



Energie-efficiënte *scheduling*-technieken voor mobiele apparaten

24 mei 2019

Student:

S.R.W. van Kampen

11874716

Tutor:

R. van Wijk

Cursus:

Besturingssystemen

Samenvatting

In dit literatuuronderzoek wordt gekeken naar mogelijke verbeteringen in energie-efficiëntie van mobiele apparaten ten gevolge van intelligente schedulingbeslissingen. De focus ligt op twee onderdelen van mobiele apparaten die uniek geschikt zijn om mee te nemen in schedulingbeslissingen: het energieverbruik van verschillende processorkernen in heterogene processorarchitecturen en het energieverbruik van hardware voor draadloze communicatie in verschillende omstandigheden. Enkele papers die deze onderdelen in acht nemend winst boeken op het gebied van energie-efficiëntie worden besproken, en we concluderen dat rekening houden met deze onderdelen een significant verschil in energieverbruik kan maken. Als vervolgonderzoek suggereren we de mogelijkheid om deze verschillende onderdelen te combineren in één *scheduling*stelsel.

1 Introductie

In de afgelopen jaren is het belang van energie-efficiëntie, ook binnen de Informatica, steeds duidelijker geworden. We zien een explosie van mobiele apparaten, van *smartphones* tot slimme sensoren en domoticasystemen. Deze apparaten hebben onder meer vanwege de focus op minimalisatie vaak kleine batterijen, waardoor al snel de vraag rijst: “Hoe kunnen we deze apparaten zo lang mogelijk laten draaien op deze kleine batterijen?”. Daarbij is de vermindering van energieverbruik ook in een maatschappelijke context relevant: in het kader van de steeds concreter wordende effecten van de klimaatverandering is een verbetering van de efficiëntie van apparaten een belangrijk onderdeel van het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen en daardoor het verminderen van de opwarming van de aarde.

Dit onderzoek probeert te belichten hoe *scheduling* het energieverbruik van mobiele apparaten kan beïnvloeden, welke technieken gebruikt kunnen worden om door middel van intelligente *scheduling* deze systemen energie-efficiënter te maken, en in welke mate deze technieken de energie-efficiëntie verhogen. Het onderzoek beperkt zich hierbij niet alleen tot *CPU schedulers*; ook efficiënte *I/O scheduling* wordt meegenomen.

2 Het effect van *schedulers* op het energieverbruik van mobiele apparaten

De unieke kenmerken van mobiele apparaten vormen ook een unieke uitdaging in *scheduler design*; *schedulers* voor *desktop*- en *servers*systemen hoeven ermee in de regel geen rekening te houden. Hieronder staan enkele van deze kenmerken beschreven, waarbij ook wordt ingegaan op de impact van *schedulers* op hun energieverbruik.

2.1 Heterogene processorarchitecturen

Mobiele apparaten worden heden ten dage voor een enorme verscheidenheid aan toepassingen gebruikt. Deze toepassingen, van het sturen van berichten tot het bekijken en creëren van hoge-resolutievideo, verschillen enorm in het gebruik van de processor. Om de meest processor-intensieve taken snel uit te voeren, zijn hele krachtige processors vereist, maar veel andere taken kunnen met een tragere, energie-efficiëntere processor toe.

Om te voldoen aan de eis voor hoge prestaties aan de ene kant, en laag energieverbruik aan de andere, zijn in de loop van dit decennium heterogene processorarchitecturen ontwikkeld, die meerdere processorkernen die verschillen in energie-efficiëntie en snelheid combineren tot een geheel (Greenhalgh, 2011). De efficiëntie van deze architecturen ligt echter alleen hoger als er ook effectief gebruik wordt gemaakt van de verschillende kernen. Er moet in de *scheduler* de beslissing genomen worden om een taak op de ene of op de andere kern te laten draaien, en deze beslissing heeft een effect op het energiegebruik van het apparaat.

2.2 Radio-hardware

Een belangrijk kenmerk van mobiele apparaten is de relatief grote hoeveelheid communicatie die ze met de buitenwereld hebben. Bij deze communicatie komt vaak veel energieverbruik kijken (Li et al., 2014). Het energieverbruik van de radio-hardware in deze apparaten is afhankelijk van diens radiostaat (i.e. versturend, ontvangend, luisterend, slapend of *idle*), waarbij wisselen van radiostaat ook energie verbruikt (Wu et al., 2009). Vanwege het feit dat verschillende processen de radio-hardware in verschillende radio-staten brengen hebben *schedulers* dus invloed op de energieconsumptie van deze hardware, en daarmee van het apparaat.

Daarnaast zijn de kosten van communicatie van mobiele apparaten vaak niet statisch, maar afhankelijk van de omgeving waarin gecommuniceerd wordt. Hiermee rekening houden kan ook leiden tot een hogere energie-efficiëntie.

3 Technieken om energie-efficiënter te *schedulen*

Zoals in de vorige sectie beschreven zijn er meerdere componenten in mobiele apparaten die uitdagingen opwerpen op het gebied van *scheduling*. In deze sectie wordt dieper ingegaan op de verschillende manieren om, de bovenstaande componenten in acht houdend, efficiënt te *schedulen*.

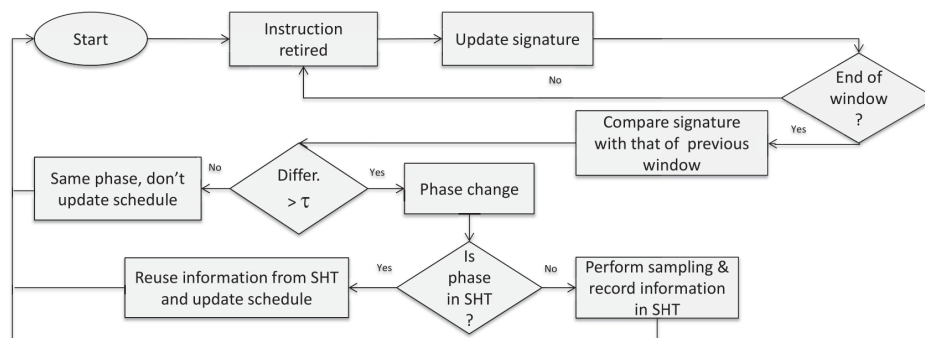
3.1 Heterogene processorarchitecturen

Om goed gebruik te maken van de computationele capaciteit van heterogene architecturen en daarbij ook energie-efficiënt te blijven, moet een *scheduler* een optimale afbeelding van programma's op processorkernen vinden. Waar Chen en John (2008) een algoritme beschrijven dat een *a priori*-profiel genereert van een programma, op basis waarvan een programma op een bepaalde kern *gescheduled* wordt, presenteren Sawalha en Barnes (2012) hiervoor een dynamische oplossing, die gebaseerd is op het analyseren van het gedrag van programma's tijdens het draaien.

De *scheduler* van Sawalha en Barnes (2012) werkt als volgt (zie ook figuur 1). Terwijl een programma draait, probeert de *scheduler* het programma te classificeren als zijnde in een bepaalde fase. Tijdens de uitvoering van het programma bepaalt de *scheduler* een 'vingerafdruk' van een bepaald instructievenster (in dit geval is het venster 100,000 instructies groot). Als deze vingerafdruk voldoende lijkt op de vingerafdruk van de vorige 100,000 instructies, wordt het proces als niet van fase veranderd beschouwd. Er wordt de aanname gemaakt dat er binnen fases in een programma weinig verschil is in het *Energy-Delay Product* (EDP), een maat van de energie-efficiëntie van een kern bij het uitvoeren van een stel instructies. Als het programma in een vooralsnog onbekende fase terecht komt, wordt het programma op de verschillende kernen gesampled, en op basis daarvan wordt het EDP van het programma op deze kern bepaald. De kern waarop het programma met het laagste EDP draait wordt als optimale kern gekozen. Deze beslissing wordt opgeslagen in een tabel, waardoor de beslissing sneller gemaakt kan worden indien dezelfde fase later nogmaals gedetecteerd wordt.

Toepassing van het algoritme uit Sawalha en Barnes (2012) leidt tot een gemiddelde vermindering van 15% van het *energy-delay product* in vergelijking met een willekeurige statische toewijzing, met als maximale vermindering 30%, waarbij de verwerkingscapaciteit van het systeem nauwelijks aangetast is.

Een ander algoritme in dezelfde hoek van dynamische *scheduling* is beschreven in Zhang et al. (2014). Ze beschrijven een methode die op basis van condities op gangbare *performance metrics* (zoals *processor*



Figuur 1: Schematische weergave van de *scheduler* uit Sawalha en Barnes (2012), overgenomen van die paper.

performance counters) een proces kan classificeren als zijnde optimaal voor een kern. Deze set condities wordt de *rule set* genoemd. Om deze regels te vinden gebruiken Zhang et al. een techniek genaamd ‘PRIM’ (voor *Patient Rule Induction Method*). Deze techniek heeft ten doel het vinden van een regio in een bepaalde inputruimte waarvoor de waarden in de outputruimte hoog zijn (Polonik en Wang, 2010). Deze techniek geeft een stel regels terug die condities op de coördinaten in de inputruimte vormen, en daarop kunnen processen getoetst worden.

In de toepassing van Zhang et al. bestaat de inputruimte uit n *performance counters* van proces A en m *performance counters* van proces B. Als outputruimte nemen ze een Booleaanse vlag die aangeeft of het voordeliger is om proces A op kern C_1 te *schedulen* en proces B op kern C_2 , of andersom. Deze vlaggen worden gevonden op basis van sampling (zoals ook bij Sawalha en Barnes het geval is), en het PRIM-algoritme wordt dus gebruikt om erachter te komen welke *performance counters* een indicatie geven van de geschiktheid van een proces voor een bepaalde kern. Ze laten daarbij ook zien dat het algoritme gewijzigd kan worden om te werken met meer dan twee processen op meer dan twee processorkernen door alle processorparen te beschouwen, en bewijzen dat die methode optimaal is (i.e. dat op basis van de kennis van het model geen betere planning bestaat).

Zhang et al. bereiken een significant betere energie-efficiëntie in vergelijking met andere *scheduling*-technieken voor heterogene *multicore*-systemen: een gemiddelde verbetering van rond de 15% ten opzichte van een statische scheduling en 5 procentpunt ten opzichte van de *MLP-ratioscheduler* uit Craeynest et al. (2012). Deze resultaten zijn vergelijkbaar met Sawalha en Barnes, maar Zhang et al. hebben lagere overhead van de *scheduler* zelf, aangezien instructiestromen niet gefingerprint hoeven te worden.

3.2 Vermindering van wisselingen van hardwarestaat

Wu et al. (2009) beschrijven een energieoptimalisatietechniek in de context van draadloze sensornetwerken. Uitgaande van een boomvormige netwerkstructuur beschrijven ze een *scheduling*-techniek om informatie van alle sensoren naar de *root sensor* te sturen met een minimale hoeveelheid wisselingen van radiostaat. Door sensoren op basis van hun positie in het netwerk aansluitend informatie te laten versturen, zorgt het algoritme van Wu et al. ervoor dat een sensor maximaal twee keer van de slaapstaat naar een actieve staat moet wisselen. Daarbij elimineren Wu et al. ook de energie die gebruikt wordt om te luisteren voor mogelijke inkomende data - de ontvangende sensoren hebben kennis van de momenten waarop van hen afhankelijke sensoren informatie zullen versturen.

Wu et al. bewijzen ook dat het door hen bedachte *scheduling*-algoritme een planning produceert die binnen een constante factor in energieverbruik ligt van de optimale planning.

3.3 Data scheduling op basis van signaalsterkte

Zoals in sectie 2.2 beschreven is varieert de hoeveelheid energie die verbruikt wordt door draadloze communicatie afhankelijk van dynamische factoren. Een van deze factoren is signaalsterkte: zoals Schulman et al. (2010) beschrijven stijgt het energieverbruik van draadloze communicatie als de signaalsterkte daalt, enerzijds vanwege de grotere benodigde zendsterkte tijdens de communicatie en anderzijds vanwege de lagere communicatiesnelheid. Deze twee elementen zorgen gecombineerd voor een groot verschil in energieverbruik: de hoeveelheid energie die per bit verbruikt wordt kan tot wel zes keer zo hoog zijn in een

omgeving met een lage signaalsterkte.

Schulman et al. maken gebruik van deze kennis door te proberen communicatie uit te stellen totdat de gebruiker naar een gebied met hogere signaalsterkte beweegt, of door alvast te communiceren voordat het signaal minder sterk wordt. Deze temporale verschuiving van communicatie is niet in alle gevallen mogelijk: als je bijvoorbeeld een artikel op Wikipedia opzoekt, verwacht je niet het artikel pas minuten later te ontvangen omdat de signaalsterkte dan hoger is. Schulman et al. beschrijft twee toepassingen die hiervoor geschikt zijn: synchronisatie op de achtergrond, waaronder bijvoorbeeld e-mail, waarbij de tijd waarop gesynchroniseerd wordt niet van groot belang is, en *streaming*-toepassingen, waarbij een buffer bijgehouden kan worden die gevuld wordt als de signaalsterkte hoog is (Schulman et al., 2010, pg. 4-5).

Alhoewel deze methode ogenschijnlijk simpel is, werpt de beschrijving hierboven wel enkele complicaties op. Hoewel het inplannen van communicatie op het moment dat de signaalsterkte hoog is zonder meer zal zorgen voor verminderd energieverbruik van de communicatie-hardware, zal een methode waar de signaalsterkte continu gemonitord wordt juist zorgen voor een hogere energieconsumptie, aangezien de processor in dat geval niet in slaapmodus kan worden gehouden. Verder is het moeilijk *a priori* te weten wanneer de signaalsterkte optimaal is - misschien stijgt de signaalsterkte over een minuut nog wel significant, en was het voordeliger geweest om later te communiceren.

Beide problemen worden door Schulman et al. op dezelfde wijze opgelost. Door gebruik te maken van de voorspelbaarheid van mensen kan communicatie al ruim van tevoren ingepland worden op de efficiëntste momenten. Aangezien mensen in het dagelijks leven voorspelbare routes hebben, houdt het algoritme van Schulman et al. de signaalsterkte bij op verscheidene routes. Op het moment dat een signaalprofiel van een route beschikbaar is, kan dat gebruikt worden om communicatie in te plannen op momenten dat de signaalsterkte op de route hoog is.

Schulman et al. maken in hun algoritme gebruik van een soortgelijke optimalisatie als in sectie 3.2: bij het inplannen van communicatie tijdens *streaming*-taken houdt het algoritme ook rekening met de verhoogde efficiëntie van het achtereenvolgens versturen en ontvangen van informatie (Schulman et al., 2010, pg. 8).

De toename in energie-efficiëntie door deze optimalisaties verschilt op basis van de toepassing: Schulman et al. beschrijven een verlaging van energieverbruik tot 10% bij synchronisatie op de achtergrond en tot wel 60% bij *streaming*-taken.

4 Conclusie

In sectie 2 hebben we gezien dat er twee componenten binnen mobiele apparaten zijn die een significant effect hebben op het energieverbruik van het apparaat: heterogene processorarchitecturen en radio-hardware. Sectie 3 ging dieper in op de manieren waarop deze onderdelen effect hadden op het energieverbruik, en hoe het maken van intelligente *scheduling*-beslissingen ertoe kan leiden dat de energie-efficiëntie van mobiele apparaten verhoogd wordt. We zien dat de *schedulers* die rekening houden met de heterogeniteit van mobiele processors gemiddeld voor een efficiëntieverhoging van 15% leiden. Als we kijken naar de energiereductie wanneer rekening gehouden wordt met radio-hardware en signaalsterkte kan deze zelfs tussen de 10 en 60% liggen, afhankelijk van de toepassing waarvoor het mobiele apparaat gebruikt wordt.

Dit zijn absoluut geen slechte resultaten, maar hogere efficiëntiewinst zou behaald kunnen worden als meerdere van deze oplossingen geïntegreerd zouden kunnen worden in één *scheduling*-systeem. Rekening houden met het netwerkgebruik van processen tijdens het *schedulen* van de CPU zal niet mogelijk zijn zonder aanpassingen die wellicht de verlaging in energieverbruik teniet doen. Hier liggen dan ook vragen voor verder onderzoek.

Referenties

- Jian Chen en Lizy K. John. Energy-aware application scheduling on a heterogeneous multi-core system. In *2008 IEEE International Symposium on Workload Characterization*. IEEE, October 2008. doi: 10.1109/iiswc.2008.4636086. URL <https://doi.org/10.1109/iiswc.2008.4636086>.
- Kenzo Van Craeynest, Aamer Jaleel, Lieven Eeckhout, Paolo Narvaez, en Joel Emer. Scheduling heterogeneous multi-cores through performance impact estimation (PIE). In *2012 39th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*. IEEE, June 2012. doi: 10.1109/isca.2012.6237019. URL <https://doi.org/10.1109/isca.2012.6237019>.

- Peter Greenhalgh. big.LITTLE processing with ARM Cortex-A15 & Cortex-A7, 2011. URL https://web.archive.org/web/20131017064722/http://www.arm.com/files/downloads/big_LITTLE_Final_Final.pdf.
- Xiangyu Li, Xiao Zhang, Kongyang Chen, en Shengzhong Feng. Measurement and analysis of energy consumption on Android smartphones. In *2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology*. IEEE, April 2014. doi: 10.1109/icist.2014.6920375. URL <https://doi.org/10.1109/icist.2014.6920375>.
- Wolfgang Polonik en Zailong Wang. PRIM analysis. *Journal of Multivariate Analysis*, 101(3):525–540, March 2010. doi: 10.1016/j.jmva.2009.08.010. URL <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2009.08.010>.
- Lina Sawalha en Ronald D. Barnes. Energy-efficient phase-aware scheduling for heterogeneous multicore processors. In *2012 IEEE Green Technologies Conference*. IEEE, April 2012. doi: 10.1109/green.2012.6200965. URL <https://doi.org/10.1109/green.2012.6200965>.
- Aaron Schulman, Vishnu Navda, Ramachandran Ramjee, Neil Spring, Pralhad Deshpande, Calvin Grunewald, Kamal Jain, en Venkata N. Padmanabhan. Bartendr. In *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '10*. ACM Press, 2010. doi: 10.1145/1859995.1860006. URL <https://doi.org/10.1145/1859995.1860006>.
- Yanwei Wu, Xiang-Yang Li, YunHao Liu, en Wei Lou. Energy-efficient wake-up scheduling for data collection and aggregation. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 21(2):275–287, March 2009. doi: 10.1109/tpds.2009.45. URL <https://doi.org/10.1109/tpds.2009.45>.
- Ying Zhang, Lide Duan, Bin Li, Lu Peng, en Srinivasan Sadagopan. Energy efficient job scheduling in single-ISA heterogeneous chip-multiprocessors. In *Fifteenth International Symposium on Quality Electronic Design*. IEEE, March 2014. doi: 10.1109/isqed.2014.6783390. URL <https://doi.org/10.1109/isqed.2014.6783390>.