



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com



## Editorial

## Foreword



Without energy, nothing is possible. Energy is the catalyst of all natural phenomena and comes in a variety of forms. One of its fundamental properties is its indestructibility. It cannot be created, it cannot disappear, but it can be converted from one to another form. Electromagnetic energy is one of its most remarkable forms as it is transmitted wirelessly, and the universe is filled with it. The ambient energy in its various forms, solar, radio waves, thermal, kinetic, etc. is an endless and renewable resource that should enable the development of green technologies and the implementation of new paradigms.

In our modern societies, energy remains the engine of our applications and uses, although the methodologies and technologies for harvesting, storing, transporting, converting the energy and its exploitation have experienced major evolutions in the last decades. In the domain of radiosciences and information society, new technologies are less and less energy greedy. Remote power and energy harvesting methods are complementing batteries and eventually replace them. In the same time, an overall evaluation of the power consumption of digital and communication systems is to draw up and put into perspective with innovative technological solutions and signal processing techniques.

In this evolving context, both in terms of technologies and concepts, URSI France devoted its 2016 Workshop to the topic “Energy and Radiosciences”. In this workshop, the techniques for electromagnetic energy harvesting, conversion, storage and optimal management have been discussed. This thematic issue, which follows the workshop, groups some of the most relevant topics discussed during it and covers both basic and conceptual aspects as well as technological developments and their applications.

The issue is organized in 11 papers, one invited and 10 contributed grouped in three topics: Harvesting, Components and Communication. A short presentation of these papers follows hereinafter.

The invited paper is entitled *Wireless energy transfer: Dielectric lens antennas for beam shaping in wireless power-transfer applications*. In the current contest of wireless systems, the last frontier remains the cut of the power cord. In that sense, the interest over wireless energy transfer technologies in the past years has grown exponentially. However, there are still many challenges to be overcome in order to enable wireless energy transfer full potential. One of the focuses in the development of such systems is the design of very high gain, highly efficient antennas that can compensate for the propagation loss of radio signals over the air. In this paper, we explore the design and manufacturing process of dielectric lenses, fabricated using a professional-grade desktop 3D printer. Lens antennas are used in order to increase beam efficiency and therefore maximize the efficiency of a wireless power-transfer system operating at microwave frequencies in the  $K_u$  band. Measurements of two fabricated prototypes showcase a large directivity, as predicted by simulations.

The “Harvesting” section consists of three papers.

*On energy harvesting for augmented tags*. In this paper, the harmonic signals generated by UHF RFID chips, usually considered as spurious effect and unused, are exploited. Indeed, the harmonic signals are harvested to feed a supplementary circuitry associated with a passive RFID tag. Two approaches are presented and compared. In the first approach, the third-harmonic signal is combined with an external 2.45-GHz Wi-Fi signal. The integration is done in such a way that the composite signal boosts the conversion efficiency of the energy harvester. In the second approach, the third-harmonic signal is used as only source of a harvester that energizes a commercial temperature sensor associated with the tag. The design procedures of the two “augmented tag” approaches are presented. The performance of each system is simulated with ADS software using Harmonic Balance tool (HB); the results of simulation and measurement are compared.

*Electrostatic vibration energy harvester with 2.4-GHz Cockcroft–Walton rectenna start-up*. This paper proposes the design, fabrication and experiments of a macro-scale electrostatic vibration energy harvester (e-VEH), pre-charged wirelessly for the first time with a 2.4-GHz Cockcroft–Walton rectenna. The rectenna is designed and optimized to operate at low power densities and to provide high voltage levels: 0.5 V at  $0.76 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  and 1 V at  $1.53 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . The e-VEH uses a Bennet doubler as a conditioning circuit. Experiments show 23 V voltage across the transducer terminal, when the harvester is excited at 25 Hz by 1.5g of external acceleration. An accumulated energy of 275  $\mu\text{J}$  and a maximum available power of 0.4  $\mu\text{W}$  are achieved.

*Multiband rectenna for microwave applications.* This paper reports a multiband rectenna (rectifier + antenna) suitable for the electromagnetic energy harvesting of the spill-over loss of microwave antennas placed on board of geostationary satellites. Such rectenna is used for powering autonomous wireless sensors for satellite monitoring. The topology of the rectenna is presented. The experimental results demonstrate that the proposed compact rectenna can harvest efficiently the incident electromagnetic energy at three different frequencies that are close to the resonant frequencies of the cross-dipoles implemented in the antenna array.

The “Components” topic consists of three papers.

*Theoretical and practical limits of superdirective antenna arrays.* Some applications as Wireless Power Transfer (WPT) require compact and directive antennas. However, Electrically Small Antennas (ESAs) have low efficiency and quasi-isotropic radiation pattern. Superdirective ESA arrays can be an interesting solution to cope with both constraints: compactness and directivity. In this paper, the theoretical and practical limits of superdirective antennas will be presented. These limits can be summarized by the directivity sensitivity toward the excitation coefficient changes and the radiation efficiency decrement as the inter-element distance decreases. The need for negative resistances is also a practical limit for transforming these arrays into parasitic ones. The necessary trade-off between the antenna total dimensions and the attainable directivity and efficiency are also analyzed throughout this paper.

*Performance of low power RFID tags based on modulated backscattering.* Ultra Wideband (UWB) modulated backscattering (MBS) passive Radio-Frequency IDentification (RFID) systems provide a promising solution to overcome many limitations of current narrowband RFID devices. This work addresses the performance of such systems from the point of view of the radio channel between the readers and the tags. Such systems will likely combine several readers, in order to provide both the detection and localization of tags operating in MBS. Two successive measurements campaigns have been carried out in an indoor reference scenario environment. The first one is intended to verify the methods and serves as a way to validate the RFID backscattering measurement setup. The second represents a real use case and allows us to quantitatively analyze the path loss of the backscattering propagation channel.

*Energy and angular momentum transfers from an electromagnetic wave to a copper ring in the UHF band.* Electromagnetic waves could carry orbital angular momentum. Such momentum can be transferred to macroscopic objects and can make them rotate under a constant torque. Based on experimental observations, we investigate the origin of the orbital angular momentum and energy transfer. Due to angular momentum and energy conservation, we show that the angular momentum transfer is due to the change in the sign of angular momentum upon reflection. This leads to a rotational Doppler shift of the electromagnetic wave frequency ensuring energy conservation.

The “Communication” topic consists of four papers:

*Fundamental energetic limits of radio communication systems.* The evaluation of the energy consumption of a radio-communication device requires analyzing the life cycle of the used elements. However, this analysis does not specify the energetic limits. Theoretical approaches allow drawing these limits that are known in multiple cases of information transmission. However, the answers are not always satisfactory, in particular in the case of time varying channels. After a brief presentation of the concept of energetic limits of a radio-communication, and beginning with a global approach, we show that, contrary to the published results, the energetic limits always differs from zero if the physical constraints are correctly expressed.

*Wavelet modulation: An alternative modulation with low energy consumption.* This paper presents wavelet modulation, based on the discrete wavelet transform, as an alternative modulation with low energy consumption. The signal generated by this modulation has low envelope variations that allow a good efficiency of the power amplifier. Wavelet modulation is analyzed and compared for different wavelet families with orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) in terms of peak-to-average power ratio (PAPR), power spectral density (PSD) properties and the impact of the power amplifier on the regrowth of side lobes. The performance in terms of bit error rate (BER) and complexity of implementation are also evaluated and several trade-offs are characterized.

*Analysis of the Faster-than-Nyquist optimal linear multicarrier system.* Faster-than-Nyquist signaling enables a better spectral efficiency at the expense of increased computational complexity. Regarding multicarrier communications, previous work mainly relied on the study of non-linear systems exploiting coding and/or equalization techniques, with no particular optimization of the linear part of the system. In this article, we analyze the performance of the optimal linear multicarrier system when used together with non-linear receiving structures, or in a standalone fashion. We also investigate the limits of the normality assumption of the interference, used for implementing such non-linear systems. The use of this optimal linear system leads to a closed-form expression of the bit-error probability, which can be used to predict the performance and help the design of coded systems. The paper also highlights the great performance/complexity trade-off offered by decision feedback equalization in a faster-than-Nyquist context.

*Turbo-FSK, a physical layer for low-power wide area networks: Analysis and optimization.* As the Internet-of-Things is becoming a reality, the need for a new Low Power Wide Area (LPWA) network emerged in the last few years. Numerous low-cost devices will be connected, and this requires an optimization of the link budget: the physical layer needs to be designed as highly energy efficient. The combination of  $M$ -ary orthogonal Frequency-Shift-Keying ( $M$ -FSK) modulation and coding in the same process has been shown to be a promising candidate when associated with an iterative receiver (turbo principle). In this work, we study this new digital transmission scheme, called Turbo-FSK. An EXtrinsic Information Transfer (EXIT) chart analysis is realized. The influence of the packet length is investigated, and the scheme is shown to stay energy efficient even with short packet sizes. Comparison with LPWA current technologies is performed, showing the potential of this technology.

The Guest Editors would like to thank the reviewers of the papers of this thematic issue: Alessandra Costanzo, Emmanuel Bergeret, Pedro Miguel Cruz, Laurent Dussopt, Jean-Marc Laheurte, Zbynek Raida, John Sahalos, Alex Takacs.

## Avant-propos

Sans énergie, rien n'est possible. L'énergie est le catalyseur de tous les phénomènes naturels et se présente sous une variété de formes. Une de ses propriétés fondamentales est son caractère indestructible. Elle ne se crée pas, elle ne disparaît pas, mais se convertit d'une forme à une autre. L'énergie électromagnétique est l'une de ses formes les plus remarquables, car elle se transmet sans fil et, de plus, l'univers en est rempli. L'énergie ambiante, sous ses différentes formes, solaire, ondes radio, thermique, cinétique, etc., est une source inépuisable et renouvelable, qui devrait permettre réellement le développement des écotecnologies et de leurs nouveaux paradigmes.

Dans nos sociétés modernes, l'énergie demeure le moteur de nos applications et usages, même si les méthodologies et technologies pour la collecter, la stocker, la transporter, la convertir et l'exploiter ont connu des évolutions majeures au cours de ces dernières décennies. Dans le domaine des radio-sciences et de la société de l'information, les nouvelles technologies sont de moins en moins gourmandes en énergie. Télé-alimentation et récupération d'énergie complètent batteries et piles comme source d'énergie autonome, voire s'y substituent. Pour autant, un bilan global de la consommation énergétique du numérique et des systèmes de communication est à dresser et à mettre en perspective avec des solutions technologiques innovantes et des méthodes de traitement du signal.

Dans ce contexte évolutif, à la fois en termes de technologies et de concepts, URSI France a consacré ses journées scientifiques 2016 au thème « Énergie et radiosciences ». Lors de ces journées, les techniques de récupération, conversion, stockage et gestion optimale de l'énergie électromagnétique ont été discutées. Ce dossier, réalisé à l'issue des journées scientifiques 2016, regroupe quelques-uns des sujets les plus pertinents discutés lors de ces journées et couvre aussi bien les aspects fondamentaux et conceptuels que les développements technologiques et leurs applications.

Ce numéro thématique est organisé en 11 articles, un article invité et 10 articles contributifs rassemblés en trois thèmes : récupération d'énergie, composants et communication. Ces articles sont brièvement présentés ci-dessous.

La contribution invitée a pour titre *Transfert d'énergie sans fil : antennes diélectriques pour la mise en forme des faisceaux dans les applications de transfert d'énergie sans fil*. Dans la compétition actuelle entre les systèmes sans fil, la dernière frontière reste la coupure du cordon électrique. Dans ce sens, l'intérêt des technologies de transfert d'énergie sans fil a crû exponentiellement au cours des dernières années. Cependant, de nombreux défis à surmonter demeurent pour qu'on puisse déployer à son plein potentiel ce mode de transfert d'énergie. L'un des objectifs poursuivis dans le cadre du développement de tels systèmes est la conception d'antennes à très haut gain, très efficaces, qui permettraient de compenser les pertes liées à la propagation des signaux radio dans l'air. Dans cet article, nous explorons la conception et la fabrication de lentilles diélectriques, réalisées à l'aide d'une imprimante 3D de bureau de qualité professionnelle. Les antennes à lentilles sont utilisées en vue d'accroître l'efficacité du réseau et donc de maximiser celle d'un système de transfert d'énergie actif aux fréquences des micro-ondes dans la bande  $K_u$ . Les mesures réalisées sur deux prototypes mettent en évidence une grande directivité, ainsi que les simulations le prédisaient.

Le thème « récupération d'énergie » regroupe trois articles.

*Récupération d'énergie pour tag augmenté*. Dans cet article, les signaux harmoniques générés par les puces RFID UHF, généralement considérés comme effet parasite non utilisé, sont exploités. En effet, les signaux harmoniques sont collectés pour alimenter un circuit supplémentaire associé à un tag RFID passif. Deux approches sont présentées et comparées. Dans la première approche, le signal harmonique à  $3f_0$  est combiné avec un signal Wi-Fi externe à 2,45 GHz. L'intégration se fait d'une telle manière que le signal composite augmente le rendement de conversion du circuit de récupération d'énergie. Dans la seconde approche, le signal harmonique  $3f_0$  est utilisé comme seule source d'énergie qui alimente un capteur de température commercial associé au tag. La conception des deux « tags augmentés » est présentée. Les systèmes sont simulés avec le logiciel ADS, en utilisant l'outil Harmonique Balance (HB), les résultats obtenus par simulations et par mesures sont comparés.

*Dispositif de récupération d'énergie vibratoire par transduction électrostatique, pré-chargé par une rectenna Cockcroft-Walton à 2,4 GHz*. Ce papier propose la conception, la réalisation et les mesures d'un transducteur électrostatique, à base d'une capacité macroscopique, pré-chargée par une rectenna de type Cockcroft-Walton à 2,4 GHz. La rectenna est conçue et optimisée pour fonctionner à des niveaux de puissance faibles et fournir des tensions élevées : 0,5 V à  $0,76 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  et 1 V à  $1,53 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Le transducteur électrostatique utilise le circuit de conditionnement de Bennet. Les mesures du système complet montrent des tensions supérieures à 23 V aux bornes du transducteur, lorsqu'il est excité à 25 Hz et avec une accélération externe de 1,5g. Une énergie cumulée de 275  $\mu\text{J}$  et une puissance disponible de 0,4  $\mu\text{W}$  ont pu être obtenues.

*Rectenna multi-bandes pour des applications micro-ondes*. Cet article présente une nouvelle rectenna (antenne + redresseur) multi-bande utilisable pour la récupération d'énergie électromagnétique à bord de satellites géostationnaires. L'objectif est de récupérer l'énergie électromagnétique rayonnée par les antennes placées à bord du satellite. L'énergie ainsi récupérée est alors utilisée pour alimenter des capteurs autonomes sans fil. Les résultats expérimentaux montrent que cette rectenna récupère, avec une bonne efficacité, l'énergie électromagnétique à trois fréquences qui correspondent aux fréquences de résonance de l'élément rayonnant de la rectenna.

Le thème « composants » regroupe trois articles.

*Limites théoriques et pratiques des antennes superdirectives.* Certaines applications comme le transfert d'énergie sans fil nécessitent des antennes à la fois directives et compactes. Cependant, les antennes électriquement petites (AES) présentent de faibles rendements et des diagrammes de rayonnement quasi-isotropes. Les antennes compactes superdirectives peuvent être une solution intéressante pour résoudre les problématiques concernant la directivité et l'efficacité énergétique. Dans cet article, nous présentons les limites théoriques et pratiques des antennes superdirectives. Ces limites sont le niveau de directivité en fonction de la sensibilité sur les coefficients d'excitation ainsi que la diminution de l'efficacité de rayonnement lorsque la distance inter-éléments diminue. Le besoin de résistances négatives pour concevoir des réseaux superdirectifs à éléments parasites est également une limite pratique dont il faut tenir compte. Les compromis nécessaires entre les dimensions totales de l'antenne, la directivité et l'efficacité atteignables sont analysés dans cet article.

*Performance des tags RFID de faible puissance fondés sur la modulation d'un signal rétrodiffusé.* Les systèmes RFID ultra large bande (ULB) utilisant la rétrodiffusion offrent une solution prometteuse pour surmonter de nombreuses limites des systèmes RFID conventionnels à bande étroite. Ce travail porte sur la performance des tels systèmes du point de vue de la propagation entre les lecteurs et les tags. Ces systèmes consistent à disposer plusieurs lecteurs afin de permettre à la fois la détection et la localisation des tags passifs opérant en rétrodiffusion. Deux campagnes de mesures successives ont été réalisées dans un environnement intérieur considéré comme scénario de référence. La première campagne de mesures est destinée à vérifier les principes et méthodes de base et sert comme moyen de calibration du dispositif de mesure. La seconde configuration représente un cas d'utilisation pratique de la RFID et permet d'analyser quantitativement l'atténuation du canal de propagation opérant en rétrodiffusion.

*Transferts d'énergie et de moment angulaire d'une onde électromagnétique à un anneau de cuivre dans la bande UHF.* Certaines ondes électromagnétiques peuvent transporter du moment angulaire orbital. Celui-ci peut être transféré à un objet macroscopique et ainsi le mettre en mouvement grâce à un couple constant. À la suite d'observations expérimentales, nous étudions l'origine du transfert de moment cinétique et d'énergie. En considérant les lois de conservation, nous montrons qu'il a pour origine le changement de signe du moment angulaire à la réflexion et entraîne un décalage Doppler rotationnel de la fréquence de l'onde électromagnétique.

Le thème « communication » réunit quatre articles.

*Limites énergétiques fondamentales des systèmes de radiocommunications.* L'évaluation de la consommation d'énergie d'une radiocommunication nécessite de faire l'analyse du cycle de vie des éléments utilisés. Mais cette analyse ne nous dit rien sur les limites énergétiques qu'il est possible d'envisager. Des approches théoriques permettent alors d'appréhender cette limite, qui est connue dans des cas très variés de transmission d'information. Cependant, les réponses ne sont pas toujours satisfaisantes, notamment dans le cas de canaux de radiocommunications variant dans le temps. Après un exposé rapide de la notion de limite énergétique d'une radiocommunication, en commençant par une approche globale, nous montrons que, contrairement aux résultats publiés, la limite énergétique est toujours non nulle si les contraintes physiques sont correctement exprimées.

*La modulation en ondelettes : une modulation alternative à faible consommation d'énergie.* Cette contribution présente la modulation en ondelettes, basée sur la transformée discrète en ondelettes, comme une modulation à faible consommation d'énergie. Le signal généré par cette modulation présente de faibles variations d'enveloppe, ce qui permet une bonne efficacité de l'amplificateur de puissance. Cette modulation est analysée pour plusieurs familles d'ondelettes et nous comparons ses performances avec l'OFDM, en termes du facteur PAPR, de densité spectrale de puissance (PSD) ainsi que l'impact de l'amplificateur de puissance sur la remontée des lobes secondaires. Les performances en termes de BER et de complexité d'implémentation sont également évaluées et plusieurs compromis sont caractérisés.

*Analyse du système linéaire optimal pour les communications multiporteuses au-delà de la cadence de Nyquist.* Les communications au-delà de la cadence de Nyquist permettent une augmentation de l'efficacité spectrale au prix d'une complexité plus élevée. Concernant les communications multi-porteuses, les travaux menés jusqu'à présent se sont principalement focalisés sur l'étude des systèmes non linéaires exploitant des techniques de codage et/ou d'égalisation, sans considération ou optimisation particulière de la partie linéaire du système. Dans cet article, nous analysons le comportement du système linéaire multi-porteuse optimal lorsqu'il est utilisé seul ou avec des structures de réception non linéaires. Nous nous intéressons également aux limites de l'hypothèse de normalité de l'interférence, laquelle est utilisée lors de l'implémentation de ces systèmes non linéaires. L'utilisation du système linéaire optimal permet d'obtenir une expression analytique de la probabilité d'erreur, qui peut alors être utilisée pour prédire les performances et aider la conception de systèmes codés. Ce travail met aussi en avant le bon compromis performances/complexité offerte par l'égaliseur à retour de décision dans le contexte des communications au-delà de la cadence de Nyquist.

*Nouvelle technique de communication pour les réseaux longue portée basse consommation : optimisation et comparaison.* L'internet des objets devient une réalité, et depuis plusieurs années le besoin d'un nouveau réseau longue portée basse consommation est apparu. Le but de ce réseau est de connecter un grand nombre de nœuds à faible coût, tout en optimisant le bilan de liaison. La couche physique doit alors être définie très efficace énergétiquement. La combinaison de la modulation orthogonale de fréquence à  $M$  états avec un codage canal dans un processus conjoint, et non successif, à l'émission se révèle très efficace lorsqu'un récepteur itératif est utilisé. Ce papier concerne l'étude de cette technique Turbo-FSK avec l'outil d'analyse itérative (EXIT, en anglais). La métrique est adaptée au cas de la  $M$ -FSK et l'influence de la taille du paquet est étudiée. On montre alors que la technique reste performante même lorsque que la taille de paquet est réduite. La comparaison avec des techniques actuelles est réalisée, montrant le potentiel de la technologie proposée.

Les éditeurs remercient vivement les membres du comité de lecture qui ont assuré l'expertise des articles de ce numéro thématique : Alessandra Costanzo, Emmanuel Bergeret, Pedro Miguel Cruz, Laurent Dussopt, Jean-Marc Laheurte, Zbynek Raida, John Sahalos, Alex Takacs.

Smaïl Tedjini  
*University Grenoble Alpes, LCIS Valence, France*

Apostolos Georgiadis  
*Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, United Kingdom*

*Guest Editors / Rédacteurs en chef invités*