AIN SHAMS UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electronics and Communication Engineering

DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENCY TECHNIQUES IN COGNITIVE RADIO HETEROGENEOUS WIRELESS NETWORKS

A Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Philosophy of Doctor in Electrical Engineering
(Electronics and Communication Engineering)

Submitted By

Eng. Amr Ali Fahmy Moustafa Shawky

Supervised By

Prof. *Salwa Hussein El-Ramly*
Prof. *Hesham Mohamed El-Badawy*
Dr. *Asmaa Mahmoud Saafan*

Cairo – Egypt
2017

جامعة عين شمس
كلـية الهـندسـة
قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات الكهربية

استخدام التقنيات الموفرة للطاقة في الشبكات اللاسلكية اللامتجانسة للراديو الإدراكي

رسـالة

مقدمة للحصول على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائية
(هندسة الإلكترونيات والاتصالات)

مقدمة من:

مهندس/ عـمرو عـلي فـهمي مـصطفى شـوقي

تحت إشـراف:

أ.د./ سـلوى حـسين الرمـلي
أ.د./ هـشام مـحمد البـدوي
د./ أسـماء مـحمود سـعفان

القاهرة – جمهورية مصر العربية
2017

AIN SHAMS UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electronics and Communication Engineering

Examiners Committee

Name: **Amr Ali Fahmy Moustafa Shawky**

Thesis: **Development of Energy Efficiency Techniques in Cognitive Radio Heterogeneous Wireless Networks.**

Degree: **Doctor of Philosophy in Electrical Engineering (Electronics and Communication Engineering)**

Approved by:

Name	Title	Signature
Prof. ***Khaled Fouad El-Sayed***	Faculty of Engineering, Cairo University.	..... (Examiner)
Prof. ***Salwa Hussein El-Ramly***	Department of Electronics and Communications Engineering, Faculty of Engineering, Ain Shams University.	..... (Supervisor)
Prof. ***Hesham Mohamed El-Badawy***	Department of Network Planning, National Telecommunication Institute, Ministry of Communication. & Information Technology.	..... (Supervisor)
Associate Prof. ***Hussein Abd El Ati Elsayed***	Department of Electronics and Communications Engineering, Faculty of Engineering, Ain Shams University.	..... (Examiner)

Date: 21/12/2017

جامعة عين شمس
كلـية الهـندسـة
قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات الكهربية

رسـالة دكتوراه الفلسفة

الاسـم: عـمرو عـلي فـهمي مـصطفى شـوقي
عنوان الرسالة: استخدام التقنيات الموفرة للطاقة في الشبكات اللاسلكية اللامتجانسة للراديو الإدراكي
الدرجـة: دكتوراه الفلسفة في الهندسة الكهربائية (هندسة الإلكترونيات والاتصالات)

لجنـة الحكـم

الاسم	الوظيفة	التـوقيع
أ.د./ خالد فؤاد السيد	أستاذ دكتور، كلية الهندسة، جامعة القاهرة.	..... (مناقشاً)
أ.د./ سـلوى حـسين الرمـلي	أستاذ متفرغ، قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات، كلية الهندسة، جامعة عين شمس	..... (عن لجنة الاشراف)
أ.د./ هشـام مـحمد البـدوي	أستاذ دكتور، قسم تخطيط الشبكات، المعهد القومي للاتصالات، وزارة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات.	..... (عن لجنة الاشراف)
أ.م.د./ حسين عبد العاطي السيد	أستاذ مساعد، قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات، كلية الهندسة، جامعة عين شمس	..... (مناقشاً)

التاريخ: 2017/12/21

جامعة عين شمس
كليـــة الهنـدســـة
قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات الكهربية

اسم الباحث: عــمرو عــلي فــهمي مصــطفى شــوقي
عنوان الرسالة: استخدام التقنيات الموفرة للطاقة في الشبكات اللاسلكية اللامتجانسة للراديو الإدراكي.
إسم الدرجة: دكتوراه الفلسفة في الهندسة الكهربية (هندسة الإلكترونيات والاتصالات)

لجنة الإشراف

الاسـم	الوظـيفة	التـوقيع
أ.د./ سـلوى حسين الـرملي	أستاذ متفرغ، قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات الكهربية، كلية الهندسة، جامعة عين شمس.	.....
أ.د./ هشـام محـمد البدوي	أستاذ دكتور، قسم تخطيط الشبكات، المعهد القومي للاتصالات، وزارة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات.	.....
د./ أسـماء محـمود سـعفان	مدرس، قسم تخطيط الشبكات، المعهد القومي للاتصالات، وزارة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات.	.....

الدراســات العليــا:

ختـم الإجـازة: **تاريخ البحث: ...../...../2017**

أجيزت الرسالة بتاريخ: ...../...../2017

موافقة مجلس الكلية: **بتاريخ: ...../...../.....**

موافقة مجلس الجامعة: **بتاريخ: ...../...../.....**

مستخلص

عـمرو عـلي فـهمي مـصطفى شـوقي، رسالة دكتوراه الفلسفة، "استخدام التقنيات الموفرة للطاقة في الشبكات اللاسلكية اللامتجانسة للراديو الإدراكي". جامعة عين شمس، 2017

مقدمة:

شهدت صناعة الهواتف المحمولة نمواً طردياً منذ عام 2014، حيث تم تسجيل 3.6 مليار مشترك بخدمات الاتصالات المحمولة. ففي خلال الربع الأول من عام 2017، إشترك أكثر من نصف سكان العالم في تلك الخدمات، بينما كانوا خمس ذلك العدد قبل إثني عشر عاماً مضت. كذلك، من المتوقع أن ينضم 10 بليون عميل جديد لتلك الخدمات بحلول العام 2020 وهو ما يعني - من الناحية الإحصائية - تحقيق معدل انتشار عالمي في جميع أنحاء العالم بحوالي 60٪ وهو ما أدى إلى النظر في مبدأ "الاتصالات الخضراء" التي أصبحت واحدة من الموضوعات الرئيسية في مجال أبحاث الاتصالات اللاسلكية نظرا لمساهماتها في الحفاظ على البيئة. ويستعمل مصطلح "كفاءة الطاقة" كطريقة لتوفير الطاقة المستهلكة في إنجاز الاتصالات، مما يقلل من التلوث ويحافظ على الموارد الطبيعية.

ستواجه الأجيال القادمة من أنظمة الاتصالات المحمولة تحديات تتعلق بالموائمات بين مطالب "كفاءة الطاقة" مقابل "جودة الخدمة" خاصة في مجال "نقل البيانات". يعتبر الراديو الإدراكي أحد التقنيات المرشحة بقوة لتحقيق كفاءة الطاقة في مجال الاتصالات ذات النطاق العريض.

تسهم الرسالة في إيجاد طرق لتحسين أداء الشبكات اللاسلكية اللامتجانسة باستخدام تقنيات "الراديو الإدراكي (Cognitive Radio)" وتحت مظلة "كفاءة الطاقة (Energy Efficiency)" أثناء تحقيق الاتصالات بشبكات الاتصال ذات النطاق العريض. وتحتوي الرسالة على عدد سبعة فصول، وملحق يحتوي علي كشف بالمراجع التي تمت الاستعانة بها اثناء العمل، ويمكن إجمال الرسالة على النحو الآتي:

في الفصل الأول، سيتم تقديم نبذة عن "الاتصالات الخضراء" لبيان الهدف من تحقيق الإسهامات في هذه الرسالة، كما سيتم عرض نقطة البحث، والأهداف المأمول الحصول عليها.

في الفصل الثاني، سيتم استعراض مفاهيم "كفاءة الطاقة" وما يتعلق بها من تقنيات الاتصالات الخضراء. حيث سيتضمن الفصل إطار تقييم ومعايير تقييم كفاءة الطاقة وأهم المشروعات الدولية المساهمة في تحديد معايير ومقاييس هذا المجال. كما سيتم استعراض أهم الاعتبارات والموائمات التي تحكم عمليات التصميم والبحث لتحسين مستوى كفاءة الطاقة لأنظمة الاتصالات.

في الفصل الثالث، سيتم استعراض التقنيات الملائمة (الصديقة) للاستخدام في مجال الاتصالات الخضراء، وأهم السمات الخاصة بها وسبب تفضيلها للتطبيقات في هذا المجال (وأهمها في مجالات تقنيات الراديو الإدراكي). كما سيتم استعراض أهم المقاييس والمعايير الدولية التي وضعتها المؤسسات الدولية والمشروعات المعنية وأسلوب تحليل أداء مكونات أنظمة الاتصالات في مرحلة الوصلة الهابطة وخاصة في مجال استهلاكهم للطاقة.

في الفصل الرابع، سيتم عرض لكيفية تطبيق تقنية اتخاذ القرارات بواسطة سلاسل "ماركوف" لتحليل الأداء في مجال شبكات الراديو الإدراكي. وسيتم استعراض مكونات تلك العمليات من حيث العناصر المختلفة كاحتمالية الانتقال من حالة لأخرى، احتمالية البقاء في نفس الحالة، وكذلك دالة

العائد من استخدام تلك الأساليب الرياضية. كما سيتم استعراض كيفية إيجاد حلول للمشاكل عند توافر بدائل و كذا إيجاد السياسة من خلال المحاولات. سيتم أيضاً استعراض كيفية استخدام الطرق الرياضية المعتمدة على أسلوب الملاحظة الجزئي حيث أن معظم النظم لا يتأتى متابعتها/ملاحظتها بصفة مستمرة لذا يتم الاعتماد على أسلوب الملاحظات الجزئي "ماركوف لاتخاذ القرار بالملاحظة الجزئية (POMDP)" وكيفية الحصول على دالة القيمة وحسابها من خلال أسلوب المحاولات العددية. ونظراً لحساسية أنظمة الاتصالات لتأخير وصول البيانات، فإن تعقيد الحسابات يمثل عنصراً هاماً يجب التغلب عليه، حيث سيتم شرح البديل المناسب لحساب "دالة القيمة" من خلال العملية المبسطة "قصيرة المدى (Myopic)" التي توفر نتائج قريبة من المثالية.

في الفصل الخامس، سيتم استعراض كيفية تقييم الأداء في مرحلة وصلة الاتصالات بالوصلة الهابطة وكيفية تحليل وحساب استهلاك الطاقة وسعة البيانات حتى يمكن تقديم المقترح لتحسين الأداء وكذا ما تم تحقيقه من مساهمة في مجال تحسين كفاءة الطاقة. حيث تم نشر ورقة بحثية في هذا المجال تضمنت النتائج التي تم الحصول عليها.

في الفصل السادس، سيتم استعراض كيفية تقييم الأداء في مرحلة وصلة الاتصالات الصاعدة وكيفية تحليل عناصر النظام من خلال استخدام تقنيتين "مثالية" وأخرى "تقريبية" كتطبيق مباشر لأسلوب "ماركوف لاتخاذ القرار بالملاحظات الجزئية" كما سيتم استعراض المساهمات والمقترحات لتعديل النموذج الممثل للنظام للحصول على تحسين كفاءة الطاقة المستخدمة في الاتصال. حيث تم نشر ورقة بحثية أخرى في هذا المجال تضمنت النتائج التي تم الحصول عليها.

وأخيراً،

في الفصل السابع، سيتم عرض لخلاصة ما تم تقديمه في هذه الرسالة، كما سيتم تقديم بعض الاقتراحات من أجل مزيد من الأعمال في المستقبل.

المشرفون على الرسالة:

أ.د./ **سـلوى حسين الرملي**

أستاذ متفرغ، قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات، كلية الهندسة، جامعة عين شمس

أ.د./ **هشام محمد البدوي**

أستاذ دكتور، قسم تخطيط الشبكات، المعهد القومي للاتصالات، وزارة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات.

د./ **أسماء محمود سعفان**

مدرس، قسم تخطيط الشبكات، المعهد القومي للاتصالات، وزارة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات.

21/12/2017

ABSTRACT

AMR ALI FAHMY MOUSTAFA

PHILOSOPHY OF DOCTOR THESIS, AIN SHAMS UNIVERSITY

The mobile industry continued to scale rapidly since 2014, in which 3.6 billion unique mobile subscribers have been recorded. During the first quarter of 2017, more than half of the world's population had a mobile subscription up from just one in five 12 years ago, to extra 10^9 mobile service customers are anticipated to join the service in the year 2020 achieving worldwide global penetration rate of about 60%. Statistically speaking, it was found that 7.1 billion active User Sims worldwide at the end of 2014, in addition to more than 243 million active Machine-to-Machine (M2M) connections. "Green Communications (GC)" has become one of the main topics in the field of wireless communication research due to its contributions in saving the environment. The term "Energy Efficiency (EE)", "Normalized Energy Efficiency (NEE) is pursuing methods for saving energy consumed in accomplishing communications, which reduces pollution and preserves natural resources. Forthcoming mobile Generations will challenge many tradeoffs between the EE demands against QoS, especially throughput. Cognitive Radio (CR) is one of the elective techniques to be recognized as a candidate technology to implement Broad Band Communications (BBC) with EE.

This Thesis objectives are to achieve a contribution in finding a way for enhancing performance of heterogeneous wireless networks using CR techniques under the umbrella of EE, NEE for performing communications in BBC.

The thesis research plan will proceed with the following milestones:

- Perform a quick preview over the Green Communications (GC) major fields.
- Preview of LTE and small cells major system components, those which contribute in both consumptions of energy and data transmission. They are the key network performance/cost indicators and all strung together.
- Conduct a survey on the current topics of EE, CR, BBC researches.
- Preview and focus on suitable researches in CR field and follow homogeneous steps to contribute in solving raised issues and problems.
- State the problem of reducing energy consumed to perform CR BBC, prepare, and propose an analytic method for solving this problem.

- Follow comparative, analytic, simulation methods for system models and verifying the obtained results.
- Propose an analytic technique to investigate the EE paradigm in both of the WRAN uplink and downlink.
- Demonstrate the results obtained from work and research papers executed during the phases of this thesis.

Supervisors:

Prof., **Salwa Hussein El-Ramly**
Department of Electronics and Communication,
Faculty of Engineering, Ain Shams University (ASU),
Cairo, EGYPT.

Prof., **Hesham Mohamed El-Badawy**
Department of Network Planning,
National Telecommunication Institute (NTI),
Cairo, EGYPT.

Dr. **Asmaa Mahmoud Saafan**
Department of Network Planning,
National Telecommunication Institute (NTI),
Cairo, EGYPT.

…./…./2017

STATEMENT

This dissertation is submitted to Ain Shams University for the degree of Philosophy of Doctor in Electrical Engineering (Electronics and Communication Engineering).

The work included in this thesis was carried out by the author at the Electronics and Communication Engineering Department, Faculty of Engineering, Ain Shams University.

No part of this thesis has been submitted for a degree or qualification at other university or institution.

Name **:** Amr Ali Fahmy Moustafa Shawky

Signature **:**

Date **:** 21/12/2017

جامعة عين شمس
كليــة الهنــدســة
قسم هندسة الإلكترونيات والإتصالات الكهربائية

رسالة دكتوراه الفلسفة

اسم الباحث: عـمرو عـلي فـهمي مصـطفى شـوقي

عنوان الرسالة: استخدام التقنيات الموفرة للطاقة في الشبكات اللاسلكية اللامتجانسة للراديو الإدراكي.

اسم الدرجة: دكتوراه الفلسفة

القسم التابع له: هندسة الإلكترونيات والاتصالات الكهربائية

اسم الكلية : كلية الهندسة

سنة التخرج: 1986

سنة المنح: 2017

ABSTRACT

AMR ALI FAHMY MOUSTAFA
PHILOSOPHY OF DOCTOR THESIS, AIN SHAMS UNIVERSITY

Mobile industry continued to scale rapidly since 2014, in which 3.6 billion unique mobile subscribers have been recorded. During the first quarter of 2017, more than half of the world's population had a mobile subscription. From just one out of five 12 years ago, to extra 10^9 mobile service customers are anticipated to join the service in the year 2020 achieving worldwide global penetration rate of about 60%. Statistically speaking, it was found that 7.1 billion active User SIMs worldwide at the end of 2014 are found, in addition to more than 243 million active Machine-to-Machine (M2M) connections. "Green Communications (GC)" has become one of the main topics in the field of wireless communication research due to its contributions in saving the environment. The term "Energy Efficiency (EE)", "Normalized Energy Efficiency (NEE)" is pursuing methods for saving energy consumed in accomplishing communications, which reduces pollution and preserves natural resources. Forthcoming mobile Generations will challenge many tradeoffs between the EE demands against QoS, especially throughput. Cognitive Radio (CR) is one of the potential techniques to be recognized as a candidate technology to implement Broadband Communications (BBC) with EE.

This Thesis objectives are to achieve a contribution in finding a way for enhancing performance of heterogeneous wireless networks using CR techniques under the umbrella of EE, NEE for performing communications in BBC.

The thesis worked on the following milestones:

- Perform a quick preview over the Green Communications (GC) major fields.
- Preview of LTE and small cells major system components, those which contribute in both consumptions of energy and data transmission. They are the key network performance/cost indicators and all strung together.
- Conduct a survey on the current topics of EE, CR, BBC researches.
- Preview and focus on suitable researches in CR field and follow homogeneous steps to contribute in solving raised issues and problems.
- State the problem of reducing energy consumed to perform CR BBC.
- Prepare, and propose an analytic method for solving this problem.
- Follow comparative, analytic, simulation methods for system models and verifying the obtained results.

- Propose an analytic technique to investigate the EE paradigm in both of the WRAN uplink and downlink.
- Demonstrate the results obtained from work and research papers executed during the phases of this thesis.

ACKNOWLEDGEMENT

Thank you ALLAH, for the Godspeed, blessings, mercy, and success, which without them, this document would have never been possible. The greatest lesson I learned throughout this working time is that "Neither ability nor force but by ALLAH".

I would like also to present my deepest gratitude and respect to Prof. Salwa El-Ramly for her humongous unconditional generosity, support, and valuable guidance. She has donated me much of her patience and time. I have learned so much from her rigorous research attitude, innovative leadership, and efficient work style. Dear professor, no words can express my utmost respect to you. I will always be very grateful to you for the rest of my life.

Another Great debt I owe to the esteemed supervisor, Prof. Dr. Hesham M. El-Badawy for uncountable things; neither the words nor the mind will be able to express them. His great support, professional advice, and profound understanding were the push behind every effort and contribution in this thesis, and by which, I learned a lot from him.

Another extended gratitude is for Dr. Asmaa Saafan who contributed in many supervisional efforts and gave support to overcome many obstacles all the way, thank you, and wish you a lot of success in your academic and practical life.

I would like to introduce this thesis to the memory of my mentor the late Prof. Bahnasy Nusseir, God bless his soul, I remembered his valuable advices from day one, and will remember them to the rest of my life. Dear Professor, rest in peace.

Cannot forget to seize the opportunity here to express my deepest appreciation to my study colleagues, with whom, I exchanged knowledge support companionship along the way. Thank you my friends, I was blessed to have you all the time.

Finally, to dearest mother, wife and children, thank you very much for your sincere love. Without your continuous support, patience and prayers this thesis would have never been accomplished. Now, and after many cancelled vacations, it is time to dedicate this effort to you.

TABLE OF CONTENTS

Abstract i
Acknowledgement iii
Table of Contents iv
List of Figures viii
List of Tables xii
List of Symbols xiii
List of Abbreviations xviii
Extracted Papers From The Thesis xxi
CHAPTER 1 GREEN COMMUNICATIONS 1
1.1 Introduction 1
1.2 Green Communications 1
1.3 Problem Statement 5
1.4 Thesis Motivations 6
1.5 Thesis Aimed Contributions 7
1.6 Thesis Organization 7
CHAPTER 2 ENERGY EFFICIENCY, RELATED GREEN COMMUNICATION TECHNIQUES 9
2.1 Introduction to Major EE Initiatives 9
2.1.1 EE evaluation framework 9
2.1.2 Global E^3F 11
2.2 EE Standards and Metrics 12
2.2.1 Standards and recommendations 12
2.2.2 EE metrics 15
2.3 Green Communications Friendly Techniques 16
2.3.1 Sleep mode 16
2.3.2 Multi-hop cellular networks relay 16
2.3.3 Green antennas 17
2.3.4 Cooperative radio 18