



超蜂窝网络基于用户行为预测的软实时服务机制与能效优化

钟晓峰^{1,2*}, 张宏纲³, 周世东^{1,2}, 王京^{1,2}

1. 清华大学电子工程系, 北京 100084

2. 清华大学信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084

3. 浙江大学电信工程系, 杭州 310058

* 通信作者. E-mail: zhongxf@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017-02-15; 接受日期: 2017-03-20; 网络出版日期: 2017-05-08

国家重点基础研究发展计划(973)(批准号: 2012CB316000)和泛网无线通信教育部重点实验室开放课题(批准号: KFKT-2014101)资助项目

摘要 无线蜂窝网络中相同的数据内容被大量重复传输,造成了网络能耗的增加和无线资源的浪费.然而,现有无线蜂窝网络并不关注所传输数据的实质内容,并对所有移动用户提供无差别服务,因此无法解决这一传输冗余问题.在分析移动用户行为的基础上,结合无线蜂窝网络和数字广播系统的优势,提出了以用户为中心、具有数据业务内容动态感知能力的软实时服务机制,降低无线蜂窝网络的传输能耗和无线资源消耗,同时提升移动用户体验的服务质量.本文给出了业务内容流行度预测、用户信息访问行为预测、动态多播小区构建与内容推送等算法设计,并建立了系统的性能模型,揭示了系统参数与系统性能之间的关联.经过公共网络新闻类信息访问的实测数据模拟验证,在理想的预测算法下,广播排名前10%的热门网络内容,可将蜂窝网络中的数据传输能效提升约2倍;经过校园网络在线学习场景的两个数据集模拟验证,在理想预测算法下,可将网络数据传输能效提高50倍.

关键词 内容服务, 流行度预测, 用户行为, 能量效率, 频谱效率

1 引言

数据传输服务已经成为移动通信网络中的主要业务,移动通信网络从2G发展到4G,数据服务速率也随之从约100 kbps发展到1 Gbps,这同时也消耗了大量的无线传输带宽和传输能量等资源.根据预测^[1],从2016年到2021年全球数据通信业务总量将翻7倍,更高的数据传输速率成为移动通信网络发展的主要目标之一.通过对实际无线蜂窝网络中的数据业务传输日志的统计分析,无线网络的

引用格式: 钟晓峰, 张宏纲, 周世东, 等. 超蜂窝网络基于用户行为预测的软实时服务机制与能效优化. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 664-676, doi: 10.1360/N112017-00041
Zhong X F, Zhang H G, Zhou S D, et al. Energy efficiency of soft real time service in hyper-cellular network with users' behavior prediction (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 664-676, doi: 10.1360/N112017-00041

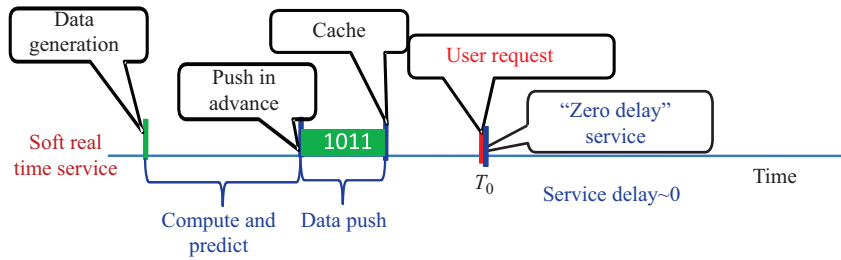


图 1 (网络版彩图) 软实时服务流程

Figure 1 (Color online) Flow of the soft real time service

数据传输存在大量冗余,即少部分热门的数据内容被多次重复传输给不同的用户终端,产生了大量的网络流量.通过预测潜在的热门数据内容及其访问用户,并在用户实际点击前将数据内容以广播方式推送到用户终端设备或邻近用户的智能接入节点,则可以提升用户 QoE (quality of experience),并提高无线蜂窝网络的能效与谱效.遵循这一思路,研究者提出了软实时信息服务机制 CASoRT (content aware soft real time media broadcast system) [2].

CASoRT 系统采用单播传输与广播传输相结合的方法来提高数据传输的效率. CASoRT 系统的关键在于“内容感知”,即分辨网络中不同数据内容之间的差别.对于访问量很大的网络数据内容,采用广播传输技术向大量的目标用户进行提前推送,使得用户在实际访问该内容前,用户终端中就已经存储了该数据内容,从而节约大量反复单播传输的能量;对于访问量不够大的数据内容,则采用单播传输技术将内容传输给目标用户,提高用户体验的服务质量.数据业务的实时动态感知、目标用户的提前预判和精准高效的提前推送是 CASoRT 系统能够发挥作用的关键所在,其服务思想如图 1 所示.为了支持软实时服务机制的数据内容推送,用户终端或用户侧接入节点需具备一定的数据缓存能力,系统服务器端需具备用户行为分析能力.

软实时信息服务机制通过对网络内用户历史通信行为和通信内容的分析,预测用户对信息内容的喜好,预先将信息内容推送到用户的终端存储器内.当用户发起数据传输要求时,已预存的内容则可直接从终端存储器调用,无需再次传输.为此,基于大量用户的历史通信数据日志,设计了相应的网络数据内容流行度预测算法 [3~5].采用协同过滤推荐、基于内容推荐和基于知识推荐等方法,设计了对应信息内容的目标用户群预测算法 [6].

在热门内容的推送过程中,如果用户位置未知,则需要对移动用户的位置进行预测,并在预测的蜂窝小区中进行推送;如果用户位置已知,则直接推送到其所在的蜂窝小区.不同的推送方式影响着软实时服务机制的能效和谱效收益.当预测某些信息内容可能成为热门内容,在未来一段时间内将被大量用户访问时,可预测目标用户的地理位置分布,在一个小区或者多个小区联合构成的广播区域内,以广播方式完成数据推送,以单次无线传输服务多位用户,提高网络能量效率;当预测某些信息内容会被少量用户访问时,可利用网络空闲时段将内容推送到用户终端设备,减少用户发起业务请求后的等待时延,提高用户体验的服务质量.

2 服务机制实施算法设计

软实时信息服务机制通过对网络内用户历史通信行为和通信内容的分析,预测用户对信息内容的喜好,预先将信息内容推送到用户的终端存储器内.当用户发起数据传输要求时,已预存的内容则可直

表 1 排序准确度比较
Table 1 Comparison in ranking accuracy

Algorithm	NDCG@1	NDCG@5	NDCG@10	NDCG@20	NDCG@100
LN (threshold=4)	0.83	0.78	0.78	0.81	0.84
LN (threshold=0)	0.83	0.73	0.72	0.74	0.75
MART	0.62	0.68	0.69	0.71	0.73
AdaRank	0.57	0.62	0.68	0.72	0.74
Coordinate Ascent	0.65	0.69	0.71	0.72	0.74

接从终端存储器调用, 无需再次传输.

软实时信息服务机制主要包含 3 个模块: 预测信息内容的热门程度; 预测信息内容对应的目标用户群; 根据目标用户群的地理位置分布, 动态规划广播区域, 完成热门内容的广播推送.

网络数据内容流行度预测的目标是根据某数据内容在最开始一小段时间内的访问量, 来预测其在整个生命周期内的访问量, 进而判断其是否为热门内容. 由于涉及到初始访问量及总访问量两个变量, 因此使用对数线性模型 (loglinear model) 作为流行度预测方法^[5]. 对数线性模型首先对变量进行对数变换, 然后找出两个变量间的线性关系. 流行度预测公式如下所示:

$$\ln N_i = k(t) \ln N_i(t) + b(t), \quad (1)$$

其中, N_i 为标题 i 的流行度预测值 (即总访问量预测值), 而 $N_i(t)$ 表示标题 i 在观察时间内的访问量, 该观察时间长度为 t . $k(t)$ 和 $b(t)$ 为反映线性关系的相关参数, 它们随观察时间长度的变化而改变, 可以在训练数据集中利用线性回归方法找到其最优值.

使用从中国移动浙江省网络中采集到的凤凰网 (ifeng.com) 访问数据进行算法性能测试. 由于存在数据噪声, 需要对初始访问量进行观察门限设置, 即当单位时间内的访问量大于这一门限时, 才设置计时时刻为 0, 并开始累计访问量, 直至时刻 t 完成累计, 得到初始访问量 $N_i(t)$. 对于该数据集而言, 最佳观察门限值为 4. 统计表明, 被最佳观察门限值排除在外的访问量占有网络数据内容总访问量的比例低于 8%, 这部分丢弃的信息基本不会对流行度预测产生影响. 以 NDCG (normal discounted cumulative gain) 作为流行度预测算法的评价指标. 如表 1 所示, 将带最佳观察门限的对数线性预测算法 LN (loglinear) 和 3 种常见的机器学习预测算法 (MART^[7], AdaRank^[8] 和 Coordinate Ascent^[9]) 进行比较, 带最佳观察门限的对数线性预测算法性能优于其他算法^[5].

针对移动网络中业务数据量大、业务类型多和用户量大的特点, 在传统推荐算法的基础上, 提出了迭代式 K 邻居协同过滤算法^[6]. 算法利用有限相关用户进行推荐, 避免用户过多导致的过拟合, 减小推荐计算复杂度, 减轻在线推荐压力, 只需基本的用户访问 log 记录即可完成推荐, 因此能够应用于业务类型复杂多样的无线蜂窝网络. 另外, 算法引入了迭代式的推荐方法, 将推荐结果引入下一轮推荐计算中, 每一次迭代均能引入用户相关性网络中更外围一层网络中的信息, 充分利用网络中的多维度信息提高推荐准确性. 基于清华大学 Meepo 网络数据集的仿真结果显示, 当邻居数量 $K > 50$ 时, 迭代式 K 邻居协同过滤算法的性能曲线收敛于基本协同过滤算法的性能曲线, 但相应的计算复杂度降低了 28%.

针对目标用户群的信息推送可以采用动态同步单频网广播的方式. 算法核心是根据目标用户群的地理位置分布, 由相邻的若干小区参与, 动态构建广播推送区域, 在此区域内使用同步单频广播的方法推送热门信息内容到用户终端. 一般而言, 为覆盖广播区域边缘用户, 广播采用的调制方式低, 频谱效

率低于单播传输. 单频网结构下多基站发出的同频同步信号可给接收端带来分集增益, 同时广播推送区域中的目标用户数量也将影响整个系统的能量效率.

2.1 单播/广播传输技术的能效分析

假设单播与广播传输的频谱效率分别为 θ_{uni} 和 θ_{bro} (单位为 $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$), 系统需要传输某一个大小为 M (bit) 的网络内容所占用的带宽为 B (Hz), 基站在带宽内的功率为 P (W), 则有: 数据传输速率为 $\theta \times B$ (bps), 所需传输时间为 $M/\theta \times B$ (s), 基站消耗能量为 $P \times M/(\theta \times B)$ (J). 因此, 单播传输的能量效率为

$$\eta_{\text{EE.uni}} = \frac{B}{P} \times \theta_{\text{uni}} \text{ (bit} \cdot \text{J}^{-1}\text{)}. \quad (2)$$

设平均每个小区有 N_{user} 个目标用户, 则采用小区广播即 PTM (point to multipoint) 广播传输时, 实际上每次广播传输了 $M \times N_{\text{user}}$ (bit) 的网络内容, 因此单小区广播传输的能量效率为 (其中 θ_{bro} 是小区广播传输的频谱效率)

$$\eta_{\text{EE.uni}} = \frac{B}{P} \times \theta_{\text{bro}} \times N_{\text{user}} \text{ (bit} \cdot \text{J}^{-1}\text{)}. \quad (3)$$

如果采用同步单频网广播, 则同步单频网区域分为存在目标用户的目标小区和辅助广播小区, 设其数量分别为 N 和 A . 辅助广播小区简称辅助小区, 小区内一般没有目标用户或目标用户数量较少, 用与目标小区相同的频率进行广播. 辅助小区与目标小区共同构成广播区域, 可以改善目标小区边缘用户的接收信号质量, 提高整个同步单频网的频谱效率, 但它们同时也会带来额外的资源消耗. 记 R_{eff} 为

$$R_{\text{eff}} = \frac{N}{N + A}, \quad (4)$$

R_{eff} 取值在 0 到 1 之间. 同步单频网广播的能量效率为 (其中 θ_{bro} 是同步单频网广播的频谱效率)

$$\eta_{\text{EE.uni}} = \frac{B}{P} \times \theta_{\text{bro}} \times N_{\text{user}} \times R_{\text{eff}} \text{ (bit} \cdot \text{J}^{-1}\text{)}. \quad (5)$$

设任意一个网络内容 i (大小仍设为 M (bit)) 的总访问量为 V_i , 目标用户所在的蜂窝小区数量为 C_i , 则无线蜂窝网络采用单播方式传输该网络内容时所消耗的能量为

$$E_i = \sum_{j=1}^{C_i} \frac{M \cdot N_{\text{user}_j}}{\eta_{\text{EE.uni}}} = \frac{M \cdot V_i}{\eta_{\text{EE.uni}}} = \frac{P \cdot M}{B} \cdot \frac{V_i}{\theta_{\text{uni}}} \text{ (J)}. \quad (6)$$

假设在蜂窝小区 $1 \sim k$ 中采用广播传输, 则此时无线蜂窝网络所消耗的能量为

$$E_i^* = \sum_{j=1}^k \frac{M \cdot N_{\text{user}_j}}{\eta_{\text{EE.uni}}} + \sum_{j=k+1}^{C_i} \frac{M \cdot N_{\text{user}_j}}{\eta_{\text{EE.uni}}} = \frac{P \cdot M}{B} \cdot \left(\frac{k}{\theta_{\text{bro}} \cdot R_{\text{eff}}} + \frac{V_i'}{\theta_{\text{uni}}} \right) \text{ (J)}, \quad (7)$$

其中 V_i' 表示在蜂窝小区 $(k+1) \sim C_i$ (即未采用广播传输的小区集合) 中的原本的总访问量. 要使得业务预推送系统能够获得能效上的收益, 需要使得 E_i^* 小于 E_i . 定义能耗率 ξ 表示这两者的比例, 即业务预推送后系统的无线网络传输能耗与单播传输能耗的比值. 则有

$$\xi = \frac{E_i^*}{E_i} = \frac{V_i' + (k/R_{\text{eff}}) \times (\theta_{\text{uni}}/\theta_{\text{bro}})}{V_i}. \quad (8)$$

要使 ξ 小于 1, 需有

$$N_{\text{user}_j} > \frac{\theta_{\text{uni}}}{R_{\text{eff}} \times \theta_{\text{bro}}}. \quad (9)$$

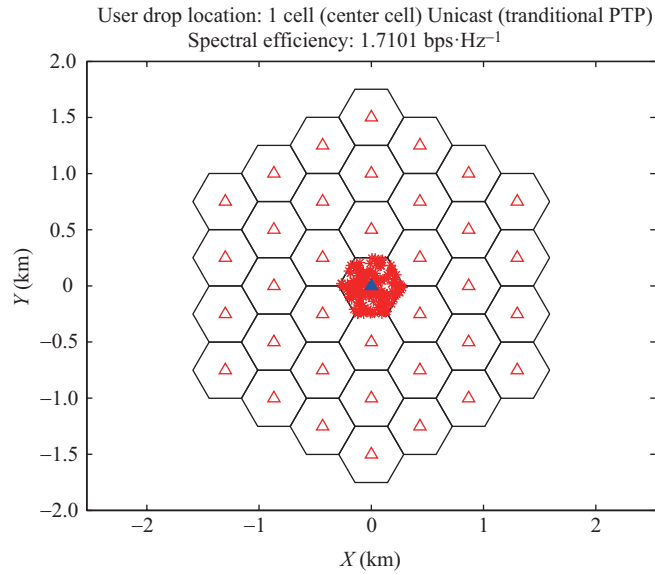


图 2 (网络版彩图) 单播传输的频谱效率

Figure 2 (Color online) Spectral efficiency in unicast

以上研究表明, 当蜂窝小区中的目标用户数量大于某一个由单播传输频谱效率、广播传输频谱效率和广播传输额外开销决定的阈值时, 需采用广播传输方式将该网络数据内容推送给用户, 以达到节省能耗的目的。

2.2 广播区域规划

在单频广播区域中, 根据辅助小区配置方式的不同, 对同步单频网传输的各种情形进行了仿真. 首先仿真没有辅助小区的情形, 分为两种情况: (1) 只有中心蜂窝小区存在目标用户; (2) 中心蜂窝小区及其外面第 1 环的 7 个蜂窝小区存在目标用户. 单播情形下的仿真结果如图 2 所示. 由传输的原理可知, 第 2 种情况的频谱效率与小区广播的频谱效率相同, 其仿真结果如图 3 所示. 第 2 种情况下, 中心基站以及外面第 1 环的 7 个基站所发射的功率为有用信号, 其他基站所发射的功率为干扰信号, 其仿真结果如图 4 所示. 当存在目标用户的 7 个蜂窝小区如图 4 所示聚集在一起时, 在不采用辅助小区协助传输的情况下, 同步单频网广播所能达到的频谱效率约为 $0.66 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$. 根据式 (9) 可知, 只有当蜂窝小区中的平均目标用户数量大于 3 时, 此情形下的同步单频网广播传输相较于单播传输才有更高的能量效率.

对于存在辅助小区的情形, 仍分为两种情况: (1) 只有中心蜂窝小区存在目标用户, 且辅助小区为中心蜂窝小区外第 1 环的 7 个蜂窝小区; (2) 中心蜂窝小区及其外面第 1 环的 7 个蜂窝小区存在目标用户, 且辅助小区为中心蜂窝小区外第 2 环的 12 个蜂窝小区. 两种情况的仿真结果如图 5 所示 (图中基站为实心三角形且没有 UE 的小区表示辅助小区). 仿真结果显示, 第 1 种情况的同步单频网广播传输频谱效率约为 $2.24 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 不但高于不采用辅助小区的小区广播传输, 而且高于单播传输. 但此时的广播传输额外开销参数 $R_{\text{eff}} = 1/7$, 因此, 按照式 (9), 只有当蜂窝小区中的平均目标用户数量大于 6 时, 此情形下的同步单频网广播传输相较于单播传输才有更高的能量效率. 第 2 种情况的同步单频网广播传输频谱效率约为 $2.83 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 但此时的广播传输额外开销参数 $R_{\text{eff}} = 7/19$. 因此, 按照式 (9), 只有当蜂窝小区中的平均目标用户数量大于 2 时, 此情形下的同步单频网广播传输相较

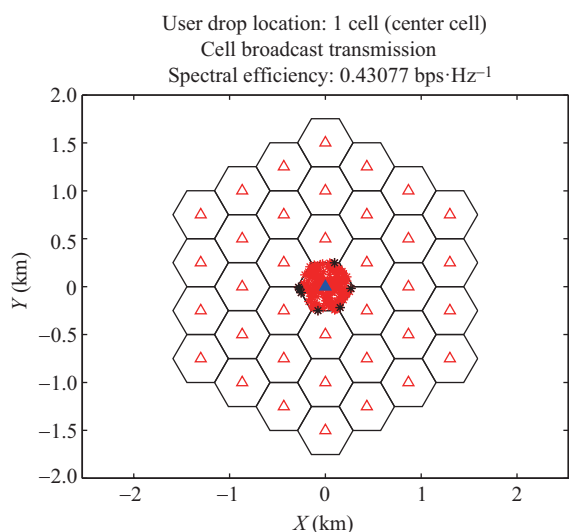


图 3 (网络版彩图) 小区广播的频谱效率
Figure 3 (Color online) Spectral efficiency of broadcast separately in each cell

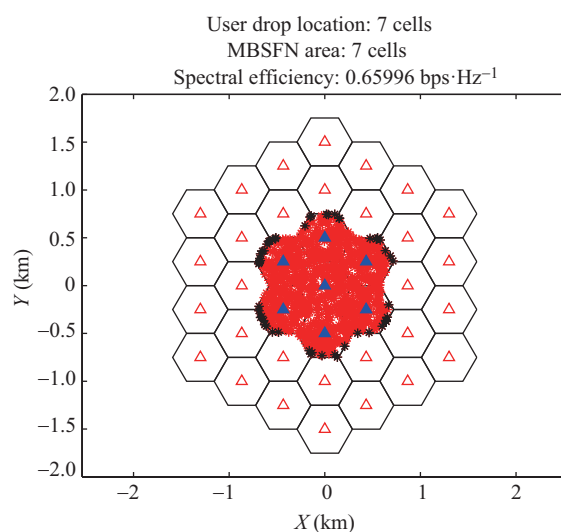


图 4 (网络版彩图) 同步单频网广播的频谱效率 (有目标用户小区数量为 7, 辅助小区数量为 0)
Figure 4 (Color online) Spectral efficiency of broadcast in a single frequency (number of user drop cell is 7, and no assisting cell)

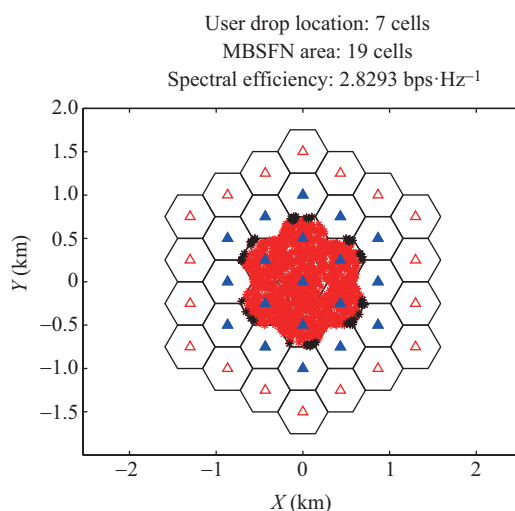
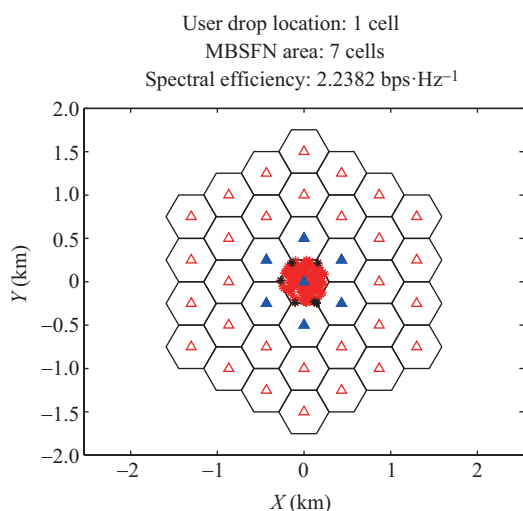


图 5 (网络版彩图) 同步单频网广播的频谱效率
Figure 5 (Color online) Spectral efficiency of broadcast in a single frequency

于单播传输才有更高的能量效率.

综合本节的各个仿真结果, 如表 2 所示. 可见当存在目标用户的蜂窝小区在地理上不相邻时, 如果小区内目标用户数量小于 4 个, 则适合采用单播传输, 如果目标用户数量大于等于 4 个, 则适合采用小区广播传输. 当存在目标用户的蜂窝小区每 7 个一组, 如图 4 所示聚集在一起时, 如果小区内平均目标用户数量只有 1 个, 则适合采用单播传输, 否则适合采用同步单频网广播传输, 且配置辅助小区数量为 12 个. 当目标用户的聚集程度更高时, 同步单频网广播的频谱效率会更高, 同时广播的开销

表 2 频谱效率仿真结果

Table 2 Simulation results of spectral efficiency (SE)

Transmission mode	SE	R_{eff}	Threshold
Unicast	1.71 bps · Hz ⁻¹	–	–
PTM	0.43 bps · Hz ⁻¹	1	4
MBSFN $N=7, A=0$	0.66 bps · Hz ⁻¹	1	3
MBSFN $N=1, A=6$	2.24 bps · Hz ⁻¹	1/7	6
MBSFN $N=7, A=12$	2.83 bps · Hz ⁻¹	7/19	2

会更低 (按照正六边形网格逐层累加的聚集方式, R_{eff} 分别为 1/7, 7/19, 19/37, ...), 因此采用广播传输的条件将更为宽松.

3 系统仿真平台

系统仿真平台的主要目标是在单频广播传输的场景下 (目标用户数量足够多), 确定广播区域的结构和参数配置. 仿真平台分别采用了正六边形网络结构和更精确的 α -stable 分布^[10] 网络结构, 仿真参数包括目标用户数量、广播覆盖率和信号传播模型等系统级仿真参数. 在给定的仿真条件下, 仿真平台会给出最优的数据传输方案, 使得无线蜂窝网络所消耗的传输能量最低. 这个最优数据传输方案包含了应该在哪个区域采用单播传输、在哪个区域采用广播传输以及采用广播传输时的具体参数配置等.

仿真中使用 3GPP 所提出的“资源效率”或者能量效率来判断采用何种传输技术. 根据 3GPP 协议, 广播传输的资源效率 RE (resource efficiency) 的定义如下:

$$RE_{\text{bro}} = \theta_{\text{bro}} \times R_{\text{eff}}. \quad (10)$$

因此在不考虑用户数量的条件下, 广播传输的能量效率 EE 与 RE 之间的关系为

$$\eta_{\text{EE.uni}} = \frac{B}{P} \times RE_{\text{bro}}. \quad (11)$$

可见, 在 RE 取得最大值时, EE 必定取得最大值. 因此仿真平台只需找出何种传输技术或参数配置可以使得 RE 最大即可.

在正六边形网络结构场景下进行仿真时, 首先设置仿真参数, 并选定存在目标用户的目标小区. 在目标小区周围的蜂窝小区可作为辅助小区, 协助存在目标用户的区域进行传输. 而是否将某一个小区选定为辅助小区, 取决于其能否提升这一区域的 RE. 例如, 在正六边形网络中, 选取一个小区作为目标小区, 如图 6 中深色区域所示. 则在其周围编号为 1 ~ 6 的蜂窝小区即可作为辅助小区协助其进行数据传输. 首先仿真没有辅助小区时的 RE 值 (此时相当于采用小区广播传输). 然后仿真编号为“1”的蜂窝小区作为辅助小区时的 RE 值, 之后再仿真编号为“1”和“2”的蜂窝小区作为辅助小区时的 RE 值. 以此类推, 最后得出 SE 和 RE 随着辅助小区数量变化的曲线, 如图 7 所示. 图中用圆点标记的曲线表示频谱效率, 用三角形标记的曲线表示资源效率. 可见, 随着辅助小区数量的增加, 存在目标用户区域的频谱效率不断上升, 并且这一曲线呈现下凸形式, 即后加入的辅助小区对频谱效率的影响较大, 而最后加入的一个辅助小区给频谱效率带来了最大的提升. 但是, RE 曲线并不是单调递增的, 而是先下降后上升, 即在最开始加入几个辅助小区时, 虽然频谱效率得到提升, 但 R_{eff} 的下降使得资

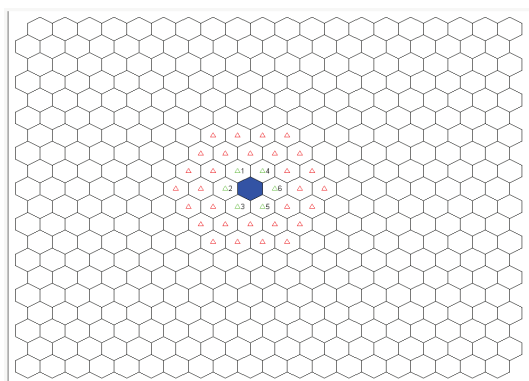


图 6 (网络版彩图) 1 个存在目标用户的蜂窝小区, 6 个蜂窝小区可作为辅助小区

Figure 6 (Color online) Number of user drop cell is 1, number of assisting cells is 0 ~ 6

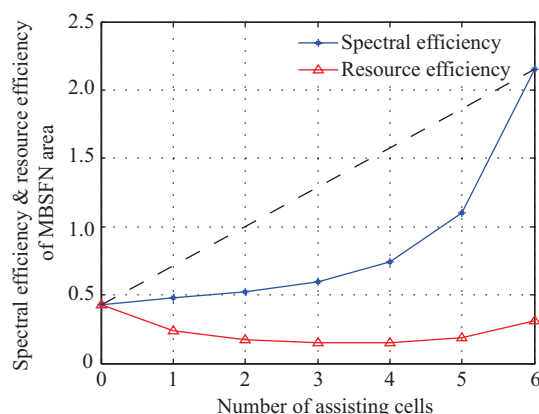


图 7 (网络版彩图) 频谱效率和资源效率曲线

Figure 7 (Color online) Spectral efficiency and resource efficiency

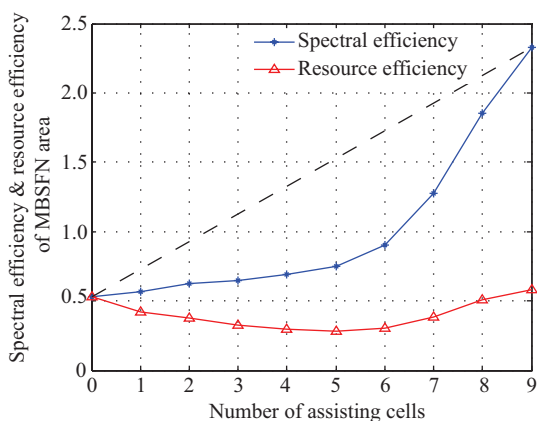


图 8 (网络版彩图) 频谱效率和资源效率曲线

Figure 8 (Color online) Spectral efficiency and resource efficiency

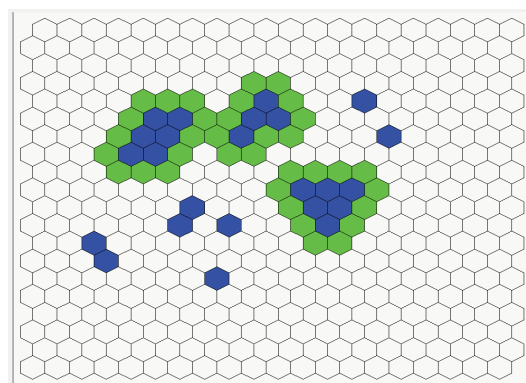


图 9 (网络版彩图) 仿真平台给出的最优数据传输方案

Figure 9 (Color online) Optimal transmission scheme in simulation platform

源效率仍会下降. 在加入第 4 ~ 6 个辅助小区时, 由于对频谱效率的提升明显, 才能够使得资源效率有所提升. 总的来看, 当辅助小区的数量为 0 时, 资源效率取到最大值, 即在给定的仿真条件下小区广播传输是最优的传输方案.

类似地, 如果选中 3 个紧邻的蜂窝小区作为存在目标用户的目标区域, 则仿真结果如图 8 所示. 可见, RE 曲线的最大值均出现在最右侧一点. 也就是说, 在这种情况下, 同步单频网广播传输是最优的传输方案, 且辅助小区应包围目标区域一圈.

采用这种方法, 仿真平台可以判断出任意一种给定的目标用户分布下的最优数据传输方案, 如图 9 中例子所示 (深色小区表示存在目标用户的小区, 浅色小区表示最优数据传输方案所指示的应该参与数据传输的辅助小区).

对符合 α -stable 分布的网络结构进行仿真时, 其算法是相似的. 例如, 选中存在目标用户区域, 如

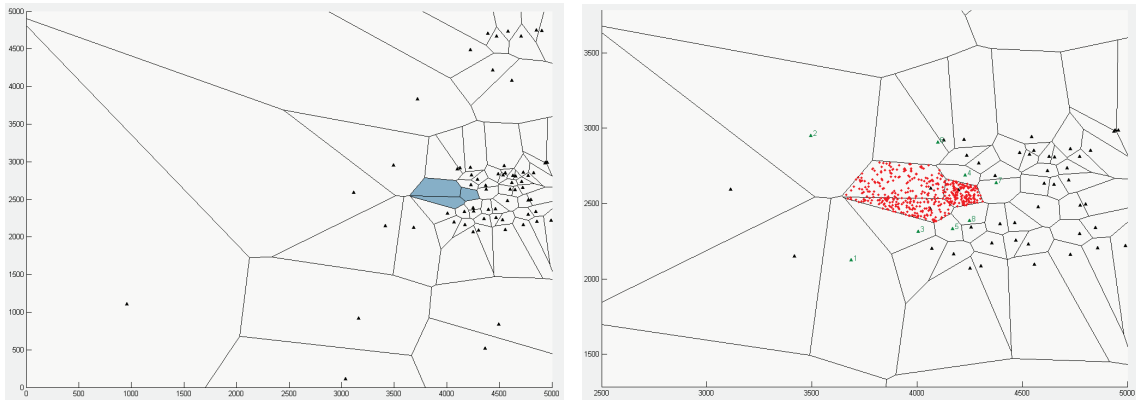


图 10 (网络版彩图) 采用 α -stable 分布下的网络结构进行仿真
 Figure 10 (Color online) Simulation in α -stable distribution

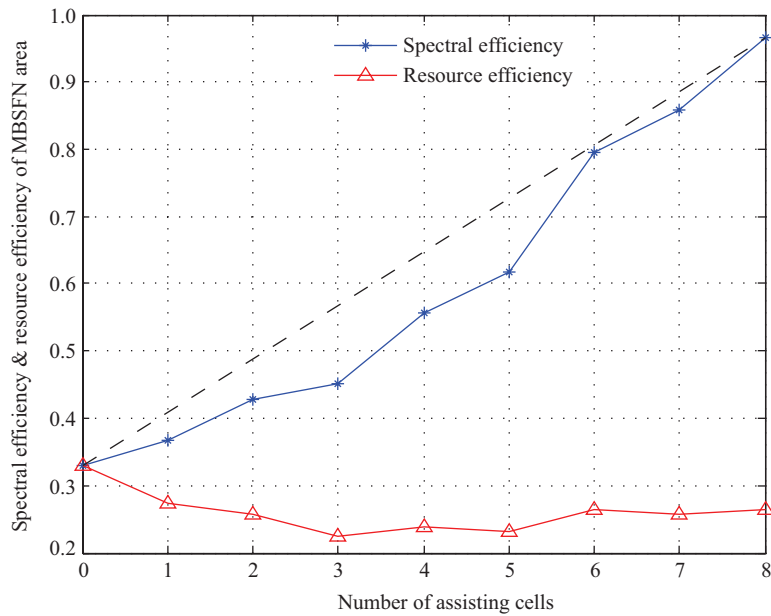


图 11 (网络版彩图) 频谱效率和资源效率曲线
 Figure 11 (Color online) Spectral efficiency and resource efficiency

图 10 中阴影所示 (其周围使用数字编号的小区可作为辅助小区). 其仿真结果如图 11 所示. 可见, 当不使用辅助小区时, 网络可以获得最大的 RE 值. 虽然 SE 曲线保持单调递增, 但 SE 和 RE 曲线均较不规则, 这是因为 α -stable 分布下的网络结构更接近真实情况, 因而其仿真结果的随机性更强, 更具有现实意义.

4 性能评估

选取中国移动通信集团公司的业务数据进行评估, 主要采集对象是移动用户的数据业务通信记录. 一条典型的数据业务通信记录包括业务发起和结束的时间、用户 IMSI 和 IMEI 号码 (经过加密处

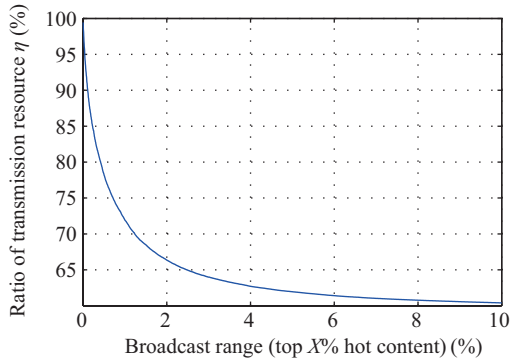


图 12 (网络版彩图) 无线蜂窝网络中数据传输次数的下降

Figure 12 (Color online) Decrease of transmission times

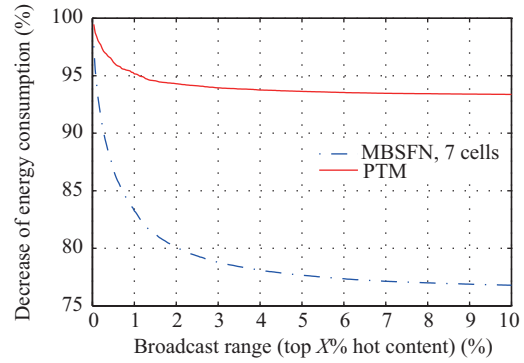


图 13 (网络版彩图) 无线蜂窝网络传输能耗的下降

Figure 13 (Color online) Decrease of energy consumption

理)、用户访问的网址 (URL)、用户所在的位置区码 (LAC) 和用户所在的小区识别码 (Cell ID) 等内容. 在采集范围内, 每天的移动业务数据量超过 7000 万条.

经过数据预处理, 获得了凤凰网共计 3462339 条移动用户的数据业务通信记录, 其中包含了移动用户所访问的网络内容 (文本形式, 通过原始数据中的 URL 获取). 经过数据库分析, 发现其中共有不同的 IMSI 号共计 262055 个 (大体可认为共有约 26 万个不同的移动用户), 不同的网络内容共计 30003 个, 不同的 LAC 号共计 1896 个, 不同的 Cell ID 号共计 159260 个. 凤凰网数据集将作为系统能效分析的基础数据集, 用来评价业务预推送系统所能达到的效果.

对于任意一个网络内容 i , 设其访问量为 V_i , 目标用户所在的蜂窝小区数量为 C_i , 则在最理想的情况下, 采用广播传输方式能够减少的数据传输次数为

$$\delta_i = V_i - C_i. \tag{12}$$

而整个无线通信系统中的数据传输次数减少量为

$$\Delta = \sum_{i \in I} \delta_i, \tag{13}$$

其中 I 表示的是被业务预推送系统所广播的网络内容的集合. 当某一个网络内容属于 I 时, 无线通信系统需要将其传输 C_i 次; 否则, 需要传输 V_i 次.

定义使用业务预推送系统后的总数据传输次数, 与原本的总数据传输次数的比值为 η , 则 η 的表达式如下:

$$\eta = \frac{\sum_{i \in D} V_i - \Delta}{\sum_{i \in D} V_i} = \frac{\sum_{i \notin I} V_i + \sum_{i \in I} C_i}{\sum_{i \in I} V_i}, \tag{14}$$

其中 D 表示的是当前网络中所有的网络内容的集合.

在凤凰网数据集中, 共有 30003 个不同的网络内容. 按照网络内容的访问量大小, 依次计算广播传输对每个网络内容所能节省的数据传输次数, 并得到传输资源占用率曲线 η , 如图 12 所示. 可见, 当业务预推送系统广播前 10% 的最热门网络内容时, 在最理想的情况下, 可以使得无线通信系统中的数据传输次数下降到大约原来的 60%. 按曲线的趋势来看, 继续广播其他相对非热门的网络内容所能获得的收益将十分有限.

由于凤凰网数据集中并没有提供各个蜂窝小区是否在地理上相邻的信息, 因此对这一条件分别进行了两个假设. 首先假设较差情形, 即所有存在目标用户的蜂窝小区都地理上不相邻, 因而在目标用户数量大于等于 4 的蜂窝小区中应采用小区广播传输, 否则采用原本的单播传输; 其次假设较好情形, 即所有存在目标用户的蜂窝小区均如图 4 所示, 每 7 个一组聚集在一起. 例如, 凤凰网数据集中最热门的一个网络内容共存在 20022 个蜂窝小区, 将这些小区按照数据传输次数从大到小进行排序, 并假设小区 1~7 按照图 4 所示在地理上紧邻, 小区 8~14 和 15~21 也是如此. 在这种情况下, 平均目标用户数量大于等于 2 的蜂窝小区组中适合采用同步单频网广播传输, 且辅助小区数量应为 12 个, 否则仍应采用原本的单播传输.

在这两种假设的条件下, 按照网络内容的访问量大小, 依次计算每个网络内容的传输能耗 E_i^* 和 E_i , 并最终得到整个网络的传输能耗下降曲线如图 13 所示. 图中上面的实曲线表示第 1 种假设下的网络传输能耗下降曲线, 可见, 当业务预推送系统广播前 10% 的最热门的网络内容时, 可以使得整个网络的传输能耗下降到大约原来的 93%; 下面的虚曲线表示第 2 种假设下的网络传输能耗下降曲线, 在同样条件下, 此时业务预推送系统可以使得整个网络的传输能耗下降到大约原来的 77%. 由此可见, 目标用户在地理位置上的聚集程度会显著影响业务预推送系统的效能, 当聚集程度较高时, 网络传输能耗下降较为明显.

网络学堂是清华大学的教学辅助系统, 教师将教学课件、教学视频和课程作业文档等材料上传, 学生下载相应材料学习和完成课程作业. 网络学堂的用户群体主要是学生和教师, 而该群体具有地理聚集性和特定访问行为的特点, 因此可以从数据中挖掘出聚集特点以及访问模式, 从而控制数据传输和通信基站的服务机制, 达到提高能效的目的^[11].

以 2015 年 5 月份网络学堂用户访问日志为例, 其中包含共 3376951 条访问记录, 涉及 6472 门课程、83111 个 IP 地址和 54624 个文件. 基于一个月的用户访问记录, 利用数据统计分析方法, 得到了网络学堂用户的分布和访问规律, 即业务访问的地理聚集性规律和业务访问的时间变化规律. 例如, 课程 12319 的访问用户主要集中在少数几个地区, 具有极强的地理聚集性; 对于同一地区, 访问量主要集中在少数几个时段; 而对于不同地区, 访问高峰出现的时间可能不同. 例如, 对于图书馆来说, 访问高峰出现在中午 10 点和下午 4 点; 而对于学生宿舍紫荆 1 号楼高峰出现在下午 2~5 点和晚上 11 点.

根据上述得到的访问用户地理聚集性和用户访问时间模式, 可以控制在合适的时间, 如流量访问低峰期, 将课程数据广播给对应地点的用户. 利用网络学堂的原始访问记录进行仿真计算. 在一般情形下, 流量节约率随时间持续增长, 直至最后基本保持稳定, 达到 68% 左右的节约率, 这意味着只需要原先流量的 32% 即可完成同样的传输任务, 从而带来显著的能效提升.

在最理想情况下, 如果能够准确预测出用户在未来一段时间的移动轨迹和用户访问文件的时间, 并假设同一文件的用户会聚集到一个地方, 则当访问同一文件的用户聚集到一起的时候, 再将文件推送给用户. 显然, 在此理想情况下, 所有文件都只需传输一次, 可以通过广播的方式推送给用户. 用户访问时间和地点都可以完全预测, 可得到流量节约率为 98%, 即系统能效最高能够提升 50 倍.

5 总结

信息是通信系统承载传递的对象, 由于信息源以及信息的发送与接收者之间内在属性的区别, 决定了通信网络所需传递的信息可以通过“用户”和“业务”两个维度进行刻画. 用户决定了对信息的需求, 包括信息的内容、信息传递的发生时刻和传递质量的主观要求等; 业务则是信息的具体表达形式, 业务体现了对信息内容的抽象, 涵盖对信息传递过程和传递质量的量化表示. 传统移动通信网络

是在语音通信需求的驱动下,进行服务机制与网络技术的设计与优化.随着信息社会的不断发展,用户产生了多种多样的信息需求,映射为各类不同的业务.在此基础上,软实时业务服务机制以移动用户的需求特征为导向,在对移动用户数据业务请求进行准确预测的基础上,动态调整数据内容的传输方式,实现对数据业务内容高效、精准的提前推送.这一机制打破了传统单一优化通信网络的思路,实现了计算资源、传输资源和存储资源的协同优化.与现有的CDN网络或其他类似技术相比,软实时业务服务机制更加适应移动互联网的新架构,也能够更深入地利用信息内容在生产、传播过程中的固有特征.其所提出的具有一定缓存、分析能力的智能接入节点,代表了从用户和实质信息内容角度对通信系统进行优化的思路,有可能对未来通信网络的新结构和服务方式的变革产生一定的影响.

参考文献

- 1 Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021. Cisco White Paper. [2017-1-7]. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- 2 Zhong X F, Zhao M, Zhou S D, et al. Content aware soft real time media broadcast (CASoRT). In: Proceedings of the 3rd International Conference on Communications and Networking in China, Hangzhou, 2008. 355–359
- 3 Sun J, Zhong X F, Zhou X, et al. Recommendation scheme based on converging properties for contents broadcasting. In: Proceedings of the 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Garden Grove, 2015. 1092–1097
- 4 Dong W, Zhong X F, Liu N J, et al. Location based content recommendation for CASoRT system. In: Proceedings of the IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, 2013. 2606–2610
- 5 Chen H Q, Zhong X F, Sun J, et al. Online prediction algorithm of the news' popularity for wireless cellular pushing. In: Proceedings of the IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Shenzhen, 2015. 1–5
- 6 Liu M L, Zhong X F, Fu X L, et al. User traffic prediction based on K neighbors collaborative filtering for CASoRT system. In: Proceedings of the IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Seoul, 2014. 1–5
- 7 Friedman J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annal Stat*, 2001, 29: 1189–1232
- 8 Xu J, Li H. Adarank: a boosting algorithm for information retrieval. In: Proceedings of the 30th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, New York, 2007. 391–398
- 9 Shalev-Shwartz S, Zhang T. Stochastic dual coordinate ascent methods for regularized loss. *J Mach Learn Res*, 2013, 14: 567–599
- 10 Gallardo J R, Makrakis D, Orozco Barbosa L. Use of alpha-stable self-similar stochastic processes for modeling traffic in broadband networks. *Perform Eval*, 1998, 40: 71–98
- 11 Tan Y, Fu X L, Zhong X F, et al. Distribution-based energy efficiency analysis of intelligent content service network. In: Proceedings of the IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Montreal, 2016. 1–5

Energy efficiency of soft real time service in hyper-cellular network with users' behavior prediction

Xiaofeng ZHONG^{1,2*}, Honggang ZHANG³, Shidong ZHOU^{1,2} & Jing WANG^{1,2}

1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China;

3. Department of Electronic Communication Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

* Corresponding author. E-mail: zhongxf@tsinghua.edu.cn

Abstract Many users require the same content, such as breaking news, newly released movies, and favorites videos. The same content is transmitted multiple times across wireless cellular network because current wireless network is designed to transmit data based on user requests, which exhausts wireless bandwidth and incurs high energy costs. This paper presents a soft real time service frame that is user-centric and content-aware. The frame broadcasts popular content to user equipment before users ask for it to achieve higher network energy efficiency and enhance quality of service. We propose a popularity prediction scheme, a target user group prediction scheme, a dynamic broadcast area calculation scheme, and a content pushing scheme. We build a system model to analyze key parameters in the service framework. As shown in simulations, the wireless network energy efficiency is improved 2 times with news contents in public cellular scenarios, and is improved 50 times with online study contents in campus cellular scenarios.

Keywords contents service, popularity prediction, user behaviors, energy efficiency, spectrum efficiency



and resource management optimization.

Xiaofeng ZHONG received his Ph.D. degree in information and communication systems from Tsinghua University in 2005. Since then, he has been an associate professor in the Department of Electronic Engineering of Tsinghua University. He research interests include mobile network, including user behavior and traffic model analysis, MAC and network protocol design,



Honggang ZHANG is a professor at Zhejiang University, China and was the international chair professor of excellence for the Universite Europeenne de Bretagne (UEB) & Supelec, France from 2012 to 2014. He is also an honorary visiting professor at the University of York, UK. His current research focus is on Green Communications.



Shidong ZHOU is a professor at Tsinghua University, China. He received a Ph.D. degree in Communication and Information Systems from Tsinghua University in 1998. His B.S. and M.S. degrees in Wireless Communications were received from Southeast University, Nanjing in 1991 and 1994, respectively. His research focuses on wireless and mobile communications.



Jing WANG received B.S. and M.S. degrees in electronic engineering from Tsinghua University, China in 1983 and 1986, respectively. He has been with the faculty at Tsinghua University since 1986. He is currently a professor at the School of Information Science and Technology. He serves as the vice director of the Tsinghua National Lab for Information Science and Technology. His research focuses on wireless communications, including transmission and networking technologies for 4G/5G networks.