



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

**Αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης ομάδος διεργασιών
με χρήση DnFS - Adaptive DnFS scheduling for bug
of tasks.**

Λεπίδα Μαρία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επιβλέπων
Λουκόπουλος Αθανάσιος**

Λαμία, 2021



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

INFORMATICS AND COMPUTATIONAL BIOMEDICINE

**Process group scheduling algorithms using DvFS - Adaptive DvFS
scheduling for bug of tasks.**

Lepida Maria

Master thesis

**Supervisor
Loukopoulos Athanasios**

Lamia, 2021



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ:**

**«Πληροφορική με εφαρμογές στην Ασφάλεια, Διαχείριση
Μεγάλου Όγκου Δεδομένων και Προσομοίωση»**

**Αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης ομάδος διεργασιών με χρήση DvFS -
Adaptive DvFS scheduling for bug of tasks.**

Λεπίδα Μαρία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επιβλέπων
Λουκόπουλος Αθανάσιος**

Λαμία, 2021

«Υπεύθυνη Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης»

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, και γνωρίζοντας τις συνέπειες της λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα και ενυπογράφως ότι η παρούσα εργασία με τίτλο «Αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης ομάδος διεργασιών με χρήση DvFS - Adaptive DvFS scheduling for bug of tasks» αποτελεί προϊόν αυστηρά προσωπικής εργασίας και όλες οι πηγές από τις οποίες χρησιμοποίησα δεδομένα, ιδέες, φράσεις, προτάσεις ή λέξεις, είτε επακριβώς (όπως υπάρχουν στο πρωτότυπο ή μεταφρασμένες) είτε με παράφραση, έχουν δηλωθεί κατάλληλα και ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Η ΔΗΛΟΥΣΑ

Ημερομηνία 21/4/2021

Υπογραφή



**Αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης ομάδος διεργασιών με χρήση
DvFS - Adaptive DvFS scheduling for bug of tasks.**

Λεπίδα Μαρία

Τριμελής Επιτροπή:

Λουκόπουλος Αθανάσιος (επιβλέπων)

Δαδαλιάρης Αντώνιος

Τζιρίτας Νικόλαος

Επιστημονικός Σύμβουλος:

Λουκόπουλος Αθανάσιος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>Περίληψη</i>	1
<i>Abstract</i>	2
<i>Πρόλογος</i>	3
<i>Κεφάλαιο 1:</i>	5
<i>1.1 Επισκόπηση διπλωματικής εργασίας</i>	5
<i>1.2 Κατανάλωση ενέργειας των αχρησιμοποίητων εξυπηρετητών</i>	6
<i>1.3 Μείωση της ενέργειας σε ενεργούς διακομιστές</i>	7
<i>1.3.1 Στρώμα εφαρμογών/υπηρεσιών</i>	7
<i>1.3.2 Στρώμα Middleware</i>	8
<i>1.3.3 Στρώμα πόρων</i>	9
<i>1.3.4 Στρώμα δικτύου</i>	12
<i>1.4 Διάγραμμα διατριβής και κύρια αποτελέσματα</i>	14
<i>Κεφάλαιο 2:</i>	16
<i>2.1 Εισαγωγή</i>	16
<i>2.2 Ενεργειακή απόδοση στα συστήματα HPCS</i>	18
<i>2.3 Δυναμική διαχείριση ισχύος (DPM)</i>	21
<i>2.3.1 Απλός τερματισμός λειτουργίας</i>	23
<i>2.3.2 OSPM</i>	23
<i>2.3.3 Προηγμένη διαμόρφωση και διεπαφή ισχύος (ACPI)</i>	24
<i>2.4 Τεχνικές μικρό-αρχιτεκτονικής</i>	25
<i>2.4.1 Προσαρμοστική αρχιτεκτονική</i>	25
<i>2.4.2 Διαχείριση κρυφής μνήμης</i>	26
<i>2.5 Δυναμική κλίμακα συχνότητας τάσης (DVFS)</i>	27
<i>Κεφάλαιο 3:</i>	35

3.1 Εισαγωγή.....	35
3.2 Προκαταρκτικά.....	36
3.2.1 Μοντέλα συστημάτων και εφαρμογών.....	36
3.2.2 Μοντέλο ενέργειας.....	37
3.2.3 Βέλτιστη συνεχής συχνότητα	38
3.2.4 Αλγόριθμος RDVFS: αποκατάσταση χαλαρότητας από μία συχνότητα.....	40
3.2.5 Στάθμιση δυναμικής τάσης αναφοράς (RDVFS)	41
3.3 Ο αλγόριθμος DVFS μέγιστης ελάχιστης συχνότητας (MMF-DVFS)	42
3.3.1 Αλγόριθμος.....	43
3.4 Αξιολόγηση και πειραματικά αποτελέσματα	45
3.4.1 Ρυθμίσεις προσομοίωσης	47
3.4.2 Αποτελέσματα	50
3.5 Περίληψη και Παρατηρήσεις.....	56
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	56
Βιβλιογραφία.....	590

Περίληψη

Με γνώμονα την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των συστημάτων υψηλής απόδοσης, τον τελευταίο καιρό έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι μείωσης ενέργειας, προσανατολισμένοι στον περιορισμό της, στοχεύοντας στα στρώματα υλικού, υπηρεσιών αλλά και στο ευρύτερο στρώμα συστήματος. Θα μπορούσαμε να τους κατηγοριοποιήσουμε, σύμφωνα με τις βασικές τους αρχές λειτουργίας, σε αυτούς που προσπαθούν να μειώσουν άμεσα την κατανάλωση ενέργειας με αλλαγές στην συχνότητα λειτουργίας του συστήματος χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν την απόδοση του και αυτούς που επικεντρώνονται στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, με το σκεπτικό ότι η αποτελεσματική λειτουργία ενός συστήματος υψηλής απόδοσης μπορεί έμμεσα να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια.

Στην ακόλουθη διπλωματική εργασία αναπτύσσουμε δύο αλγόριθμους ώστε να μελετήσουμε την ανταπόκρισή τους σε συστήματα υψηλής απόδοσης, σε σχέση με τους πόρους που χρησιμοποιούνται, σε συνδυασμό πάντα με τους εκάστοτε παραμέτρους διαμόρφωσης που απαιτούνται σε εφαρμογές υψηλής απαίτησης (Google, Yahoo, Facebook κ.ο.κ.).

Για να μπορέσουμε να εξάγουμε συμπεράσματα, αναπτύξαμε προσομοίωση σε ένα σύμπλεγμα αποτελούμενο από 5 φυσικούς κόμβους που συνδυάζονται με 25 εικονικούς, χρησιμοποιώντας κυρίως εικονικές εφαρμογές που προσπαθούν να εξωθήσουν το σύστημα σε ακραίες καταστάσεις. Οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται συγκρίνονται με τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στην πραγματικότητα και τα πειραματικά αποτελέσματα δίνουν νέες πληροφορίες για την απόδοσή τους, καθώς και για τις ιδιότητες των αλγορίθμων σε σχέση με τις έννοιες MapReduce και DVFS.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Κατανάλωση Ενέργειας, Επεξεργαστές, Αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης, ομάδες διεργασιών, Εικονικό Εργαστηριακό Περιβάλλον, εικονικοί κόμβοι, DVFS, Βελτιστοποίηση απόδοσης.

Abstract

In order to reduce the energy consumption of high efficiency systems, recently various energy reduction algorithms have been developed, aimed at reducing it, targeting the layers of hardware, services and the wider system layer. We could categorize them, according to their basic operating principles, as those who try to reduce energy consumption directly by changing the frequency of the system without taking into account its efficiency, and those who focus on improving the efficiency of the system, by the reasoning that the efficient operation of a high efficiency system can indirectly save more energy.

In the following dissertation we develop two algorithms to study their response to high performance systems, in relation to the resources used, always in conjunction with the respective configuration parameters required in high demand applications (Google, Yahoo, Facebook etc. K.).

To be able to draw conclusions, we developed a simulation in a cluster consisting of 5 physical nodes combined with 25 virtual ones, using mainly virtual applications that try to push the system into extreme situations. The algorithms presented are compared with the algorithms actually used and the experimental results give new information about their performance, as well as the properties of the algorithms in relation to the MapReduce and DVFS concepts.

KEYWORDS: Power Consumption, Processors, Time-routing algorithms, Process groups, Virtual Lab Environment, Virtual Nodes, DVFS, Performance Optimization.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο: «Αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης ομάδας διεργασιών με χρήση DvFS - Adaptive DvFS scheduling for bug of tasks» αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών: «Πληροφορική με εφαρμογές στην Ασφάλεια, Διαχείριση Μεγάλου Όγκου Δεδομένων και Προσομοίωση» του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Η έρευνα που παρουσιάζεται σε αυτή τη διατριβή αποτελείται από δύο κύρια μέρη. Στο πρώτο μέρος, δίνετε βαρύτητα για ενεργειακά αποδοτικό προγραμματισμό εργασιών στο επίπεδο πόρων των κατανεμημένων υπολογιστικών συστημάτων χρησιμοποιώντας την τεχνική Dynamic Voltage-Frequency Scaling (DVFS). Για να ξεκινήσει η μελέτη αυτού του θέματος, ολοκληρώσαμε μια εις βάθος έρευνα των υφιστάμενων τεχνικών που βασίζονται στο DVFS.

Στη συνέχεια, προτείνονται δύο αλγόριθμοι. Σε αντίθεση με το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας σε αυτήν την περιοχή που χρησιμοποιεί τη συχνότητα μόνο ενός επεξεργαστή για να εκτελέσει μια εργασία σε ένα γράφημα εργασιών, η βασική ιδέα αυτών των αλγορίθμων ήταν να αναπτύξει για πρώτη φορά τις πολλαπλές συχνότητες που είναι διαθέσιμες σε έναν επεξεργαστή με δυνατότητα DVFS για να εκτελέσει εργασίες και στη συνέχεια βελτιστοποιήστε το γράφημα ολόκληρης της εργασίας. αυτός είναι ένας πολλά υποσχόμενος τρόπος για την ανάκτηση των χαλαρών χρόνων μεταξύ των εργασιών σε ένα προγραμματισμένο γράφημα εργασιών και έτσι να επιτευχθεί ενεργειακή απόδοση.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας, παρατηρήσαμε ότι μια εργασία φτάνει στη βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας όταν εκτελείται από το πολύ δύο συχνότητες επεξεργαστή με δυνατότητα DVFS. Παραδόξως, αυτές οι δύο συχνότητες είναι γειτονικές όταν εφαρμόζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο DVFS.

Ο στόχος είναι να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός εργασιών του χαρτογράφου και ο αριθμός των εργασιών μείωσης για την εκτέλεση μιας νέας άγνωστης εφαρμογής MapReduce, αρχικά να κατηγοριοποιηθεί με βάση τα πρότυπα χρήσης της CPU και στη συνέχεια να εκτιμηθούν οι βέλτιστες παράμετροι

λειτουργίας που βασίζονται σε παρόμοιες εφαρμογές στην ίδια κατηγορία / τάξη.

Στον δεύτερο αλγόριθμο, η στατιστική παλινδρόμηση χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την εξάρτηση μεταξύ του φορτίου κίνησης δικτύου MapReduce εφαρμογών και δύο κύριων MapReduce τις παραμέτρους διαμόρφωσης (δηλ. τον αριθμό των εργασιών χαρτών και τον αριθμό των εργασιών μείωσης). Αυτές οι στατιστικές τεχνικές μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του πλαισίου MapReduce με αυτόματη ρύθμιση των φόρτων εργασίας.

Κεφάλαιο 1^ο

1.1 Επισκόπηση διπλωματικής εργασίας

Πρόσφατα, κυρίως λόγω επιχειρησιακών και περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως οι σημαντικές αυξήσεις της τιμής της ενέργειας και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που συνδέονται με την παραγωγή και τη μεταφορά ενέργειας, το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας επεκτάθηκε σε ένα πολύ ευρύτερο φάσμα συστημάτων, Συστήματα (HPCS, δηλαδή πολυπύρηνια, πλέγματα και σύννεφα) και διακομιστές (σε μικρότερη κλίμακα).

Η κατανάλωση ενέργειας αυτών των συστημάτων συνδέεται με διάφορα νομισματικά, περιβαλλοντικά και συστήματα επιδόσεων. Για παράδειγμα, το Earth Simulator και το Petafloer είναι δύο συστήματα HPCS που χρησιμοποιούν 12 και 100 μεγαβάτ μέγιστης ισχύος, αντίστοιχα. Με μια τιμή περίπου 100 δολαρίων ανά μεγαβάτ, το ενεργειακό τους κόστος κατά τους χρόνους αιχμής είναι 1.200 και 10.000 δολάρια την ώρα, αντίστοιχα, αυτό είναι πέρα από τον αποδεκτό προϋπολογισμό πολλών (δυναμικών) φορέων HPCS. Εκτός από το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, η ψύξη είναι ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί λόγω των αρνητικών επιπτώσεων της υψηλής θερμοκρασίας στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Η ανυψούμενη θερμοκρασία ενός κυκλώματος όχι μόνο εκτροχιάζει το κύκλωμα από την κανονική του δραστηριότητα αλλά επίσης μειώνει τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων του. Πρόκειται για ένα τύπο (σχέση απόδοσης και θερμοκρασίας λειτουργίας) που βασίζεται στον Arrhenius.

Ο νόμος υποδεικνύει ότι το προσδόκιμο ζωής των εξαρτημάτων μειώνεται κατά 50% για κάθε 10 C αύξηση της θερμοκρασίας. Στην αντίθετη κατεύθυνση, ο χρόνος ζωής των εξαρτημάτων θα διπλασιαστεί για κάθε μείωση των 10 ° C.

Το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με τα διάφορα μέρη των συστημάτων ΗΡCS και οι υπάρχουσες τεχνικές για τη μείωση της χρήσης ενέργειας σε τέτοια συστήματα περιγράφονται παρακάτω.

1.2 Κατανάλωση ενέργειας των αχρησιμοποίητων εξυπηρετητών

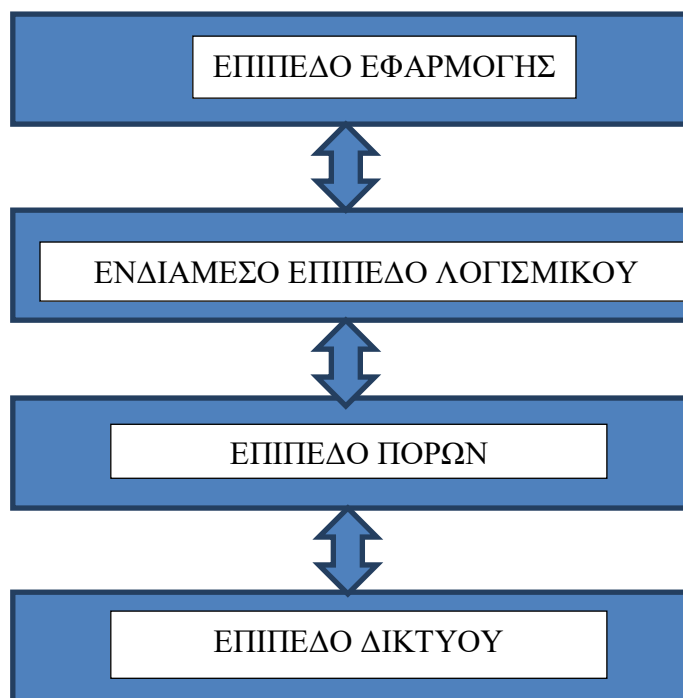
Για να τρέξει 24/7, ένα διακομιστή μια εταιρεία, πρέπει να δαπανήσει ένα τεράστιο χρηματικό ποσό κάθε χρόνο για το υλικό, την ενημέρωση των αδειών χρήσης λογισμικού, την επιχειρησιακή υποστήριξη και την ενέργεια. Ωστόσο, η εταιρεία θα πρέπει να εξετάσει εάν ο εγκατεστημένος διακομιστής είναι επωφελής για την εταιρεία και αν είναι απαραίτητο να λειτουργεί συνεχώς. Μερικοί αναλυτές εκτιμούν ότι, κατά μέσο όρο, περίπου το ένα έκτο (15%) διακομιστών πλήρους απασχόλησης σε μια εταιρεία δεν χρησιμοποιείται ενεργά σε καθημερινή βάση.

Αυτό δείχνει ότι από τους 44 εκατομμύρια εξυπηρετητές στον κόσμο, περίπου 4,7 εκατομμύρια εξυπηρετητές δεν κάνουν καμία χρήσιμη δουλειά. Οι πιθανές εξοικονομήσεις με την απενεργοποίηση αυτών των διακομιστών είναι μεγάλες. Παγκοσμίως, μόνο 3,8 δισεκατομμύρια δολάρια σε ενεργειακό κόστος και 24,7 δισεκατομμύρια δολάρια στο συνολικό κόστος λειτουργίας μη παραγωγικών εξυπηρετητών, σύμφωνα με μελέτη της εταιρείας 1E σε συνεργασία με τη Συμμαχία για Εξοικονόμηση Ενέργειας).

Από περιβαλλοντική άποψη, αυτή η ποσότητα σπατάλης ενέργειας καταλήγει σε 11,8 εκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα ετησίως, που ισοδυναμεί με τη ρύπανση CO₂ από 2,1 εκατομμυρίων αυτοκινήτων. Μόνο στις ΗΠΑ, ο αριθμός είναι 3,17 εκατομμύρια τόνοι διοξειδίου του άνθρακα ή 580,678 αυτοκίνητα.

1.3 Μείωση της ενέργειας σε ενεργούς διακομιστές

Εκτός από τη μείωση του αριθμού των αχρησιμοποίητων εξυπηρετητών, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν οι κατάλληλες τεχνικές για τη μείωση της ενεργειακής χρήσης των ενεργών διακομιστών σε HPCS με αμελητέα επίδραση στις επιδόσεις τους. Σύμφωνα με το Σχήμα 1.1, το ζήτημα της διαχείρισης ενέργειας στις πλατφόρμες HPCS μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερα επίπεδα: το στρώμα εφαρμογής, το μεσαίο λογισμικό, το στρώμα πόρων και το επίπεδο δικτύου.



Σχήμα 1.1. Αρχιτεκτονική υπολογιστικών πλατφόρμων υψηλής απόδοσης

1.3.1 Στρώμα εφαρμογών/υπηρεσιών

Μέχρι στιγμής, όλες οι εφαρμογές χρηστών σε HPCS, όπως οι εφαρμογές στην επιστήμη, τη μηχανική, τις επιχειρήσεις και τα οικονομικά, βελτιστοποιούνται για να αυξάνουν την απόδοση της εφαρμογής, η οποία ορίζεται ως η ταχύτητα, η ακρίβεια ή η σταθερότητά της. Κατά την εισαγωγή

εφαρμογών εξοικείωσης με την ενέργεια, η πρόκληση είναι να σχεδιάσουμε εξελιγμένες πολυεπίπεδες και πολυεπίπεδες εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας με μικρό αντίκτυπο στην απόδοση. Το πρώτο βήμα είναι να διερευνήσουμε τη σχέση μεταξύ απόδοσης και ενέργειας στο HPCS. Πράγματι, η κατανάλωση ενέργειας μιας εφαρμογής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των οδηγιών που απαιτούνται για την εκτέλεση της εφαρμογής και από τον αριθμό των συναλλαγών με τη μονάδα αποθήκευσης (ή τη μνήμη). Αυτά τα δύο στοιχεία συμμετέχουν επίσης στο χρόνο ολοκλήρωσης της εφαρμογής. Επιπλέον, οι οδηγίες με μικρότερο αριθμό κύκλων ρολογιού καταναλώνουν γενικά λιγότερη ενέργεια. Ωστόσο, ένα πολύπλοκο μοντέλο είναι απαραίτητο για τη βελτιστοποίηση της σχέσης μεταξύ απόδοσης και ενέργειας.

Για παράδειγμα, η σειρά ορισμένων λειτουργιών και η αναπαράσταση των δυαδικών ψηφίων μπορεί να μεταβάλει την κατανάλωση ενέργειας χωρίς απαραίτητα να αλλάξει τον χρόνο ολοκλήρωσης.

1.3.2 Στρώμα Middleware

Οι εφαρμογές σε μια πλατφόρμα HPC, όπως ένα πλέγμα ή ένα σύννεφο, αλληλεπιδρούν έμμεσα με τους κόμβους υπολογιστών και τις μονάδες αποθήκευσης στο επίπεδο πόρων μέσω του στρώματος middleware. Με άλλα λόγια, το στρώμα του μεσαίου λογισμικού λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ του στρώματος εφαρμογής και του στρώματος πόρων. Ως εκ τούτου, το επίπεδο αυτό πρέπει να παρέχει αρκετές έξυπνες μονάδες, όπως μεσολαβητές πόρων, πρόσβαση σε ασφάλεια, αναλυτή εργασίας, χρονοπρογραμματιστή εργασίας, υπηρεσία επικοινωνίας, υπηρεσία πληροφοριών και έλεγχο αξιοπιστίας, για τη βελτιστοποίηση της σχέσης μεταξύ της εφαρμογής και των στρώσεων πόρων.

Λόγω της ευφυούς φύσης αυτών των μονάδων, αυτό το στρώμα είναι πολύ επιρρεπές για την εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών, ιδιαίτερα στον προγραμματισμό των εργασιών. Μέχρι πρόσφατα, ο προγραμματισμός έχει βελτιστοποιηθεί προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η λειτουργία κόστους,

γενικά δηλαδή η χρονική διαφορά μεταξύ της έναρξης και της λήξης μιας ακολουθίας εργασιών ή εργασιών (το makespan). Τώρα, είναι απαραίτητη μια νέα λειτουργία κόστους που να περιλαμβάνει τόσο το makespan, αλλά και την εξοικονόμηση της ενέργειας που καταναλώνεται.

1.3.3 Στρώμα πόρων

Το στρώμα πόρων αποτελείται από ένα ευρύ φάσμα πόρων, ειδικότερα, τους κόμβους υπολογιστών και τις μονάδες αποθήκευσης. Αυτό το επίπεδο αλληλεπιδρά γενικά με τις συσκευές υλικού και το λειτουργικό σύστημα (OS) και ως εκ τούτου είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο όλων των καταναλωμένων πόρων σε υπολογιστικά συστήματα υψηλής απόδοσης. Στο πρόσφατο παρελθόν, έχουν αναπτυχθεί αρκετοί μηχανισμοί για την καλύτερη/ αποδοτικότερη διαχείριση ισχύος του υλικού και των λειτουργικών συστημάτων. Η πλειοψηφία αυτών είναι προσεγγίσεις υλικού, ειδικά για τους επεξεργαστές.

Η δυναμική διαχείριση ισχύος (DPM) και η δυναμική κλιμάκωση τάσης-συχνότητας (DVFS) είναι ίσως οι πιο ελκυστικές μέθοδοι που ενσωματώνονται σε μεγάλο μέρος του πρόσφατου εξοπλισμού. Στο DPM, οι συσκευές υλικού, όπως η CPU, έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν από μια κατάσταση αναμονής σε μία ή περισσότερες λειτουργίες χαμηλής κατανάλωσης. Στο DVFS, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας αξιοποιώντας το γεγονός ότι η κατανάλωση ενέργειας στα κυκλώματα CMOS έχει άμεση σχέση με τη συχνότητα και το τετράγωνο της παροχής τάσης. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος εκτέλεσης και η κατανάλωση ισχύος μπορούν να ελεγχθούν με εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων και τάσεων.

Το σχήμα 1.2 δείχνει την αρχή της μεθόδου DVFS. Όπως μπορεί να φανεί, στην συσκευή DVFS μια συσκευή χρησιμοποιεί το χρόνο χαλαρότητας (χρόνος αδράνειας) μιας εργασίας για να εκτελέσει την εργασία σε χαμηλότερη

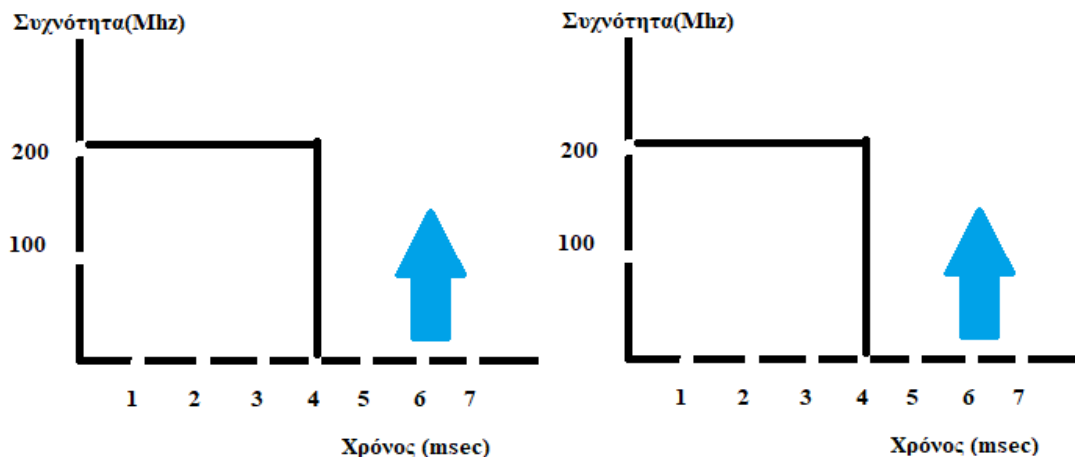
συχνότητα τάσης. Η σχέση μεταξύ ενέργειας και τάσης-συχνότητας σε κυκλώματα CMOS είναι:

$$\left\{ \begin{array}{l} E = C_{\text{eff}} f v^2 t \\ F * \alpha (v - v_t)^2 / v_t \end{array} \right.$$

όπου C_{eff} και v_t είναι η ικανότητα μεταγωγής κυκλώματος και η τάση κατωφλίου κυκλώματος, αντίστοιχα, ενώ t είναι ο χρόνος εκτέλεσης της εργασίας στην τρέχουσα συχνότητα (f). Επομένως, με τη μείωση της τάσης και της συχνότητας η κατανάλωση ενέργειας της συσκευής μπορεί να μειωθεί.

Ωστόσο, τόσο οι τεχνικές DPM όσο και οι μέθοδοι DVFS ενδέχεται να έχουν ορισμένες αρνητικές επιπτώσεις στην κατανάλωση ενέργειας μιας συσκευής σε ενεργούς και αδρανείς τρόπους και να δημιουργούν μια υπερφόρτωση μετάβασης για τη μετάβαση μεταξύ καταστάσεων ή τάσης/συχνοτήτων.

Η υπερφόρτωση μετάβασης είναι ιδιαίτερα σημαντική στην τεχνική DPM: εάν οι λανθάνουσες μεταβατικές φάσεις μεταξύ κατώτερης ισχύος θεωρούνται αμελητέες, τότε η ενέργεια μπορεί να εξοικονομηθεί με απλή εναλλαγή μεταξύ αυτών των τρόπων λειτουργίας. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση είναι σπάνια σωστή και επομένως η εναλλαγή μεταξύ τρόπων χαμηλής κατανάλωσης επηρεάζει την απόδοση. Για να ελαχιστοποιηθεί αυτό το φαινόμενο, χρησιμοποιούνται τεχνικές δέσμευσης φόρτου εργασίας για να αλλάξουν το φόρτο εργασίας έτσι ώστε οι περισσότεροι από τους μικρούς χρόνους αναμονής να συγχωνευθούν σε λιγότερες μεγάλες.



Σχήμα 1.2. Δυναμική τεχνική κλιμάκωσης τάσης-συχνότητας: (αριστερά) αρχική εργασία (δεξιά) κλιμακωτή εργασία συχνότητας τάσης. Αυτός ο χαλαρός χρόνος δημιουργείται από τον προγραμματιστή μεταξύ αυτής της εργασίας και της επόμενης εργασίας (υποδεικνύεται ως μπλε).

Παρόλο που οι τεχνικές DPM και DVFS χρησιμοποιούνται ευρέως στη στρώση πόρων για να εξοικονομούν ενέργεια σε κόμβους υπολογιστών και μονάδες αποθήκευσης, ενδέχεται να έχουν αρνητική επίδραση στην απόδοση με περίπλοκο τρόπο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο συνολικός ρυθμός υπολογισμού του συστήματος εξαρτάται τόσο από την ταχύτητα όσο και από τη συνεργασία μεταξύ πολλαπλών στοιχείων εντός του συστήματος. Για παράδειγμα, η αύξηση της ταχύτητας CPU μπορεί να μην αυξάνει τον ρυθμό υπολογισμού όταν η μνήμη δεν μπορεί να στείλει / λάβει δεδομένα πιο γρήγορα. Έτσι, προκειμένου να κατασκευαστεί ένα καλό μοντέλο για τη μελέτη ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν άλλες συσκευές του συστήματος και ο συντονισμός τους.

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα στο στρώμα πόρων είναι οι μονάδες αποθήκευσης. Καθώς οι κόμβοι υπολογιστών τυπικά παράγουν και επεξεργάζονται ένα τεράστιο όγκο δεδομένων και είναι απαραίτητη η αποθήκευση αυτών των δεδομένων, οι μονάδες αποθήκευσης έχουν έναν τεράστιο αριθμό αλληλεπιδράσεων με τους κόμβους υπολογιστών στο HPCS. Αυτός ο τεράστιος αριθμός αλληλεπιδράσεων σημαίνει ότι οι μονάδες αποθήκευσης είναι συνεχώς ενεργές, ταυτόχρονα με τους κόμβους υπολογιστών. Ως αποτέλεσμα, μετά από κόμβους υπολογιστών, οι μονάδες

αποθήκευσης είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας στο HPCS, έτσι ώστε οι συσκευές αποθήκευσης να ξοδεύουν σχεδόν το ένα τρίτο (27%) της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κέντρο δεδομένων. Ακόμη χειρότερα, το ποσοστό αυτό αυξάνεται κατά 60% ετησίως λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για εξοπλισμό αποθήκευσης.

Έτσι, οι νέες τεχνολογίες σχεδιασμού συσκευών αποθήκευσης και νέων αλγορίθμων για την αντιμετώπισή τους είναι ιδιαίτερα επιθυμητές για την επίτευξη ενεργειακά αποδοτικών HPCS. Ορισμένοι από αυτούς τους αλγορίθμους περιλαμβάνουν τα συστήματα διαχείρισης δυναμικής ενέργειας, τις στρατηγικές διαχείρισης της μνήμης cache με γνώση της ισχύος, τα προγράμματα προπληρωμής με γνώση της ισχύος, τις τεχνικές διαχείρισης ενέργειας που κατευθύνονται από το λογισμικό και τις ρυθμίσεις πολλών ταχυτήτων.

1.3.4 Στρώμα δικτύου

Η δρομολόγηση και η μεταφορά πακέτων και η ενεργοποίηση των υπηρεσιών δικτύου στο επίπεδο πόρων αποτελούν τις κύριες ευθύνες του στρώματος δικτύου στο HPCS. Η μεγάλη πρόκληση για την οικοδόμηση ενεργειακά αποδοτικών δικτύων είναι η μέτρηση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του δικτύου και η βελτιστοποίηση της ισορροπίας μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και απόδοσης. Το κλειδί για την κατανόηση και την πρόβλεψη συμπεριφορών δικτύου είναι να μοντελοποιήσουμε πραγματικά το δίκτυο.

Τέτοια μοντέλα είναι χρήσιμα για να βοηθήσουν τους ερευνητές να κατανοήσουν βαθιά την αλληλεπίδραση μεταξύ ενέργειας και επιδόσεων στα δίκτυα. Ορισμένες από τις σημαντικότερες προκλήσεις στο σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών δικτύων είναι οι ακόλουθες:

- Τα αναπτυγμένα μοντέλα, πρώτον, πρέπει να εφαρμόζονται στον πραγματικό κόσμο. Στη συνέχεια, αυτά τα μοντέλα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τα δίκτυα συνολικά, στο βαθμό που θα πρέπει να κατανοούν πλήρως τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ χρόνου, χώρου και ενέργειας.

- Πρέπει να αναπτυχθούν νέοι αλγόριθμοι δρομολόγησης ενεργειακής απόδοσης. Οι τρέχοντες αλγόριθμοι δρομολόγησης αφορούν κυρίως τη βελτιστοποίηση των διαδρομών πακέτων και την αξιοπιστία των διαδρομών.

- Δεδομένου ότι τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δεν έχουν σχεδιαστεί για την ενεργειακή απόδοση, θα πρέπει να αναπτυχθούν νέα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα. Τα νέα πρωτόκολλα πρέπει πρώτα να είναι ισχυρά κατά της επίθεσης. Στη συνέχεια, τα πρωτόκολλα αυτά θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να εξισορροπήσουν την αντιστάθμιση μεταξύ της καθυστέρησης του δικτύου και της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτή η δυνατότητα είναι σημαντική καθώς αντιμετωπίζει μια βασική ερώτηση στο cloud computing: ποιο σενάριο είναι αποτελεσματικό; Αποστέλλονται δεδομένα στο σύννεφο, πραγματοποιούν υπολογισμούς στο σύννεφο και στη συνέχεια λαμβάνουν το αποτέλεσμα ή κάνουν υπολογισμό τοπικά στον κεντρικό υπολογιστή;

- Η ανάπτυξη νέων μεθόδων για την τεχνολογία της κυκλοφορίας δικτύου είναι ένα άλλο ζήτημα στον ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό δικτύου. Για παράδειγμα, είναι σημαντικό να καθοριστεί αν η χρήση της μισής χωρητικότητας επεξεργασίας ή δικτύου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα είναι πιο ενεργειακά αποδοτική από τη χρήση της πλήρους χωρητικότητας δικτύου για το ήμισυ του χρόνου. Το ίδιο ερώτημα πρέπει να τεθεί σε πολλές άλλες περιπτώσεις, όπως τη χρήση συνδέσεων δικτύου, επεξεργαστών πολλαπλών εντολών και διακομιστών datacentre.

Η απάντηση σε αυτή την ερώτηση - η οποία εξαρτάται από πολλά στοιχεία, μεταξύ των οποίων η σχέση μεταξύ της χωρητικότητας και της

κατανάλωσης ενέργειας - μπορεί να παράγει έναν οδηγό χάρτη για την επίτευξη της βέλτιστης σχέσης μεταξύ της ενεργειακής και της χωρητικότητας του δικτύου καθώς και μιας ενεργειακής αναλογίας (δηλαδή,) σχέδιο σχεδιασμού για τη δημιουργία συσκευών δικτύου όπως οι δρομολογητές IP και οι διακόπτες Ethernet.

1.4 Διάγραμμα διατριβής και κύρια αποτελέσματα

Η έρευνα που παρουσιάζεται σε αυτή τη διατριβή αποτελείται από δύο κύρια μέρη. Το ερευνητικό πρόβλημα και τα κύρια αποτελέσματα κάθε τμήματος περιγράφονται παρακάτω.

Στο πρώτο μέρος, δίνετε βαρύτητα για ενεργειακά αποδοτικό προγραμματισμό εργασιών στο επίπεδο πόρων των κατανεμημένων υπολογιστικών συστημάτων χρησιμοποιώντας την τεχνική Dynamic Voltage-Frequency Scaling (DVFS). Για να ξεκινήσει η μελέτη αυτού του θέματος, ολοκληρώσαμε μια εις βάθος έρευνα των υφιστάμενων τεχνικών που βασίζονται στο DVFS.

Στη συνέχεια, προτείνονται δύο αλγόριθμοι. Σε αντίθεση με το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας σε αυτήν την περιοχή που χρησιμοποιεί τη συχνότητα μόνο ενός επεξεργαστή για να εκτελέσει μια εργασία σε ένα γράφημα εργασιών, η βασική ιδέα αυτών των αλγορίθμων ήταν να αναπτύξει για πρώτη φορά τις πολλαπλές συχνότητες που είναι διαθέσιμες σε έναν επεξεργαστή με δυνατότητα DVFS για να εκτελέσει εργασίες και στη συνέχεια βελτιστοποιήστε το γράφημα ολόκληρης της εργασίας. αυτός είναι ένας πολλά υποσχόμενος τρόπος για την ανάκτηση των χαλαρών χρόνων μεταξύ των εργασιών σε ένα προγραμματισμένο γράφημα εργασιών και έτσι να επιτευχθεί ενεργειακή απόδοση.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας, παρατηρήσαμε ότι μια εργασία φτάνει στη βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας όταν εκτελείται από το πολύ δύο

συχνότητες επεξεργαστή με δυνατότητα DVFS. Παραδόξως, αυτές οι δύο συχνότητες είναι γειτονικές όταν εφαρμόζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο DVFS.

Στον πρώτο αλγόριθμο, χρησιμοποιείται ανάλυση στατιστικής αντιστοίχισης μοτίβων για να βρεθούν παρόμοια μοτίβα χρόνου χρήσης CPU μεταξύ δύο εφαρμογών MapReduce. Η ιδέα είναι ότι εάν δύο εφαρμογές θεωρούνται «υπολογιστικά παρόμοιες» για σύντομα αρχεία δεδομένων, θα είναι αρκετά «παρόμοιες» και για μεγάλα μεγέθη δεδομένων. Ο στόχος είναι να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός εργασιών του χαρτογράφου και ο αριθμός των εργασιών μείωσης για την εκτέλεση μιας νέας άγνωστης εφαρμογής MapReduce, αρχικά να κατηγοριοποιηθεί με βάση τα πρότυπα χρήσης της CPU και στη συνέχεια να εκτιμηθούν οι βέλτιστες παράμετροι λειτουργίας που βασίζονται σε παρόμοιες εφαρμογές στην ίδια κατηγορία / τάξη.

Στον δεύτερο αλγόριθμο, η στατιστική παλινδρόμηση χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την εξάρτηση μεταξύ του φορτίου κίνησης δικτύου MapReduce εφαρμογών και δύο κύριων MapReduce τις παραμέτρους διαμόρφωσης (δηλ. τον αριθμό των εργασιών χαρτών και τον αριθμό των εργασιών μείωσης). Αυτές οι στατιστικές τεχνικές μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του πλαισίου MapReduce με αυτόματη ρύθμιση των φόρτων εργασίας.

Η υπόλοιπη εργασία οργανώνεται ως εξής. Το Κεφάλαιο 2 υπογραμμίζει τη σχετική εργασία στον ενεργειακά αποδοτικό προγραμματισμό εργασιών σε επεξεργαστές με δυνατότητα DVFS. Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει τον πρώτο μας αλγόριθμο για την ανάπτυξη της υψηλότερης και χαμηλότερης συχνότητας ενός επεξεργαστή με δυνατότητα DVFS για την εκτέλεση εργασιών. Τα πειράματα σε αυτό το κεφάλαιο οδηγούν σε ορισμένες παρατηρήσεις σχετικά με τη χρήση πολλαπλών συχνοτήτων στο DVFS για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας. Στο Κεφάλαιο 4, παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 2^ο

2.1 Εισαγωγή

Η έρευνα για συστήματα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας έχει λάβει ιδιαίτερη βαρύτητα τα τελευταία χρόνια, καθώς η βιωσιμότητα των σημερινών τεχνολογιών και πρακτικών έχει καταστεί σοβαρό ζήτημα. Μερικά παραδείγματα συστημάτων όπου η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι κρίσιμη είναι τα εξής:

- **Ασύρματοι αισθητήρες:** αρκετοί αισθητήρες εκπέμπουν ταυτόχρονα δεδομένα από το περιβάλλον, μεταδίδουν αυτά τα δεδομένα σε μια μονάδα επεξεργασίας και λαμβάνουν επεξεργασμένα δεδομένα συνοδευόμενα από τις κατάλληλες εντολές από τη μονάδα επεξεργασίας. Οι αισθητήρες και ο δέκτης/πομπός τους τροφοδοτούνται γενικά από μπαταρία και/ή ηλιακά κύτταρα.

- **Δορυφορικά κυκλώματα:** Οι δορυφόροι συνήθως περιλαμβάνουν έναν τεράστιο αριθμό σύνθετων κυκλωμάτων που πρέπει να λειτουργούν σε χαμηλή ισχύ. Αυτά τα κυκλώματα τροφοδοτούνται ενέργεια, από ηλιακά κύτταρα, το μόνο διαθέσιμο τροφοδοτικό σε δορυφόρους.

- **Ρομπότ και συσκευές επιτήρησης:** οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στον στρατό, στην εξόρυξη ορυχείων και σε δύσκολα ή μη ασφαλή περιβάλλοντα για τον άνθρωπο.

- **Κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές:** οι συσκευές αυτές τροφοδοτούνται από μπαταρίες που αναμένεται να λειτουργούν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Οι άκαμπτές αυξήσεις της τιμής της ενέργειας και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που συνδέονται με την

παραγωγή και τη μεταφορά ενέργειας ανάγκασαν το ζήτημα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας να επεκταθεί σε ένα ευρύτερο φάσμα συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστικών συστημάτων υψηλής απόδοσης (HPCS).

Πρέπει να αντιμετωπιστούν διάφορα θέματα, όπως η διαχείριση των πόρων τόσο στο επίπεδο του λογισμικού όσο και στο υλικό, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας στο HPCS. Ένα σημαντικό ζήτημα στη διαχείριση των πόρων υλικού είναι πώς να μειώσετε τη χρήση ενέργειας στους επεξεργαστές. Στο πρόσφατο παρελθόν, πολλές προσεγγίσεις βασισμένες στο υλικό έχουν γίνει για την αποτελεσματική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα για τους επεξεργαστές (CPU's).

Η δυναμική κλιμάκωση τάσης-συχνότητας (DVFS) είναι ίσως η πιο ελκυστική μέθοδος που ενσωματώνεται σε πολλούς πρόσφατους επεξεργαστές. Η εξοικονόμηση ενέργειας με αυτή τη μέθοδο βασίζεται στο γεγονός ότι η κατανάλωση ισχύος στα κυκλώματα CMOS έχει άμεση σχέση με τη συχνότητα και το τετράγωνο της παροχής τάσης. Έτσι, ο χρόνος εκτέλεσης και η κατανάλωση ενέργειας μπορούν να ελεγχθούν με εναλλαγή μεταξύ των συχνοτήτων και των τάσεων ενός επεξεργαστή. Παρόλο που αυτή η προσέγγιση σχεδιάστηκε αρχικά για τον προγραμματισμό εργασιών μεμονωμένων επεξεργαστών, πρόσφατα έλαβε πολύ μεγάλη προσοχή και στα πολυεπεξεργαστικά συστήματα.

Η τεχνική DVFS και ο προγραμματισμός των εργασιών μπορούν να συνδυαστούν με δύο τρόπους: (1) γενιά προγραμμάτων και (2) ανάκτηση χρόνου χαλαρότητας. Κατά τη δημιουργία του χρονοδιαγράμματος, τα γραφήματα των εργασιών είναι (προγραμματίστηκαν) σε επεξεργαστές με δυνατότητα DVFS σε μια συνάρτηση παγκόσμιου κόστους που περιλαμβάνει τόσο εξοικονόμηση ενέργειας όσο και makespan ώστε να ικανοποιούν συγχρόνως τους ενεργειακούς και χρονικούς περιορισμούς ταυτόχρονα. Στην επαναχρησιμοποίηση του χρόνου χαλάρωσης, η οποία λειτουργεί ως διαδικασία μετα-επεξεργασίας για την παραγωγή αλγορίθμων προγραμματισμού, η τεχνική DVFS χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιήσει την

κατανάλωση ενέργειας των εργασιών σε ένα χρονοδιάγραμμα που παράγεται από έναν ξεχωριστό προγραμματιστή.

Ωστόσο, οι υπάρχουσες μέθοδοι που βασίζονται στην τεχνική DVFS παρουσιάζουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα: (1) οι περισσότεροι επικεντρώνονται στην παραγωγή χρονοδιαγράμματος και δεν λαμβάνουν επαρκώς υπόψη τις προσεγγίσεις ανάκτησης χρόνου για να εξοικονομήσουν περισσότερη ενέργεια. και (2) οι υπάρχουσες μέθοδοι ανάκτησης χρόνου αδράνειας χρησιμοποιούν μόνο μία συχνότητα για κάθε εργασία μεταξύ των διακριτών συνόλων των συχνοτήτων ενός επεξεργαστή. Η χρήση μίας συχνότητας συνήθως έχει ως αποτέλεσμα ακάλυπτο χρόνο αδράνειας όπου ο επεξεργαστής και άλλες συσκευές απορροφούν μόνο ενέργεια.

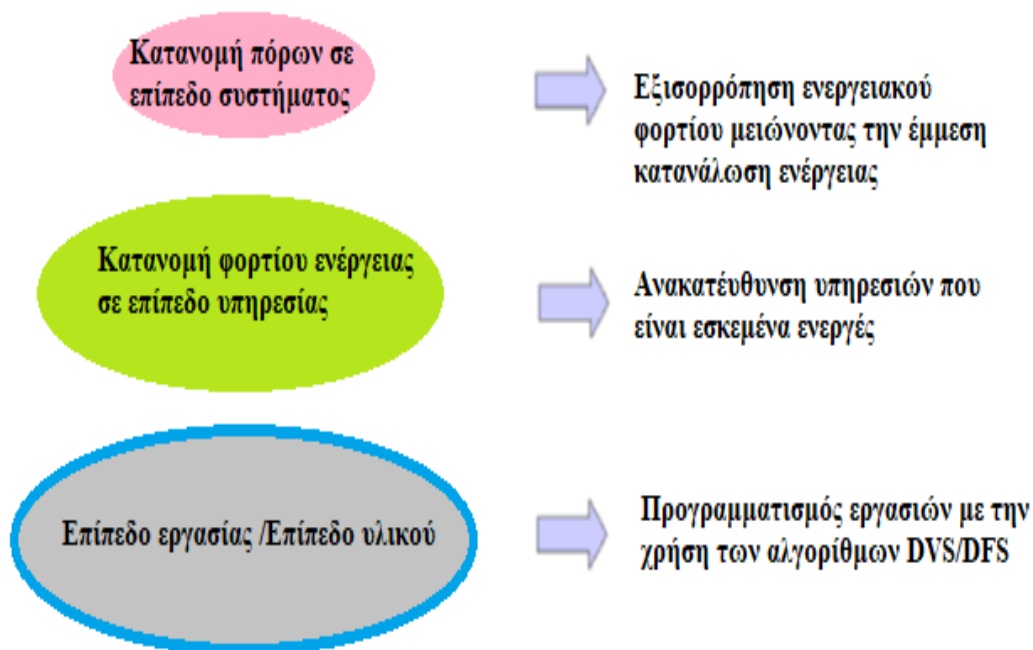
Σε αυτό το κεφάλαιο επικεντρωνόμαστε στην αποκατάσταση της χαλαρής χρονικής περιόδου και προτείνουμε μια νέα τεχνική ανάκτησης χρόνου, DVFS πολλαπλής συχνότητας επιλογής (MFS-DVFS). Η βασική ιδέα είναι να εκτελεστεί κάθε εργασία με έναν γραμμικό συνδυασμό περισσότερων από μία συχνότητας, έτσι ώστε ο συνδυασμός να έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση της χαμηλότερης ενέργειας καλύπτοντας ολόκληρο τον κύκλο αδράνειας του έργου. Έχουμε δοκιμάσει τον αλγόριθμό μας με τυχαίες και πραγματικές γραφικές παραστάσεις εργασιών εφαρμογής. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσέγγισή μας μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας σχεδόν ταυτόσημη με τη βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας.

2.2 Ενεργειακή απόδοση στα συστήματα HPCS

Πολλά ηλεκτρονικά συστήματα στη ζωή μας, όπως δορυφορικά συστήματα, κινητά τηλέφωνα, όργανα παιχνιδιών και ούτω καθεξής, χρησιμοποιούν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ως τροφοδοτικό τους. παρόλο που η χωρητικότητα της μπαταρίας έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια (η χωρητικότητα της μπαταρίας αυξάνεται κατά 5% ετησίως), η διάρκεια ζωής

της μπαταρίας εξακολουθεί να αποτελεί το κύριο μειονέκτημα για τα περισσότερα ηλεκτρονικά συστήματα.

Εκτός από τα συστήματα που βασίζονται σε μπαταρίες που βασίζονται στην κατανάλωση ενέργειας, το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας προσέλκυσε πρόσφατα μεγάλη προσοχή στα συστήματα υπολογιστών υψηλής απόδοσης (HPCS). Το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας σε τέτοια συστήματα μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις ομάδες: (1) κατανομή πόρων σε επίπεδο συστήματος, (2) κατανομή ενεργειακού φορτίου σε επίπεδο υπηρεσίας και (3) επίπεδο προγραμματισμού εργασιών (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1. Επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας σε HPCS.

Σε επίπεδο συστήματος, το πρόβλημα είναι ο τρόπος διανομής των υπολογιστικών πόρων (π.χ. CPU, δίκτυο, μνήμη και I / O) μεταξύ αποθήκευσης δεδομένων μεγάλης κλίμακας και κέντρα επεξεργασίας δεδομένων (όπως οι υπερυπολογιστές και τα κέντρα δεδομένων). Η δίκαιη κατανομή πόρων μεταξύ εφαρμογών (ή υπηρεσιών) απαιτεί όχι μόνο την απόκτηση ατομικής προσαρμογής των πόρων αλλά και την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιμέρους πόρων όταν λειτουργούν ως σύστημα. Επομένως, η μεγάλη

πρόκληση εδώ είναι να βρεθούν τόσο οι σχέσεις μεταξύ των πόρων του συστήματος όσο και η ανταλλαγή τους, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε μια βέλτιστη ισορροπία μεταξύ απόδοσης, ποιότητας υπηρεσιών και κατανάλωσης ενέργειας. Μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών σε επίπεδο συστήματος για τη διαχείριση πόρων μεταξύ φόρτου εργασίας, η εικονικοποίηση (virtualisation) γίνεται βασική τεχνολογία στα κέντρα δεδομένων. Η εικονικοποίηση επιτρέπει στους υπολογιστικούς πόρους να μοιράζονται μεταξύ διαφορετικών φόρτων εργασίας. Πολλοί από τους εισερχόμενους φόρτους εργασίας σε κέντρα δεδομένων είναι μεσαίου μεγέθους φόρτος εργασίας που απαιτούν συχνά ένα μικρό κλάσμα των υπολογιστικών πόρων.

Οι διακομιστές καταναλώνουν συνήθως περίπου το 70% της μέγιστης κατανάλωσης ισχύος τους, ακόμη και σε χαμηλή χρήση. Με την εικονικοποίηση, οι φόρτοι εργασίας μπορούν να εκτελεστούν μέσα σε μια εικονική μηχανή (VM), προκαλώντας σημαντική εξοικονόμηση στη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Τα συνδεδεμένα VM ενδέχεται να απαιτούν λιγότερους πόρους και επομένως μπορούν να λειτουργούν σε μια ενιαία μονάδα υλικού. Είναι προφανές ότι λιγότερο υλικό χρησιμοποιείται συνολικά, έτσι σπαταλιέται λιγότερη ενέργεια τόσο για την εργασία όσο και για την ψύξη των εξυπηρετητών.

Σε επίπεδο υπηρεσίας, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αφορά την εξισορρόπηση φορτίου, τον προγραμματισμό και το φόρτο εργασίας. Η κύρια πρόκληση είναι να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλοι αλγόριθμοι τόσο για φόρτους πολλαπλής όσο και για αποπληθωριστικό, προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια και να επιτευχθεί αντιστάθμιση μεταξύ της απόδοσης και της μείωσης του κόστους των υπηρεσιών λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας.

Επίσης, για να αποφεύγονται τα hotspots στα κέντρα δεδομένων λόγω των φορτωμένων κόμβων, οι υπηρεσίες μπορούν να μετακινηθούν από κόμβους με υψηλό φορτίο και υψηλή θερμοκρασία σε κόμβους με μικρότερο φορτίο και χαμηλότερη θερμοκρασία. Γενικά, αυτή η κίνηση υπηρεσιών θα

πρέπει να συμβεί όταν οι κόμβοι προορισμού μπορούν να λειτουργήσουν τις υπηρεσίες με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο.

Στο επίπεδο του επιπέδου του χώρου / υλικού, η επικέντρωση αυτού του κεφαλαίου, το λειτουργικό σύστημα (OS) και η διαμόρφωση υλικού, όπως η δυναμική διαχείριση ενέργειας, οι τεχνικές μικροαρχιτεκτονικής και η δυναμική κλιμάκωση τάσης, χρησιμοποιούνται για τη μείωση της ισχύος. Εδώ, το τυπικό ερώτημα θα μπορούσε να είναι: ποια είναι η κατάλληλη διαμόρφωση μεταξύ υλικού και λογισμικού (OS/hardware) για την επεξεργασία των εργασιών στο συντομότερο δυνατόν και με ελάχιστη ενέργεια;

2.3 Δυναμική διαχείριση ισχύος (DPM)

Η δυναμική διαχείριση ισχύος (DPM) είναι ένας μηχανισμός επιπέδου λειτουργικού συστήματος για τη δυναμική διαμόρφωση του υλικού. Ο μηχανισμός αυτός προσπαθεί να χρησιμοποιήσει τον ελάχιστο αριθμό ενεργών στοιχείων για τις ζητούμενες υπηρεσίες και τις επιδόσεις. Γενικά, τα υπολογιστικά συστήματα και τα εξαρτήματά τους χρησιμοποιούνται μη ομοιόμορφα από φόρτο εργασίας κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας. Επομένως διαιρώντας τον χρόνο λειτουργίας του συστήματος σε διαφορετικές καταστάσεις εργασίας, μπορεί να προβλεφθεί η επόμενη κατάσταση φόρτου εργασίας αναφορικά με τις προηγούμενες καταστάσεις φόρτου εργασίας σε συνδυασμό με την τρέχουσα κατάσταση.

Το DPM είναι ένα σύνολο υπολογιστικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την εξοικονόμηση ενέργειας ενεργοποιώντας και αποσυνδέοντας επιλεκτικά τα στοιχεία του συστήματος ή μετακινώντας τα σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης σε κατάσταση αναμονής. Συνήθως, υπάρχει διαχειριστής ισχύος (PM) για τον έλεγχο των καταστάσεων λειτουργίας των στοιχείων. Ο PM λαμβάνει αποφάσεις με βάση την παρατήρηση του φορτίου εργασίας κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης και κάνοντας κάποια παραδοχή σχετικά με το φόρτο εργασίας. Ο διαχειριστής ισχύος (PM) ακολουθεί

κάποιες πολιτικές για να διαχειριστεί την ενέργεια και την κατανάλωση. Για παράδειγμα, μια απλή πολιτική που χρησιμοποιείται ήδη σε φορητούς υπολογιστές απενεργοποιεί το σύστημα αφού έχουν παρέλθει προκαθορισμένα δευτερόλεπτα του χρόνου σε αδράνεια.

Στη βιβλιογραφία, μπορούν να βρεθούν αρκετές μελέτες σχετικά με τον προγραμματισμό εργασιών με βάση το DPM. Ένας αλγόριθμος ηλεκτρονικού προγραμματισμού για άπληστους σκοπούς θα ήταν ένας που επιχειρεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας διατάσσοντας την εκτέλεση της εργασίας έτσι ώστε οι συσκευές να μπορούν να έχουν συνεχείς περιόδους αναμονής.

Επιπλέον, η μείωση του αριθμού των συμβάντων ενεργοποίησης/απενεργοποίησης συσκευών συρρικνώνει τις καθυστερήσεις μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων λειτουργίας της συσκευής. Σε αντίθεση με τις περισσότερες τεχνικές DPM σε πραγματικό χρόνο οι οποίες είναι προσανατολισμένες στην διαχείριση ενέργειας από την CPU, μπορούμε να επικεντρώσουμε και στις συσκευές εισόδου/εξόδου προτείνοντας έναν αλγόριθμο που στοχεύει να βρει το βέλτιστο ενεργειακό χρονοδιάγραμμα για ένα συγκεκριμένο σύνολο εργασιών σε πραγματικό χρόνο. Δεδομένου ότι το λειτουργικό σύστημα (OS) παρατηρεί τη σχέση μεταξύ διαδικασιών και συσκευών υλικού, μπορούμε να προτείνουμε μια προσέγγιση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας συσκευών I/O σε διαδραστικά συστήματα. Σε αυτήν την προσέγγιση, αφού εκτιμηθεί η χρησιμοποίηση μιας συσκευής από κάθε λειτουργία που εκτελείται στο σύστημα από το λειτουργικό σύστημα, μια συσκευή θα μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας εάν δεν εκτελεί καμία διαδικασία. Επίσης, αποδεικνύεται ότι ακόμη και όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση χρονισμού, η επίλυση του βέλτιστου προγραμματισμού εργασιών χαμηλής ισχύος για το DPM σε πολλές συσκευές χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα NP-hard.

2.3.1 Απλός τερματισμός λειτουργίας

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η λειτουργία του ρολογιού, μια τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας που χρησιμοποιείται σε πολλά σύγχρονα κυκλώματα, δεν μειώνει την απώλεια ισχύος. Κατ' αρχάς, υπάρχει απώλεια ισχύος σε ένα κύκλωμα ρολογιού όταν υπάρχει τοπικό ρολόι ρολογιού ή είναι ενεργοποιημένη η γεννήτρια ρολογιού. Δεύτερον, τα ρεύματα διαρροής στα εξαρτήματα αποβάλλουν πάντα την ισχύ ακόμη και αν όλα τα ρολόγια είναι απενεργοποιημένα. Ως εκ τούτου, το κλείδωμα ρολογιού μπορεί να είναι ένας αναποτελεσματικός τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας σε συσκευές που βασίζονται σε μπαταρίες. Μια απλή αλλά χρήσιμη πολιτική για τις συσκευές που βασίζονται σε μπαταρίες είναι απλά να τις απενεργοποιήσετε σε αδράνεια. Το κύριο όφελος αυτής της πολιτικής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα σχεδόν τα ηλεκτρονικά συστήματα, τόσο ψηφιακά όσο και αναλογικά, αισθητήρες και μετατροπείς. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα είναι ο χρόνος ενεργοποίησης της συσκευής (δεδομένου ότι τα στοιχεία πρέπει να αρχικοποιηθούν), η οποία είναι συνήθως μεγαλύτερη από την χρονική ρύθμιση.

2.3.2 OSPM

Το Microsoft OnNow είναι ένα εργαλείο διαχείρισης ενέργειας στο επίπεδο του λειτουργικού συστήματος το οποίο υποστηρίζει OSPM (Ρυθμίσεις Κατευθυνόμενες από το Λειτουργικό Σύστημα για Διαχείριση Ενέργειας) σε προσωπικούς υπολογιστές, με δυνατότητα μετακίνησης σε διαφορετικές καταστάσεις ισχύος. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την ικανότητα υλικού των υπολογιστών να μετακινούνται σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας αντί της απενεργοποίησης. Η γενική πολιτική στην OSPM είναι ότι το λειτουργικό σύστημα αποστέλλει αυτόματα τον υπολογιστή σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας όταν ο υπολογιστής βρίσκεται σε αδράνεια για κάποιο χρονικό διάστημα ή όταν ο χρήστης πιάσει ένα κουμπί στο μπροστινό μέρος του υπολογιστή για να υποδείξει ότι η συνεδρία έχει ολοκληρωθεί.

Σε κατάσταση αναστολής, ο επεξεργαστής και τα περιφερειακά δεν λειτουργούν, αλλά ορισμένα εξαρτήματα εξακολουθούν να εργάζονται για τη λήψη συμβάντων. Εάν συμβεί κάποιο γεγονός είτε σε λογισμικό είτε σε υλικό, το σύστημα ξυπνά και μεταβαίνει στην ενεργή κατάσταση.

Με το OnNow, το λειτουργικό σύστημα μπορεί να ελέγξει καθολικά τις μεταβάσεις ισχύος-κατάστασης. Ανάλογα με την πολιτική εξοικονόμησης ενέργειας, το σύστημα μπορεί να μετακινηθεί σε κατάσταση αναμονής ανάλογα με τις αναφορές που προέρχονται από το υλικό. Επίσης, οι τρέχουσες εφαρμογές που εκτελούνται μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να ξυπνούν το σύστημα. Δεδομένου ότι κάθε στοιχείο του συστήματος έχει τις δικές του καταστάσεις ισχύος, μπορεί να ανασταλεί και να περάσει σε κατάσταση αδράνειας ανεξάρτητα από άλλα εξαρτήματα ακόμα και όταν λειτουργούν ορισμένα τμήματα του συστήματος. Επομένως, μια άλλη πολιτική του συστήματος είναι η προσαρμογή των ειδικών απαιτήσεων κάθε εφαρμογής τόσο με τις δυνατότητες του συστήματος όσο και με τις πληροφορίες του λειτουργικού συστήματος, προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια χωρίς αρνητική επίδραση στις εργασίες που κάνει ο χρήστης.

2.3.3 Προηγμένη διαμόρφωση και διεπαφή ισχύος (ACPI)

Η Advanced Configuration and Power Interface (ACPI), υποστηριζόμενη από την Intel, τη Microsoft και την Toshiba, είναι ένα πρότυπο για την απλούστευση του OSDM εισάγοντας μια τυποποιημένη διεπαφή για τον έλεγχο των πόρων του συστήματος. Αυτό το πρότυπο, ωστόσο, δεν παρέχει μια ικανοποιητική, μοναδική και κατάλληλη διαδικασία για τον αποτελεσματικό έλεγχο όλων των συστημάτων. Για παράδειγμα, οι πολιτικές που σχετίζονται με το ACPI είναι διαφορετικές μεταξύ επιτραπέζιων υπολογιστών και φορητών υπολογιστών. Επομένως, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν διαφορετικές πολιτικές σε ένα σύστημα και να εξεταστεί ποιος συνδυασμός πολιτικών μπορεί να βοηθήσει το σύστημα να λειτουργεί πιο ενεργειακά αποτελεσματικά.

2.4 Τεχνικές μικρό-αρχιτεκτονικής

Η αύξηση της θερμοκρασίας του κυκλώματος λόγω της απότομης αύξησης του αριθμού των τρανζίστορ ανά cm^2 οδήγησε τους σχεδιαστές κυκλωμάτων να ενισχύσουν και να τροποποιήσουν την αρχιτεκτονική και το σχεδιασμό των μικροεπεξεργαστών (όπως ενσωμάτωση συστημάτων on-chip, multi-clock εφαρμογή συχνότητας και πολλαπλές τάσεις). Όπως και στα κυκλώματα CMOS, υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ της συχνότητας του ρολογιού και της κατανάλωσης ρεύματος και κατά συνέπεια της θερμοκρασίας του κυκλώματος.

Έτσι, το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κύκλωμα μπορεί εύκολα να περιορίσει τη μέγιστη συχνότητα ρολογιού. Με άλλα λόγια, προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ισχύς/απόδοση και η βελτιστοποίηση της ενέργειας/κόστους κατά το σχεδιασμό ενός νέου μικροεπεξεργαστή. Δύο σημαντικές τεχνικές μικρο-αρχιτεκτονικής για τη μείωση της ισχύος είναι η προσαρμοστική αρχιτεκτονική και η διαχείριση της κρυφής μνήμης.

2.4.1 Προσαρμοστική αρχιτεκτονική

Δεδομένου ότι υπάρχει μεγάλη εξάρτηση μεταξύ των επιδόσεων των πολιτικών DPM και των στατιστικών φόρτου εργασίας, μια στατική πρόβλεψη φόρτου εργασίας καθίσταται αναποτελεσματική όταν το φόρτο εργασίας είναι είτε άγνωστο είτε μη στατικό. Επομένως, το DPM απαιτεί κάποια μορφή προσαρμογής. Η ιδέα της προσαρμογής βασίζεται στην πρόβλεψη της χρονικής διάρκειας του χρόνου φόρτωσης εργασίας, ή μερικές φορές με τη χρήση αρκετών χρονικών ορίων για μη στάσιμα φορτία εργασίας. Συνήθως χρησιμοποιούν ένα σύνολο τιμών χρονικού ορίου, όπου κάθε timeout συνδέεται με ένα δείκτη για να δείξει πόσο καλά εκτελείται το χρονικό όριο. Το χρονικό όριο που εκτελείται καλύτερα από το σύνολο των διαθέσιμων επιλέγεται ως

πολιτική προσαρμογής. Μια άλλη μελέτη από τους Helmbold et al στο [20] διατηρεί μια λίστα υποψηφίων χρονικών ορίων και αποδίδει ένα βάρος σε κάθε χρονικό όριο. Το πραγματικό χρονικό όριο είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος όλων των υποψηφίων.

2.4.2 Διαχείριση κρυφής μνήμης

Η μνήμη είναι ένα από τα πιο καταναλωτικά στοιχεία ισχύος στα περισσότερα συστήματα υπολογιστών. Με βάση διαφόρων αναφορών, η μνήμη χρησιμοποιεί περίπου το 40% της συνολικής ενέργειας, γεγονός που την κατατάσσει ως το δεύτερο μεγαλύτερο καταναλωτή ενέργειας σε υπολογιστικά συστήματα μετά τον επεξεργαστή. Εκτός από τα συστήματα πληροφορικής, η μνήμη εξακολουθεί να είναι ένας από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ισχύος σε PDA και φορητούς υπολογιστές. Η μείωση της κατανάλωσης ισχύος στη μνήμη είναι σημαντική, όπως συμβαίνει με τα περισσότερα συστήματα υπολογιστών και η μνήμη λειτουργεί συνεχώς.

Η τεχνολογία Power-Aware Εικονική Μνήμη (PAVM), είναι ένα πρόσφατο και ισχυρό σχέδιο για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μνήμης με την κατανομή ενεργών σελίδων στην ίδια μνήμη. Αυτό το σχήμα χρησιμοποιείται για την κύρια μνήμη και σε επίπεδο λειτουργικού συστήματος. Η ιδέα πίσω από αυτό το σχήμα είναι ότι ενεργοποιεί τις ενεργές τάξεις της διαδικασίας p και απενεργοποιεί τις αδρανείς τάξεις ενώ η διαδικασία p προγραμματίζεται. Μια τάξη ορίζεται ως ενεργός βαθμός της διαδικασίας p εάν, και μόνο αν, τουλάχιστον μία σελίδα από την κατάταξη χαρτογραφείται στον χώρο διευθύνσεων του p .

Το κύριο μειονέκτημα αυτού του σχήματος είναι η ποσότητα της προσωρινής μνήμης buffer που χρησιμοποιεί. Οι προσωρινές μνήμες buffer χρησιμοποιούνται ως γέφυρα μεταξύ του σκληρού δίσκου και της κύριας μνήμης. Η αύξηση του συνολικού μεγέθους της μνήμης έχει ως αποτέλεσμα την

αύξηση της ποσότητας της προσωρινής μνήμης buffer και κατά συνέπεια την κατοχή ενός μεγαλύτερου μέρους της μνήμης.

2.5 Δυναμική κλίμακα συχνότητας τάσης (DVFS)

Η δυναμική κλιμάκωση τάσης-συχνότητας είναι μια σύγχρονη τεχνική στον υπολογιστή αρχιτεκτονική για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των μικροεπεξεργαστών ή για τον έλεγχο της ποσότητας θερμότητας που παράγεται από τα κυκλώματα. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως σε μπαταρίες και συσκευές όπως φορητοί υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα, όπου μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας του, όπου και τα υψηλά επίπεδα μπαταρίας είναι απαραίτητα. Επιπλέον, το DVFS χρησιμοποιείται σε κόμβους υψηλής επεξεργασίας όχι μόνο για την μείωση της δύναμης των κόμβων, αλλά και περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας που θα απαιτηθεί, προκειμένου οι κόμβοι αυτοί να ψυχθούν.

Ένα μοντέλο προσέγγισης δείχνει ότι η δυναμική ισχύς σε κυκλώματα CMOS είναι μια γραμμική συνάρτηση τόσο της συχνότητας μεταγωγής όσο και της τετραγωνικής τάσης ως: $C * f * V^2$

όπου C είναι η αποτελεσματική ικανότητα μεταγωγής ανά κύκλο ρολογιού. Επομένως, ένα φόρτο εργασίας (ή εργασία) μπορεί να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια όταν εκτελείται σε χαμηλότερη τάση και συχνότητα.

Γενικά, ένας υπολογιστικός κόμβος εκτελεί ταυτόχρονα διάφορες εργασίες με σχέσεις μεταξύ καθυκόντων (π.χ. περιορισμούς προτεραιότητας). Αυτές οι σχέσεις μεταξύ των καθυκόντων συνήθως προκαλούν χαλαρό χρόνο (χρόνος αναμονής) μεταξύ των εργασιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το DVFS για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Συγκεκριμένα, ο χρόνος χαλάρωσης που σχετίζεται με μια εργασία χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της εργασίας σε χαμηλότερη συχνότητα τάσης-αγωγής, όπου αυτό με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια, υπήρξε σημαντική εργασία για προγραμματισμό εργασιών με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιώντας την τεχνική DVFS, ειδικά σε ενσωματωμένα συστήματα σε πραγματικό χρόνο και HPCS. Η κύρια ιδέα των περισσότερων υφιστάμενων αλγορίθμων είναι ότι ο χρόνος χαλαρότητας του επεξεργαστή πρέπει να γεμίσει με τη μεταγωγή της συχνότητας λειτουργίας του επεξεργαστή στη χαμηλότερη δυνατή συχνότητα. Αυτό αλλάζει το πρόβλημα DVFS σε εκείνο της εκτίμησης του χρόνου χαλάρωσης των επεξεργαστών και των πληροφοριών χρονισμού των εργασιών (π.χ. προθεσμία εργασίας, χρόνος έκδοσης εργασιών και χρόνος εκτέλεσης εργασιών). Με βάση τη διαθεσιμότητα πληροφοριών των χρονικών ορίων των εργασιών, ο προγραμματισμός των ενεργειακών εργασιών σε ενσωματωμένα συστήματα κατηγοριοποιείται σε δύο ομάδες: προγραμματισμός σε πραγματικό χρόνο και προγραμματισμός σε πραγματικό χρόνο.

Σε προγραμματισμό σε πραγματικό χρόνο, ο χρόνος απελευθέρωσης της εργασίας (δηλαδή ο χρόνος άφιξης) και ο συνολικός αριθμός κύκλων CPU που απαιτούνται για την ολοκλήρωση κάθε εργασίας (δηλ. Χρόνος εκτέλεσης εργασίας) είναι άγνωστοι εκ των προτέρων. Υπάρχουν πολλές μελέτες που εφαρμόζουν το DVFS σε σενάρια προγραμματισμού σε πραγματικό χρόνο. Στις περισσότερες προσεγγίσεις, μελετήθηκε ο χαμηλός προγραμματισμός των πολλαπλών εργασιών, ενώ ικανοποιούνταν οι περιορισμοί του σκληρού χρονισμού στο λειτουργικό σύστημα (OS).

Η βασική παραδοχή σε αυτές τις προσεγγίσεις DVFS, που είναι δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη, είναι ότι ο συνολικός αριθμός κύκλων CPU που απαιτούνται για την εκτέλεση κάθε εργασίας είναι σταθερός και διαθέσιμος. Ένας αλγόριθμος προγραμματισμού που συνειδητοποιεί την ενέργεια διαμορφώνεται σε ένα μαθηματικό προγραμματισμό του προβλήματος προγραμματισμού και εκχώρησης τάσης/ συχνότητας. Για να επιταχυνθεί ο αλγόριθμος, κατασκευάζεται ένας πίνακας χρονοδιαγράμματος κατά το σχεδιασμό ώστε να παρέχει πολλαπλές επιλογές προγραμματισμού για κάθε εργασία. αυτές οι πολλαπλές επιλογές προγραμματισμού μπορούν να χρησιμοποιούν σύνθετους αλγορίθμους για την κατασκευή του πίνακα χρονοδιαγράμματος κατά το σχεδιασμό.

Ένας στοχαστικός, καταμερισμένος, αλγόριθμος προγραμματισμού βασισμένος σε προγραμματισμό με μη-γραμμική μέθοδο, προτείνεται για πλατφόρμες πολλαπλών επεξεργαστών. Εκτός από την ακριβή αναλυτική διατύπωση της στοχαστικής αντικειμενικής συνάρτησης που βασίζεται στην ανάλυση γραφήματος εργασιών για προγραμματισμό, οι συγγραφείς επεκτείνουν επίσης τον περιορισμό του χρονοδιαγράμματος για τις υπό όρους δραστηριότητες για να βελτιώσουν την στοχαστική κατανομή των πόρων τους. Μια πιθανοτική κατανομή του χρόνου εκτέλεσης όλων των καθηκόντων χρησιμοποιείται για να χωρίσει καλύτερα το φόρτο εργασίας και συνεπώς να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας. Στη συνέχεια προτείνεται μια ευρετική μέθοδος πολυωνυμικού χρόνου για τη μετατροπή του προβλήματος προγραμματισμού, το οποίο είναι NP-hard, σε ένα πρόβλημα εξισορρόπησης φορτίου που βασίζεται στην πιθανότητα. αυτό το πρόβλημα επιλύεται στη συνέχεια με τη χειρότερη εφαρμογή φθίνουσας ευρετικής συσσώρευσης δοχείων. Οι συγγραφείς του, εξετάζουν την αβεβαιότητα όσον αφορά τον χρόνο εκτέλεσης των εργασιών και μοντελοποιούν κάθε μεταβλητό χρόνο εκτέλεσης ως τυχαία μεταβλητή. Στη συνέχεια προτείνονται δύο αλγόριθμοι τόσο για τον μονοεπεξεργαστή όσο και για τον πολυεπεξεργαστή χρησιμοποιώντας μια πιθανοτική προσέγγιση. αυτοί οι αλγόριθμοι σχεδιάζονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος και να ικανοποιούν τους περιορισμούς χρόνιου με μια εγγυημένη πιθανότητα εμπιστοσύνης. Ωστόσο, οι αλγόριθμοί τους για πλατφόρμες πολλαπλών επεξεργαστών υποφέρουν από εκθετική πολυπλοκότητα.

Στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας - τα ενσωματωμένα συστήματα που λειτουργούν σε περιβάλλον χωρίς πρόσβαση στην ενεργειακή δύναμη - ο προγραμματισμός χαμηλής ισχύος με το DVFS αυξάνει τη διάρκεια ζωής τους. Σε τέτοια συστήματα, τα καθήκοντα είναι περιοδικά και γενικά απλά. επίσης οι προγραμματιστές τους προσπαθούν να βρουν ένα βέλτιστο συνδυασμό μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της προθεσμίας καθυστέρησης των εργασιών - πράγμα που σημαίνει ότι οι χρονικοί περιορισμοί δεν είναι δύσκολο σε τέτοια συστήματα.

Σε μία άλλη προσέγγιση προτείνεται η Προσαρμοσμένη Προγραμματισμένη DVFS (AS-DVFS) τεχνική, η οποία απλοποιεί το αρχικό πρόβλημα προγραμματισμού με την αποσύνδεση και τον διαχωρισμό των χρονικών και ενεργειακών περιορισμών. Σε αυτή την περίπτωση, η προσέγγιση AS-DVFS ρυθμίζει τη συχνότητα λειτουργίας του επεξεργαστή: (1) βασισμένη στις πληροφορίες φόρτου εργασίας και (2) στο πλαίσιο των χρονοδιαγραμμάτων και των ενεργειακών περιορισμών, προς την επίτευξη της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του συστήματος.

Ένας αλγόριθμος προγραμματισμού, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας: (1) αναθέτοντας εργασίες στο στοιχείο επεξεργασίας με χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας και (2) μετεγκαθιστώντας αυτά τα καθήκοντα μεταξύ των επεξεργαστών. Επίσης προτείνουν έναν αλγόριθμο βασισμένο σε αξιοποίηση (UTB) που συνδυάζει τη συνειδητοποίηση της συγκομιδής ενέργειας, το DVFS και τη διαχείριση χρόνου βραδείας καθυστέρησης για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας περιοδικών εργασιών στα συστήματα πολλαπλών επεξεργαστών. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος προγραμματισμού χαμηλής πολυπλοκότητας βασίζεται στην έννοια της χρήσης της CPU εργασίας - που ορίζεται ως ο χειρότερος χρόνος εκτέλεσης της εργασίας που διαιρείται με την περίοδο.

Σε μια άλλη προσέγγιση, οι συγγραφείς προτείνουν έναν αλγόριθμο προγραμματισμού τάσης εντός εργασίας, βασισμένο σε μια στατική ανάλυση χρονισμού μιας εφαρμογής: αρχικά, μια δεδομένη εργασία χωρίζεται σε διάφορα τμήματα και κατόπιν η κατάλληλη τάση τροφοδοσίας (που προκύπτει από την ανάλυση στατικού χρόνου του προηγούμενου τμήματα και με βάση τον χειρότερο χρόνο εκτέλεσης της εργασίας) ανατίθεται για κάθε τομέα. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι αυτός ο αλγόριθμος προγραμματισμού έχει υψηλή αναλογία μείωσης ενέργειας, αξιοποιώντας πλήρως όλους τους χρόνους χαλάρωσης και επιλέγοντας μια κατάλληλη τάση/συχνότητα για να γεμίσει όσο το δυνατόν περισσότερο αυτούς τους χρόνους χαλάρωσης.

Μια μέθοδος με βάση το βρόχο ανατροφοδότησης λογισμικού προτείνεται στο όπου για κάθε χρονική περίοδο παρέχεται προθεσμία. Στη

συνέχεια, η συχνότητα λειτουργίας του επεξεργαστή της τρέχουσας θυρίδας υπολογίζεται με βάση τα ακόλουθα: (1) τον χρόνο χαλάρωσης που δημιουργείται στην προηγούμενη υποδοχή και (2) τον χειρότερο χρόνο εκτέλεσης της τρέχουσας θυρίδας. Η βασική παραδοχή και στις δύο προαναφερθείσες μεθόδους DVFS είναι ότι ο χειρότερος χρόνος εκτέλεσης κάθε τμήματος/θυρίδας μιας εργασίας είναι γνωστός, γεγονός που είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, σε αποκωδικοποίηση MPEG είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί με ακρίβεια, καθώς και να υπολογιστεί ο χρόνος εκτέλεσης της χειρότερης περίπτωσης κάθε πλαισίου. Αν και ο υπολογισμός ενός μόνο μοναδικού χρόνου εκτέλεσης χειρότερης περίπτωσης για όλα τα καρέ σε ένα συγκεκριμένο βίντεο μπορεί να είναι μια επιλογή - και επίσης εύκολη - δεν μπορεί να αξιοποιήσει σημαντικά τη δυνατότητα των τεχνικών DVFS που βασίζονται στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Ο αλγόριθμος επικεντρώνεται στην ενεργειακά αποδοτική αποκωδικοποίηση MPEG, προτείνοντας έναν αποτελεσματικό αλγόριθμο DVFS βασισμένο σε μελλοντική πρόβλεψη φόρτου εργασίας. Το ιστορικό βάσει πλαισίου χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη του υπολογιστικού φόρτου εργασίας ενός εισερχόμενου πλαισίου. Αυτή η πρόβλεψη δίνει αυτή την ευκαιρία να επιλέξει μια κατάλληλη τάση/συχνότητα για τον επεξεργαστή και να παράσχει την ακριβή ποσότητα υπολογιστικής ισχύος για να αποκωδικοποιήσει το πλαίσιο.

Επομένως, ο χρόνος αποκωδικοποίησης ενός πλαισίου χωρίζεται σε δύο μέρη: το τμήμα που εξαρτάται από το πλαίσιο και το τμήμα που είναι ανεξάρτητο από το πλαίσιο. Η στατιστική μεταβολή στο τμήμα που εξαρτάται από το πλαίσιο αντισταθμίζεται από το τμήμα που είναι ανεξάρτητο από το πλαίσιο. Αυτό επιτρέπει μια σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας με λιγότερη υποβάθμιση της QoS.

Σε μη προγραμματισμό σε πραγματικό χρόνο, οι πληροφορίες χρονοδιαγράμματος των εργασιών είναι διαθέσιμες κατά το χρόνο σύνταξης. Έχοντας αυτές τις πληροφορίες, οι προγραμματιστές (όπως ο χρονοπρογραμματιστής λίστας) μπορούν να αναπτυχθούν με τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης του επεξεργαστή για να καλύψουν όλες τις προθεσμίες-

απαιτήσεις. Αυτός ο τύπος προγραμματισμού χρησιμοποιείται για τα περισσότερα υπολογιστικά προβλήματα μεγάλης κλίμακας όπως η βιοπληροφορική, η χημεία και η αναγνώριση αντικειμένων σε εφαρμογές μηχανικής όρασης. Τα καθήκοντα προγραμματίζονται για πρώτη φορά χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο λίστας-προγραμματισμού όπου η αμοιβαία σχέση του χρόνου χαλάρωσης χρησιμοποιείται ως προτεραιότητες των εργασιών.

Στη συνέχεια, αυτοί οι χαλαροί χρόνοι κατανέμονται μεταξύ των καθηκόντων σε κάθε κρίσιμη διαδρομή. Έτσι, οι επεξεργαστές μπορούν να μετακινηθούν σε χαμηλότερη συχνότητα/τάση και να καταναλώσουν λιγότερη ενέργεια. Οι προγραμματισμένες εργασίες επαναδιοργανώνονται από έναν εκτεταμένο αλγόριθμο καταλογογράφησης-προγραμματισμού. Σε κάθε βήμα, ο αλγόριθμος υπολογίζει πρώτα την εξοικονόμηση ενέργειας μιας εργασίας όταν προγραμματίζεται στο τρέχον βήμα και το επόμενο βήμα. Η διαφορά μεταξύ της ενέργειας αυτών των δύο βημάτων αντιπροσωπεύεται ως εξοικονόμηση ενέργειας της εργασίας.

Ένα έργο με υψηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας και χαμηλότερο χρόνο βραδείας καθυστέρησης έχει προγραμματιστεί με μεγαλύτερη προτεραιότητα. Μια λύση δύο φάσεων μπορεί να αναπτυχθεί, όπου χρησιμοποιείται μια πρώτη έκδοση ενός πρώτου προγραμματισμένου αλγόριθμου πρώτης προθεσμίας στην πρώτη φάση για την ανάθεση μιας εργασίας σε έναν επεξεργαστή με το καλύτερο σετ σε σχέση με τον χρόνο ετοιμότητας εργασιών και τον ελεύθερο επεξεργαστή χρόνο; στη δεύτερη φάση, η κατάλληλη τάση / συχνότητα του επεξεργαστή για την εκτέλεση κάθε εργασίας στη συνέχεια επιλύεται με έναν ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (Integral Linear Programming, ILP).

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι στη βιβλιογραφία για ενεργειακά αποδοτικά ενσωματωμένα συστήματα προγραμματισμού σε πραγματικό χρόνο και σε μη πραγματικό χρόνο. Αυτοί οι αλγόριθμοι είναι κατάλληλοι για πλατφόρμες με μικρό αριθμό επεξεργαστών και συνήθως υποθέτουν ότι τα καθήκοντα (περιοδικά ή απεριόριστα) είναι ανεξάρτητα. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί μερικοί αλγόριθμοι για τη μείωση της κατανάλωσης ρεύματος σε

HPCS με χρήση DVFS και DPM. Παράδειγμα μπορούμε να αναπτύξουμε ένα θεωρητικό πλαίσιο για ενεργειακά αποδοτικά κέντρα δεδομένων ηλεκτρονικού επιχειρείν και εισάγουν μια αυτόματη μεθοδολογία διαχείρισης της ισχύος και της απόδοσης. Η μεθοδολογία τους χρησιμοποιεί μια μαθηματικά αυστηρή τεχνική βελτιστοποίησης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης/watt όσον αφορά την τήρηση των περιορισμών απόδοσης και την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Υπάρχουν μερικές τεχνικές βελτιστοποίησης για τους αλγόριθμους ηλεκτρονικού προγραμματισμού, οι οποίοι γενικά λειτουργούν αναπτύσσοντας δημοφιλείς ευρετικούς αλγορίθμους όπως MET, Min-Min, Max-Min, OLB ή γρήγορα άπληστους. Επιπλέον, έχουν προταθεί μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι όπως η προσομοίωση ανόπτησης και ο Tabu.

Οι συγγραφείς σ' αυτές τις προσεγγίσεις μελετούν την επίδραση της εικονικοποίησης για ενοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και προτείνουν μια τεχνική/αλγόριθμο δυναμικής διαμόρφωσης για την αποτελεσματική βελτιστοποίηση της ισχύος σε συστοιχίες διακομιστών εικονικοποίησης και τη δυναμική διαχείριση της. Στην περίπτωση της ενοποίησης πολλαπλών υπηρεσιών/εφαρμογών σε τέτοιου είδους εικονικοποιημένες συστάδες, αναπτύχθηκε μια δυναμική διαμόρφωση με βάση τη σύνταξη μικτού ακέραιου προγραμματισμού (MIP). Αυτή η ενεργειακά αποδοτική προσέγγιση λαμβάνει επίσης υπόψη το κόστος των διακομιστών που συχνά ενεργοποιούνται/ απενεργοποιούνται. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση είναι πολύ αργή για να πάρει μια σωστή απόφαση για έναν online προγραμματιστή. Επίσης το Virtual Machine (VM) χρησιμοποιείται για την εκτέλεση εφαρμογών HPC για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των εικονικοποιημένων κέντρων δεδομένων, υποστηρίζοντας τη μετανάστευση VM και τη βελτιστοποίηση τοποθέτησης VM με λιγότερη ανθρώπινη αλληλεπίδραση. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη το γενικό κόστος της εικονικοποίησης.

Ο φόρτος εργασίας διανέμεται σε διαφορετικά κέντρα δεδομένων σε διάφορες τοποθεσίες, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας και να διασφαλιστεί η SLA. Μια άλλη δυναμική πολιτική προγραμματισμού των εργασιών προτείνεται, για την κατανομή των πόρων με γνώση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα εικονικοποιημένο datacentre. Εκτός από την

εξέταση των γενικών εξόδων της εικονικοποίησης, η τεχνική προσπαθεί να συγκεντρώσει φόρτου εργασίας από ξεχωριστές μηχανές σε μικρότερο αριθμό κόμβων, απενεργοποιεί περισσότερους διακομιστές και έτσι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας ολόκληρου του κέντρου δεδομένων.

Η τεχνική DVFS Just-in-time παρουσιάστηκε για να γεμίσει χρόνο χαλάρωσης σε προγράμματα MPI. Ένα σύστημα που ονομάζεται Jitter χρησιμοποιήθηκε για να μειώσει τη συχνότητα στους κόμβους με πιο χαλαρούς χρόνους και λιγότερους υπολογισμούς. Ο στόχος του Jitter ήταν να είναι σίγουρος ότι τα καθήκοντα ήρθαν εγκαίρως χωρίς να αυξηθεί ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε σε επεξεργαστές που δεν λειτουργούσαν σε κορυφαία απόδοση κατά την εκτέλεση μιας παράλληλης εφαρμογής. Η καλύτερη συχνότητα επεξεργαστή για κάθε εργασία επιλέχθηκε με ανάλυση των προφίλ υπολογιστικής και επικοινωνιακής ισχύος που συλλέχθηκαν πριν από την εκτέλεση.

Κεφάλαιο 3^ο

3.1 Εισαγωγή

Από όσο γνωρίζουμε, οι περισσότερες μέθοδοι που βασίζονται σε DVFS χρησιμοποιούν μόνο μία συχνότητα για να επεξεργαστούν μια εργασία. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται ένα νέο μοντέλο (ονομάζεται αλγόριθμος DVFS μέγιστης ελάχιστης συχνότητας ή MMF-DVFS).

Σε αντίθεση με την ανάκτηση χρόνου σάρωσης στους περισσότερους υπάρχοντες αλγόριθμους βασισμένους σε DVFS που χρησιμοποιούν μόνο μία συχνότητα για να επεξεργαστούν μια εργασία σε γράφημα, το MMF-DVFS χρησιμοποιεί έναν γραμμικό συνδυασμό των υψηλότερων και χαμηλότερων συχνοτήτων ενός επεξεργαστή για να προσεγγίσει καλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης διεξάγεται εκτεταμένο σύνολο πειραμάτων και συγκρίσεων.

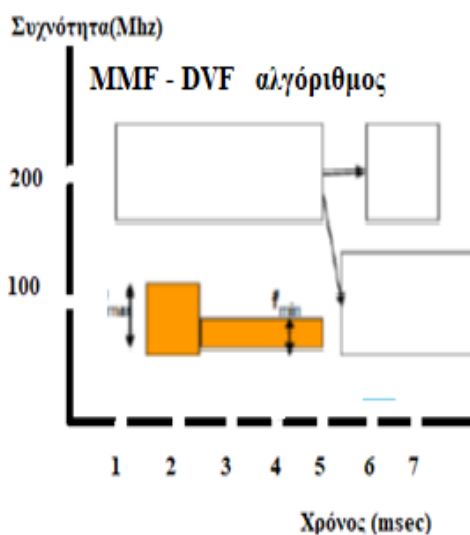
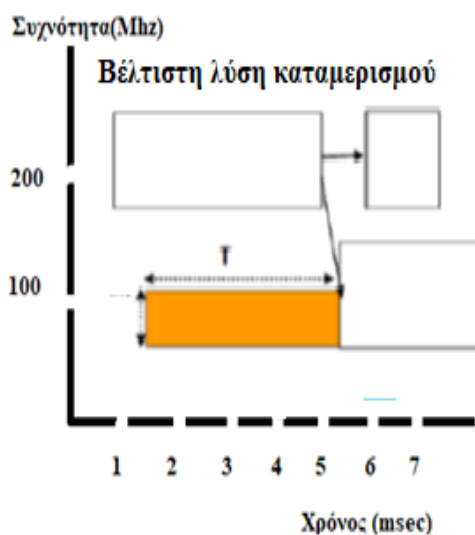
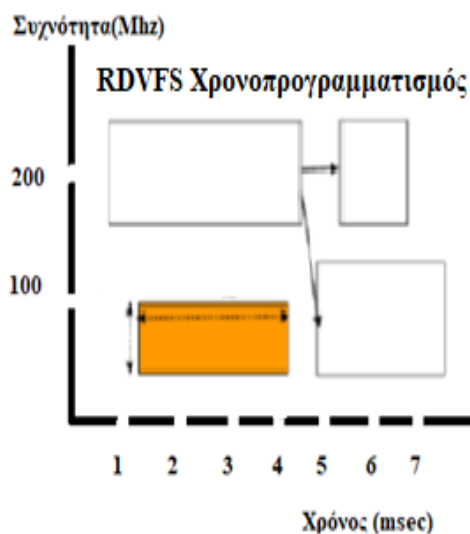
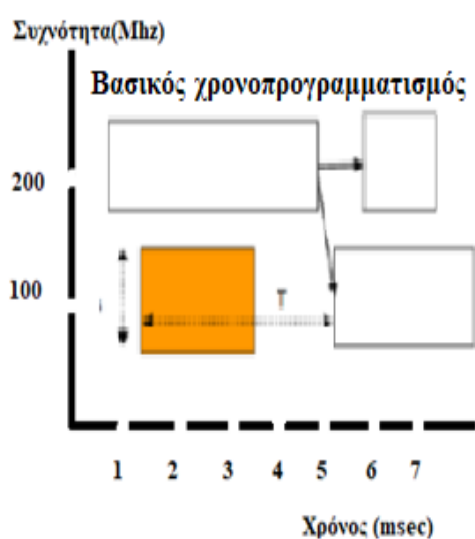
Πριν περιγράψουμε τον αλγόριθμο, εξηγούνται ορισμένες προκαταρκτικές παραδοχές σχετικά με τα μοντέλα συστημάτων και εφαρμογών και το ενεργειακό μοντέλο των επεξεργαστών.

3.2 Προκαταρκτικά

Στις παρακάτω ενότητες περιγράφονται οι έννοιες που θα χρησιμοποιήσουμε για να αναλύσουμε τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιήσουμε και θα αναλυθούν οι γραμμικοί συνδυασμοί DVFS enabled σχετικά με τις συχνότητες του επεξεργαστή για την τροποποίησή του.

3.2.1 Μοντέλα συστημάτων και εφαρμογών

Ένα παράλληλο σύστημα πληροφορικής αποτελείται από N ομοιογενείς επεξεργαστές με μεμονωμένες μνήμες. Σε τέτοια συστήματα, ο χρόνος μεταγωγής μεταξύ των συχνοτήτων μπορεί να αγνοηθεί με ασφάλεια στους επεξεργαστές επειδή ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση από μία συχνότητα σε μια άλλη (30-150 / sec) είναι σημαντικά μικρότερος από τον χρόνο εκτέλεσης των εργασιών (τουλάχιστον 1 ms).



Σχήμα 3-1. Χρονική αναπαράσταση του MMF-DVFS και άλλων αλγορίθμων: (α) Αρχικός προγραμματισμός, (β) Αλγόριθμος RDVFS, (γ) βέλτιστη συνεχής συχνότητα και (δ) αλγόριθμος MMF-DVFS.

Ένα σύνολο εξαρτημένων εργασιών ($A(1), A(2), \dots, A(M)$) που αντιπροσωπεύεται από ένα κατευθυνόμενο άκυκλο γράφημα εργασιών (DAG) θεωρείται επίσης ότι εκτελείται στο διαμορφωμένο σύστημα HPC.

Εδώ, η K -^{ιστή} διεργασία ($A(k)$) έχει τις ακόλουθες πέντε παραμέτρους: $T^{(k)}$ είναι το σύνολο του διαθέσιμου χρόνου που ένας επεξεργαστής μπορεί να αναθέσει στην εργασία - μια σύνοψη της εκτέλεσης της εργασίας και του χρόνου χαλάρωσης (Εικόνα 3-1α) είναι ο χρόνος εκτέλεσης της εργασίας όταν χρησιμοποιείται η συχνότητα f_i , και η f_{ideal} είναι η ιδανική συνεχής συχνότητα με βάση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας (Εικόνα 3-1γ). Το $K(k)$ είναι ο απαιτούμενος αριθμός κρουσμάτων ρολογιού (δηλαδή κύκλοι ρολογιού) που χρειάζεται η εργασία για την εκτέλεσή του και είναι ο χρόνος που ο επεξεργαστής ξοδεύει στην εκτέλεση της εργασίας στον αρχικό προγραμματισμό (Εικόνα 3-1α).

3.2.2 Μοντέλο ενέργειας

Οι επεξεργαστές με δυνατότητα DVFS μπορούν να εκτελέσουν μια εργασία χρησιμοποιώντας ένα διακριτό σύνολο τάσης-ζευγών συχνοτήτων ($F_i - V_i$), στην οποία ισχύει:

$$\{ V_1 < V_2 < \dots < V_N \} \text{ ΚΑΙ } \{ f_1 < f_2 < \dots < f_N \}$$

Στους επεξεργαστές που βασίζονται σε CMOS, η κατανάλωση ρεύματος ενός επεξεργαστή αποτελείται από δύο μέρη: (1) ένα δυναμικό μέρος που σχετίζεται κυρίως με την ενέργεια μεταγωγής κυκλώματος CMOS και (2) ένα στατικό μέρος που ασχολείται με τη διαρροή κυκλώματος CMOS. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας (P_d) υπολογίζεται ως:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_d = \lambda f v^2 + \mu v \\ f \propto (v - v_t)^2 / v_t \end{array} \right.$$

Όπου f , λ και μ αντιπροσωπεύουν τη συχνότητα λειτουργίας του επεξεργαστή, την πραγματική χωρητικότητα και την τάση λειτουργίας του επεξεργαστή, αντίστοιχα. Σημειώστε ότι v_t είναι μια τάση κατωφλίου που παρέχεται συνήθως από έναν κατασκευαστή. Η γενική σχέση μεταξύ τάσης, συχνότητας και ισχύος είναι:

$$\text{Αν } (f_i, v_i) < (f_j, v_j) \text{ Τότε } P_d(f_i, v_i) < P_d(f_j, v_j)$$

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας της K -^{100%} διεργασίας ($A(k)$) σε ένα DAG υπολογίζεται ως:

$$E^{(k)} = P_d t_i^{(k)} + P_l (T^{(k)} - t_i^{(k)})$$

όπου P_l είναι η ενέργεια που ένας επεξεργαστής καταναλώνει όταν είναι σε αδράνεια. Με τη σχεδόν-πάντα αληθινή υπόθεση ότι η μ_v είναι σταθερή και $v \gg v_t$, η σχέση μεταξύ συχνότητας και τάσης καθίσταται αναλογικά, δηλαδή, ως εκ τούτου, F_{av} είναι απλουστευμένη ως εξής:

$$P_d = \lambda f^3 + \gamma$$

3.2.3 Βέλτιστη συνεχής συχνότητα

Η βέλτιστη προσέγγιση για την απομάκρυνση του χρόνου χαλαρότητας και, ως εκ τούτου, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ενός επεξεργαστή,

είναι για τον επεξεργαστή να εκτελεί μια εργασία χρησιμοποιώντας μια συνεχή συχνότητα (Εικόνα 3-1c). Προτού προχωρήσουμε περαιτέρω, είναι απαραίτητο να αποδείξουμε τα ακόλουθα θεωρήματα:

Θεώρημα 1: Αν οι f_1 και $(f_2 > f_1)$ εκτελούν μια εργασία στο t_1 και t_2 , αντίστοιχα, τότε ισχύει ότι:

$$E^{(k)}(f_1, t_1) < E^{(k)}(f_2, t_2)$$

Απόδειξη:

$$E^{(k)}(f_2, t_2) - E^{(k)}(f_1, t_1) =$$

$$(\alpha f_2^3 + \gamma) t_2 + P_{idle}(T^{(k)} - t_2) - (\alpha f_1^3 + \gamma) t_1 + P_{idle}(T^{(k)} - t_1)$$

$$= \dots =$$

$$(f_2 - f_1) [\alpha f_1 f_2 (f_2 + f_1) - \gamma + P_{idle}] \geq 0$$

Γενικά, $P_{idle} > \gamma$, επομένως, το θεώρημα 1 αποδεικνύεται.

Θεώρημα 2: Αν η συχνότητα του επεξεργαστή συνεχίζεται (μη ρεαλιστική υπόθεση), η βέλτιστη ενέργεια για τη K -^{ιστή} επιτυγχάνεται όταν η εργασία καλύπτει το χρόνο-καθήκον ολόκληρης της εργασίας (ολοκλήρωση $T(k)$).

Απόδειξη: Το αποτέλεσμα στο θεώρημα 1 δείχνει ότι όταν μια συχνότητα καλύπτει ολόκληρο το χρόνο χαλαρότητας δίνει τη βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας. Σημειώστε ότι αυτή η συχνότητα μπορεί να μην υπάρχει εκτός εάν η συχνότητα είναι συνεχής.

Αναφερόμενο στο θεώρημα 2, για $K^{-100\text{th}}(A^{(k)})$, η βέλτιστη συνεχής συχνότητα που σχετίζεται με την ενέργεια ορίζονται ως:

$$F_{opt-cont}^{(k)} \text{ και } E_{opt-cont}^{(k)}$$

υπολογίζονται ως:

$$E_{opt-cont}^{(k)} = (\alpha (f_{opt-cont}^{(k)})^3 + \gamma) T^{(k)}$$

Σε πραγματικά συστήματα, ωστόσο, οι συχνότητες πρέπει να επιλέγονται από ένα διακριτό σύνολο συχνοτήτων.

Επίσης, η ολοκλήρωση μιας εργασίας μέχρι την προθεσμία μπορεί να απαιτεί την επιλογή συχνότητας ταχύτερης από τη βέλτιστη συχνότητα. Επομένως, η βέλτιστη διακριτή συχνότητα για τη $K^{-100\text{th}}$ διεργασία, είναι η πρώτη συχνότητα στο διακριτό σύνολο μεγαλύτερο από το αρχικό.

Αυτή η διακριτική συχνότητα και ο σχετικός χρόνος είναι $f_{RD}^{(k)}$ και $t_{RD}^{(k)}$, αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος που υπολογίζει αυτή τη συχνότητα αναφέρεται ως RDVFS για τη σύγκρισή μας.

3.2.4 Αλγόριθμος RDVFS: αποκατάσταση χαλαρότητας από μία συχνότητα

Παρακάτω παρατίθεται ο αλγόριθμος χαλαρότητας από μία συχνότητα. Ως είσοδος δίνονται οι προγραμματισμένες εργασίες σε ένα σύνολο επεξεργαστών P.

Αλγόριθμος RDVFS: Χαλαρή ανάκτηση κατά μία συχνότητα.

Είσοδος στον αλγόριθμο: Οι προγραμματισμένες εργασίες σ ένα σύνολο επεξεργαστών.

Έξοδος: Ο υπολογισμός $f^{(k)}_{RDVFS}$ $t^{(k)}_{RDVFS}$ για όλες τις διεργασίες.

Βήμα 1: Για κάθε εργασία $A^{(k)}$ που έχει προγραμματιστεί στον επεξεργαστή P_j .

Βήμα 2: Υπολόγισε τη βέλτιστη συνεχή συχνότητα $f^{(k)}_{opt-cont}$.

Βήμα 3: Επίλεξε την πλησιέστερη υψηλότερη συχνότητα $f^{(k)}_{opt-cont}$ στο σύνολο των συχνοτήτων για την CPU.

Βήμα 4: $t^{(k)}_{RDVFS} = (f^{(k)}_{opt-cont} / (f^{(k)}_{RDVFS})) T^{(k)}$

Βήμα 5: $E_{RDVFS} = f^{(k)}_{RDVFS} + t^{(k)}_{RDVFS} + P_{idle}(T^{(k)} - t^{(k)}_{RDVFS})$

Βήμα 6: Επανάλαβε τα βήματα από το Βήμα 1

Τελικά: επέστρεψε το $f^{(k)}_{RDVFS}$ $t^{(k)}_{RDVFS}$ για όλες τις διεργασίες.

Κώδικας 3-1. Αλγόριθμος RDVFS

3.2.5 Στάθμιση δυναμικής τάσης αναφοράς (RDVFS)

Το RDVFS είναι μια απλοποιημένη έκδοση του αλγορίθμου για συσπειρώσεις υψηλών επιδόσεων με δυνατότητα κλιμάκωσης ισχύος που υποστηρίζουν DVFS. Μειώνει την κατανάλωση ενέργειας των επεξεργαστών επιλέγοντας τη μικρότερη διαθέσιμη συχνότητα επεξεργαστή (FRDVFS) ικανή να ολοκληρώσει μια εργασία σε ένα συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο (Σχήμα 3-1β). Οι λεπτομέρειες του αλγορίθμου RDVFS παρουσιάζονται στο παραπάνω κώδικα (Κώδικας 3-1).

Για κάθε εργασία που εκχωρείται σε έναν επεξεργαστή, η οποία είναι η πρώτη συχνότητα μεγαλύτερη από τη βέλτιστη συχνότητα που υπολογίζεται από το θεώρημα 2, είναι πιθανό να είναι ο καλύτερος υποψήφιος διακριτής συχνότητας για να εκτελέσει την εργασία εντός του δεδομένου χρονικού πλαισίου και να καλύψει τον σχετικό χρόνο βραδείας χαλάρωσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένας σημαντικός περιορισμός της τεχνικής RDVFS είναι η χρήση μόνο μιας συχνότητας λειτουργίας που θα ολοκληρώσει την διεργασία.

3.3 Ο αλγόριθμος DVFS μέγιστης ελάχιστης συχνότητας (MMF-DVFS)

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο απλουστευμένης κατανάλωσης ενέργειας, η κατανάλωση ρεύματος της $K^{-\text{ισοτή}}$ διεργασίας στον MMF-DVFS αλγόριθμο διαμορφώνεται ως:

Βελτιστοποιημένο: $E(t_1^{(k)}, t_2^{(k)}) =$

$$f_{max}^3 t_1^{(k)} + f_{min}^3 t_2^{(k)} + P_{idle}(T^{(k)} - t_1^{(k)} - t_2^{(k)})$$

υπακούει στα εξής:

1. $f_{max} t_1^{(k)} + f_{min} t_2^{(k)} = f_{RDVFS}^{(k)} t_{RDVFS}^{(k)}$
2. $0 \leq t_1^{(k)} + t_2^{(k)} \leq T^{(k)}$
3. $t_1^{(k)} \geq 0, t_2^{(k)} \geq 0$

και επίσης:

$$\left\{ \begin{array}{l} E(t_1^{(k)}, t^{(k)}) < E^{(k)}_{RDVFS} \\ E^{(k)}_{RDVFS} = (f^{(k)}_{RDVFS})^3 + t^{(k)}_{RDVFS} + P_{idle}(T^{(k)} - t_1^{(k)}_{RDVFS}) \end{array} \right.$$

Η προηγούμενη ελαχιστοποίηση αποτελεί πρόβλημα βελτιστοποίησης και αντιπροσωπεύει το πρόβλημα της κατανάλωσης ρεύματος: πώς να επιλέγουμε και, όσον αφορά τους περιορισμούς, ώστε να ελαχιστοποιείται η καταναλισκόμενη ενέργεια του όλου συστήματος διεργασιών.. Για την επεξεργασία όλων των διεργασιών, ο επεξεργαστής πρέπει να περάσει τον ίδιο αριθμό κύκλων και στους δύο αλγόριθμους RDVFS και MMF-DVFS, όπως αναφέρεται στους περιορισμούς της προηγούμενης ελαχιστοποίησης.

3.3.1 Αλγόριθμος

Σε αυτή την ενότητα, αποδεικνύεται ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης για την εύρεση της ελαχιστοποίησης που προσεγγίστηκε παραπάνω, μπορεί να λυθεί άμεσα.

Θεώρημα 3: Για K_{th} -task ($T^{(k)}$), ο αλγόριθμος MMF-DVFS προσεγγίζει μια καλύτερη λύση από τον αλγόριθμο RDVFS όταν ισχύει:

$$t^{(k)}_{RDVFS} \leq \frac{[f_{max}^2 + f_{max} f_{min} P_{idle} / f_{min}](f_{max} / f^{(k)}_{RDVFS}) T^{(k)}}{[f_{max}^2 + f_{max} f_{min} + f_{min}^{(k)} - f^{(k)}_{RDVFS}] + P_{idle} / f^{(k)}_{RDVFS}}$$

Απόδειξη: απόκτηση του περιορισμού 1 και την αντικατάστασή του σε περιορισμό 2 οδηγεί σε:

$$\frac{f^{(k)}_{RDVFS} t^{(k)}_{RDVFS} - T^{(k)} f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \leq t_1^{(k)} \leq \frac{f^{(k)}_{RDVFS} t^{(k)}_{RDVFS}}{f_{max} - f_{min}}$$

Αντικατάσταση από τον περιορισμό 1 στο πρόβλημα βελτιστοποίησης δίνει:

$$E (t1^{(k)}) = t1^{(k)} [f^3_{max} - P_{idle} - (f_{max} / f_{min}) (f^3_{min} - P_{idle})] +$$

$$t^{(k)}_{RDVFS} (f^{(k)}_{RDVFS} / f_{min}) [f^3_{min} - P_{idle}] + P_{idle} T^{(k)} =$$

$$t1^{(k)} a + \beta$$

Με την προσθήκη των παραπάνω, τα νέα κριτήρια υπολογίζονται τώρα ως:

$$t1^{(k)} \leq \frac{[(f^{(k)}_{RDVFS})^2 - f^2_{min} + (P_{idle} / f_{min})]$$

$$f^{(k)}_{RDVFS} t^{(k)}_{RDVFS} - P_{idle} t^{(k)}_{RDVFS}) /$$

$$(f_{max} [f^2_{max} - f^2_{min}] + [P_{idle} / f_{min}] * [f_{max} - f_{min}])$$

Σε συγχώνευση όλων των παραπάνω αποτελεσμάτων αποδίδεται:

$$t^{(k)}_{RDVFS} \leq \frac{([f_{max}^2 + (f_{max} f_{min}) + (P_{idle} / f_{min})](f_{min} / f^{(k)}_{RDVFS})P_{idle} T^{(k)})}{[f_{max}^2 + (f_{max} f_{min}) + f_{min}^2 - (f^{(k)}_{RDVFS})^2] + (P_{idle} / f^{(k)}_{RDVFS})}$$

Η μη ισότητα στον τελευταίο τύπο, στην πραγματικότητα δείχνει ότι η αναπροσαρμογή της Κ-ιοστής διεργασίας με τον αλγόριθμο MMF-DVFS θα οδηγήσει σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από την χρήση του αλγορίθμου RDVFS για αυτή την εργασία.

Επομένως, ανάλογα με το αν η μη ισότητα στην τελευταία εξίσωση ικανοποιείται για αυτήν την εργασία ή όχι, το MMF-DVFS ή το RDVFS χρησιμοποιείται για να καθορίσει τον τρόπο εκτέλεσης της εργασίας, αντίστοιχα.

Σε συμπέρασμα, η ενέργεια του έργου ελαχιστοποιείται όταν το t έχει την ελάχιστη πιθανή τιμή. Συγκρίνοντας τις παραπάνω εξισώσεις μας δίνετε η τελική τιμή ως εξής:

$$t_1^{(k)} = (f^{(k)}_{RDVFS} t^{(k)}_{RDVFS} - T^{(k)} f_{min} T^{(k)}) / (f_{max} - f_{min})$$

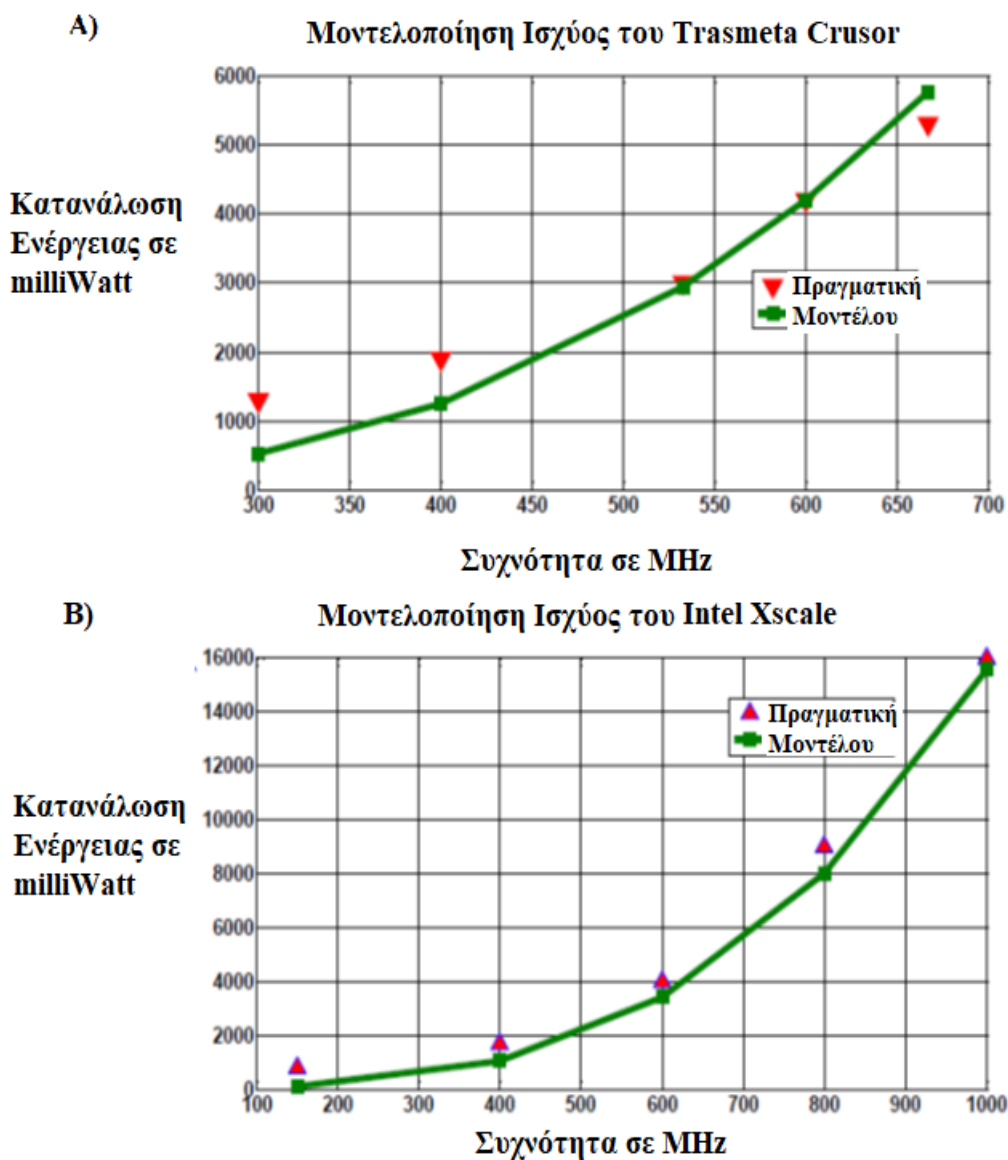
$$t_2^{(k)} = (T^{(k)} f_{max} - f^{(k)}_{RDVFS} + t^{(k)}_{RDVFS}) / (f_{max} - f_{min})$$

3.4 Αξιολόγηση και πειραματικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατανάλωση ενέργειας που προκύπτουν από την προσομοίωση του αλγορίθμου MMF-DVFS σε σύγκριση με τη βέλτιστη συνεχή συχνότητα και RDVFS. Για τη σύγκριση των αλγορίθμων, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω χρονοπρογραμματιστές με διαφορετικούς αριθμούς επεξεργαστών: (1) προγραμματισμός λίστας, (2) προγραμματισμός λίστας με το μεγαλύτερο

χρονικό διάστημα επεξεργασίας (LPT) και (3) προγραμματισμός λίστας με τον πιο σύντομο χρόνο επεξεργασίας (SPT).

Αυτοί οι χρονοπρογραμματιστές επιλέγονται ως παραδείγματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλοι αλγόριθμοι προγραμματισμού, καθώς ο αλγόριθμος ισχύει για τις διεργασίες που παρέμειναν μετά τον προγραμματισμό και είναι ανεξάρτητα από τον ίδιο τον προγραμματιστή. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή που αναπτύξαμε ως μέρος αυτής της μελέτης.



Σχήμα 3-4. Το λιγότερο τετράγωνο μοντέλο (α) *Trasmeta Crusoe*, και (β) *Intel Xscale* επεξεργαστές.

3.4.1 Ρυθμίσεις προσομοίωσης

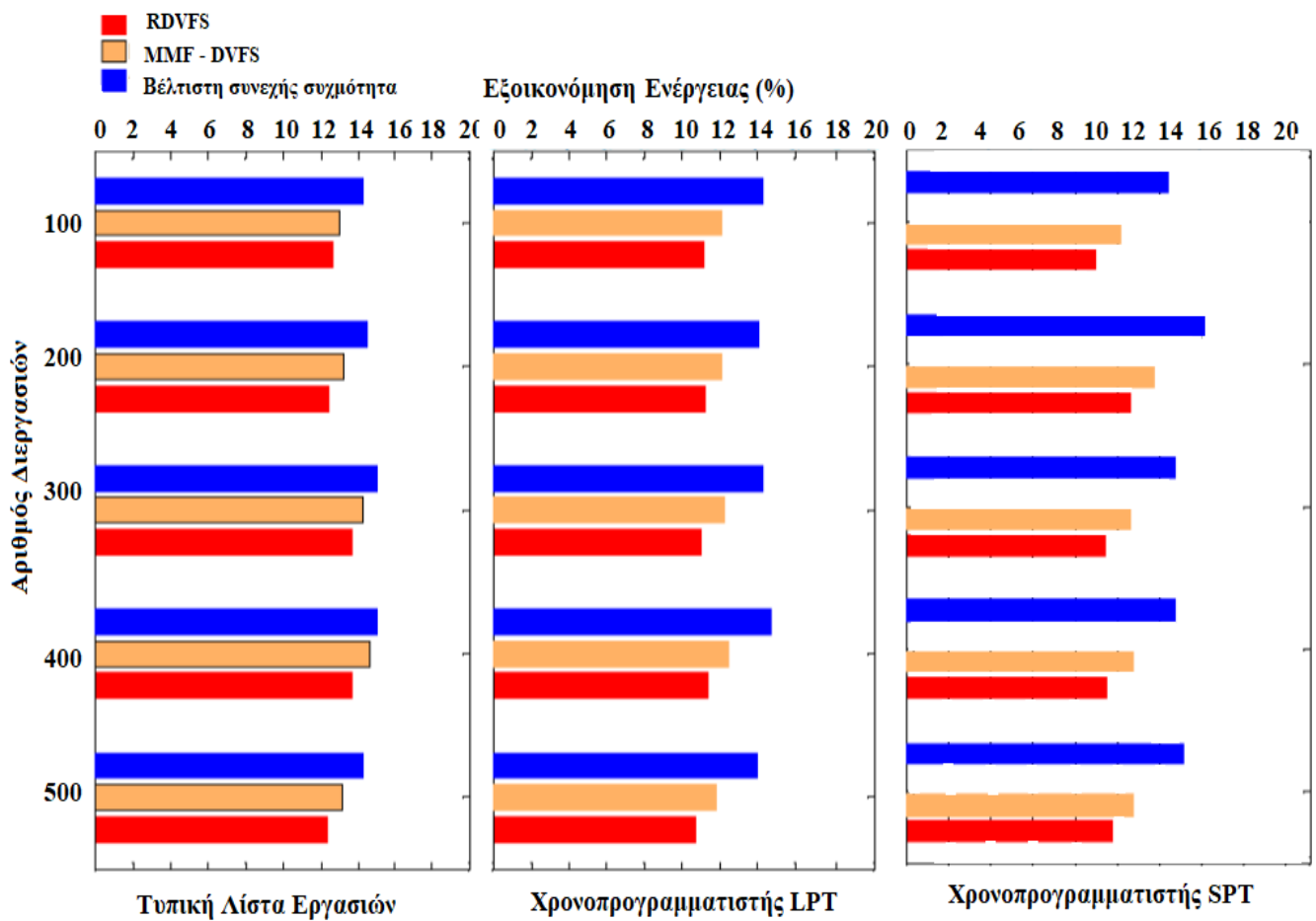
Η ρύθμιση τάσης/συχνότητας δύο πραγματικών επεξεργαστών χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις: Transmeta Crusoe [10] και Intel Xscale [62]. Ο Πίνακας 3-1 δείχνει την τάση / συχνότητα και τη σχετική κατανάλωση ενέργειας αυτών των επεξεργαστών μαζί με τα κυρτά μοντέλα κάθε επεξεργαστή. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν καμπύλη ελάχιστης τετραγώνου για να ταιριάζουν σε μια κυρτή λειτουργία με τη συχνότητα-ισχύ των δύο πραγματικών επεξεργαστών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-4.

Πίνακας 3-1. Η ρύθμιση τάσης / συχνότητας δύο πραγματικών επεξεργαστών στα πειράματα με την κατανάλωση ενέργειας και τα κυρτά μοντέλα.

TRANSMETA CRUSOE			
ΕΠΙΠΕΔΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (MHz)	ΤΑΣΗ (V)	ΙΣΧΥΣ (W)
0	667	1.6	5.3
1	600	1.5	4.2
2	533	1.35	3
3	400	1.225	1.9
4	300	1.2	1.3
ΜΟΝΤΕΛΟ CONVEX	$P=1.94 \cdot 10^{-5} \cdot (f/10^6)^3 + 4.44 \text{mW}$		
INTEL XSCALE			
ΕΠΙΠΕΔΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (MHz)	ΤΑΣΗ (V)	ΙΣΧΥΣ (W)
0	1000	1.8	1.6
1	800	1.6	0.9
2	600	1.3	0.4
3	400	1	0.17
4	150	0.75	0.08
ΜΟΝΤΕΛΟ CONVEX	$P=1.55 \cdot 10^{-5} \cdot (f/10^6)^3 + 60 \text{mW}$		

Η απόδοση των αλγορίθμων αξιολογείται με δύο ομάδες γραφημάτων εργασιών: παράλληλα δημιουργούμενες τυχαία και πραγματικές λέξεις. Οι δύο πραγματικές εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματά μας ήταν αποσύνθεση LU και Gauss-Jordan με DAG που εξάγονται. Για κάθε εφαρμογή στις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός παραλλαγών στον αριθμό των επεξεργαστών και των εργασιών. Το σετ γραφικών τυχαίων εργασιών αποτελείται από 1500 γραφήματα με πέντε μεγέθη γραφικών 100, 200, 300, 400 και 500 κόμβων, μαζί με τρεις διαφορετικούς προγραμματιστές σε πέντε ομάδες επεξεργαστών 2, 4, 8, 16 και 32 (Πίνακας 3-2).

Αυτά τα γραφήματα εργασιών έχουν διαφορετικό αριθμό εργασιών, διανομές εργασιών, κόστος επικοινωνίας και εξαρτήσεις εργασίας. Ο κύκλος εκτέλεσης αυτών των τυχαία παραγόμενων εργασιών κυμάνθηκε από 5-10 εκατομμύρια κύκλους από μια ομοιόμορφη κατανομή. Επιπλέον, 150 πραγματικές γραφικές παραστάσεις εργασιών εφαρμογής που βασίζονται στον αλγόριθμο αποσύνθεσης LU χρησιμοποιούνται σε πειράματα. Για το πραγματικό γράφημα εφαρμογής, ερευνήθηκε ο ίδιος αριθμός γραφικών εργασιών - που κυμαίνονταν από 100 έως 500 εργασίες - με τρεις προγραμματιστές και σε πέντε σύνολα επεξεργαστών.



Σχήμα 3-5. Η κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας του MMF-DVFS στον αριθμό των εργασιών: Η τυπική λίστα χρονοπρογραμματιστών, χρονοπρογραμματιστής λίστας με το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα επεξεργασίας (LPT) και λίστα χρονοπρογραμματισμού με σύντομη ώρα επεξεργασίας (SPT).

Πίνακας 3-2. Πειραματικές παράμετροι και μετρήσεις

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	[100, 200, 300, 400, 500]
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ ΣΤΟ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ	[2, 4, 8, 16, 32]
ΤΥΠΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ	Transmeta Crusoe, Intel Xscale

3.4.2 Αποτελέσματα

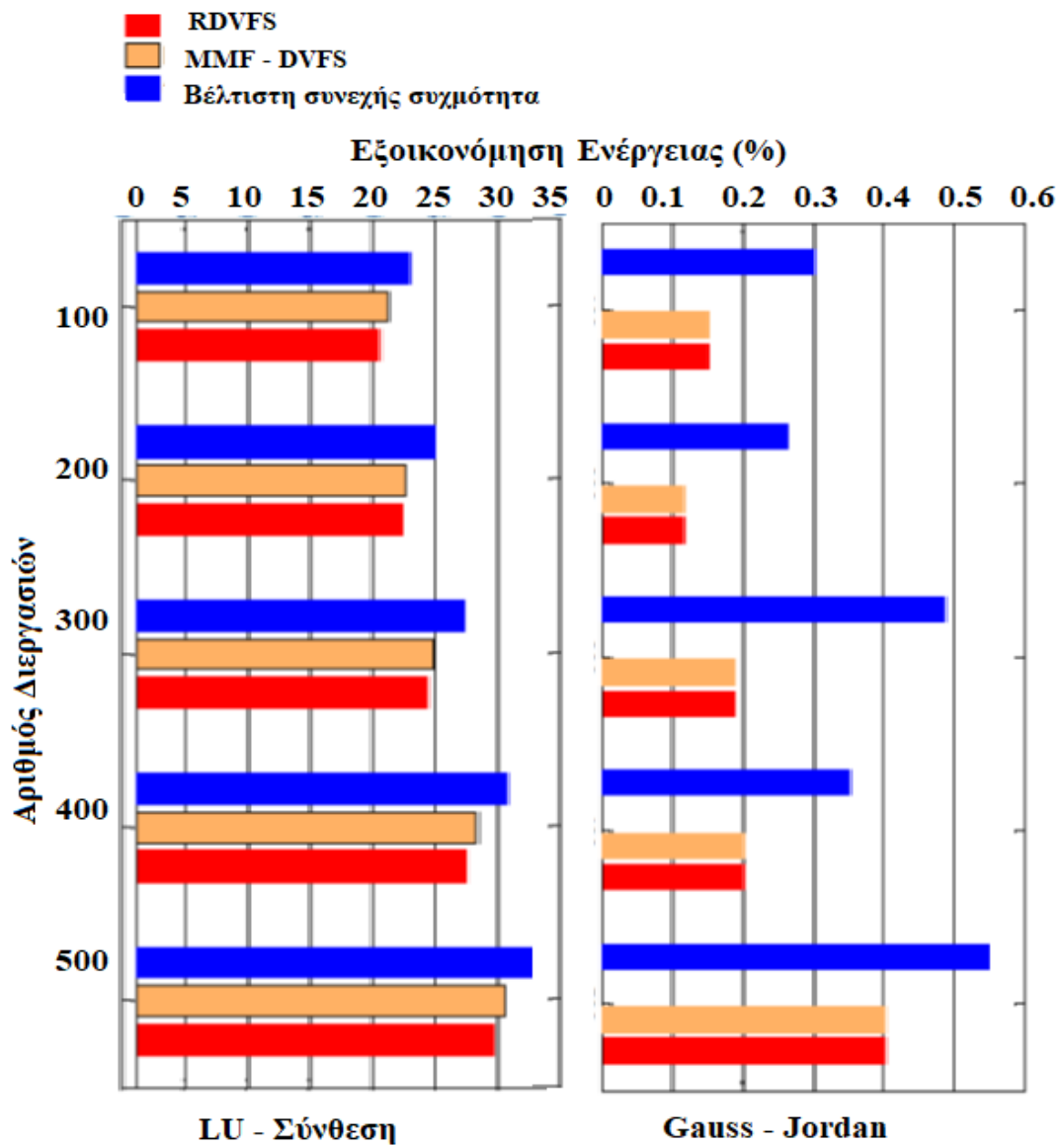
Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της κανονικοποιημένης κατανάλωσης ενέργειας για όλα τα DAG (Σχήματα 3-5 και 3-6 από Nikzad Babaii Rizvandi) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3. Αυτός ο πίνακας υποδηλώνει σαφώς την ανώτερη απόδοση του προγραμματισμού MMF-DVFS σε σύγκριση με τις άλλες προσεγγίσεις σε όλες τις περιπτώσεις. Το σχήμα 3-6 δείχνει ότι παρόλο που η αποτελεσματικότητα όλων των αλγορίθμων, συμπεριλαμβανομένου του MMF-DVFS, στην εξοικονόμηση ενέργειας σε σύνθεση LU είναι σημαντική, αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν φτωχότερη απόδοση στις εργασίες Gauss-Jordan.

Για μια βαθύτερη εξέταση αυτής της συμπεριφοράς, ένα δείγμα τριών επιπέδων σχεδιασμού θέσεων εργασίας Gauss-Jordan σε τρεις επεξεργαστές και με δεδομένο ότι δεν υπάρχει χρόνος αναμονής μεταξύ των εργασιών σε εφαρμογές γραφημάτων Gauss-Jordan, κανένας από αυτούς τους αλγόριθμους δεν μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας.

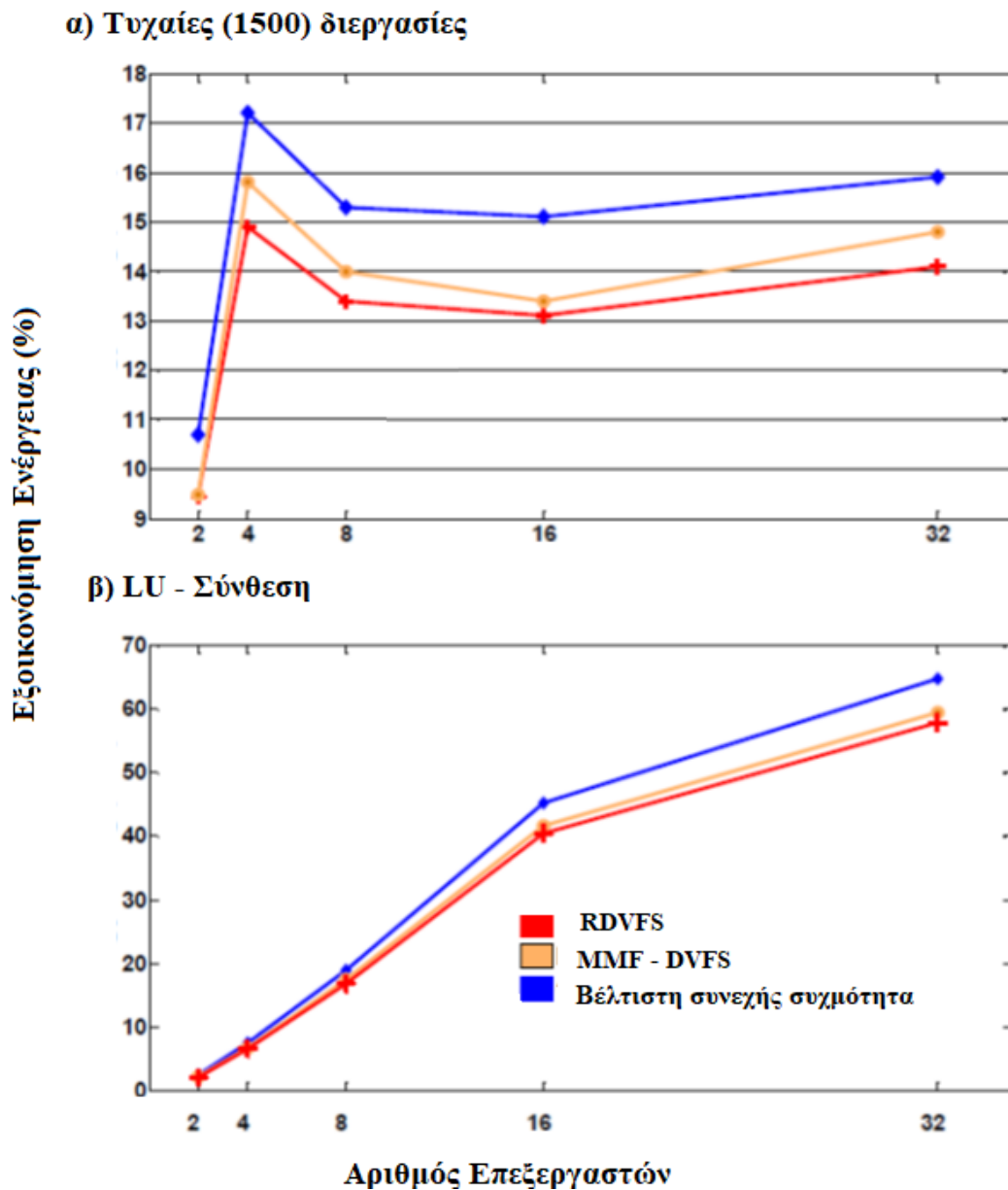
Πίνακας 3-3. Το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας του MMF-DVFS και άλλων αλγορίθμων σε 1800 τυχαίες και πραγματικές γραφικές παραστάσεις.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	Τυχειότητα στις διεργασίες	Causs - Jordan	LU - Σύνθεση
RDVFS	13%	0.10%	24.80%
MMF-DVFS	13.50%	0.11%	25.50%
Βέλτιστος συνεχόμενης συχνότητας	14.84%	0.14%	27.81%

Ένα ενδιαφέρον θέμα για περαιτέρω έρευνα είναι η σχέση μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και του αριθμού των επεξεργασιών στα πειράματά μας. Η αύξηση του αριθμού των επεξεργασιών επιταχύνει τον χρόνο επεξεργασίας και κατά συνέπεια μειώνει το μέγεθος του επεξεργαστή. Ωστόσο, ως μειονέκτημα, αυξάνει επίσης το χρόνο βραδείας λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 3-6. Η κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας του MMF-DVFS και άλλων αλγορίθμων για τον αριθμό των εργασιών για δύο εφαρμογές πραγματικού κόσμου: σύνθεση LU, και Gauss-Jordan.



Σχήμα 3-8. Η εξάρτηση της εξοικονόμησης ενέργειας σε MMF-DVFS και άλλους αλγορίθμους στον αριθμό των επεξεργαστών: (α) 1500 τυχαία παραγόμενα γραφικά εργασίας, (β) γραφικές παραστάσεις εργασιών αποικοδόμησης 300 LU.

Το σχήμα 3-8 (από Nikzad Babaii Rizvandi) αντιμετωπίζει αυτό το ζήτημα και απεικονίζει το ποσοστό της συνολικής εξοικονόμησης ενέργειας του συστήματος λόγω του αριθμού των επεξεργαστών για τυχαία γραφήματα και γραφικά σύνθεσης LU. Τα γραφήματα σε αυτό το σχήμα αποκαλύπτουν ότι η αύξηση του αριθμού των επεξεργαστών έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση περισσότερης ενέργειας.

Ο βασικός περιορισμός στους περισσότερους αλγόριθμους που βασίζονται σε DVFS που λειτουργούν με μία συχνότητα (όπως ο αλγόριθμος RDVFS) είναι ότι οι συνδυασμοί συχνοτήτων είναι σταθεροί. Αυτοί οι αλγόριθμοι λειτουργούν καλύτερα όταν ο επεξεργαστής μπορεί να τρέξει σε οποιοδήποτε αυθαίρετο σύνολο συχνοτήτων. Ωστόσο, λόγω των τεχνολογικών θεμάτων, ο αριθμός των έγκυρων συχνοτήτων είναι περιορισμένος, έτσι ώστε αυτοί οι αλγόριθμοι να επιλέγουν την καταλληλότερη συχνότητα μεταξύ ενός συνόλου συχνοτήτων που ορίζονται από το DVFS. Σύμφωνα με τον σταθερό αριθμό κύκλων κηλίδας για μια εργασία η σχέση μεταξύ, και για k-ιοστή διεργασία είναι:

$$t_{RD}^{(k)} = (f_{RD}^{(k)} / f_N) * t_{OS}^{(k)}$$

Δείχνεται ότι αν και είναι μια συνεχής μεταβλητή, δεν μπορεί να δεχθεί όλες τις τιμές. επομένως ο ελάχιστος χρόνος των εργασιών δεν μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Ωστόσο, στον αλγόριθμο MMF-DVFS, η σχέση μεταξύ αυτών των μεταβλητών είναι:

$$f_{RD}^{(k)} t_{RD}^{(k)} = f_{min} t_1^{(k)} + f_{max} t_2^{(k)}$$

η οποία είναι μια εξίσωση με περισσότερες από μία μεταβλητές και μπορεί να έχει περισσότερα επιλέξιμα αποτελέσματα.

Έτσι, οι κατάλληλες τιμές αυτών των μεταβλητών, σε σχέση με τις συνθήκες εργασίας, μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τον χρόνο βραδείας χαλάρωσης ή / και να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας.

Μια επιβάρυνση με MMF-DVFS είναι ο χρόνος μετάβασης από τη μετάβαση από τη μία συχνότητα στην άλλη. Μια υπόθεση που είναι σχεδόν πάντα αλήθεια είναι ότι το γενικό κόστος των χρόνων μετάβασης είναι σχετικά

μικρότερο από το χρόνο εκτέλεσης των εργασιών. επομένως, οι υπερωρίες μεταβατικών χρόνων μπορούν να παραμεληθούν στους υπολογισμούς. Στα πειράματά μας, οι εργασίες με τουλάχιστον 20 φορές μεγαλύτερο χρόνο μετάβασης θεωρούνται για τον αλγόριθμο MMF-DVFS. Γενικά τα γενικά έξοδα υπολογισμού του MMF-DVFS για κάθε εργασία είναι αρκετά αμελητέα σε σύγκριση με το μήκος της εργασίας.

3.5 Περίληψη και Παρατηρήσεις

Δεδομένου ότι οι περισσότεροι παραδοσιακοί αλγόριθμοι προγραμματισμού των στατικών εργασιών σε HPCS δεν εξετάζουν τη διαχείριση ενέργειας, εξετάστηκε το ζήτημα της ενέργειας με τον προγραμματισμό της εργασίας και παρουσιάστηκε ο αλγόριθμος DVFS μέγιστης ελάχιστης συχνότητας (MMF-DVFS). Αυτός ο αλγόριθμος υιοθέτησε την τεχνική DVFS, μια πρόσφατη πρόοδο στον σχεδιασμό του επεξεργαστή, για να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας.

Ενώ οι περισσότερες υπάρχουσες προσεγγίσεις που βασίζονται στο DVFS καλύπτουν τον χρόνο αδράνειας των προγραμματισμένων εργασιών χρησιμοποιώντας μία συχνότητα, το MMF-DVFS χρησιμοποιεί ένα γραμμικό συνδυασμό των υψηλότερων και χαμηλότερων συχνοτήτων στην περιοχή συχνοτήτων των επεξεργαστών για να επεξεργαστεί μια εργασία. Μετά τη διαμόρφωση ενός ενεργειακού μοντέλου σε επεξεργαστές με δυνατότητα DVS, ο αλγόριθμος MMF-DVFS διατυπώθηκε ως πρόβλημα βελτιστοποίησης αυτών των συχνοτήτων. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης των 1500 γραφημάτων εργασιών που δημιουργήθηκαν τυχαία και 300 γραφήματα εργασιών πραγματικού κόσμου έδειξαν ότι το MMF-DVFS μπορεί να βελτιώσει την εξοικονόμηση ενέργειας κατά 0,7% σε σύγκριση με τον αλγόριθμο RDVFS.

Κεφάλαιο 4^ο

Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Σ' αυτή τη εργασία στα πλαίσια της διδακτορικής μου μελέτης, έγινε αναφορά και χρησιμοποιήθηκαν έννοιες για την εφαρμογή αλγοριθμικών εργαλείων: (1) στον ενεργειακά αποδοτικό προγραμματισμό εργασιών σε επεξεργαστές κατανεμημένων / cloud με δυνατότητα DVFS. και (2) πρόβλεψη και μοντελοποίηση των επιδόσεων τους. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε ο ενεργειακώς αποδοτικός προγραμματισμός των εργασιών σε επεξεργαστές με δυνατότητα DVFS και δόθηκε μια εις βάθος έρευνα των υπάρχουσών μεθόδων.

Προτείνοντας και δοκιμάζοντας δύο νέους αλγορίθμους, παρατηρήσαμε ότι μια εργασία φτάνει στη βέλτιστη ενέργεια της όταν εκτελείται από το πολύ δύο διαθέσιμες συχνότητες στον επεξεργαστή με δυνατότητα DVFS. Αυτή η παρατήρηση αποδείχθηκε μαθηματικά. Ως παραπροϊόν, η απόδειξη αυτή αντιμετωπίζει ένα πρόβλημα συμφόρησης όσον αφορά την έρευνα σχετικά με τον ενεργειακό προγραμματισμό των εργασιών σε DVFS.

Όπως αναφέρεται από τους ερευνητές στο UC-Berkeley [6], ο πιο ενεργειακά αποδοτικός τρόπος προγραμματισμού ενός υπολογισμού είναι να τοποθετηθεί όλο το υλικό στην κατάσταση με τις υψηλότερες επιδόσεις και να αγωνιστεί για να ολοκληρωθεί το συντομότερο δυνατό. Στη συνέχεια, ρίξτε το υλικό σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ρεύματος. Στον πρώτο αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκε ανάλυση στατιστικής αντιστοίχισης προτύπων για να βρεθούν παρόμοια πρότυπα χρόνου χρήσης CPU μεταξύ δύο εφαρμογών. Με βάση τις έννοιες αντιστοίχισης προτύπων, υποτίθεται ότι εάν δύο εφαρμογές θεωρούνται «υπολογιστικά παρόμοιες» για σύντομα αρχεία δεδομένων, θα είναι αρκετά «παρόμοιες» και για μεγάλα μεγέθη δεδομένων. Αυτή η υπόθεση μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός χαρτών και να μειωθούν οι εργασίες για την εκτέλεση μιας νέας άγνωστης εργασίας MapReduce μέσω της πρώτης κατηγοριοποίησης με βάση τα πρότυπα αξιοποίησης της CPU και κατόπιν εκτίμησης των βέλτιστων παραμέτρων λειτουργίας που βασίζονται σε παρόμοιες εφαρμογές στην ίδια κατηγορία.

Δεδομένου ότι το MapReduce είναι ένα παραμετρικό καταναμημένο υπολογιστικό μοντέλο, το οποίο σημαίνει ότι μερικές από τις παραμέτρους διαμόρφωσης πρέπει να ρυθμιστούν σωστά από τον χρήστη, στον δεύτερο αλγόριθμο μελετήσαμε τη συσχέτιση - εξάρτηση μεταξύ δύο κύριων παραμέτρων διαμόρφωσης (δηλαδή του χάρτη για μείωση των εργασιών) και τη χρήση πόρων MapReduce και στη συνέχεια μοντελοποίησε αυτήν την εξάρτηση με την στατιστική υποχώρηση.

Δεδομένου ότι η διπλωματική αυτή εργασία περιλαμβάνει δύο τομείς έρευνας, συζητούμε τις μελλοντικές τάσεις της έρευνας και στους δύο αυτούς τομείς. Πρώτον, αυτό το έργο χρησιμοποιεί DVFS για να ανακτήσει τους χαλαρούς χρόνους προγραμματισμένων εργασιών. Γενικά, υπάρχουν δύο τρόποι συνδυασμού του προγραμματισμού και του DVFS: (1) ανεξάρτητη αποκατάσταση χαλαρότητας, και (2) ολοκληρωμένη δημιουργία προγραμματισμού.

Ο πρώτος απευθυνόταν σε αυτό το έργο, επομένως το επόμενο έργο μας είναι να επικεντρωθούμε στο τελευταίο συνδυάζοντας το DVFS και τον προγραμματισμό των εργασιών. Οι υπάρχουσες μέθοδοι στη βιβλιογραφία που βασίζονται σε αυτόν τον συνδυασμό έχουν έναν σημαντικό περιορισμό: σχεδόν όλοι τους επιλέγουν μία συχνότητα για κάθε εργασία για να ενσωματώσουν το DVFS και τον προγραμματισμό, ενώ θα θέλαμε να εφαρμόσουμε την τεχνική επιλογής πολλαπλών συχνοτήτων και τον προγραμματισμό για να πετύχουμε περισσότερη ενέργεια οικονομία.

Δεύτερον, η μοντελοποίηση πόρων και η παροχή θέσεων εργασίας στην πλατφόρμα MapReduce - μια παρόμοια διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες πλατφόρμες καταναμημένων / cloud computing - είναι σχετικά ένας

νέος τομέας έρευνας. Εκτός από την παροχή CPU και τη χρήση δικτύου, που μελετάται στο παρόν έργο, η πρόβλεψη του χρόνου εκτέλεσης μιας εργασίας είναι επίσης ένα σημαντικό ζήτημα. Μια τέτοια πρόβλεψη μπορεί να βοηθήσει τον χρονοπρογραμματιστή VM να αποδεχτεί / απορρίψει νέες θέσεις εργασίας ή να αναπροσαρμόσει με έξυπνο τρόπο τόσο τρέχουσες όσο και νέες θέσεις εργασίας με εγγύηση όλων των συμφωνιών επιπέδου υπηρεσιών (SLA). Μια βασική ανάλυση του χρόνου εκτέλεσης τέτοιων εργασιών αναφέρθηκε στην Τεχνική Έκθεση.

Τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση των μοντέλων πρόβλεψής μας για τη χρήση της CPU, τη χρήση του δικτύου και το χρόνο εκτέλεσης έδειξαν ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ αυτών των μετρήσεων και δύο παραμέτρων διαμόρφωσης MapReduce (δηλ. Αριθμού χαρτών / μειώσεων εργασιών). Υποθέτουμε ότι μπορεί να υπάρχει ισχυρή εξάρτηση μεταξύ αυτών των μετρήσεων και των περισσότερων άλλων παραμέτρων διαμόρφωσης. Επομένως, γίνεται όλο και πιο ενδιαφέρον και πολύτιμη η κάλυψη περισσότερων παραμέτρων διαμόρφωσης σε μοντέλο χρόνου εκτέλεσης και άλλους πόρους. Επιπλέον, παρατηρήσαμε ότι η στατιστική παλινδρόμηση δεν μπορεί να επιτύχει την απαιτούμενη ακρίβεια για κάποιες εφαρμογές, πιθανώς λόγω υπερβολικής τοποθέτησης και ελλιπούς τοποθέτησης μοντέλων που βασίζονται σε παλινδρόμηση και της μη γραμμικής συμπεριφοράς τέτοιων εφαρμογών. Έτσι, η επόμενη κίνηση μας είναι να αναπτύξουμε τεχνικές όπως ο συνδυασμός του k-πλησιέστερου γείτονα και της παλινδρόμησης ή της ασαφούς λογικής για να βελτιώσουμε την ακρίβεια της πρόβλεψης.

Επομένως, ένα άλλο μελλοντικό έργο θα μπορούσε να είναι να μελετηθεί και να μοντελοποιηθεί μια τέτοια αβεβαιότητα βασισμένη σε παραμέτρους διαμόρφωσης χρησιμοποιώντας Gaussian Process Regression. Όσον αφορά στην ενεργειακή απόδοση στο MapReduce / Hadoop, το σχέδιό μας είναι (1) να κάνουμε περαιτέρω ανάλυση και συνθετικό φόρτο εργασίας για να διερευνήσουμε σε ποιο τύπο εφαρμογής τα χαρακτηριστικά θα είναι τα καλύτερα ή χειρότερα αποτελέσματα όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και (2) να συσχετίζουμε και να επεκτείνουμε τη μοντελοποίηση των επιδόσεων και τις προβλέψεις για το MapReduce για να συμπεριλάβει την ισχύ.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

- K. Hwang, J. Dongarra, and G. C. Fox, Distributed and Cloud Computing: From Parallel Processing to the Internet of Things, first ed.: 9780123858801, 2011.
- Z. Zong, "Energy-Efficient Resource Management for High-Performance Computing Platforms," PhD Thesis, Auburn University, 2008.
- R. Ge, X. Feng, and K. W. Cameron, "Performance-constrained Distributed DVS Scheduling for Scientific Applications on Power-aware Clusters," presented at the Proceedings of the 2005 ACM/IEEE conference on Supercomputing, 2005.
- Alliance to Save Energy (ASE) and 1E, "Server Energy and Efficiency Report," 2009.
- Kirk W. Cameron, Kirk Pruhs, Sandy Irani, Partha Ranganathan, and D. Brooks, "Report of the Science of Power Management Workshop," presented at the Workshop on the Science of Power Management (SciPM 2009), 2009.
- S. Dawson-Haggerty, A. Krioukov, and D. Culler, "Power Optimization - A Reality Check," UCB/EECS-2009-140, UC-Berkeley, 2009.
- N. Kamyabpour and D. B. Hoang, "A hierarchy energy driven architecture for wireless sensor networks," presented at the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2010), Perth, Australia, 2010.
- N. Kamyabpour and D. B. Hoang, "A study on Modeling of Dependency between Configuration Parameters and Overall Energy Consumption in Wireless Sensor Network (WSN)," CoRR, 2011.
- J. Zhuo and C. Chakrabarti, "Energy-efficient dynamic task scheduling algorithms for DVS systems," ACM Trans. Embed. Comput. Syst., vol. 7, pp. 1-25, 2008.
- H. Kimura, M. Sato, Y. Hotta, T. Boku, and D. Takahashi, "Empirical study on Reducing Energy of Parallel Programs using Slack Reclamation

- by DVFS in a Power-scalable High Performance Cluster," in Cluster Computing, 2006 IEEE International Conference on, 2006, pp. 1-10.
- R. Xiaojun, Q. Xiao, Z. Ziliang, K. Bellam, and M. Nijim, "An Energy-Efficient Scheduling Algorithm Using Dynamic Voltage Scaling for Parallel Applications on Clusters," in Computer Communications and Networks, 2007. ICCCN 2007. Proceedings of 16th International Conference on, 2007, pp. 735-740.
 - Y. C. Lee and A. Y. Zomaya, "Minimizing Energy Consumption for Precedence-Constrained Applications Using Dynamic Voltage Scaling," presented at the Proceedings of the 2009 9th IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid (CCGrid), 2009.
 - Berl, E. Gelenbe, M. d. Girolamo, G. Giuliani, H. d. Meer, M. Q. Dang, et al., "Energy-Efficient Cloud Computing," The Computer Journal, 2009.
 - L. Benini and G. d. Micheli, Dynamic Power Management: Design Techniques and CAD Tools. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1998.
 - Y.-H. Lu, L. Benini, and G. D. Micheli, "Low-power task scheduling for multiple devices," presented at the Proceedings of the eighth international workshop on Hardware/software codesign, San Diego, California, United States, 2000.
 - V. Swaminathan and K. Chakrabarty, "Pruning-based, energy-optimal, deterministic I/O device scheduling for hard real-time systems," ACM Trans. Embed. Comput. Syst., vol. 4, pp. 141-167, 2005.
 - Y.-H. Lu, L. Benini, and G. D. Micheli, "Power-aware operating systems for interactive systems," IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst., vol. 10, pp. 119-134, 2002.
 - E. Y. C. Y. Lu, T. Simunic, L. Benini and G. De Micheli "Quantitative Comparison of Power Management Algorithms," Proceedings of Design Automation and Test in Europe (DATE), March 2000.
 - P. L. P. Krishnan, J. Vitter, "Adaptive Disk Spindown Via Optimal Rent-to-buy in Probabilistic Environments," International Conference on Machine Learning, pp. 322-330, July 1995.

- D. L. D. Helmbold, E. Sherrod, "Dynamic Disk Spin-down Technique for Mobile Computing," Conference on Mobile Computing, pp. 130-142, Nov.1996.
- P. d. Langen and B. Juurlink, "Trade-Offs Between Voltage Scaling and Processor Shutdown for Low-Energy Embedded Multiprocessors," presented at the Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling, and Simulation, 2007.
- E. S. Min Lee, Joonwon Lee, and Jin-soo Kim, "PABC: Power-Aware Buffer Cache Management for Low Power Consumption," IEEE Transactions on Computers, vol. 56, April 2007.
- C. L. H. Huang, T. Keller, and K.G. Shin, "Memory Traffic Reshaping for Energy-Efficient Memory," Int'l Symp. Low Power Electronics and Design (ISLPED '05), pp. 393-398, Aug 2005.
- P. P. H. Huang, and K.G. Shin, "Design and Implementation of Power-Aware Virtual Memory," Proc. USENIX Ann. Technical Conf., pp. 57-70, 2003.
- F. Yao, A. Demers, and S. Shenker, "A scheduling model for reduced CPU energy," presented at the Proceedings of the 36th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 1995.
- T. Ishihara and H. Yasuura, "Voltage scheduling problem for dynamically variable voltage processors," presented at the Proceedings of the 1998 international symposium on Low power electronics and design, Monterey, California, United States, 1998.
- J. Cong and K. Gururaj, "Energy Efficient Multiprocessor Task Scheduling under Input-dependent Variation," presented at the Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE '09), Dresden, Germany, 2010.
- M. Lombardi and M. Milano, "Stochastic allocation and scheduling for conditional task graphs in MPSoCs," presented at the Proceedings of the 12th international conference on Principles and Practice of Constraint Programming, Nantes, France, 2006.
- C. Xian, Y.-H. Lu, and Z. Li, "Energy-aware scheduling for real-time multiprocessor systems with uncertain task execution time," presented at

the Proceedings of the 44th annual Design Automation Conference, San Diego, California, 2007.

- M. Qiu, C. Xue, Z. Shao, and E. H.-M. Sha, "Energy minimization with soft real-time and DVS for uniprocessor and multiprocessor embedded systems," presented at the Proceedings of the conference on Design, automation and test in Europe, Nice, France, 2007.
- S. Liu, Q. Wu, and Q. Qiu, "An adaptive scheduling and voltage/frequency selection algorithm for real-time energy harvesting systems," presented at the Proceedings of the 46th Annual Design Automation Conference, San Francisco, California, 2009.
- T. Wei, Y. Guo, X. Chen, and S.Hu, "Adaptive Task Allocation for Multiprocessor SoCs in Energy Harvesting Systems," presented at the 11th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED), San Jose, CA, 2010.
- J. Lu and Q. Qiu, "Scheduling and mapping of periodic tasks on multi-core embedded systems with energy harvesting," presented at the Second International Green Computing Conference (IGCC 2011), Orlando, Florida, 2011.
- D. Shin, J. Kim, and S. Lee, "Low-energy intra-task voltage scheduling using static timing analysis," presented at the Proceedings of the 38th annual Design Automation Conference, Las Vegas, Nevada, United States, 2001.
- S. Lee and T. Sakurai, "Run-time power control scheme using software feedback loop for low-power real-time application," presented at the Proceedings of the 2000 Asia and South Pacific Design Automation Conference, Yokohama, Japan, 2000.
- K. Choi, W-C. Cheng, and M. Pedram, "Frame-based dynamic voltage and frequency scaling for an MPEG player," *Journal of Low Power Electronics*, American Scientific Publishers, vol. 1, pp. 27-43, April 2005.
- J. M. Geusebroek and F. J. Seinstra, "Object Recognition by a Robot Dog Connected to aWide-Area Grid System," in *Multimedia and Expo*,

2005. ICME 2005. IEEE International Conference on, 2005, pp. 1565-1566.
- J. Luo and N. K. Jha, "Static and Dynamic Variable Voltage Scheduling Algorithms for Real-Time Heterogeneous Distributed Embedded Systems," presented at the Proceedings of the 2002 Asia and South Pacific Design Automation Conference, 2002.
 - F. Gruian and K. Kuchcinski, "LEneS: task scheduling for low-energy systems using variable supply voltage processors," presented at the Proceedings of the 2001 Asia and South Pacific Design Automation Conference, Yokohama, Japan, 2001.
 - Y. Zhang, X. S. Hu, and D. Z. Chen, "Task scheduling and voltage selection for energy minimization," presented at the Proceedings of the 39th annual Design Automation Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 2002.
 - B. Khargharia, S. Hariri, and M. S. Yousif, "Autonomic power and performance management for computing systems," *Cluster Computing*, vol. 11, pp. 167-181, 2008.
 - T. D. Braun, H. J. Siegel, N. Beck, L. L. B\, \#246, \, et al., "A comparison of eleven static heuristics for mapping a class of independent tasks onto heterogeneous distributed computing systems," *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 61, pp. 810-837, 2001.
 - R. Armstrong, D. Hensgen, and T. Kidd, "The Relative Performance of Various Mapping Algorithms is Independent of Sizable Variances in Runtime Predictions," presented at the Proceedings of the Seventh Heterogeneous Computing Workshop, 1998.
 - Abraham, R. Buyya, and B. Nath, "Nature's Heuristics for Scheduling Jobs on Computational Grids," presented at the 8th International Conference on Advanced Computing and Communications, India, 2000.
 - M. Mika, G. Walig\, \#243, ra, and J. Weglarz, "A metaheuristic approach to scheduling workflow jobs on a Grid," in *Grid resource management*, N. Jarek, M. S. Jennifer, and W. Jan, Eds., ed: Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 295-318.

- V. Petrucci, O. Loques, B. Niteroi, and D. Mossé, "Dynamic configuration support for power-aware virtualized server clusters," presented at the 21th Conference on Real-Time Systems, Dublin, Ireland, 2009.