

基于硬件使用率和延时功耗的智能手机功耗模型*

苏静芳^{1,2}, 吕勇强², 李兴华¹, 奉飞飞³

¹(西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071)

²(清华大学 信息技术研究院, 北京 100084)

³(闪联信息技术工程中心有限公司, 北京 100089)

通讯作者: 吕勇强, E-mail: luyq@tsinghua.edu.cn

摘要: 理解和优化智能手机的功耗已成为一个重要的研究领域, 软件和硬件开发人员均需要一个动态的功耗评估工具来指导功耗优化, 从而开发低功耗的应用程序和构建省电的系统. 现有的工作已经提出多种功耗模型来评估功耗, 但这些模型缺乏细化粒度和精确度. 提出基于硬件使用率和延时功耗的智能手机功耗模型, 细化了模型的硬件组件, 加入了延时功耗, 能够更加精确地评估实时功耗. 该模型基于非线性回归结构, 通过模块化目标设备的各个系统变量来确定模型, 然后通过功耗测试用例测试进行模型辨识, 确定各个功耗相关系数, 最终将评估功耗与功耗测量设备实测数据进行对比. 实验结果表明, 在常用场景下, 模型的平均绝对误差均小于 4.6%, 明显提高了模型精度.

关键词: 智能手机; 硬件使用率; 延时功耗; 功耗模型

中文引用格式: 苏静芳, 吕勇强, 李兴华, 奉飞飞. 基于硬件使用率和延时功耗的智能手机功耗模型. 软件学报, 2015, 26(Suppl. (2)): 189-197. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15029.htm>

英文引用格式: Su JF, Lü YQ, Li XH, Feng FF. Power model for smartphones considering hardware utilization and power delay. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015, 26(Suppl. (2)): 189-197 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15029.htm>

Power Model for Smartphones Considering Hardware Utilization and Power Delay

SU Jing-Fang¹, LÜ Yong-Qiang², LI Xing-Hua¹, FENG Fei-Fei³

¹(School of Computer Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

²(School of Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

³(IGRS Information Technology Engineering Center Co. Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: Understanding and optimizing the power consumption of smartphones has become an important research topic. It is necessary to have a dynamic power estimation tool for hardware and software developers so that they can develop energy-efficient applications and construct energy-efficient smartphone systems. Previous work has proposed various power models for estimating the power consumption. However, these models lack granularity and accuracy. In this paper, a power model for smartphones considering hardware utilization and power delay is proposed. The model makes each hardware component more fine-grained and includes the power delay. Therefore, it can more accurately estimate the real-time power consumption. The model is based on a nonlinear regression structure. First, the model is determined by making each system variable modular from the target device. Then, the specified model is identified by test cases and the final coefficients concerning the power consumption are confirmed. Finally, the estimated power is compared with the actual power measured. Experimental results demonstrate that the average absolute error of power model is less than 4.6% in common scenarios, which obviously improves the accuracy of evaluation.

Key words: smartphone; hardware utilization; delay power; power model

随着移动终端市场持续、快速的发展, 移动产品越来越受欢迎, 其丰富的功能为用户娱乐、通信等提供了

* 基金项目: 国家自然科学基金(61201357); 国家核高基重大专项(2012ZX01039-004); 国家科技支撑计划(2012BAH25B02)

收稿时间: 2014-06-20; 定稿时间: 2014-08-20

更加全面的服务,移动社交已成为很多人生活中不可或缺的一部分.然而,当前主流的移动产品均为电池驱动,其使用时间严格受电池寿命的限制.对于硬件和软件开发人员来说,理解和优化移动设备的功耗,分析每个进程和硬件组件的功耗越来越重要,这就需要功耗评估工具来实现,从而指导应用程序和系统的优化,开发低功耗的应用程序和构建省电的系统.

针对移动终端设备,研究学者已将功耗评估和优化作为一个重要的研究领域.现有的工作已经提出多种功耗模型^[1-5]来评估移动设备的功耗,但是,随着技术的不断进步,硬件组件驱动程序中的功耗优化逻辑更加复杂,系统层面的功耗调度更加完善,简单依靠硬件组件的使用率信息来刻画移动设备的功耗显然不够完善和精确.就智能手机而言,基于使用率的功耗评估模型^[3]利用易获取的应用层硬件组件参数作为输入,涉及的硬件模块不够全面,并不符合当前主流设备.另外,通过对多款手机 WiFi、3G 场景启用时的多次测量,我们发现智能手机 WiFi、3G 等无线通信模块存在延时功耗.为了明显地看出延时功耗的存在及其变化趋势,我们以 WiFi 工作 25s 为例来说明,如图 1 所示.当 WiFi 开启时,手机功耗状态没有立即达到 WiFi 使用过程中的平均功耗,明显经过逐渐上升的过程才达到平均功耗,时间大约为 4s;WiFi 关闭后,手机的功耗状态没有立刻降到 WiFi 开启之前的水平,大约 3s 后才缓慢降到初始的功耗状态.测试分析表明,在 WiFi 工作的 25s 内,延时功耗对整体功耗的影响高达 19.2%,对单个硬件组件的影响显而易见.因此,多个硬件组件的延时功耗累加,明显地增加了智能手机整体功耗,要深入、透彻地研究智能手机功耗模型,延时功耗这一影响因素不容忽视,必须加入功耗评估模型中.

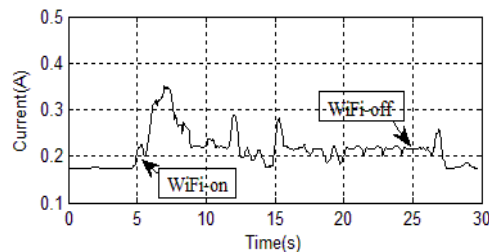


Fig.1 The delay power of WiFi

图 1 WiFi 延时功耗示意图

本文中,我们提出智能手机动态功耗评估模型,该模型将基于使用率的线性回归模型和延时功耗模型相结合,实现实时功耗评估,很大程度上提高了模型的精确度.我们开发了一个数据收集程序,集成各个硬件组件对应的压力测试场景,例如屏幕亮度值的改变,实现自动化场景测试.程序执行的过程中,收集相应硬件组件状态变化的参数,选择有代表性的参数作为模型的输入.借助于外接恒压电源,电脑端与其配套的软件记录智能手机相应的实时功耗值,作为模型的输出.通过当前主流的智能机验证,我们的功耗模型明显提高了评估精度,体现了更高的实用价值.

本文的主要贡献包括以下 3 个方面:(1) 将 Flash、Camera、Bluetooth 硬件组件加入到手机功耗模型中,完善了已有的基于硬件使用率的功耗模型.(2) 首次提出硬件组件的延时功耗,并建立了相应的延时功耗模型,提高了单个硬件模块的功耗评估精度.(3) 该模型细化了各个硬件模块,提高了整体模型的精确度,通过最新 Android 移动平台验证得出,常用场景下该模型的绝对误差小于 4.6%.

本文第 1 节总结现有的研究成果及其不足.第 2 节介绍功耗建模的主要影响因素,建立功耗评估模型.第 3 节详细描述实验平台,验证功耗评估模型.最后,总结研究成果.

1 相关工作

智能手机功耗建模是一个重要的研究课题.研究人员已经提出多种多样的模型来评估智能手机的功耗,目前,建立智能手机功耗模型主要分为离线^[3]和在线^[4-6]两种方法.Zhong^[4]提出 Sesame,一种利用内置电流传感器建立的自动化智能手机功耗模型,集中于整体系统功耗而不是单个硬件组件的功耗分析,对于评估单个应用程序的功耗并不适用.PowerTutor^[5]、PowerProf^[6]和 Eprof^[7]均支持应用程序能耗评估.PowerTutor^[5]是利用功耗传

感器和电池放电行为知识建立的一种功耗模型生成工具,但是该方法是不精确的,且需要修改 Android 系统软件和组件内核,例如 GPS 和 Audio.PowerProf^[6]是一种无人监督的功耗分析方案,可以实现在线功耗评估,但该技术很大程度上依赖于程序员的意图,在应用程序能耗计量方面作用不大.Eprof^[7]是一种细粒度的能耗分析方法,基于有限状态机(FSM)功耗模型^[8],可以分析应用程序的异步能耗状态,模块化硬件组件的尾功耗特性,实现能耗计量,但需要修改 Android 框架来跟踪 API 调用,如果使用 Android 开发包,应用程序代码也需要修改,造成额外开销.AppScope^[9]是利用内核活动监控建立的一种应用程序能耗计量框架,可以实现在线功耗评估,但其没有考虑 WiFi、GPS 等硬件组件产生的尾功耗的影响。

针对单个硬件组件功耗分析,基于使用率的功耗模型^[3,5,10]建立在操作系统 API 为每个硬件组件提供利用率信息的基础上,该类模型假设某个硬件使用率的改变会导致该硬件设备的状态甚至系统总体功耗状态的改变.研究人员开发数据采集程序,周期性地记录 CPU^[11]、内存^[12]、磁盘^[13]等硬件设备的使用率,借助外接在智能手机上的恒压电源获取设备的实时功耗,最后将智能手机的实时功耗和硬件使用率数据输入统计分析软件,通过多组数据的训练,建立起硬件使用率和智能手机总体功耗之间的函数关系^[3]。

Pathak^[8]等人发现,基于使用率的功耗模型有如下限制:(1) 并非所有的硬件设备都存在可量化的使用率,比如智能手机上的 GPS 设备、摄像头设备,这种类型的设备不会接收发送数据,只是简单地改变自身状态(打开、关闭设备);(2) 智能手机上的网络设备存在“尾功耗”^[14]现象,“尾功耗”是指硬件设备关闭之后,智能手机电源模块对该设备的供电依然保持延时的高电平效应,不能立刻降低;(3) 不是所有硬件设备使用率的变化都会导致硬件设备状态的改变.因此,Pathak 提出一种基于系统调用的有限状态机 FSM(finite state machine)模型.该 FSM 模型克服了基于使用率方法的限制,实现了细粒度的智能手机功耗模型.但是,深入研究和测量时需要获取详细的功耗状态的优先级,且尾功耗部分只采用了简单的平均值近似法估算,在当前硬件总体功耗水平逐步降低、用户使用行为多变的情形下,该方法的误差较为明显。

2 功耗评估模型

本节中,我们讨论本文提出的基于硬件使用率和延时功耗的智能手机动态功耗评估模型.首先,选择与功耗相关的硬件组件系统变量;其次,我们列出单个硬件组件和系统整体的功耗评估模型。

2.1 选取系统变量

通过静态分析智能手机操作系统的电源管理模块源码,我们提取与功耗相关的各个硬件组件系统变量.为了决定需要考虑哪些组件和与其对应的系统变量,我们对每个硬件组件进行以下实验.首先,保持电压和所有其他组件的活动状态是不变的;其次,对于被测试的硬件组件设计相应的功耗测试用例,遍历其相关系统变量的所有值,例如,设置 CPU 使用率从 0~100%逐渐增加.基于这些初步实验,我们排除对系统功耗影响较小的硬件组件,例如 SD 卡,选出对系统功耗具有显著影响的硬件组件,包括组件对应的系统变量作为模型的输入。

下面列出各硬件组件以及被选择的系统变量。

- 1) CPU:CPU 功耗主要由其使用率(util)决定。
- 2) Screen:屏幕亮度(brightness)变化决定了其功耗,我们设置亮度间隔为 5,均匀变化。
- 3) Memory:内存功耗依赖于其使用率(util)。
- 4) Flash:闪存功耗由两个系统变量决定,分别为读取速度(readSpeed)和写入速度(writeSpeed)。
- 5) WiFi:衡量 WiFi 功耗主要依赖于以下 4 个系统变量:连接速率(wifi_On)、信号强度(wifi_Rssi)、连接速度(linkSpeed)和数据流量(wifi_Traffic)。
- 6) Phone:通话模块的功耗主要由通话状态(callState)和通话时的信号强度(call_Rssi)决定。
- 7) 3G:当前 3G 上网较为活跃,其功耗主要依赖于以下 3 个变量:开启状态(3G_on)、GSM 信号强度(3G_Rssi)和数据流量(3G_Traffic)。
- 8) Audio:在播放音乐的过程中,音频模块的功耗主要体现在是否外放(headset)和音量大小(volume)上。
- 9) Camera:相机的工作状态(camera_On)决定了其功耗。

- 10) GPS:GPS 功耗决定于其工作状态(GPS_On).
- 11) Bluetooth:蓝牙的功耗取决于其是否开启(blue_On).

2.2 建立功耗模型

为了建立整体的功耗评估模型,提高模块细化粒度以及精确度,我们分以下步骤来完成.首先,基于单个硬件组件的状态变化建立线性回归模型,整体的思想是控制单一变量法,尽可能地减少外界和系统自身的噪音干扰,找出采集的系统变量和功耗之间的线性关系.然后,针对具有延时功耗现象的硬件组件,建立相应的非线性延时功耗模型.结合上述两部分,我们建立了一个高度精确的智能手机功耗评估模型.

一部智能手机的功耗 P 如表达式(1)所示.

$$P = P_{base} + \sum_i \sum_k (c_{i,k} \times \alpha_{i,k}) + \sum_i P_{i_delay} \tag{1}$$

其中, P_{Base} 表示设备处于活动状态时的基础功耗. $\alpha_{i,k}$ 表示某一时刻硬件组件 i 的第 k 个系统变量对应的值,例如某时刻 CPU 的使用率. $c_{i,k}$ 表示硬件组件 i 的第 k 个系统变量的功耗相关系数. P_{i_delay} 表示硬件组件 i 产生的延时功耗.

2.2.1 线性模型

基于各个硬件组件所选的系统变量,通过自主开发的自动化场景测试工具,将采集的系统变量作为输入,对实时功耗作为输出,经过训练得出功耗相关系数 c ,建立相应的线性模型,从而进行单个硬件组件的功耗评估.对于硬件组件 i ,功耗 P_i 如表达式(2)所示.

$$P_i = c_{i,0} \times \alpha_{i,0} + \dots + c_{i,m} \times \alpha_{i,m} \tag{2}$$

其中, m 表示该硬件组件的系统变量个数.

智能手机与功耗相关的所有组件的线性模型整体功耗 P_{line} 如表达式(3)所示.

$$P_{line} = \begin{bmatrix} \alpha_{0,0} & \dots & \alpha_{0,m} \\ \alpha_{1,0} & \dots & \alpha_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n,0} & \dots & \alpha_{n,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{0,0} & \dots & c_{n,0} \\ c_{0,1} & \dots & c_{n,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{0,m} & \dots & c_{n,m} \end{bmatrix} \tag{3}$$

令 $X = \begin{bmatrix} \alpha_{0,0} & \dots & \alpha_{0,m} \\ \alpha_{1,0} & \dots & \alpha_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n,0} & \dots & \alpha_{n,m} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_{0,0} & \dots & c_{n,0} \\ c_{0,1} & \dots & c_{n,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{0,m} & \dots & c_{n,m} \end{bmatrix}$, 则功耗可表示成公式(4).

$$P_{line} = X \cdot C \tag{4}$$

表达式(3)中, n 表示当前计算整体功耗时涉及的硬件组件的个数, m 表示单个硬件组件包括的系统变量个数.表达式(4)中, X 表示由系统变量组成的矩阵, C 表示由线性模型功耗相关系数组成的矩阵.

表 1 中列出了各个系统变量对应的取值范围,硬件组件的工作状态用 0 表示关闭,1 表示开启.

Table 1 The range of each system variable

表 1 各个系统变量取值范围

硬件组件	系统变量(system variable)	范围	硬件组件	系统变量(system variable)	范围
CPU	util	[0,100]	Screen	brightness	[0,255]
Memory	util	[0,100]	Flash	readSpeed	[0,∞]
				writeSpeed	[0,∞]
WiFi	wifi_On	0,1	3G	3G_On	0,1
	wifi_Rssi	[-99,0]		3G_Traffic	[0,∞]
	linkSpeed	[0,12]		3G_Rssi	[0,31]
Phone	wifi_Traffic	[0,∞]	Audio	headset	0,1
	callState	[0,2]		volume	[0,13]
Camera	call_Rssi	[-299,0]	Bluetooth	blue_On	0,1
GPS	camera_On	0,1	System	System_On	0,1
	GPS_On	0,1			

2.2.2 延时功耗模型

据我们所知,本文中首次提出延时功耗,并将其补充到功耗模型中,改进了模型评估的精度.不同的硬件组件,其延时功耗持续时间不同,但持续时间均较短.无线通信模块开启和关闭时均存在功耗延迟现象,其变化趋势如图 2 所示,绿线和蓝线分别表示某个硬件组件开启和关闭时的延时功耗.

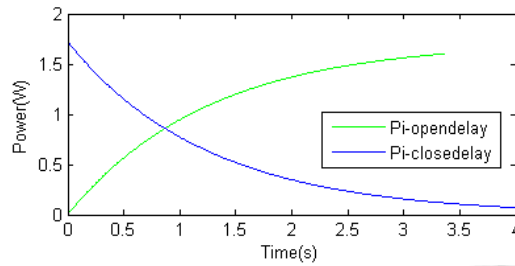


Fig.2 The change trends of delay power

图 2 延时功耗变化趋势

硬件组件开启时的延时功耗模型如公式(5)所示.

$$P_{i_opendelay} = P_i \cdot (1 - e^{-\tau t}), t \geq 0 \tag{5}$$

硬件关闭时的延时功耗模型如公式(6)所示.

$$P_{i_closedelay} = P_i \cdot e^{-\tau t}, t \geq 0 \tag{6}$$

其中, P_i 表示硬件组件 i 工作过程中实时功耗的平均值. τ 表示延时功耗的相关系数,由智能手机的硬件参数决定,与手机电池电压、负载以及频率成一定的比例关系.自变量 t 即延迟时间,一般在 3s~5s 内.整体延时功耗如表达式(7)所示.

$$P_{i_delay} = P_{i_opendelay} + P_{i_closedelay} \tag{7}$$

对于一部智能手机而言,其整体能耗 E 如表达式(8)所示.

$$E = P_{base} \cdot D + \sum_j E^j + \sum_j E_{delay}^j \tag{8}$$

其中,

$$E^j = \sum_i (\sum_k (\alpha'_{i,k} \times c'_{i,k})) \times d_i^j \tag{9}$$

$$E_{delay}^j = \sum_i (P_{i_delay}^j \times t_{i_delay}^j) \tag{10}$$

公式(8)中 D 表示设备的整个活动时间.表达式(9)中, E^j 表示用户活动过程 j 产生的能耗,用各个硬件组件相应的功耗乘以组件的工作时间来表示,其中, $\alpha'_{i,k}$ 、 $c'_{i,k}$ 和 d_i^j 分别表示用户活动过程 j 所涉及的硬件组件 i 的系统变量值、功耗相关系数和活动时间.公式(10)中, E_{delay}^j 表示过程 j 中延时所产生的能耗, $P_{i_delay}^j$ 和 $t_{i_delay}^j$ 分别表示用户活动过程 j 涉及的硬件组件 i 产生的延时功耗和延迟时间.

3 模型验证

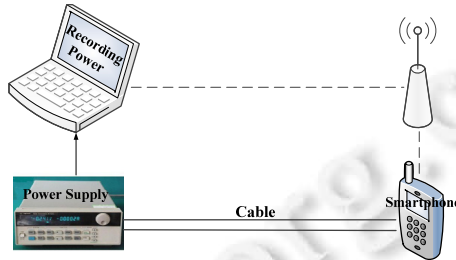
3.1 实验设置

为了精确获取智能手机的实时功耗情况,选取联想 S920 智能手机作为目标设备.目标设备搭载 Android 4.0 操作系统,电池拆卸方便,能够十分便捷地接入第三方电源,目标设备的具体情况见表 2.选取安捷伦 66 319B 恒压电源作为目标设备的外接电源,该设备能够以 4.0V 的恒定电压持续为目标设备供电,同时能够将供电信息保存在与恒压电源连接的 PC 端.

模型数据采集的整体系统框架如图 3 所示,通过安捷伦恒压电源 66 319B 的 GPIB 接口与计算机连接,在 PC 端运行与恒压电源配套的数据记录软件,获取实时功耗.恒压电源通过电缆给手机供电,手机端运行自主研发的功耗变量数据采集程序,将采集的系统变量存储在本地 SD 卡中.

Table 2 The smartphone hardware parameters**表 2** 智能手机硬件参数

智能手机型号	联想 S920
CPU	联发科 MT6589 1228MHz 四核
内存	4GB ROM+1GB RAM
屏幕	5.3 寸 电容触摸屏
网络模式	支持 WCDMA、GSM、WiFi 带宽:3G WCDMA 2100MHz, 2G GSM 900/1800/1900
电池容量	2 250mAh

**Fig.3** The framework of data acquisition**图 3** 数据采集的系统框架

我们主要采集两类数据,一类用于训练得出功耗相关系数,这需要大量的测试数据.另一类是用户实际使用场景采集的系统变量和对应功耗,用于验证功耗评估模型.模型拟合过程为:将智能手机的硬件组件系统变量作为输入,对应的实时功耗作为输出,导入统计分析软件 SPSS 中,拟合得到目标设备的功耗相关系数 c 和延时功耗系数 τ .表 3 列出了目标设备的所有功耗相关系数.

Table 3 The coefficients concerning power consumption**表 3** 功耗相关系数

硬件组件	系统变量	系数 c (mW)	系数 τ	硬件组件	系统变量	系数 c (mW)	系数 τ
CPU	util	10.624	N.A	Phone	callState	502.0	N.A
Screen	brightness	3.00	N.A		call_Rssi	60.0	
Memory	util	0.104	N.A	Audio	headset	44.0	N.A
Flash	readSpeed	0.008 4	N.A		volume	6.98	
	writeSpeed	0.014		3G	3G_On	765.6	1.933
WiFi	wifi_On	95.44	3G_Traffic		17.56/byte		
	wifi_Rssi	0.08	3G_Rssi		2.0		
	linkSpeed	848.0	0.195 8	GPS	GPS On	6.0	0.137 4
Camera	wifi_Traffic	0.06/byte	0.796 7	Bluetooth	blue On	123.6	0.189 4
	camera_On	1 478.8		System	System On	477.16	N.A

3.2 精确度分析

首先,对目标手机联想 S920 在终端用户正常使用的情况下进行测试,遍历 Phone、WiFi、3G 等使用场景,比较 Pathak^[8]等人提出的细粒度的功耗模型和本文提出的功耗模型对功耗评估的精确度.图 4 描述了使用上述两个功耗模型和实测功耗之间的对比图,其中绿线表示实测功耗变化,蓝色表示文献[8]中提出的功耗模型的评估功耗,红色表示本文提出的功耗模型的评估精度.在 32 分钟后我们开启 WiFi,显然,本文的评估功耗和实测功耗变化趋势吻合度更高.

我们利用功耗模型计算得出的评估功耗和实测功耗之间的平均绝对误差来评估模型的精确度.根据公式 (11),计算出评估功耗和实测功耗之间的绝对误差,actual 表示实测功耗,estimated 表示评估功耗.

$$error = \left| \frac{actual - estimated}{actual} \right| \times 100\% \quad (11)$$

经过计算,我们得出本文提出的功耗模型绝对误差最大为 6.2%,而文献[8]中提出的功耗模型绝对误差范围

最大可达到 34.5%,且前者和后者的平均绝对误差分别为 3.5%和 8.6%.两者相比,本文提出的功耗模型平均绝对误差降低了 59.3%,加入延时功耗明显提高了模型的精确度.

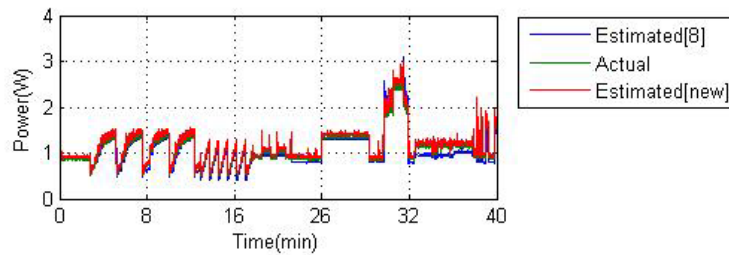


Fig.4 The comparison of estimated power for different power models

图 4 不同功耗模型的评估功耗对比图

其次,利用以下 6 种通用的场景来验证功耗评估模型计算得出的整体功耗.场景设计如下:读取消息(ReadMessage)、开启 3G(3G)、开启 WiFi(WiFi)、开启 GPS(GPS)、听音乐(Music)、通话(Phone).图 5 描述了上述 6 种场景下实测和评估功耗之间的对比图.蓝线和绿线分别表示根据模型计算得出的评估功耗值和实际测得的功耗值.

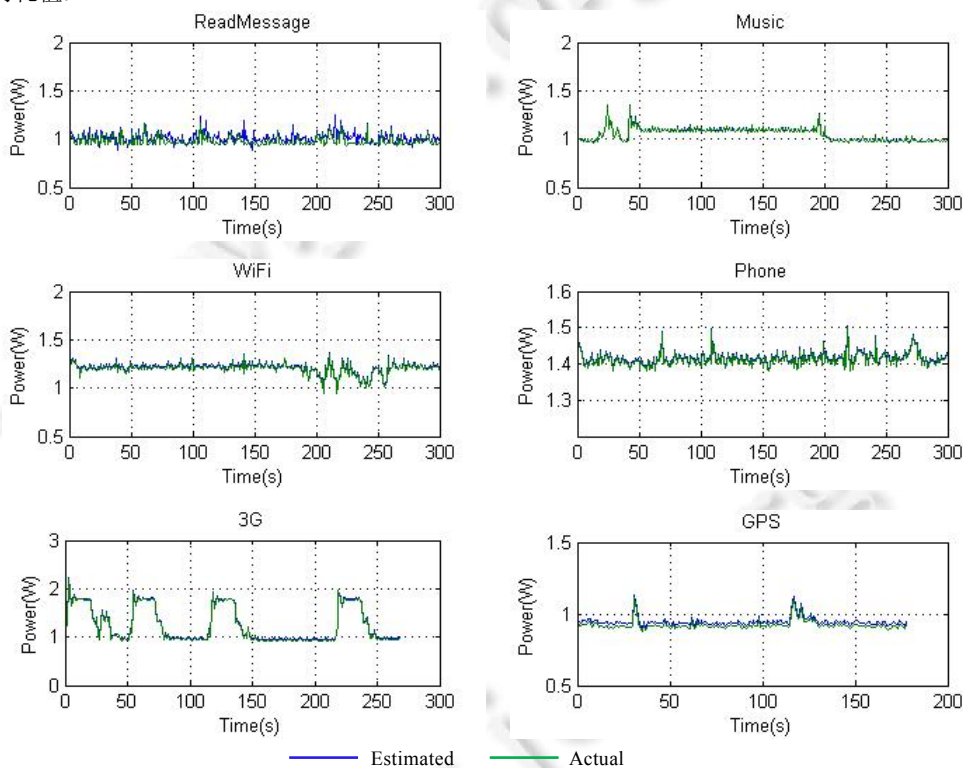


Fig.5 The comparison of estimated power with actual power in common scenarios

图 5 6 种常用场景下评估和实测功耗对比图

经过计算,我们得出 6 种场景下不同的平均绝对误差.如图 6 所示,横坐标表示实验的 6 种场景,纵坐标表示实验误差.实验结果表明,在常用场景下功耗的平均绝对误差均小于 4.6%.

为了验证模型的评估精度,我们也针对目标手机以外的智能手机进行了测量.图 7 描述了智能手机中兴 N5 的评估功耗和实测功耗之间的对比图,显示的是在 40 分钟内,在增加进程数、改变屏幕亮度、开启 WiFi、开启 3G、通话等场景下依次切换得出的整体功耗值.计算得出评估功耗和实测功耗之间的平均绝对误差为 3.47%.

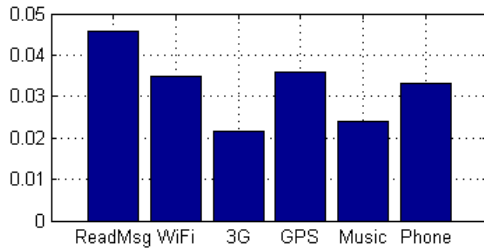


Fig.6 The figure of average absolute errors

图6 平均绝对误差值显示图

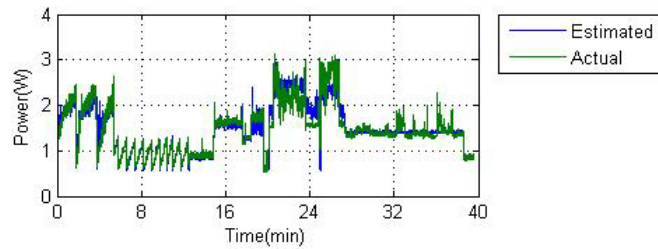


Fig.7 The comparison of estimated power with actual power of ZTE N5

图7 中兴 N5 评估和实测功耗对比图

4 总结和讨论

本文提出了基于硬件使用率和延时功耗相结合的智能手机功耗评估模型,细化了模型包括的各个硬件组件,并首次将延时功耗补充到功耗模型中,提高了模型的精确度.实验数据表明,模型在常用场景下评估功耗和实测功耗之间的平均绝对误差均小于 4.6%.同时,我们测量了华为、海信、HTC 等不同厂商的智能手机功耗,经过计算分析,验证了该功耗模型的精确度.因此,该模型具有一定的实用价值,可以为硬件和软件开发人员提供一种功耗评估的工具,从而实现功耗优化指导.

我们在测试单个硬件组件的系统变量对功耗影响的过程中,发现 3G 信号强度以同样的规律变化时,对不同的智能手机而言,功耗变化有明显的差异.如图 8 所示,蓝线表示联想手机 3G 信号强度改变对功耗的影响,绿线表示对中兴手机 3G 信号强度改变对功耗的影响,在 110s 左右信号强度最弱,之后信号强度逐渐增加.由此可见,不同厂商在功耗和性能之间的平衡选择有较大的差异.中兴 N5 手机在 3G 模块的设计上首先满足信号要求,即始终保持优先的发射功率来满足无线信号传输.联想 S920 手机 3G 模块设计上则考虑平衡信号强度和功耗之间的关系,当 3G 信号较强时,主动降低无线信号的发射功率以满足较低的能耗.

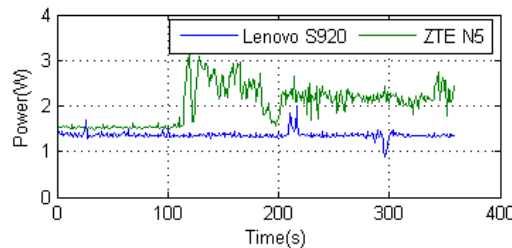


Fig.8 The influence of signal strength on different smartphones

图8 信号强度对不同智能手机功耗的影响

References:

- [1] Bonetto A, Ferroni M, Matteo D, *et al.* MPower: Towards an adaptive power management system for mobile devices. In: Proc. of the ICCSE. 2012. 15:318–325.
- [2] Nacci AA, Trovo F, Maggi F, *et al.* Adaptive and flexible smartphone power modeling. Mobile Netw. Appl., 2013,18:600–609.
- [3] Shye A, Scholbrock B, Memik G. Into the wild: Studying real user activity patterns to guide power optimizations for mobile architectures. In: Proc. of the MICRO. 2009. 42:168–178.
- [4] Dong M, Zhong L. Self-Constructive high-rate system energy modeling for battery-powered mobile systems. In: Proc. of the MobiSys. 2011. 335–348.
- [5] Zhang L, Tiwana B, Qian Z, Wang Z, *et al.* Accurate online power estimation and automatic battery behavior based power model generation for smartphones. In: Proc. of the CODES+ISSS. 2010. 105–114.

- [6] Kjærsgaard MB, Blunck H. Unsupervised power profiling for mobile devices. In: Proc. of the Mobiquitous. 2011. 138–149.
- [7] Pathak A, Hu YC, Zhang M. Where is the energy spent inside my app? Fine grained energy accounting on smartphones with Eprof. In: Proc. of the EuroSys. 2012. 29–42.
- [8] Pathak A, Hu YC, Zhang M. Fine-Grained power modeling for smartphones using system call tracing. In: Proc. of the EuroSys. 2011. 6:153–168.
- [9] Yoon C, Kim D, Jung W, *et al.* AppScope: Application energy metering framework for android smartphones using kernel activity monitoring. In: Proc. of the USENIX Annual Technical Conf. 2012. 387–400.
- [10] Carroll A, Heiser G. An analysis of power consumption in a smartphone. In: Proc. of the USENIX Annual Technical Conf. 2010. 1–14.
- [11] Snowdon DC, Sueur EL, Petters SM, *et al.* A platform for OS-level power management. In: Proc. of the EuroSys. 2009. 4:289–302.
- [12] Rawson F. MEMPOWER. A simple memory power analysis tool set. Technical Report, IBM Austin Research Laboratory, 2004.
- [13] Zedlewski J, Sobti S, Garg N, *et al.* Modeling hard-disk power consumption. In: Proc. of the FAST. USENIX Association, 2003. 217–230.
- [14] Balasubramanian N, Balasubramanian A, Venkataramani A. Energy consumption in mobile phones: A measurement study and implications for network applications. In: Proc. of the IMC. 2009. 280–293.



苏静芳(1989—),女,山西阳泉人,硕士,主要研究领域为移动智能终端操作系统.



李兴华(1978—),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究领域为无线网络安全,安全协议的设计与分析.



吕勇强(1979—),男,博士,助理研究员,CCF 会员,主要研究领域为融合软硬件体系结构,数字医疗.



奉飞飞(1989—),男,博士,主要研究领域为音视频互联互通,多屏互动,家庭网络.