中继处均存在缓冲。结合不同的中继系统模型,包含多信源节点、多中继节点、多目标节点等,如单信源单目标两中继的缓冲钻石中继网络系统(buffer-aided diamond relay system)、多信源多目标单中继的多用户双向缓冲

中继网络系统(buffer-aided multi-user two-way relay system)等, 考虑不同的信源节点处的传输技术, 如:

- a) 选择中继, 亦即信源节点根据信道状态、时延限制等因素在具体时刻选择某一中继来接收信息;
- b) 叠加编码, 亦即信源通过叠加编码把不同信息发送给不同的中继;
- c) 广播信道, 亦即信源把相同的信息同时发送给多个中继, 此时结合 HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest)的技术有望提升系统性能;
- d) 正交传输, 亦即信源对时间、频率进行分割从而在不同的时频单元上把不同的信息发送给不同中继。

根据不同的信源传输技术, 中继节点考虑不同的正交或非正交传输技术, 如时分多址接入(time division multiple access, TDMA), 码分多址接入(code division multiple access), 虚拟多输入多输出(virtual MIMO, VMIMO)等。以四节点的缓冲钻石中继网络系统为例, 选择中继和码分多址接入的结合传输策略具体如下: 信源传输阶段, 信源选择信道状态最好的中继接收信息; 而中继传输阶段, 中继可以通过码分多址接入技术发送信息给信源节点。鉴于衰落信道的特性, 信息论给出的通信链路信道容量在不同的传输策略下是随机可变的, 缓冲之间的影响必然是复杂且相互作用的。针对这种相互关联的缓冲中继系统, 是不能用单个缓冲的有效容量理论来分析的, 而且不同传输策略下的系统吞吐量是尚未可知的。因此, 有必要提出新的方法来分析缓冲中继系统的统计时延特性及系统吞吐量。本研究将结合具体的应用场景, 对缓冲中继系统进行不同的建模, 从而分析适用于不同应用场景的缓冲中继系统的性能。

- 2) **统计时延限制下缓冲中继系统的谱效优化资源分配算法设计。**资源分配是系统设计的核心问题之一, 已有的理论分析均表明结合时延限制的资源分配算法可以有效提升系统性能。但是, 缓冲中继系统的相关分析还很少, 如何结合中继处的缓冲和时延限制来提升系统吞吐量仍未可知。另一方面, 如前面所述, 不同信源与中继缓冲间彼此是互相影响的, 由于时延的限制, 信息论的经典分析手段不再适用, 有效容量理论的分析势必要与信源及中继的统计时延特性结合。同时, 传输技术以及资源分配算法的不同也将影响不同的通信链路可以支持的有效带宽, 如信源到多中继的下行信道, 在前述不同信源传输策略下, 各中继的到达数据的有效带宽将有很大不同, 同时在不同中继传输策略下, 各中继的离开数

据的有效带宽也会有显著不同。也就是说，传输技术以及资源分配算法的不同将影响信源及中继的缓冲的统计时延特性，从而影响整个系统的吞吐量。因此，需要设计一种新的资源分配算法，兼顾信源与中继处的缓冲的统计时延特性，从而在满足统计时延限制下提高系统吞吐量。

3) **统计时延限制下缓冲中继系统的能效及安全性研究。**能效及安全性是下一代通信系统的设计需要考虑的重要问题，而已有的能效及安全性分析方法多建立在吞吐量的明确表达式之上。基于已有的结果，我们预计考虑到在统计时延限制下，缓冲中继系统的能效及安全通信速率很难有清晰的表达式。因此，本研究将从统计时延限制出发，分析功率、统计时延特性对系统吞吐量及安全通信速率的影响，从而建立新的分析缓冲中继系统下能效及安全性的方法，进而设计性能最优或次优的传输策略。

图 1 所示的框图描述了以上研究内容，其中资源分配是不同性能分析所要采取的必要手段。

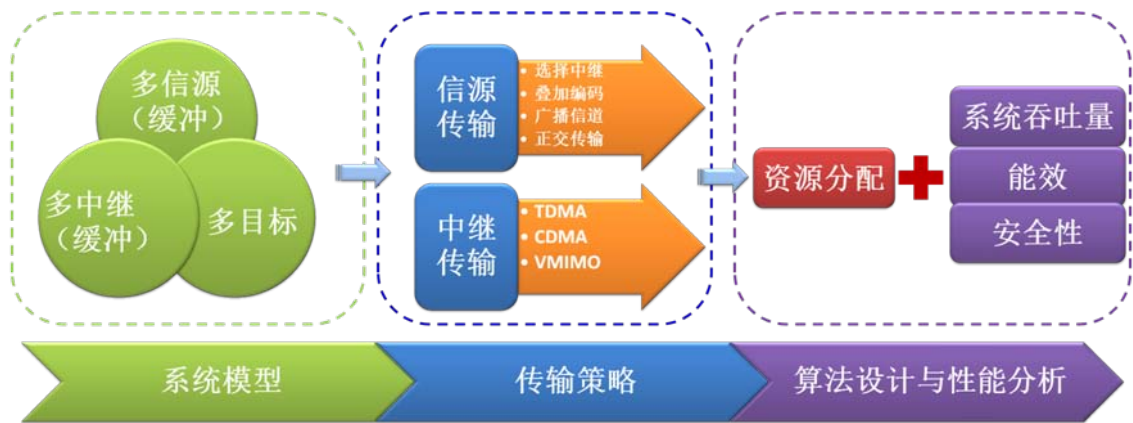


图 1. 研究内容

(2) 研究目标

本项目的研究目标是充分理解缓冲中继系统相互关联缓冲的统计时延特性，结合信息论，有效容量理论和凸优化理论，提出分析时延限制下缓冲中继系统的新方法，设计出提高吞吐量、能效及安全通信速率的传输策略及资源分配算法，分析、仿真并为系统设计提供参考。

本项目在逐步加深对缓冲中继系统的理解基础上，分析传输策略、资源分配等系统设计中的重要问题，以期得到理想的研究成果。

### 不同传输策略下缓冲中继系统的系统吞吐量分析

- 1) 基于树内网络(intree network)的有效带宽分析, 针对不同缓冲中继系统, 得到不同传输策略下缓冲中继系统不同通信链路上的有效带宽, 为后续研究奠定基础;
- 2) 分析缓冲中继系统的统计时延特性, 提出时延限制下系统吞吐量的表示方法;
- 3) 明确不同传输策略的系统吞吐量界限, 提出结合时延限制的传输策略, 通过仿真验证策略的有效性。

### 统计时延限制下缓冲中继系统的谱效优化资源分配算法设计

- 1) 提出结合不同缓冲上的统计时延特性分析缓冲中继系统的资源分配算法的理论框架;
- 2) 设计缓冲中继系统的吞吐量最优或次优资源分配算法;
- 3) 提出结合中继缓冲及时延限制从而提高谱效的传输策略。

### 统计时延限制下缓冲中继系统的能效及安全性研究

- 1) 分析结合统计时延限制的能效与谱效折中关系;
- 2) 设计缓冲中继系统的能效及安全通信速率最优或次优的资源分配算法;
- 3) 分析考虑能效及安全性的传输策略, 证明结合中继缓冲及时延限制的传输策略可有效提高能效及安全性。

## (3) 拟解决的关键问题

本项目在研究缓冲中继系统的传输策略及系统性能时, 将解决如下三个关键问题。

- 1) 在将有效容量理论拓展到相互关联的两个以上缓冲时, 将使得端到端的统计时延特性分析的难度大大提高。因此, 建立分析多信源、多中继及多目标的复杂缓冲中继系统下端到端的统计时延特性的理论框架, 是本项目需要首先取得突破的技术要点和难点之一。
- 2) 基于三节点缓冲中继系统的成果可以发现, 系统吞吐量建立在复杂的表达式之上, 此时系统吞吐量没有显而易见的表示方法。吞吐量优化的传输策略调

整及资源分配算法设计时考虑的目标函数将是非线性非凸 (nonlinear nonconvex) 的, 但缓冲处时延特性对吞吐量有着很大的影响, 如何把吞吐量优化问题转化为有效的统计时延的优化问题是本项目具有理论挑战性的问题之一。

- 3) 对缓冲中继系统进行性能分析时, 能效以及安全传输速率均没有显而易见的表示方法。此时, 除了系统吞吐量, 还需要考虑系统功率对能效及安全传输速率的影响, 如何把能效及安全性优化传输问题转化为可求解的时延与功率优化问题是本项目需要解决的另一个技术要点。

### 3、拟采取的研究方案及可行性分析。

#### (1) 研究方案

本项目将从下一代通信系统发展的需求出发, 主要利用有效容量理论、信息论及凸优化理论来研究时延限制下的缓冲中继系统, 结合凸/非凸优化理论来设计系统性能最优或次优的传输策略。缓冲中继系统的构建上**基于信息论的经典场景**, 统计时延的分析上**结合有效容量理论的最新研究成果**, 优化问题转化上**参考凸优化理论**, 从而使得问题模型是合理、有效的, 进而产生适用的传输策略。

- 1) **不同传输策略下缓冲中继系统的系统吞吐量分析**。根据三节点缓冲中继系统的预研结果, 我们已经知道系统吞吐量的定义是在端到端时延限制下, 满足各个缓冲单独的统计时延限制的**信源缓冲数据恒定到达速率**的上限。对于缓冲中继系统来说, 多个节点构建了无线网络, 这样不同的信息流经过不同的路径到达目标。因此, 保证系统端到端的统计时延限制等价于保证每条路径的端到端的统计时延限制。不同的信源传输策略下, 如选择中继、叠加编码、广播信道、正交传输等, 及中继传输策略下, 如时分多址接入、码分多址接入、虚拟多输入多输出等, 信息流的传输可以转化为不同的树内网络模型, 这样同一节点处所有信息流的有效带宽可以转化为树内网络的有效带宽, 进而实现节点缓冲的统计时延特性分析。通过对文献[30]所提的方法的拓展, 我们可以在已知各路径的通信链接间有效带宽的情况下, 明确不同缓冲中继系统在不同传输策略下满足时延限制时的网络所能支持的最大系统吞吐

量。关键问题是如何分离相互关联的缓冲间的有效带宽，从而使得关联缓冲的有效带宽可以有明确的表示方法。这一点可以通过有效带宽理论解决。然后，在分析不同缓冲处的统计时延特性后，结合网络内不同的路径的端到端统计时延限制，可进一步得出满足统计时延限制的系统吞吐量。这部分分析的关键在于结合具体的信息论给出的衰落信道下的信道容量，从而使得所有缓冲的统计时延限制均得到满足，避免出现端到端时延限制不满足或者某一缓冲的统计时延限制过于严格的情况，毕竟过于严格的统计时延限制将降低系统吞吐量。

2) **统计时延限制下缓冲中继系统的谱效优化资源分配算法设计。**预研结果[31]已经告诉我们，即使是相对简单的三节点缓冲中继系统，系统吞吐量也没有明确的公式来表示，而且与衰落信道的分布、统计时延限制、节点的信噪比是密不可分的。如果直接根据前述研究给出的系统吞吐量来进行资源分配算法的设计，那么目标函数是非线性非凸的，解决此类问题是基本不可能的。具体来说，对于单个信源的系统，此类问题表示方法为

$$\begin{aligned}
 \max_{\mu} \quad & R = -\frac{\Lambda_{out,s}(-\theta_s)}{\theta_s} \\
 s.t. \quad & \Pr\left\{\sum_i D_{ji} \geq D_{\max}\right\} \leq \varepsilon, \forall j \\
 & \Lambda_{in,i}(\theta_i) + \Lambda_{out,i}(-\theta_i) = 0, \\
 & \lim_{D_{\max} \rightarrow \infty} \frac{-\log \Pr\{D_i \geq D_{\max}\}}{D_{\max}} \geq -\Lambda_{out,i}(-\theta_i), \\
 & \Lambda_{out,i}(-\theta_i) = \log E_z \left\{e^{-\theta_i C_i(\mu)}\right\}, \\
 & E_z \{\mu_i\} \leq SNR_i.
 \end{aligned}$$

其中  $D_{\max}$  为端到端的最大时延，

$\varepsilon$  为端到端时延超过最大时延的最大概率，

$D_{\max}$  和  $\varepsilon$  在一起构成了系统端到端的统计时延限制，

$D_{ji}$  为数据流所经过的不同路径  $j$  上的节点  $i$  上的缓冲导致的时延，

节点  $i$  的取值为  $\{s, r_1, r_2, \dots\}$ ， $s$  表示信源， $r_k$  表示中继  $k$ ，

$\Lambda_{in,i}(\theta_i)$  为节点  $i$  的缓冲的到达数据的对数动差生成函数 (log-moment generating function)，



$\Lambda_{out,i}(\theta_i)$  为节点  $i$  的缓冲的离开数据的对数动差生成函数，

$\theta_i$  为节点  $i$  的缓冲的统计队列限制，是未知变量，取决于  $D_{\max}$  和  $\varepsilon$ ，

$\mu = (\mu_s, \mu_{r_1}, \mu_{r_2}, \dots)$  为节点处的资源分配方法，是信道质量  $\mathbf{z} = (z_{sd}, z_{sr_1}, \dots)$  以及统计时延限制  $D_{\max}$  和  $\varepsilon$  的函数， $d$  表示目标节点，

$C_i(\mu)$  为相应资源分配算法下离开节点  $i$  的链路的信道容量，

$SNR_i$  为节点  $i$  的平均传输信噪比。

因此，关键问题是如何在满足统计时延限制下，把对系统吞吐量的优化问题转换为可以求解的问题。具体来说，对缓冲中继系统吞吐量形成更完善的认识以后，结合不同的传输策略，需要得出不同节点处的统计时延限制的可能调整与导致的结果，由于统计时延限制调整对于缓冲可以支持的有效带宽影响很大，进而影响系统吞吐量，因此在满足端到端的统计时延限制下，可以把问题建模为统计时延相关的问题。在文献[31]中，我们已在恒定传输功率下，把最优化选择中继策略问题建模为任意信源队列限制  $\theta_s$  下最大化信源统计时延系数，即  $-\Lambda_{out,s}(-\theta_s)$ ，从而利用凸优化的方法得到次优解。后续可对该方法进行拓展，结合信源以及中继处缓冲统计时延特性的折中关系进行优化问题建模的转化，如不同权重的统计时延优化问题， $-\sum_i \lambda_i \Lambda_{out,i}(-\theta_i)$ ，其中  $\lambda_i$  为不同缓冲处的统计时延的权重，或不同缓冲处的指数化的统计时延在不同时刻取值的权重优化问题([27])，即  $\sum_i \lambda_i e^{-\theta_i C_i(\mu)}$ ，其中  $\lambda_i$  为权重。

该部分转换的关键问题在于如何把系统吞吐量与多节点的统计时延特性有机结合，从而使得建模问题所得吞吐量接近于系统所能支持的上限。

3) **统计时延限制下缓冲中继系统的能效及安全性研究**。在无线通信系统中，能效一般定义为传输每比特信息消耗的能量，即传输功率与传输速率的比值。而缓冲中继系统中，由于系统吞吐量没有明确的表达式，能效分析会比较复杂。因此，关键问题是如何在谱效分析中消除对于系统吞吐量明确表达式的依赖。针对点到点的通信，在没有明确的吞吐量表达式情况下，我们已得到基于信噪比和时延限制的中间变量，进而实现了对能效与谱效折中关系的分析[32]。为了能够对应实际系统的操作，能耗需要结合多个节点处的功率，同时为了能够使问题给出有意义的结论，我们将假设不同节点处的功率具有可比性，即不会出现不同节点处发射功率比例相差极大的情

况。然后，从端到端的时延限制出发，针对不同的中继系统的不同传输策略，结合有效容量理论关于时延限制的统计分析，建立新的基于信源和中继节点信噪比和统计时延限制的中间变量，从而使能效有明确的近似表达式。这建立在每条路径上的端到端时延限制均需被满足的基础之上，信源与缓冲的统计时延满足明确的折中特性。另一方面，基于前述分析能效的中间变量的认识，结合不同传输策略下的系统能耗建模，我们可以进一步把能效最优的传输策略设计问题建模为最大化中间变量的问题。此时，目标函数依然是非线性非凸的。基于前述资源分配算法设计的研究，我们需要得出不同中继处功率及统计时延限制的调整对中间变量的影响，从而在满足系统功率及时延限制的情况下，把问题转化为功率及中间变量的不同权重优化问题，如  $-\sum_i \lambda_i \Gamma_i(\theta_i) + \kappa_i (\mathbf{E}_z\{\mu_i\} - P_i)$ ，其中  $\Gamma_i(\theta_i)$  为节点  $i$  分析能效的中间变量， $\lambda_i$  为不同缓冲对应的中间变量的权重， $\kappa_i$  为不同缓冲相应功率的权重， $\mu_i$  为节点  $i$  的资源分配方法， $P_i$  为节点  $i$  的平均分配功率。随后，结合端到端的统计时延限制以及对系统吞吐量的深入认识，考虑功率的有机分离，把上述问题进一步转换为可求解的子问题，如分布式最优化问题  $\Gamma_i(\theta_i) + \nu_i (E\{\mu_i\} - P_i)$ ， $\nu_i$  为不同节点功率的权重。这部分的关键问题在于分析不同传输策略的影响，从而合理确定子问题求解的顺序，使得转换的优化问题将保持目标的一致性，即最大化能效，进而确保次优解接近于最优解。

系统存在窃听者的情况下<sup>1</sup>，我们还需要考虑缓冲中继系统的安全性。此时，安全通信速率定义为保证不被窃听者获取信息的前提下所能实现的最大系统吞吐量。同之前分析的难点一样，缓冲中继系统的安全通信速率没有明确的表达式。针对不同的缓冲中继系统模型，结合不同传输策略下各个单独通信链路的安全通信速率，我们可以得出不同通信链路的安全通信有效带宽。此时，系统安全通信速率的优化问题，与前述对系统吞吐量的优化分析具有相通之处。因此，我们可以结合上述方法，如不同权重的统计时延方法，设计提高系统安全通信速率的资源分配算法及传输策略。需要指出的是，相比无缓冲的中继系统，缓冲中继系统的安全性将有进一步的提升，如两跳缓冲中继系统中，在窃听者可以获取中继到目标的通信链路的信息时，文献[10]设计的结合中继缓冲的传输策略显著提高了安全通信速率。

---

<sup>1</sup> 缓冲中继系统的窃听者的引入与系统模型密切相关，如三节点的缓冲中继系统：窃听者可以获取信源到中继以及中继到目标的通信链接的信息；或者，窃听者只可以获取中继到目标的通信链路的信息。

综上所述，图 2 给出了这几部分研究所涉及到的技术路线。

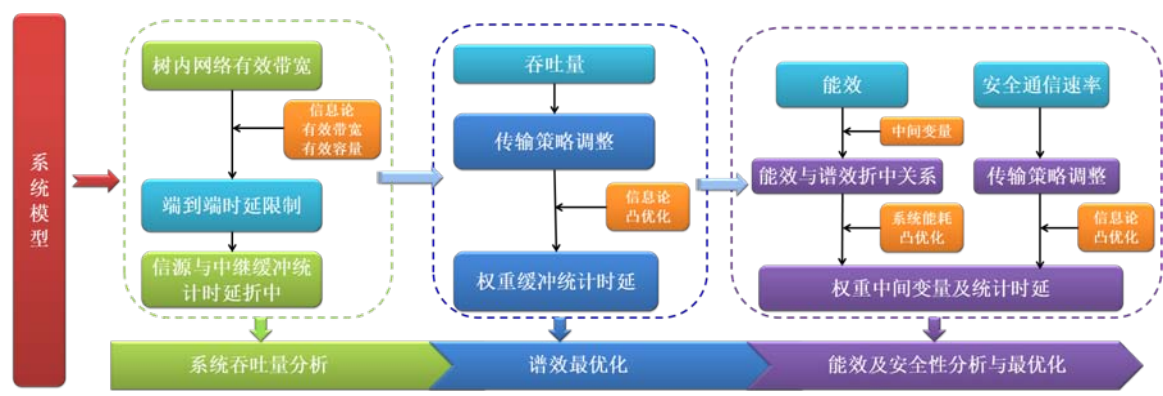


图 2.研究技术路线图

## (2) 可行性分析

### 1) 项目组有着坚实的前期积累

本项目申请人自 07 年以来一直从事于无线通信的研究，并取得了一定的成果，已在通信领域的国际期刊如 IEEE Transactions on Information Theory (TIT)，IEEE Transactions on Communications (TCOM)，IEEE Transactions on Wireless Communications (TWC)，IEEE Transactions on Signal Processing (TSP)，IEEE Transactions on Information Forensics and Security (TIFS)等和国际会议如 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)，IEEE Global Communications Conference (Globecom)，IEEE International Conference on Communications (ICC)等发表若干研究文章。考虑到下一代无线通信系统的研究热点，课题组成员已经对时延限制下的缓冲中继系统展开深入的研究，已经得到三节点中继系统的吞吐量，结合时延特性提出了新的选择中继技术，发现所提技术可以进一步提升系统性能，该成果已发表在 IEEE Transactions on Communications, vol. 64, no. 1, pp. 117-129, Jan. 2016 上。

以上预研内容和初步成果给予我们信心结合有效容量理论、信息论、凸优化等理论工具，从而解决缓冲中继系统中的实际问题，完成本项目的研究。

### 2) 研究方案可行，相关理论与技术成熟

针对缓冲中继系统中不考虑时延或考虑平均时延的分析，如 H. V. Poor（美国工

稗院 (NAE)院士、美国艺术与科学院(AAAS)院士)等在 IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 11, pp. 4492 – 4496, Nov. 2008 上发表的“Buffering in a three-node relay networks”和 R. Schober (IEEE Fellow, IEEE TCOM 主编 (Editor-in-Chief)) 等在 IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 59, no. 5, pp. 2816 – 2840, May 2013 上发表的“Buffer-aided relaying with adaptive link selection-fixed and mixed rate transmission”以及 V. K. N. Lau (IEEE Fellow) 等在 IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 61, no. 1, pp. 404 – 425, Jan. 2015 上发表的“Delay optimal buffered decode-and-forward for two-hop networks with random link connectivity”等,也为我们对于缓冲中继系统进行结合信息论的深入分析提供了有力的支撑。另外,基于缓冲中继系统的相关研究,目前在无线通信领域中刚刚兴起,经我们调研,在国际领域内尚未有较完整的考虑时延限制的分析。同时,有效容量理论应用于无线通信领域的分析,已经取得了显著的成果,在近年来受到了广泛的关注。通过与信息论的结合,对不同的系统如点到点系统、多址接入系统等进行建模分析,已完善了时延限制对相关系统物理层的传输策略及系统性能的影响。因此我们运用有效容量理论来对缓冲中继系统进行建模分析是完全可行的,只要我们合理的结合信息论以及有效容量理论,针对相互影响的缓冲统计时延特性、信道信息等因素的整体考虑,有信心可以提出分析缓冲中继系统的新方法。

在前期研究中,我们已经得到了一些结果,比如考虑统计时延限制的多址接入系统的最优传输策略,两跳中继系统不考虑端到端时延限制的系统吞吐量表示方法等,研究团队熟悉有效容量理论的具体建模方法,凸/非凸优化等解决传输策略设计问题的数学知识与工具,谱效与能效折中关系分析的理论工具。对于缓冲中继系统,目前考虑传输策略的设计可通过吞吐量与统计时延特性的关系来转换优化问题,对于转换后的问题,可以结合多用户系统的容量区间(capacity region)表示的方法来求解,此部分分析借鉴我们之前发表在IEEE Transactions on Information Theory, vol. 58, no. 3, pp. 1578 – 1593, March 2012 的“Transmission strategies in multiple access fading channels with statistical QoS constraints”以及自身的设想。在应用到三节点缓冲中继系统时,我们已经得到系统吞吐量的表示方法,结合不同缓冲统计时延限制对吞吐量的影响,通过吞吐量优化问题到统计时延限制相关的优化问题的转化,设计了结合统计时延的提高系统吞吐量的选择中继策略,成果已发表在IEEE Transactions on Communications, vol. 64, no. 1, pp. 117 – 129, Jan. 2016 上。同时,由于前期研究成果显示系统吞吐量没有直接的表达式,考虑点到点系统的能效时,我们可以由端到端的固

定的时延限制出发，得到分析能效的中间变量<sup>2</sup>，明确了能效与谱效的折中关系，成果已在线发表在IEEE Transactions on Wireless Communications上。以上研究方法为本项目后续研究奠定了关键基础，总体来说，研究是可行的。

3) 人员配备合理，具有扎实的相关工作基础和完善的实验设备及技术支持（参见工作基础）

本项目组具有良好的学术积累、明确的研究方向、可行的技术路线。我们有信心在计划时间内完成该项研究，取得预期的研究成果。

## 4、本项目的特色与创新之处。

### 创新点

- a) 提出一种分析缓冲中继系统中考虑端到端的统计时延限制下系统性能的新方法，结合了信息论和有效容量理论，为缓冲中继系统的分析提供新的思路。
- b) 建立在给定的端到端的时延限制基础上，提出新的分析能效及安全通信速率的方法，区别于以往建立在明确的能效及安全传输速率表达式之上的理论工具。
- c) 综合考虑相互影响的缓冲的统计时延特性的折中关系，通过传输策略调整及资源分配，从而提升缓冲中继系统吞吐量、能效及安全通信速率等性能。据调研，这种基于统计时延特性的折中的设计，在现有的相关研究中尚未见报道，是我们在自身前期工作的基础上进行的设想与创新。

### 特色

本项目结合底层的物理层技术和数据链路层的缓冲技术，以端到端的统计时延限制下的缓冲中继系统为研究主体，以有效容量理论、信息论及凸优化为理论指导，拟设计优化的传输策略、资源分配算法等，为下一代通信系统的设计提供参考，具有相当的实际前瞻性和理论挑战性。

## 5、年度研究计划及预期研究成果。

---

<sup>2</sup> 中间变量为时延限制和传输端信噪比的函数。

## （1）年度研究计划

本项目拟在四年内完成，总体安排与进度如下：

2017 年 1 月～2017 年 12 月：缓冲中继系统下统计时延特性的研究

- 1) 建立缓冲中继系统下进行端到端的统计时延特性分析的框架；
- 2) 针对不同缓冲中继系统，提出系统吞吐量表示方法，及传输策略调整算法。

2018 年 1 月～2018 年 12 月：缓冲中继系统下的吞吐量分析

- 1) 基于系统吞吐量，进行谱效优化的缓冲中继系统下资源分配算法的研究；
- 2) 分析统计时延特性，设计可应用于端到端时延限制的缓冲中继系统的资源分配算法。

2019 年 1 月～2019 年 12 月：缓冲中继系统下的谱效分析

- 1) 提出一种适用于分析统计时延限制下系统谱效与能效折中关系的工具，并进行缓冲中继系统下的相应的谱效与能效的研究；
- 2) 基于内部能耗的模型及能效的替代方法，进行能效最优的资源分配方法设计
- 3) 不同传输策略及资源分配策略下的性能分析、评价与比较研究。

2020 年 1 月～2020 年 12 月：缓冲中继系统下的安全通信

- 1) 提出缓冲中继系统下安全通信速率的表示方法；
- 2) 基于系统安全速率，进行吞吐量优化的缓冲中继系统下资源分配算法的研究；
- 3) 结合实际系统因素，进一步完善资源分配算法，使其更具实用性。

## （2）预期研究成果

- 1) 建立分析时延限制下缓冲中继系统性能的新方法，为此类系统的理论分析提供新的思路。

- 2) 设计出适用于缓冲中继系统的新的传输策略及资源分配算法，完善对此类系统的认识。
- 3) 在国际重要学术期刊和会议上发表学术论文 10~20 篇，其中 SCI 检索 IEEE 期刊不少于 5 篇。
- 4) 申请专利 4~6 项。
- 5) 培养研究生 4~6 名。

## (二) 研究基础与工作条件

### 1. 工作基础 ( 与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩 );

#### 1) 有效容量理论研究基础

本项目申请人在有效容量理论应用于无线通信系统性能分析方面具有一定的基础，已经在在点到点通信的能效分析、多址接入的传输策略及系统吞吐量的分析等方面进行了一系列的研究工作，积累了对于有效容量理论及信息论的理解。从事相关研究以来，申请人已在国际期刊如 IEEE Transactions on Information Theory (2 篇)、IEEE Transactions on Communications (3 篇)、IEEE Transactions on Wireless Communications (3 篇)、 IEEE Transactions on Signal Processing (1 篇) 等及国际会议如 IEEE ISIT、IEEE ICC、IEEE Globecom 等发表及投稿文章若干篇。

#### 2) 相关理论基础

针对统计时延限制下多址接入系统以及统计时延限制下的单用户安全通信，申请人已对最优传输策略设计问题进行了合理建模，提出了结合统计时延特性及信道信息的解决方案，成果分别发表在 IEEE Transactions on Information Theory 2012 和 IEEE Transactions on Information Forensics and Security 2011 之上。针对缓冲中继系统，在不考虑端到端的时延限制时，申请人结合有效容量理论和信息论，对两跳系统进行了分析建模，从而明确了两跳系统的吞吐量，发现在某些情况下，中继更为苛刻的统计时延限制并不会对系统的吞吐量造成影响，相关文章发表在 IEEE Transactions on



Information Theory 2013。针对端到端时延限制下的三节点的缓冲中继系统，申请人提出了选择中继传输策略下系统吞吐量的表示方法，同时通过系统吞吐量优化问题到统计时延限制优化问题的转化，设计了结合统计时延限制的提高系统吞吐量的选择中继传输策略，相关文章发表在 IEEE Transactions on Communications 2016 上。考虑点到点系统的能效时，申请人由端到端的固定的时延限制出发，得到分析能效的中间变量，明确了能效与谱效的折中关系，成果在线发表在 IEEE Transactions on Wireless Communications 上。以上研究成果为该项目的进行奠定了扎实的相关理论基础。

与本研究相关代表性成果如下：

1. **D. Qiao**, M. C. Gursoy, S. Velipasalar, “Effective capacity of two-hop wireless communication systems,” **IEEE Transactions on Information Theory**, vol. 59, no. 2, Feb. 2013, pp. 873 – 885.
2. **D. Qiao**, M. C. Gursoy, S. Velipasalar, “Transmission strategies in multiple access fading channels with statistical QoS constraints,” **IEEE Transactions on Information Theory**, vol. 58, no. 3, March 2012, pp. 1578-1593.
3. **D. Qiao**, “Effective capacity of full-duplex buffer-aided relay systems with selection relaying,” **IEEE Transactions on Communications**, vol. 64, no. 1, pp. 117-129, Jan. 2016.
4. **D. Qiao**, M. C. Gursoy, S. Velipasalar, “Secure wireless communication and optimal power control under statistical queueing constraints,” **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, vol. 6, no. 3, Sep. 2011, pp. 628-639.
5. **D. Qiao**, “The impact of statistical delay constraints on the energy efficiency in fading channels,” **IEEE Transactions on Wireless Communications**, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2015.

## 2. 工作条件 ( 包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况 )；

本申请项目的研究人员所在的华东师范大学信息科学技术学院通信工程系是信息与通信工程一级学科硕士点、通信与信息系统（二级学科）博士点。通信系拥有 8

名教授，9名副教授，7名讲师，10多名博士研究生，110多名硕士生，先后承担了国家863、973项目和国家自然科学基金、国家科技攻关项目、上海市重点科技攻关项目、国际合作项目及企业合作项目等科研任务。依托于“上海市多维度信息处理重点实验室”，学院无论在软件、硬件方面，都为课题人员提供了必要的支持，能够为未来的研究工作提供良好的支撑条件。

**3. 承担科研项目情况 ( 申请人和项目组主要参与者正在承担的科研项目情况，包括国家自然科学基金的项目，要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等 )；**

无

**4. 完成国家自然科学基金项目情况 ( 对申请人负责的前一个已结题科学基金项目 ( 项目名称及批准号 ) 完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已结题项目研究工作总结摘要( 限 500 字 )和相关成果的详细目录 )。**

无