

移动数据分流研究综述

姚宏 白长敏 胡成玉 曾德泽 梁庆中

(中国地质大学(武汉)计算机学院 武汉 430074)

摘要 移动数据分流(Mobile Data Offloading)是近年来一个比较新的研究热点。为了解决用户日益增长的移动数据需求给蜂窝网络运营商造成的流量负载和网络拥塞等问题,移动数据分流被提出来,即将蜂窝网络的数据分流到无处不在的用户间本地机会通信。其基本思想是通过蜂窝网络分发数据对象到一部分订阅用户(称为种子用户),再由种子用户通过本地机会通信(如 Bluetooth、WiFi Direct、DSRC、Device-to-Device in LTE 等)或基于 WiFi AP 辅助的方式传递给其他订阅的用户。首先从总体上概述了当前对数据分流研究的背景、意义和具体的研究进展。然后针对当前国内外学术界对这方面的研究内容和趋势,按照形式和技术路线对数据分流的方案进行了归类,并对各种类型的分流方案进行了综述。最后结合现实环境进行总结。

关键词 移动网络,车载网络,数据分流

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Survey on Mobile Data Offloading

YAO Hong BAI Chang-min HU Cheng-yu ZENG De-ze LIANG Qing-zhong

(School of Computer Science & Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract Mobile data offloading is a relatively new research hotspot in recent years. In order to solve the growing mobile data required by the user to cellular network operators which brings the problems such as traffic load and network congestion, mobile data offloading was raised to offload cellular network data to the ubiquitous user local opportunity communication. The basic idea is to distribute the data object to only part of subscribers (called seed sources) via the cellular network, and then allow seed sources to propagate the object to other subscribers through opportunistic local communications (e. g., Bluetooth, Wi-Fi Direct, DSRC, Device-to-Device in LTE) or Wi-Fi AP based. At first, this paper summarized research background, significance and the research progress of data offloading in general. Then focusing on research content and trend of current academic circles at home and abroad, we classified the data offloading into different scheme via the form and technical route, and then summarized the various of schemes. Lastly, we summarized the full text combining reality environment.

Keywords Mobile networks, Vehicular Ad-hoc network, Data offloading

1 引言

近年来,互联网的迅猛发展为移动互联网、无线通信、车组通信等应用提供了有力的技术支持,伴随着蜂窝网络(如 3G/LTE/4G)、移动无线本地机会通信技术(如 WiFi/Bluetooth/NFC/D2D)的推广和普及,拥有无线通讯能力的智能设备越来越多,越来越多的用户逐步趋向于用移动设备下载内容、浏览新闻、观看视频、上传图片等,随之而来的是移动数据的疯狂式增长。据 Cisco 2010 年做的一个关于移动数据预测报告显示^[1],全球的移动数据将会在 2011 年和 2016 年之间提高 18 倍,在 2016 年截止将会超过 10EB。日益增长的移动数据,势必给移动蜂窝网络运营商(Mobile Cellular Network

Operators, MNOs)造成巨大的流量负载和网络拥塞,导致运营维护的艰难和资金成本的损失。

对运营商来说,存在着迫切对此问题进行研究的必要性。从当前的研究工作中,可以总结出以下 3 个主要的解决方案:第一,将网络基础设施升级到下一代更加先进的网络技术,如 LTE(Long Term Evolution)、4G 或 WiMax。这种方案不适合长期发展,一来对运营商会造成很大的成本损失;二来移动设备和应用程序将会在未来几年内出现爆炸式的增长,即使升级基础设施也不能满足用户日益增长的数据需求^[2]。第二,运营商可以寻找合理的定价方案,来抑制用户对数据流量的使用。近年来,研究者已经提出多种不同的定价方案,Joe-Wong 等人^[3]综述了几种比较传统的定价方案,有常用的包

本文受国家自然科学基金项目(61272470, 61305087),中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项资金项目(CUG140615, CUG120114)资助。

姚宏(1976—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为移动网络、车联网, E-mail: yaohong@cug.edu.cn;白长敏(1991—),男,硕士生,主要研究方向为移动网络;胡成玉(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向为大规模优化问题;曾德泽(1984—),男,博士,副教授,主要研究方向为移动网络、物联网;梁庆中(1979—),男,博士生,主要研究方向为嵌入式系统。

月(flat-Rate)和包流量(usage-Based)方案,还有按不同时段定价的方案(Simple day/night charging)、双层(two-tier)和考虑拥塞(congestion)的方案等。最近,Sangtae Ha 等人^[3]提出了一种比较新颖的、依赖时间的定价方案,该方案根据用户对数据的延迟容忍度,将高峰时段用户请求的数据流量转移一部分到低峰时段,有效地避免了流量的超负载。诚然,这些方案从长期来看是无效或不足的,运营商必须寻找出长期有效的解决方案。

因此,就出现第3种解决方案——移动数据分流。该方案的研究在最近3年才兴起,伴随着移动数据指数式的增长趋势和多种新兴无线通信技术的出现,加快了这个领域的研究进程,现在基本上已经呈现出一个成熟且饱和的状态。近年来,研究人员对数据分流的研究视角非常广泛,有针对性的移动节点的(如拥有智能手机或平板的节点、城区车辆节点等);有研究分流的形式的,例如,有的工作研究利用基础设施如路边通讯单元、RSU或WiFi AP、Femtocells网络、具有通信能力的固定虚拟节点(如Throwbox^[5]、FemtoCaching^[6]、VTube^[7]等)来辅助分流;而有的工作则考虑没有基础设施辅助,单纯依靠节点自组织(Ad-Hoc Model)通信形式实现分流,如节点通过机会相遇,利用直接WiFi(Direct WiFi)、DSRC、Bluetooth、NFC、D2D等本地机会通信技术进行数据传输。根据用户对数据延迟容忍的特性,大部分工作基于DTN(Delay Tolerance Network)网络环境展开,为了最大化分流的数据量,往往从设计较好的DTN路由协议出发,以提高数据在DTN网络中的传输率和减小传输时延为最终的目的。图1显示的就是各种形式的数据分流,假设场景为城区,则用户包括车辆用户和普通用户,其获取数据的方式总共有3种,即直接从昂贵的蜂窝基站获取、间接从路边的基站获取和间接从拥有数据的用户获取。

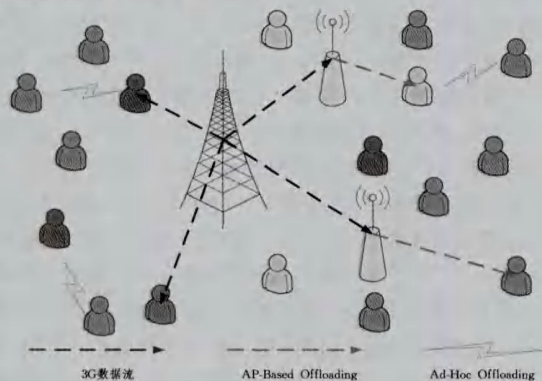


图1 多种形式的数据分流形式

总体而言,移动数据分流研究的意图是充分利用了机会网络通信的优势,将用户从蜂窝网络获取数据的途径转移到本地机会通信上,以此来节省蜂窝网络流量的负载。下面分别对近年来移动数据分流的相关工作进行阐述,指出部分工作所存在的问题,同时指明将来可扩展的工作。

2 移动数据分流研究综述

移动数据分流(Mobile Data Offloading),也叫做移动蜂窝数据分流(Mobile Cellular Data Offloading),目的是将原计划通过蜂窝网络传输的数据转移到其它补足(complementary)的网络上,如WiFi、Femtocells网络等。当前利用这些

网络来辅助蜂窝网络进行数据分流是一个值得探讨且有趣的课题。然而,是否进行数据分流的前提,需要考虑几个相关的因素,如蜂窝网络的数据流量是否过载,其它补足的网络是否可用,以及用户对所分流的数据是否具有有一定的延迟容忍度,即数据必须是非实时的(如邮件、音频/视频、软件更新和移动备份等)^[8]。近年来,研究人员从不同的角度,以不同的视角对移动数据分流进行了多方面的研究。

如果按照进行分流的网络中是否有基础设施辅助,可以将其分为基于基础设施(Infrastructure-Based)的数据分流方案和无基础设施(Un-Infrastructure)的分流方案。在无基础设施辅助分流的方案中,往往需要考虑选择一部分种子节点或目标节点来从蜂窝网络中获取数据,然后利用本地机会通信将数据传送给其他节点。因此,一些工作侧重于研究如何选择种子节点以使最终分流的数据量最大。另外,节点都存在着自私性,有研究人员从经济学的角度来谈数据分流,提出不同的激励机制来激励用户参与分流,同时保证平衡运营商和用户之间的利益关系。进一步,有工作利用这种利益关系从工程层面提出自己的系统框架,以手机APP的形式来指导用户的分流。数据分流是一个相对广泛的概念,除了为运营商减轻流量负载之外,也为智能移动设备减轻能量的消耗,将计算、存储、通信的部分任务分流到云端处理。有的工作基于此考虑来实现移动设备上的数据分流,如文献^[9,10]做的就是这样的工作。下面分别对上述几种分流的情况进行阐述。

2.1 基于基础设施的分流方式

基于基础设施的分流方案的基本思想是通过部署一些具有通信、计算和存储功能的基础设施来辅助数据传输。这些基础设施可以是现实生活中真实存在的,如,WiFi AP^[8,11]、Femtocells^[12]、路边的通信单元(RSU)^[13,14]、公共交通系统(Public Transport System)^[15]。文献^[11]采用同样的分流架构来分流大块的文件和视频流,指出femtocells和microcells处于同一频段,容易产生干扰,因此femtocells更适合于室内环境下的数据分流。文献^[13]从内容下载的角度指出通过马尔科夫链预测车辆和AP的相遇率,可以间接提高数据分流的效率。文献^[14]提到采用合理的缓存分配方案和网络编码的方式来提高分流的效率,作者将研究重点放在网络编码上,指出在什么情况下适合用网络编码,并使用整数线性规划来求解他们提出的模型。而文献^[15]则将蜂窝流量通过公共交通系统进行分流,作者引入公交车站来辅助数据的传输,但是他们的工作引入了较多的前提假设。基础设施也可以是人为抽象出来的虚拟通信节点,类似于AP,只不过其一般用于存储和中继数据。文献^[5]提出了在DTN网络中用于辅助数据中继的虚拟节点Throwbox,利用其可以提高数据传输率。文献^[6]引入一种在商场、足球场等人群密集的地方用于传输视频数据的,类似于Femtocells的FemtoCaching,这种存储单元相比femtocell具备存储容量和高回程网络带宽的特点,且成本相对较低,作者根据用户的需求和密度力图寻找最佳的缓存方案来尽可能地满足用户对数据的需求。而文献^[16]充分利用了节点的社交关系来组成社区(community),在社区中又利用Throwbox来存储数据,又进一步提高了数据传输率。文献^[17]则利用移动节点簇(cluster)的方式来分流蜂窝网络的流量,与前人工作明显的不同之处在于:作者引入了3G网络运营商的参与,运营商充当着中间仲裁者的角色,在

用户数据请求高峰期的时候,其负责将用户的请求转移到周围的其他拥有数据的用户上,然后将 3G 网络连接作为控制信道,自动唤醒通信的接口,这就免去了用户主动扫描周围通信信道的过程,在实现数据分流的同时又大大节省了设备电池能量的消耗。

2.2 无基础设施的分流方式

没有基础设施辅助的分流方案利用节点之间的机会通信来传输数据,只要两个设备具有通信的接口,并且在彼此的通信范围之内就可以相互通信传输数据。这种通信技术叫做无基础设施的用户到用户(user-to-user)的本地机会通信技术,如蓝牙(Bluetooth),Direct WiFi^[18,19],小型的单元网络(Small cell Network),近场通信(Near-Field-Communication, NFC)^[20]和 Device-to-Device (D2D)^[21]等。在这些通信方式中,为了达到数据分流的目的,需要选择一个能够进行数据分流的目标节点集合,也叫种子节点集合,利用这个集合中的节点从蜂窝网络获取数据,然后携带着这些数据,当与需要数据的目标节点机会相遇时,再将数据通过本地机会通信传送给目标节点。种子节点的选择决定了最终能够为运营商进行分流的数据量的多少。

对于如何选择种子节点集合,前人已做了不少尝试和突破工作。文献[22]分别提出了贪心、启发式和随机 3 个算法来选择种子节点集合,作者通过数学模型推导将问题转换成亚膜函数(submodular)问题来求解。文献[23]提出在已知全局网络拓扑信息的情况下,使用 dominating set 问题来寻找一个最大化覆盖所有用户对数据需求的集合。如果不考虑节点的自私性,从节点本身的特性出发,在选择种子节点集的时候一般会选择一些与其他节点频繁相遇的节点,如考虑节点的社交特性。文献[24]考虑选择 Centrality 最大的节点作为种子节点。而文献[25]同时考虑了节点在社交网络(Social Network Service, SNS)和移动社交网络(Mobile Social Network, MSN)的特征。SNS 网络具有同质(homophily)和本地(locality)的特性,以及 MSN 网络中节点在某些兴趣点(POI)经常相遇的特性,选择在这两种网络中与其他节点相遇最频繁的节点,即影响最大的节点作为种子节点。图 2 是一个利用种子节点在 DTN 网络中传播数据的图示。

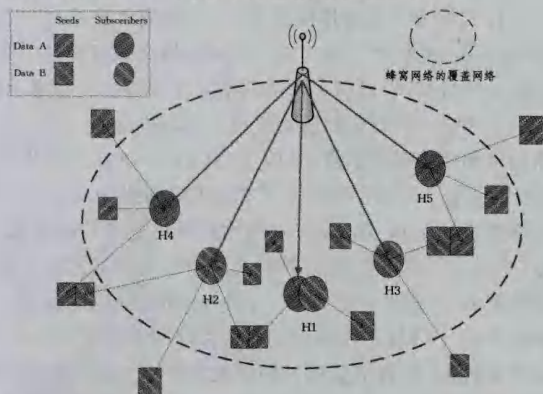


图 2 种子节点数据分流示意图

此外, Balasubramanian 等人^[26]设计了一个将 3G 流量通过 WiFi 网络分流的系统: Wiffler。作者使用与 WiFi 基站相遇的历史数据, 以上次遇见的时间间隔来预测下次相遇的期望时间, 根据用户对数据延迟容忍的特性, Wiffler 有相应的

机制让用户选择是等待从 WiFi 网络获取数据, 还是快速切换到 3G 模式获取数据。文献[27]也是利用 WiFi 网络来对蜂窝网络流量进行分流, 根据用户对数据的延迟容忍度, 提出两种数据分流的方式: on-the-spot 和 delayed。Yong Li 等人^[28]考虑了一个更广泛的场景, 研究将多种网络中的数据通过 DTN 网络进行分流。他们考虑了数据异构的特性, 即数据不同的生命周期和大小, 用户对不同的数据有不同的订阅兴趣, 以及辅助分流的节点的容量有限, 他们通过严格的数学模型推导转化成背包问题进行求解, 最后分别针对不同的移动场景设计 3 个近似算法来得到最优解。

2.3 移动数据分流的成本考量

在另外一些工作中, 研究者是从数据分流的利益关系方面分析分流的可行性及分流的最佳时机, 以及在有利益关系的驱动下如何激励才能促进分流, 以使运营商和用户达到双赢的局面。

移动数据分流往往通过 WiFi 网络和机会网络进行。相对于蜂窝网络, 从这些网络获取数据, 可以体验高带宽的链路, 几乎不用考虑昂贵的流量成本费用, 但是存在着间断性的网络连接和一定的网络延迟。如果对于手机等智能移动设备, 在侦听 WiFi 信道的过程中要消耗较高的电池能量, 如果是车辆等节点, 则能量消耗并不是一个问题^[29]。相反, 蜂窝网络具有全覆盖的信号, 用户可以随时随地获取数据, 但却有相对较低的数据率(在用户移动的过程中, 蜂窝网络的数据率相对要高^[30]), 且需要付出一定的流量成本^[31]。基于成本考虑, 数据分流对于用户和运营商来说都是一件非常可取的事。

在这方面的研究中, 文献[31]研究了用户成本-网络吞吐量-时延之间的 Trade-Off。通过分析, 作者提出一个系统框架 AMUSE, 并以手机 APP 的形式实现, 用户安装之后可以根据流量的使用情况和 WiFi 网络的可用性, 决定选择哪些应用程序分流。文献[2]则从经济学的角度来探索利用 WiFi 网络分流为运营商和用户所带来的经济价值, 并将这个模型模拟成两阶段的连续博弈过程。实验表明, 用户的流量套餐和定价有着很大的时空相关性。对于运营商来说, 他们的收入能够提高 21%~152%, 同时能够为用户带来 73%~319% 的剩余价值。进而, 在此基础上, 文献[32, 33]从激励机制的角度出发来权衡运营商和用户在分流过程中的利益关系, Zhuo Xuejun 等人^[32]提出一个利于用户和运营商双方的激励模型, 用户如果选择进行数据分流, 则运营商为其提供相应的报酬。在他们的模型中, 用户对不同的数据具有不同的容忍度, 利用该容忍度向运营商提出相应的报酬, 运营商根据用户的容忍度和所出的价位判断该用户能为自己分流多少数据量, 从而带来多少成本, 根据每个用户的出价和容忍度, 运营商选择不同的数据方案, 他们采用反向拍卖的技术最终能够很好地平衡每个用户和运营商之间的利益。而文献[33]则加入 WiFi 网络运营商的角色, 变成用户、WiFi 网络运营商、蜂窝网络运营商 3 个角色之间的利益分配。假设 WiFi 网络运营商由多家公司维护, WiFi 网络运营商根据自身的覆盖范围和服务能力, 向蜂窝网络运营商出价, 蜂窝网络运营商根据其出价情况和服务能力, 以及自身的成本情况, 选择哪些 WiFi 网络运营商来帮助自己分流。

此外, 还有一些相关的工作也是建立在激励机制的制定上, 研究人员从不同问题的维度出发, 通过建模, 最终得出了

一套适合自己问题场景的激励框架。

结束语 移动数据分流是为了应对数据的增长给蜂窝网络运营商造成数据承载的压力而提出的一种有效的解决方案。为了达到分流的目的,可以充分利用多种移动无线通信技术来共同达成这一目标。结合机会网络、DTN 网络、移动社交网络等多种网络的特性,在移动数据分流大的背景下,为学术界带来了多个方向进行研究的空

间。本文对当前关于移动数据分流的相关研究工作进行了综述性描述,首先对移动数据分流的相关工作进行分类,然后针对每一类进行了较为详细的总结和分析。在未来的研究工作中,为了提高数据分流的效率,可以从提高数据传输率的角度出发,尝试其他有希望的技术实现手段,譬如说网络编码、缓存分配等诸多方面,均值得进一步研究。

参 考 文 献

- [1] CISCO. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2010-2015. CISCO, Tech. Rep., 2010
- [2] Lee J, Yi Y, Chong S, et al. Economics of wifi offloading: Trading delay for cellular capacity[C]//2013 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2013: 357-362
- [3] Sen S, Joe-Wong C, Ha S, et al. Pricing data: A look at past proposals, current plans, and future trends. arXiv. Feb. 2012[OL]. <http://arxiv.org/abs/1201.4197>
- [4] Ha S, Sen S, Joe-Wong C, et al. Tube: time-dependent pricing for mobile data[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 247-258
- [5] Zhao W, Chen Y, Ammar M, et al. Capacity enhancement using throwboxes in DTNs[C]//2006 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS). IEEE, 2006: 31-40
- [6] Golrezaei N, Shanmugam K, Dimakis A G, et al. Femtocaching: Wireless video content delivery through distributed caching helpers[C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2012: 1107-1115
- [7] Luan T H, Cai L X, Chen J, et al. Vtube: Towards the media rich city life with autonomous vehicular content distribution[C]//2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). IEEE, 2011: 359-367
- [8] Han B, Hui P, Srinivasan A. Mobile data offloading in metropolitan area networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2011, 14(4): 28-30
- [9] Barbera M V, Kosta S, Mei A, et al. Mobile Offloading in the Wild: Findings and Lessons Learned Through a Real-life Experiment with a New Cloud-aware System[C]//Proc. of IEEE INFOCOM. 2014
- [10] Barbera M V, Kosta S, Mei A, et al. To offload or not to offload? the bandwidth and energy costs of mobile cloud computing[C]//2013 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2013: 1285-1293
- [11] Dimatteo S, Hui P, Han B, et al. Cellular traffic offloading through WiFi networks[C]//2011 IEEE 8th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS). IEEE, 2011: 192-201
- [12] Chandrasekhar V, Andrews J G, Gatherer A. Femtocell Networks: A Survey[J]. IEEE Comm. Magazine, 2008, 46(9): 59-67
- [13] Malandrino F, Casetti C, Chiasserini C, et al. Offloading cellular networks through ITS content download[C]//2012 9th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). IEEE, 2012: 263-271
- [14] Li Y, Jin D, Wang Z, et al. Coding or Not: Optimal Mobile Data Offloading in Opportunistic Vehicular Networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1)
- [15] Kashiwara S, Sanadidi M Y, Gerla M. Mobile, Personal Data Offloading to Public Transport Vehicles[C]//ICMU. 2012
- [16] Wu J, Xiao M, Huang L. Homing spread: Community home-based multi-copy routing in mobile social networks[C]//2013 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2013: 2319-2327
- [17] Bao X, Lin Y, Lee U, et al. DataSpotting: Exploiting naturally clustered mobile devices to offload cellular traffic[C]//2013 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2013: 420-424
- [18] L Xiao-feng, Pan H, Lio P. Offloading mobile data from cellular networks through peer-to-peer WiFi communication: A subscribe-and-send architecture[J]. Communications, China, 2013, 10(6): 35-46
- [19] Hu S, Liu H, Su L, et al. Towards Automatic Phone-to-Phone Communication for Vehicular Networking Applications[J/OL]. <http://www.cs.virginia.edu/~stankovic/psfiles/infocom2014.pdf>
- [20] Michahelles F, Thiesse F, Schmidt A, et al. Pervasive RFID and near field communication technology[J]. Pervasive Computing, IEEE, 2007, 6(3): 94-96, c3
- [21] Jänis P, Yu C H, Doppler K, et al. Device-to-Device Communication Underlying Cellular Communications Systems[J]. International Journal of Communications, Network & System Sciences, 2009, 2(3)
- [22] Han B, Hui P, Kumar V S, et al. Cellular traffic offloading through opportunistic communications: a case study[C]//Proceedings of the 5th ACM workshop on Challenged networks. ACM, 2010: 31-38
- [23] Whitbeck J, Amorim M, Lopez Y, et al. Relieving the wireless infrastructure: When opportunistic networks meet guaranteed delays[C]//2011 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE, 2011: 1-10
- [24] Han B, Hui P, Kumar V S A, et al. Mobile data offloading through opportunistic communications and social participation [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(5): 821-834
- [25] Wang X, Chen Min, Han Z, et al. TOSS: Traffic Offloading by Social Network Service-Based Opportunistic Sharing in Mobile Social Networks[C]//IEEE INFOCOM 2014. Toronto, Canada, 2014: 27
- [26] Balasubramanian A, Mahajan R, Venkataramani A. Augmenting mobile 3G using WiFi[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. ACM, 2010: 209-222
- [27] Lee K, Lee J, Yi Y, et al. Mobile data offloading: how much can WiFi deliver? [C]//Proceedings of the 6th International Con-

- [28] Li Y, Su G, Hui P, et al. Multiple mobile data offloading through delay tolerant networks [C] // Proceedings of the 6th ACM workshop on Challenged networks. ACM, 2011; 43-48
- [29] Lee K, Lee J, Yi Y, et al. Mobile data offloading; how much can WiFi deliver? [C] // Proceedings of the 6th International Conference. ACM, 2010; 26
- [30] Gass R, Diot C. An experimental performance comparison of 3g and wi-fi [C] // Proceedings of the 11th International Conference on Passive and Active Measurement. PAM'10, 2010; 71-80

(上接第 169 页)

选集合 Ω 中去除并分配到 G_i 组, $i=i+1$, 转到第二步; 否则减小 N_G , 使得 $N_G = N_G - 1$; ②如果 $N_G = 0$, 则转到第四步;

第四步: 返回 $G_1, \dots, G_m, N = \sum_{i=1}^m |G_i|$ 。

4 性能仿真分析

本节, 我们对所提出的 BD 预编码和时分复用相结合的 MIMO 传输方案进行性能仿真。使用蒙特卡洛的方法, 根据信道分布随机产生一组信道增益矩阵 H_i , 使用第 3 节提出的 BD 编码和时分复用相结合的算法, 计算系统支持的用户数以及系统吞吐量。本次仿真中系统发射端配置 4 根天线, 接收端配置 2 根天线, 信噪比采用 $SNR = 10\text{dB}$, 系统要求的速率 $R_{req} = 3\text{bps/Hz}$ 。

图 2 为不同方案所能够支持的最大平均用户数。把只采用时分复用的方案记作 TDM, 只采用 BD 编码的方案记作 BD 以及采用 BD 和 TDM 结合的方案记为 BD-TDM。在 BD-TDM 方案中考虑了每组 2 或 3 个用户的情况, 分别用 BD-TDM(2)、BD-TDM(3) 来表示。仿真图表明 BD-TDM(2) 和 BD-TDM(3) 编码方案的性能比 BD 方案和 TDM 方案更加优异, 同时它们的编码复杂度却不及 BD 方案的 $\frac{1}{2}$ 和 $\frac{2}{3}$ 。

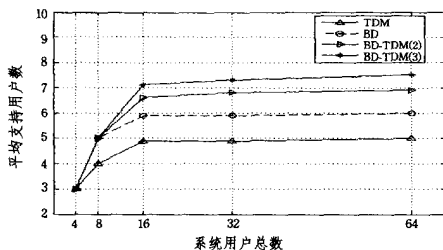


图 2 不同方案的平均支持用户数

图 3 为不同方案的吞吐量。仿真结果显示 BD-TDM(2) 和 BD-TDM(3) 编码方案的吞吐量比 TDM 和 BD 编码方案有较大的提高。

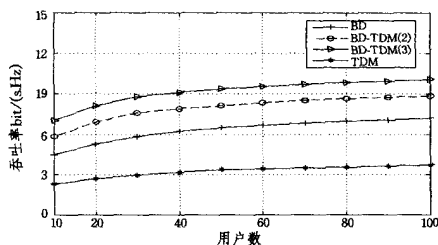


图 3 不同方案的吞吐量

- [31] Im Y, Joe-Wong C, Ha S, et al. AMUSE: Empowering users for cost-aware offloading with throughput-delay tradeoffs [C] // 2013 Proceedings IEEE INFOCOM, IEEE, 2013; 435-439
- [32] Zhuo X, Gao W, Cao G, et al. Win-Coupon: An incentive framework for 3G traffic offloading [C] // 2011 19th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP). IEEE, 2011; 206-215
- [33] Dong W, Rallapalli S, Jana R, et al. iDEAL: Incentivized dynamic cellular offloading via auctions [C] // 2013 Proceedings IEEE INFOCOM, IEEE, 2013; 755-763

结束语 本文提出了一种基于 BD 预编码和时分复用的 MIMO 广播传输方案。仿真结果表明, 基于块对角化和时分复用的方案比只用 BD 算法的性能更优, 可以支持更多的用户数以及更高的吞吐率, 同时更加容易满足系统天线配置的要求, 降低了系统的复杂度。

参考文献

- [1] Telatar I E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels [J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10 (6): 585-595
- [2] Gesbert D, Shafi M, Shiu D S, et al. From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems [J]. IEEE J. on Selected Areas in Commun., 2003, 21(4): 281-302
- [3] Jafar S A, Vishwanath S, Goldsmith A J. Channel Capacity and Beamforming for Multiple Transmit and Receive Antennas with Covariance Feedback [C] // IEEE International Conference on Communications. 2001, 7; 2266-2270
- [4] Chen R, Andrews J G, Heath R W. Multi-user space-time block coded MIMO system with Downlink Precoding [C] // IEEE International Conference on Communications. 2004; 2689-2693
- [5] Jongren G, Skoglund M, Ottersten B. Combining beamforming and orthogonal space-time block coding [J]. IEEE Trans. Info. Theory, 2002, 48; 611-627
- [6] Wong K K, Murch R D, Letaief K B. A joint-channel diagonalization for multiuser MIMO antenna systems [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2003, 2(4): 773-786
- [7] Costa M. Writing on Dirty Paper [J]. IEEE Trans. Info. Theory, 1983, 29; 439-441
- [8] Caire G, Shamai S. On the Achievable Throughput of a Multi-Antenna Gaussian Broadcast Channel [J]. IEEE Trans. Info. Theory, 2003, 49; 1691-1706
- [9] Weingarten H, Steinberg Y, Shamai S. The capacity region of the Gaussian MIMO broadcast channel [J]. IEEE Trans. Info. Theory, 2004; 174
- [10] Lai U C, Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2004, 3(1); 20-24
- [11] Serbetli S, Yener A. Beamforming and Scheduling Strategies for Time Soltted Multimuser MIMO System [J]. IEEE Signals, Systems and Computers, 2004; 1227-1231
- [12] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Hartin M. Zero-Forcing Methods for Downlink Spatial Multiplexing in Multiuser MIMO Channels [J]. IEEE Transactions on Signal, 2004, 52 (2): 461-471