

学校编码: 10384
学号: 23220141153335

分类号_____密级
UDC

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

4G 协议的通信能耗模型分析与优化

Modeling analysis and optimization of energy computation in
4G mobile communication

林云

指导教师姓名: 刘 瞰 东 教授
专 业 名 称: 系 统 工 程
论文提交日期: 2 0 1 7 年 月
论文答辩时间: 2 0 1 7 年 月
学位授予日期: 2 0 1 7 年 月

答辩委员会主席:

评 阅 人:

2017 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

第四代移动通信技术(4G)可提供高速的数据传输能力, 大大推动以智能手机为代表的移动终端应用。但由于 4G 协议的通信能效较低, 给智能手机的续航能力带来挑战, 并成为移动应用发展的阻碍。因此, 通过提供准确的通信能耗分析, 提出可行的能耗优化方案, 对改善 4G 网络通信能效具有重大意义。本论文设计了一种基于 RRC 状态机的能耗估测模型, 能够有效地分析 4G 网络数据传输的能量使用状况。通过比较 4G 与 3G 和 WIFI 网络的传输能耗差异, 分析能耗估测模型测量结果, 设计了提高 4G 协议的通信能效的方案。主要工作包括:

(1) 介绍 4G 协议中数据传输的能耗问题的相关研究工作, 对现有的能耗优化策略进行分类, 并讨论它们的优势和不足。

(2) 设计基于 RRC 状态机的 4G 通信能耗估测模型。针对 4G 数据的具体传输过程, 以 RRC 状态机为基础, 获取各个传输状态的能量消耗。

(3) 在开源的 Android 平台上, 实现基于本论文 4G 通信能耗估测模型的测量工具。针对多个应用在多种网络环境下进行通信能耗测量的对比实验, 比较 4G 与 3G 和 WFI 网络的通信能量消耗过程及其能效。

(4) 分析 4G 网络的通信能量消耗过程, 发现 4G 协议中的关键时间参数(例如 DRX 循环周期、非活动计时器等)对通信能效的重大影响, 并由此提出 2 种可行的能效优化方案。

本论文建立了基于 RRC 状态机的 4G 通信能耗估测模型, 并在 Android 智能手机上进行充分的验证。实验表明, 本论文的能耗估测模型准确率最高达到 93%, 可获得详细得能量消耗过程; 所提出的 2 个能效优化方案均可以降低移动终端在 4G 网络下的通信能耗。

关键词: 4G 协议; 智能手机; 通信能耗估测模型; RRC 状态机; 能效优化

Abstract

The fourth-generation mobile communication technology (4G) provides high speed data transmission capabilities which promote the development of mobile devices such as smartphones. However, the low energy efficiency of 4G communication often results in a short battery life of smartphone which hinders the development of mobile applications. It is important to analyze the energy consumption of 4G communication and propose feasible optimization schemes to improve the energy efficiency of 4G networks. This thesis designs an energy estimation model of smartphone based on the RRC state machine to elaborate the energy consumption process of 4G communication. Moreover, we compare the energy consumption of 4G, 3G and WIFI by experiments, and propose a feasible scheme to save the energy consumption of 4G communication inspired by experimental results. Our contributions are summarized as following.

(1) Introduce the related works about the energy consumption and optimization schemes of 4G network communication.

(2) Propose an energy estimation model for 4G communication based on the RRC state machine, which obtains the energy consumption in transmission states.

(3) Based on the Android platform, we carry out experiments on various customized and open-source applications and analyze their energy consumption using the energy estimation model under 4G environment.

(4) Find the key time parameters of in 4G protocol which have great impact on the energy consumption of 4G communication, such as DRX cycle, inactive timer, etc. Then this thesis raises two feasible schemes to improve 4G energy efficiency.

Our energy estimation model of 4G communication based on RRC state machine has been validated by a series experiments. Experimental results have shown that this model accurately estimates the energy consumption process of 4G communication, whose accuracy rate is up to 93%. And two proposed optimization schemes of energy consumption effectively reduce the energy consumption of Android smartphone under 4G communication environments.

Keywords: 4G Protocol; Smartphone; Energy Estimation Model; RRC State Machine; Energy Optimization

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 相关技术背景	2
1.2.1 移动通信技术发展.....	2
1.2.2 4G 协议的通信机制.....	4
1.3 国内外研究现状.....	5
1.4 研究内容与目标.....	9
1.5 论文结构	10
第二章 4G 通信能耗估测模型.....	11
2.1 RRC 状态机转换机制.....	11
2.2 RRC 状态机时间参数.....	13
2.3 4G 通信能耗估测模型的设计.....	15
2.3.1 流量捕获模块	15
2.3.2 能耗计算模块	16
2.4 准确性验证	21
2.4.1 实验平台.....	21
2.4.2 准确性分析.....	22
第三章 4G 通信能耗分析.....	27
3.1 4G、3G 和 WIFI 的能耗效率比较.....	27
3.1.1 能耗比率.....	27
3.1.2 批量数据传输能耗.....	28
3.1.3 典型应用能耗	30
3.1.4 能耗组成分析	31
3.2 LTE 时间参数的影响	32

3.2.1 尾计时器 (T_{tail}) 的影响	33
3.2.2 DRX 静止计时器 (T_i) 的影响	35
3.2.3 Short DRX 周期计时器 (T_{is}) 的影响	35
3.2.4 RRC_IDLE DRX 周期 (T_{pi}) 的影响	36
3.2.5 RRC 状态转换时延的影响.....	37
第四章 4G 通信能耗优化方案.....	39
4.1 基于代理的分块传输方案.....	39
4.2 基于 LTE 时间参数的能耗优化方案	42
4.2.1 快速休眠.....	42
4.2.2 动态计时器	43
第五章 总结和展望	45
5.1 论文总结	45
5.2 未来展望	46
参考文献.....	49
硕士在读期间的工作	53
致谢.....	54

Content

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Research Background	1
1.2 Related Works	2
1.2.1 Development of Mobile Communication Techonology	2
1.2.2 4G Data Transfer Mechanism	4
1.3 Research Status	5
1.4 Research Contents.....	9
1.5 Main Contents of This Paper	10
Chapter 2 4G Energy Consumption Model.....	11
2.1 RRC State Machine in 4G	11
2.2 Time parameters in RRC	13
2.3 Design of 4G Energy Consumption Model	15
2.3.1 Traffic Model.....	15
2.3.2 Energy Model	16
2.4 Validation	21
2.4.1 Testbed	21
2.4.2 Analysis of Experiments.....	22
Chapter 3 Energy Consumption Analysis of 4G	27
3.1 Energy Efficiency Comparison.....	27
3.1.1 Energy Ratio	27
3.1.2 Batch Data Transmission Energy Consumption	28
3.1.3 Energy Consumption in Typical Applications	30
3.1.4 BreakDown of Energy Consumption.....	31
3.2 Impact of LTE Parameters.....	32
3.2.1 Impact of T_{tail}	33
3.2.2 Impact of DRX Inactivity Timer T_i	35
3.2.3 Impact of Short DRX Cycle T_{is}	35

3.2.4 Impact of DRX Cycle in RRC_Connected.....	36
3.2.5 Impact of State Promotion	37
Chapter 4 Optimization of 4G Energy Consumption	39
4.1 Block Transfer	39
4.2 Shaped LTE Time Parameters	42
4.2.1 Fast Dormancy.....	42
4.2.2 Dynamic Timer	43
Chapter 5 Conclusion and Future Work.....	45
5.1 Conclusion	45
5.2 Future Work.....	46
Reference.....	49
Paper Published During Master Study Period.....	53
Acknowledgment.....	54

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

由于移动通信网络环境的持续改善和硬件技术的不断创新，智能移动终端产业发展迅速（例如平板电脑、智能手机和计算机手表），用户数量剧增。其中，智能手机的发展尤为引人注目。从 2007 年美国苹果公司推出首款苹果智能手机（iPhone）开始，智能手机逐渐成为人们生活工作的重要工具，普及程度越来越高^{[1][2]}。Android、IOS 和 WinPhone 等手机操作系统（operating system, OS）纷纷涌入市场。同时，移动终端应用的繁荣给智能手机的续航能力带来新的挑战，即人们日益增长的应用需求与手机电池能耗效率过低之间的矛盾。充电宝和手机快充等辅助工具能暂时缓解这个矛盾，但大大降低了用户的使用体验，阻碍了智能手机及其应用的进一步推广。

同时，4G 通信网络为移动终端提供更快的数据传输速度和更先进的网络支持。其理论上行带宽达到 50Mbps，下行带宽达到 100Mbps，成为推动移动终端发展的强大动力。虽然 4G 网络能够让手机用户以更快的速度接入互联网，提升用户体验，但是其过多的通信能耗，也缩短了手机电池的使用时间。例如，Pathak^[3]等人研究发现，在常用的网络应用（如谷歌浏览器、谷歌地图和手机游戏）中，4G 通信过程中的能量消耗占据了智能手机总能耗很大一部分，最高达到 40%。

近年来，手机能耗问题日益严峻，但由于手机电池技术门槛高、研发周期长，其更新换代的速度远赶不上手机配置的飞快发展，硬件升级面临瓶颈。因此，从软件方面着手，通过提高 4G 协议的通信能耗效率，有效地延长手机使用时间是当前手机能耗研究的重点。在以往的工作中^[43-48]，国内外研究者都对 4G 协议的通信能耗问题进行了研究。例如，Zhou 等人^[43]将研究重点放在无线网络基础设施的改良上。他们在文中提出了两种方案，包括分布和集中式动态调度算法，通过在网络资源紧张时适当的关闭或开启某些基站，来节约能耗。实验结果显示，算法能够在能源节约和网络覆盖率之间取得良好的平衡，成功节约了设备能耗。除此之外，通过改良 4G 网络的通信协议来节约能耗也是当前研究热点。Huang 等人^[45]深入研究了 TCP 通信协议对 4G 通信能耗的影响，并提出了动态接收窗口调整算法。实验显示，所提出的

算法能够在保证吞吐量的前提下，有效提高 4G 通信效率，节约设备能耗。通过这些工作，人们开始对 4G 协议通信过程中的能量消耗有了更加清晰的认识，相应的优化方案也不断涌现。目前的 4G 协议通信能耗研究工作中，对通信能耗的测量大多使用硬件测量工具，相关的优化方案也多集中在基础设施和硬件设备的改良上。但是，这种方法成本高昂、耗时耗力，实用性较低。如何寻找简便、高效的 4G 通信能耗问题研究方法，成为时下的研究热点。

4G 协议的通信能耗问题日益突出，关于通信能耗的模型研究尚未成熟。因此，本论文以 4G 通信能耗估测模型为基础，对 4G 协议通信过程中的能耗问题进行研究。文中设计了基于 RRC 状态机的 4G 通信能耗估测模型，其准确率最高达到 93%。同时，实验中以市场占有率最高的开源 Android 系统为平台，搭建测试环境，比较 4G、3G 和 WIFI 网络的通信能耗，分析了 4G 通信协议在数据传输过程中的能耗效率和特征。实验结果揭示了造成 4G 协议通信高能耗的主要原因。针对这些原因，文章提出了可行的 4G 协议的通信能耗优化方案，为将来的 4G 网络节能优化策略提供有价值的参考，对解决智能手机能耗问题有重要的理论意义和应用价值。

1.2 相关技术背景

1.2.1 移动通信技术发展

近年来，世界电信行业发生了巨大的变化，移动通信技术迅速发展，使用户彻底摆脱终端设备的束缚，实现完整的个人移动性、可靠的数据传输手段和接收方式。自移动通信技术诞生以来，移动设备从一个简单的双向寻呼机发展成为 GPS 导航设备、嵌入式浏览器和即时消息客户端甚至手持游戏机。许多专家认为，计算机技术的未来取决于无线网络的移动计算的发展。

自 20 世纪 90 年代中期以来，蜂窝通信行业出现了爆炸式增长，无线通信网络以极快的速度在世界范围内普及开来。移动通信网络的第一次快速发展源于 20 世纪 90 年代中期，世界各国政府加强了新的无线电频谱的竞争，并鼓励发展个人通信服务（PCS）。第二次突破则在蜂窝概念的提出之后，各种移动通信技术迅速发展。其中，第一代通信网络技术（1G）是首个尝试者，它在 19 世纪 80 年代提出的模拟电信标准一直被延用到 2G 数字电信时代。2G 是第二代通信网络技术，它使用数字调制格

式和 TDMA/FDD 和 CDMA/FDD 多址技术。2G 网络在很长一段时间内是最流行和常用的蜂窝通信标准，但它无法传输复杂的多媒体信息如视频，邮件等，这成为 2G 进一步发展的阻碍。在 1G 和 2G 时代，由于其新颖的移动通信功能给用户带来了极大的冲击，人们更多地将注意力放在如何提高通信速度和传输质量上，并没有考虑 1G 和 2G 网络通信过程中存在的能量浪费现象。此时，关于无线通信网络数据传输能耗效率的研究还很少。

1G 和 2G 通信网络技术作为移动通信的先驱者，给移动终端设备的用户带来了新奇特别的体验。接下来诞生的第三代通信网络技术（3G），则推动了智能手机市场的进一步繁荣。不同于 2G，3G 致力于提升多媒体服务和互联网数据传输速率。它提供了一套符合国际移动通信-2000（IMT-2000）规范的用于移动、网络和电信设备的通信标准，为无线语音电话、移动应用、互联网接入、固定无线上网、视频通话和移动电视等领域提供可靠的网络支持。随着 3G 网络的普及，越来越多的手机应用在移动网络环境下进行数据交互，3G 网络的数据传输能耗问题渐渐凸显。为了最大化地利用有限的网络资源，3G 网络采用无线资源控制（RRC）协议来合理调配网络资源，提高资源的有效利用率。但是，RRC 协议需要智能手机在数据传输过程中频繁进行各种状态间的切换，产生额外的状态迁移能耗。例如，当手机接收到数据发送请求时，它需要从低耗能模式切换到高耗能模式。当数据传输结束时，它又要从高耗能模式切换回低耗能模式。数据传输过程中这种频繁的状态切换，造成手机电池的额外能量消耗，缩短了手机续航时间。从这个时候开始，研究者开始重视 3G 智能手机的能耗问题，纷纷投入到 3G 网络数据传输能耗及其优化的研究中。

第四代网络通信技术（4G）是 3G 标准的继承者。它舍弃了 3G 网络的扩频无线电技术，使用 OFDMA 多载波传输和其他频率域替代均衡（FDE）方案，提供了非常高的比特传输速率，其最大静态传输速率达到 1Gbps。不仅如此，相较其他蜂窝网络 4G 网络支持多种 QoS、拥有更高的数据吞吐量、更低的建设、运行维护成本和更低时延、更高的数据安全性。目前 4G 网络主要应用于移动网络访问，IP 电话，游戏服务，高清晰度移动电视，视频会议和 3D 电视等应用。凭借其高于其它蜂窝服务的数据传输速率（宽带和 Wi-Fi 连接除外），4G 蜂窝网络受到越来越多移动设备厂商的青睐。IBM 数据显示，67%移动通信运营商正考虑使用 4G。近年来，Android 和

Windows Phone 系统也纷纷宣布支持 4G 蜂窝网络。可见，4G 蜂窝网有着良好的数据传输性能和应用前景。但在 4G 发展的同时，研究者发现 4G 协议中存在通信能耗浪费现象。据信息通信技术发布的报道称，全球 9% 的碳排放来自于移动通信，而其中 4G 协议的通信能耗占移动通信总能耗的 70%^[4]。因此，在享受 4G 提供的快速网络接入时，如何减少 4G 的通信能耗成为热门的研究课题。

1.2.2 4G 协议的通信机制

随着 4G 技术的发展，智能手机数据交互越来越频繁，音频、视频和文件等大量数据在手机之间传递。智能手机的数据交互具有分块化和频繁性的特点，其平均数据交互次数达到每小时 60-110 次^[5]。这种特性使得数据在传输过程中并非是连续发送的，每个数据包完成传输之后，手机网络端口都会经历一段等待时间。在这段时间中，手机依然保持工作状态，持续消耗能量。智能手机数据传输过程中的分块化和频繁性的特点，使得网络端口并不总是处于工作状态，有效工作效率降低，手机能量被白白消耗。

除了手机数据传输分块化和频繁性的特点，4G 协议的通信机制也不同于固定网络。如图 1.1 所示，以手机间文件传输为例，数据在 4G 协议的传输过程中经历了 4 个过程。首先，文件从用户 1 的手机通过 4G 网络上传到 4G 基站（eNB），然后通过基站相继转发到 SGW 和 PDN-GW（SGW 和 PDN-GW 是 4G 核心网的两个网元，负责路由和转发用户产生的 IP 数据包）。然后它通过 PDN-GW 进入互联网，经过多级路由交换之后再次通过 PDN-GW 和 SGW 传到目标手机所在的 4G 基站，最后下载到用户 2 的手机中。由此可见，智能手机在数据传输过程中需要经历多个阶段，其间的能量消耗不容小觑，对于手机续航存在较大影响。

因此，对智能手机数据传输过程中的 4G 协议的通信方式进行研究和优化，不仅可以提高网络利用率，更可以有效降低手机能耗。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库