

# TELECOMMUNICATION SYSTEM FOR GREEN ECONOMY – A SURVEY

## ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННИ СИСТЕМИ ЗА ЗЕЛЕНА ИКОНОМИКА - ОБЗОР

**Zdravka Tchobanova, Galia Marinova**

Department "Technology and management of communication systems", Faculty of Telecommunications, Technical University-Sofia, 8 "Kl. Ohridski" Blvd, Sofia, z.chobanova@tu-sofia.bg, gim@tu-sofia.bg

**Здравка Чобанова, Галя Маринова**

Катедра "Технология и мениджмънт на комуникационни системи", Факултет по Телекомуникации, Технически Университет-София, бул. "Кл. Охридски" 8, Sofia, z.chobanova@tu-sofia.bg, gim@tu-sofia.bg

**Keywords:** energy consumption, green communication, USRP

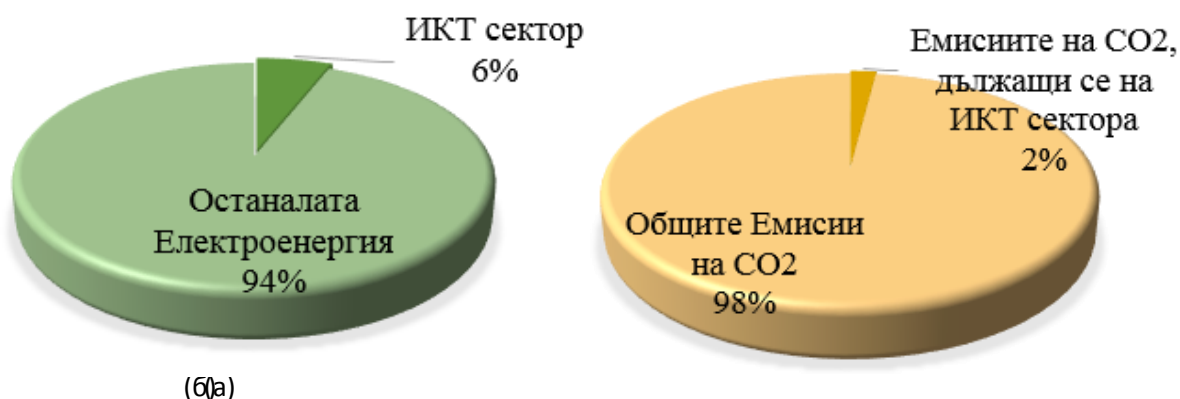
*Abstract – The fast development of telecommunications arises the question of power consumption in communication systems, as well as its impact on the environment. Another important issue is the electromagnetic pollution due to the use of these systems. The article is a brief overview of the energy consumption in various types of communication systems - data centers, cloud computing, networks, systems, devices and circuits. The proposed solutions to tackle the problem vary depending on the type of communication system. Most commonly a low-power mode is used when there is absence of traffic in the entire system or parts of it. It is called economical or "sleep mode". Other good practices are developing new algorithms and protocols that improve the energy efficiency of the system.*

*Резюме – През последните години телекомуникациите се развиват с бързи темпове. Като главен проблем възниква въпросът за консумираната енергия в комуникационните системи, както и въздействието ѝ върху околната среда. Важен въпрос е и електромагнитното замърсяване в следствие използването на тези системи. В статията е направен кратък преглед на консумацията на енергия в различни видове комуникационни системи – центрове за данни, изчислителни облаци, мрежи, системи, устройства и схеми. Предложените решения за справяне с проблема са различни в зависимост от вида на комуникационната система. Най-често се въвежда режим на ниска консумация при липса на трафик на цялата система, или на части от нея, т.нар. икономичен или спящ режим. Други добри практики са разработване на нови алгоритми и протоколи, подобряващи енергийната ефективност на системата.*

### 1. УВОД

Бързото нарастване на броя на мобилните устройства, както и услугите, които те осигуряват води до стремително развитие на сектора на Информационните и Комуникационните Технологии (ИКТ). В световен мащаб, ИКТ секторът допринася с 16% за растежа на Брутният Вътрешен Продукт (БВП) в периода 2002г.-2007г., а самият сектор е увеличил своя дял от БВП от 5.8-7.3% и се очаква да скочи допълнително до 8.7% от растежа на БВП в световен мащаб за периода 2007г.-2020г. [26]. Този икономически растеж води

до увеличение на разходите на енергия и съответно до увеличение на въглеродните емисии. Статистиката сочи, че ИКТ секторът консумира 6% от общото потребление на електроенергия и на него се дължат 2% от въглеродните емисии в световен мащаб [13], както е показано на фиг.1.



Фиг.1 Консумираната енергия (а) и въглеродните емисии (б) на ИКТ сектора сравнени с общото потребление на електроенергия и въглеродните емисии в световен мащаб [13]

По тези причини, все по-наложително става вземането на решения за намаляване на въглеродните емисии, без това да се отрази на качеството на доставяните услуги. Възможностите за развитие, които дават ИКТ могат да доведат до намаляване на въглеродните емисии до 7,8 Gt CO<sub>2</sub>e (въглероден диоксид еквивалент) към 2020 г., в сравнение с 0,53 Gt CO<sub>2</sub>e през 2002 г. ИКТ предлага решения за мониторинг на енергията и емисиите в реално време, осигурява средства за оптимизиране на процесите и системите с цел те да станат по-ефективни. Промяната на начина на комуникация трябва да се отнесе до всички системи и устройства в комуникациите.

По-нататък в статията в секция 2 са разгледани консумацията на енергия и електромагнитното замърсяване в различни видове комуникационни системи. В секция 3 е направен преглед на различни решения за намаляване на консумираната енергия. В секция 4 е направена приблизителна оценка на консумираната мощност на USRP N210.

## 2. КОНСУМАЦИЯ НА ЕНЕРГИЯ В РАЗЛИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ СИСТЕМИ

### 2.1 Консумация на енергия в центровете с данни и изчислителните облаци.

За да се разберат по-добре възможностите за намаляване на консумацията на енергия, в [12] е направен анализ на разходите в центровете за данни и при облачните изчисления, по данни на Amazon.com, които са разпределени както следва:

- |   |      |
|---|------|
| • Разходи в сървърите и центровете за данни | 53 % |
| • Пряка консумирана енергия                 | 19 % |
| • Енергия за охлаждане в инфраструктурата   | 23 % |
| • Други                                     | 5 %  |

В [7] е разгледан проблемът с преоразмеряване при използване на захранването на големи групи от сървъри (до 15000). В центрове с данни разликата между максималната мощност, която се използва от големи групи от машини и тяхното съвкупно теоретично използване на пиковата стойност може да бъде по-голяма от 40%.

В един изчислителен облак консумираната енергия включва транспорта, обработката и съхранението на данните. В обществените облаци транспортът представлява по-значителен разход на енергия, отколкото в частните облачни услуги. Потреблението на енергия при обработката на данните нараства с намаляването на броя на потребители на сървъра [15].

## 2.2 Консумация на енергия в мрежите

За оценка на консумацията на мрежата е направен модел, в зависимост от степента на достъп до мрежата [11]. Мрежата е разделена на мрежа за достъп, периферия и основна мрежа, като мрежата за достъп може да използва различни топологии. Направеният анализ представя консумираната мощност на потребител като функция на скоростта на достъпа, предоставена на потребителя. Безжичните мрежи за достъп (WiMax, 3G/UMTS/Universal Mobile Telecommunication System) изискват по-голяма енергия в сравнение с жичните мрежи. Когато се изискват високи скорости, жичният достъп е енергийно по-ефективната технология.

Общото потребление на енергия на ниво клетка на системата намалява когато загубите по пътя и размерът на клетката се увеличават [17]. Тъй като потреблението на енергия на базовата станция BS и мобилната станция MS намалява, емисиите на CO<sub>2</sub> също намаляват. За една година, при радиус на клетката макроклетка с радиус 1 km, пикоклетка с радиус 100 m и фемтоклетка с радиус 10 m, количеството на емисиите на CO<sub>2</sub> от една BS предавател е съответно около 181 килограма, 1.81 кг и 18.1 грама. Следователно, с помощта на топология, базирана на намаляване размера на клетката, може да се намалят емисиите на CO<sub>2</sub>.

Размерът на клетките влияе и върху електромагнитното замърсяване. Оценката за всяка BS и MS може да бъде получена с въвеждане на индекс на електромагнитното замърсяване EPI, който е произведение на нормализираната замърсена област и замърсяващата енергията. Нормализираната замърсена област е отношението на сумата от площите на всички области на замърсяване (Pockets of Pollution PoP) и площта на клетката, а замърсяваща енергия е сумата от енергиите на всички PoP [9].

$$EPI = \left( \frac{\text{Sum of area of all PoP}}{\text{Area of cell}} \right) * (\text{Sum of energy of all PoP}) \quad (1)$$

В безжичните сензорни мрежи основният проблем е общата консумация на енергия, която включва енергията, необходима за преноса и потреблението на енергия в сензорните възли, работещи на батерии, което поставя ограничение на живота на мрежата [18]. Постигането на добра енергийна

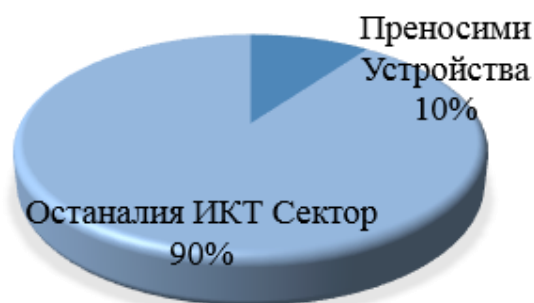
ефективност е разрешаването на компромиса между намаляване на консумираната енергия и изискванията за пропускателна способност и забавяне.

За да може да се постигне добра енергийна ефективност в оптичните мрежи е определена долна граница на потреблението на енергия, както и енергийните характеристики на някои превключващи устройства [24]. Долната граница на енергията е ограничена от потреблението на енергия в оптичните усилватели и в оптичните предаватели и приемници [23]. Критерият за анализ е потреблението на енергия за бит пренесени данни. Оптималната енергия за бит в усилен транспортна система зависи от броя на повторителите и от оптималното разстояние между тях.

### 2.3 Консумация на енергия в устройства и системи

За да се характеризира консумацията на енергия от преносими устройства като лаптопи и мобилни телефони като дял от общото потребление на енергия, в [13] е въведена дефиницията сегмент на персоналните компютри (**personal computing segment**), която включва потребителските устройства като преносими компютри, мобилни телефони, настолни компютри и устройства, използвани на втора линия, като сървърни ферми / центрове за данни, интернет и мобилни инфраструктури. Не са включени офис техника като принтери, копирни машини и т.н., и потребителска електроника като телевизори, DVD-та и т.н. Както се вижда от фиг.2, дялът на консумираната от преносимите устройства е 10% от целия сегмент на персоналните компютри и 12% от общия енергиен сектор, но неговият принос към глобалните емисии на CO<sub>2</sub> е огромен 40%.

При сравнението на UMTS/3G клетъчна система трето поколение за мобилни мрежи и GSM/2G второ поколение клетъчни мрежи в [16] са оценени всички компоненти, като мобилни телефони, базови станции, антени и комутационни системи, както и стационарните компоненти като кабелна система и комутационни центрове. Въздействието върху околната среда се оценява, като се вземат предвид всички основни фази на жизнения цикъл, като добива на суровини, производство, употреба, разглобяване и унищожаване на продукта. Емисиите на CO<sub>2</sub> са причинени от търсенето на електроенергия, използването на пластмаси при производството и от консумацията на енергия от изкопаеми горива. С изключение на използването на мед (кабели), трансферът на данни от 1 Gbit, от мобилен телефон до мобилен телефон изисква повече ресурси и причинява повече емисии в сравнение с варианта на мобилен телефон до фиксирана мрежа. В жизнения цикъл на мобилните



Фиг.2 Консумираната енергия от преносимите устройства срещу консумираната енергия от целия ИКТ сектор [13]

телефони фазата на производството има най-голямо значение, поради краткия експлоатационен живот, докато при базовите станции такава значение има фазата на експлоатацията, поради по-дългия си живот.

#### **2.4 Консумация на енергия в схеми**

В съвременните технологии с голям брой транзистори в схемата, все по-голяма роля играе статичната мощност [25]. С намаляване на статичния разход на енергия се оптимизира времето в стенд-бай режим и живота на батерията.

Важен фактор за консумираната енергия в схемите е температурата на чипа. Навременното откриване на места с висока температура дава възможност за включване на техники за управление на температурата и оптимизация на производителността при производството на FPGA.

В [14] се сравнява консумираната енергия на цифрови оптични и електронни схеми за обработка на сигнала, включително потреблението на енергия на конверторите от оптичната към електрическата част и електрическата към оптичната част на схемата, и демултиплексорите и мултиплексори необходими за електронни схеми за обработка на високоскоростните оптични сигнали. Направеният анализ показва, че оптичната обработка на сигнала е конкурентна на електрониката във вериги с много висока скорост, само ако извършваните действия са прости, т.е. когато има малък брой операции за всеки бит информация. Когато се изисква по-сложна обработка, електрониката осигурява по-добра енергийна ефективност.

### **3. ВЪЗМОЖНОСТИ И МЕТОДИ ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА КОНСУМАЦИЯТА НА ЕНЕРГИЯ В КОМУНИКАЦИИТЕ**

#### **3.1 Енергийно ефективен хардуер**

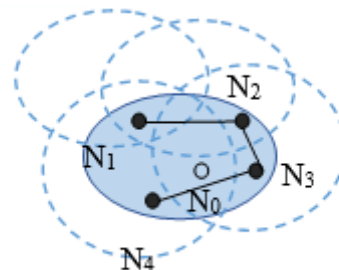
Енергийно ефективните решения за намаляване на консумираната енергия включват енергийно ефективен хардуер. Замяна на хардуерни устройства с аналогични такива от ново поколение, които консумират по-малко енергия. Например hard disc drives от центровете за данни са заменени с Solid-state-discs [12], които са с намалена консумация на енергия.

#### **3.2 Управление на захранването**

Намаляване на консумацията на енергия може да се постигне чрез въвеждане на режим на ниска мощност („спящ“ режим). Различни мрежови компоненти се поставят в спящ режим при липса на трафик [4][5][6][10][20] за определено време (timer-driven sleeping) или се събуждат при пристигане на данни (wake-on-arrival). Ако се премине в спящ режим за определено време и на входа постъпят пакети с данни, то те ще бъдат загубени. В случай на събуждане при пристигане на данни (wake-on-arrival) схемата разпознава пакетите и линията остава захранена, дори и в спящ режим. Така се стига до подхода на оформяне на трафика при малки препълвания по краищата на мрежата. Крайните устройства предават пакетите на кълстери и рутери, докато мрежата се събуди за обработка на поредицата от пакети и отново да заспи, докато пристигне следващата поредица.

Въвежда се схема за адаптация на скоростта на мрежата [6], при която се намалява работната честота на устройство. Това води до намаляване на разходите на енергия. Едната причина е че Ethernet връзките, работещи при честоти 100 Mbps ÷ 1Gbps разсейват 2÷4 W срещу 10÷20W при 1Gbps. Втората причина за намаляване на разходите е тази, че работата при по-ниска честота позволява използването на динамично мащабиране на напрежението (dynamic voltage scaling – DVS), което намалява работното напрежение.

В M2M комуникацията (от машина до машина) енергийната ефективност може да се увеличи чрез регулиране на предавателната мощност (към минимално необходимото ниво) [20]. Ефективността може да бъде допълнително подобрена чрез въвеждането на график, целта на който е някои възли да се преминат в състояние на ниска мощност ("спящ") режим, така че само подмножество от свързани възли да останат активни, като функционалността (наблюдението и събирането на данни) в оригиналната мрежата се запазва, както е показано на фиг.3 Схемата включва само локална комуникация и генерира много малък брой контролни съобщения, като по този начин тя е енергийно ефективна.



Фиг. 3 Възел  $N_0$  може да премине в спящ режим, защото неговия обхват на сензора се покрива напълно от свързаните съседи  $N_1 \dots N_4$ . [20]

Една от препоръките в [13] за управление на захранването в преносимите устройства е потребителите да използват по-често управлението на захранването. При лаптопите, настройката за управление на захранването е изключена по подразбиране.

Използват се различни механизми за изключване на процесора в компютъра (SpeedStep, PowerNow, Cool'nQuiet, Demand-Based Switching), чрез които се забавя скоростта на тактовата честота на процесора или се изключват части от чипа [12].

### 3.3 Енергийно ефективно планиране

При проектиране на мрежа в сътрудничество, трябва да бъдат проектирани протоколи и алгоритми за намаляване на общото потребление на енергия като показател, а не на индивидуалните възли от мрежата [13].

Планират се множество задачи в реално време в многопроцесорни системи, които поддържат DVS. Прави се вероятностно планиране на времето за изпълнението на задачите за да се раздели обема на работа и така да се намали потреблението на енергия [12].

Енергийната ефективност може да се повиши на базата на консолидация на сървърите чрез виртуализация на обслужването. Виртуализацията дели изчислителните ресурси и позволява споделяне на хардуера. Виртуализацията може да е на различни нива и да се реализира чрез различни форми, напр.

пълна, виртуализация на ниво операционна система или виртуализация на сензора като услуга (Sensor Node as Service SNaaS) на сензорен облак в интернет на нещата IoT [21].

Енергийно ефективното планиране може да се направи и на ниво схема [8] [22]. Чрез планиране и промяна на стила на картографиране се намалява мощността, както и броят на компонентите, използвани в реализацията, което води до по-ефективно проектиране на площта в програмируема схема.

### **3.4 Разработване на системи, алгоритми и протоколи за мултирадио предаване**

Мултирадиосистема [2], която да съвместява различни системи – базирани на стандарти и такива, които не са базирани на стандарти. Мултирадио концепцията показва как, прескачайки между честотните ленти 2.4GHz и 868MHz, може да бъде направена една връзка между отдалечени клъстери на ZigBee възли, които са на различни места или разделени с претоварена комуникация. Осигурява се решение за претоварване на мрежата в среди като Home Area Networking HAN и търговски сгради.

Разработването на MIMO системи, които имат добра спектрална ефективност за радио приложения в сензорни мрежи е представено в [18]. Тези индивидуални MIMO системи могат да работят и в сътрудничество. Така чрез съвместно предаване и приемане на информацията се спестяват разходите за пренос на енергия.

До 50 % намаление на консумираната енергия се получава с разработването на Dynamic Coverage Management (DCM) алгоритъма за спестяване на енергията в разнородни безжични мрежи, основаващ се на две базови структури.[1] Едната структура използва механизъм за пренасочване на повикванията, а другата изисква въвеждането на прагова стойност, чрез която се активира микроклетка, за да поеме обажданията и да облекчи трафика на макроклетката.

Намаление на консумацията на енергия и увеличаване на живота на сензорната мрежа се постига с разработване на различни протоколи като например density-aware multihop clustering (DAMC) за неравномерно разположени безжични сензорни мрежи Wireless Sensor Networks (WSNs) [5], протоколи за маршрутизация в архитектурата на M2M комуникацията [20], стандарти като 802.15.4 ZigBee Smart Energy в интелигентните мрежи [19] или устройства от ново поколение като енергийно ефективния сензор на преносимо устройство за проследяване и възпроизвеждане на движение [3].

## **4. ПРИМЕРНА ОЦЕНКА НА КОНСУМАЦИЯТА В СИСТЕМА НА СОФТУЕРНО РАДИО**

Оценката на консумираната мощност от USRP може да се направи по данни на производителя. Обикновено тези данни имат цел да покажат максималната консумирана енергия. Основната им цел е да информират потребителя за

безопасното хранване на USRP-то. Оценката на производителя е направена като са взети стойностите при най-лошия случай и при пълно натоварване /всички компоненти работят при пълна мощност/.

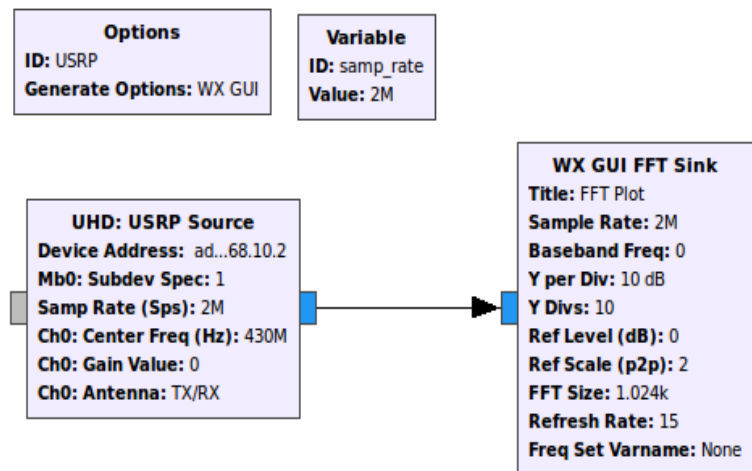
Каталожните данните са еднакви за цялата серия N2x0, въпреки че USRP N210 е с по-голям FPGA - Xilinx Spartan 3A DSP - XC3SD3400A FPGA от USRP N200 със Xilinx Spartan 3A DSP1800 FPGA. На базата на зададените стойности на приложеното напрежение и протичащия ток, мощността може да се пресметне по закона на Ом.

За оценка на действително консумираната енергия може да се използват програми за мониторинг на системата, които дават информация за натовареността на компонентите в компютъра в проценти или консумацията на енергия от различните компоненти.

За да се наблюдава работата на USRP-то е реализирана проста блокова схема на приемник с блок USRP, която е показана на фиг.4 с блок USRP, който приема получения сигнал и блок FFT Sink, който го визуализира. Процесът по обработката на блоковата схема в GNU Radio Companion (създаване на програмен код на Python, описващ работата на блоковата схема) отнема 44 % от ресурсите на CPU-то. Инструментът **Gnome System Monitor** дава информация за заетите ресурси на системата. Той се инсталира и се стартира като приложение.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направеният преглед показва големия интерес на изследователите за търсене на решения, свързани със зелените комуникации. Решенията се търсят



Фиг. 4 Блокова схема на приемник с USRP

Process Name	User	% CPU	ID	Memory	Priority
notify-osd	zdr	0	2573	2.9 MiB	Normal
polkit-gnome-authentic...	zdr	0	2639	5.0 MiB	Normal
pulseaudio	zdr	0	2491	2.0 MiB	Very High
python2	zdr	44	3287	97.3 MiB	Normal
software-center	zdr	0	3383	160.4 MiB	Normal
telepathy-indicator	zdr	0	2869	5.2 MiB	Normal
ubuntu-geoip-provider	zdr	0	2604	1.5 MiB	Normal
unity-fallback-mount-hel...	zdr	0	2645	2.9 MiB	Normal
unity-panel-service	zdr	0	2438	6.8 MiB	Normal
unity-settings-daemon	zdr	0	2423	4.9 MiB	Normal

Фиг. 5 Оценка на използваните ресурси от CPU за работата на блоковата схема.



в зависимост от конкретния вид комуникационна система – центрове за данни и облаци, мрежи, устройства и системи и схеми. Най-широко разпространеният метод за намаляване на консумираната енергия е включване на вид спящ режим, но съществуват и други по-конкретни предложения. В изобилната литература по въпроса има множество материали, които препоръчват различни политики за зелени комуникации, но настоящия обзор е концентриран върху инженерните и технически измерения на проблема и решения. Съвсем накратко е засегнат въпроса за конкретната оценка на енергията в проектирани комуникационни устройства, като по-пълнен преглед в това отношение предстои. Освен това предстои цялостно изследване на проекти на комуникационни системи върху програмируема логика и софтуерно радио в търсене на по-ефективни алгоритми за реализации на устройствата с цел минимизиране на консумираната енергия и електромагнитните излъчвания.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Резултатите от представеното изследване са финансирани в рамките на научноизследователски проект в помощ на докторанти №162ПД0020-07 към НИС на Технически Университет - София.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Öztoprak, M. Ali Aydin, T. Atmaca, "Energy-Efficiency for Heterogeneous Wireless Networks by Using Hands-off Approach", *Adv. Int. Conf. on Telecom. "AICT 2016"*, Copyright (c) IARIA, 2016, Valencia, Spain, vol.12, pp. 40-44, May 22-26, 2016.
- [2] B. O'Flynn, M. Donno, W. Magnin, "Multiradio Sensing Systems for Home Area Networking and Building Management", *Int. Conf. on Smart Cities, Systems, Devices and Technologies (includes URBAN COMPUTING 2016)*, Copyright (c) IARIA, 2016, Valencia, Spain, vol. 5, pp. 25-30, May 22-26, 2016.
- [3] M. Benedetto, A. Gagliardi, P. Buonocunto, G. Buttazzo, "A Real-Time Head-Tracking Android Application Using Inertial Sensors", *Int. Conf. on Mobile Services, Resources, and Users*, Copyright (c) IARIA, 2016, Valencia, Spain, vol. 6, pp. 34-40, May 22-26, 2016
- [4] M. Brandl, K. Kellner. "Position Estimation of RFID based Sensors Using Surface Acoustic Wave Devices", *Adv. Int. Conf. on Telecommunications* Copyright (c) IARIA, Valencia, Spain, vol.12, pp. 6-8, May 22-26, 2016.
- [5] S. Choi and S. Moh, "Density-Aware Multihop Clustering for Irregularly Deployed Wireless Sensor Networks", *Int. Conf. on Advanced Communications and Computation (contains MODOPT 2016) "INFOCOMP 2016"* Copyright (c) IARIA, 2016, Valencia, Spain vol.6, pp. 34-40, May 22-26, 2016
- [6] S. Nedeveschi, L. Popa, G. Iannaccone, S. Ratnasamy and D. Wetherall, "Reducing Network Energy Consumption via Sleeping and Rate – Adaptation", *NSDI '08: 5th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation*, San Francisco, USA, vol.5, pp. 323-336, April 16-18, 2008.
- [7] X. Fan, W. Weber, L. A. Barroso, "Power Provisioning for a Warehouse-sized Computer", *Int. Symp. on Computer Architecture (ISCA2007)*, San Diego, USA, vol.34, pp. 13-23, June 9-13, 2007.
- [8] B. Pandey and M. Pattanaik, "Low Power VLSI Circuit Design with Efficient HDL Coding", *Int. Conf. on Communication Systems and Network Technologies*, Gwalior, India, pp.698-700, 6-8 April 2013.

- [9] P.Venkatapathy, J. Jena, A. Jandhyala, "Electromagnetic Pollution Index—A Key Attribute of Green Mobile Communications" *Green Technologies Conf. IEEE*, Tulsa, OK, USA, April 19-20, 2012.
- [10] K. Saravanan, P. Carpenter, A. Ramirez, "Power/Performance evaluation of Energy Efficient Ethernet (EEE) for High Performance Computing", *IEEE Int. Symp. on Performance Analysis of Systems and Software*, Austin, USA, pp 205-214, April 2013.
- [11] K. Hinton, J. Baliga, M. Feng, R. Ayre, and R.S. Tucker, "Power consumption and energy efficiency in Internet" *IEEE Network*, vol.25, No.2, pp. 6-12, March/April 2011.
- [12] A. Berl, E. Gelenbe, M. di Girolamo, G. Giuliani, H. de Meer, M. Dang and K. Pentikousis, "Energy-Efficient Cloud Computing", *The Comp. J., Oxford University Press*, vol.53, No.7, pp. 1045-1051, August 2009.
- [13] P. Somavat and V. Namboodiri, "Energy Consumption of Personal Computing Including Portable Communication Devices", *J. of Green Engineering*, vol.1, No.4, pp.447-475, July 2011.
- [14] R. S. Tucker and K. Hinton, "Energy Consumption and Energy Density in Optical and Electronic Signal Processing", *IEEE Photonics J.*, vol.3. No.5, pp. 821-833, October 2011.
- [15] J. Baliga, R. W. A. Ayre, K. Hinton and R. S. Tucker, "Green Cloud Computing: Balancing Energy in Processing, Storage, and Transport", *Proceedings of the IEEE*, Vol.99, No.1, pp. 149-167, January 2011.
- [16] M. F. Emmenegger, R. Frischknecht, M. Stutz, M. Guggisberg, R. Witschi and T. Otto, "Life Cycle Assessment of the Mobile Communication System UMTS Towards Eco-Efficient Systems", *Int. J. of Life Cycle Assessment*, Vol.11, No.4, pp 265–276, July 2006.
- [17] N. Kaberpanthi and C. Pandey, "A Review on Impacts of Cell Size on Electromagnetic Pollution – A Comprehensive Step Towards Green Mobile Communication", *Int. J. of Advances in Engineering Sciences*, Vol 3, No 3, pp. 365-372, 2013
- [18] S. Cui, A. J. Goldsmith and A. Bahai, "Energy-efficiency of and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks", *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, Vol.22, No.6, pp. 1089–1098, August 2004.
- [19] B. Heile, "Smart Grids for Green Communications", *IEEE Wireless Communications*, vol.17, No3, pp. 4-6, June 2010.
- [20] S. Sundar Prasad and C. Kumar, "A Green and Reliable Internet of Things", *Communications and Network*, vol. 5, No.1, pp. 44-48, February 2013.
- [21] C. Zhu, V. C. M. Leung, L. Shu, E. C.-H. Ngai, "Green Internet of Things for Smart World", *IEEE Access*, Vol.3, pp.2151-2162, November 2015.
- [22] M. Hentati, A. Nafkha, P. Leray, J.F. Nezan and M. Abid, "Software Defined Radio Equipment: What's the Best Design Approach to Reduce Power Consumption and Increase Reconfigurability?", *Int. J. of Computer Applications*, Vol. 45, No.14, pp.26-32, May 2012.
- [23] R. Tucker, "Green Optical Communications—Part I: Energy Limitations in Transport", *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.17, No2, pp.245–260, March-April 2011.
- [24] R. Tucker, "Green Optical Communications—Part II: Energy Limitations in Networks", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.17, No2, pp. 261–274, March-April 2011.
- [25] A. Nafkha, P. Leray, Y. Louet and J. Palicot, "Moving a Processing Element from Hot to Cool Spots: Is This an Efficient Method to Decrease Leakage Power Consumption in FPGAs?" *Green Communications. Theoretical Fundamentals, Algorithms and Applications*, Edited by Honggang Zhang, pp. 197–219, CRC Press 2012
- [26] The Climate Group, "SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age", Global e-Sustainability Initiative (GeSI), 2008.