HAL open science

Implémentation du codage à minimum d'énergie pour les wake-up radios

Nour El Hoda Djidi, Matthieu Gautier, Antoine Courtay, Olivier Berder

To cite this version:

Nour El Hoda Djidi, Matthieu Gautier, Antoine Courtay, Olivier Berder. Implémentation du codage à minimum d'énergie pour les wake-up radios. GRETSI 2022 - 28ème colloque du Groupement de Recherche en Traitement du Signal et des Images, Sep 2022, Nancy, France. hal-03776589

HAL Id: hal-03776589

https://inria.hal.science/hal-03776589

Submitted on 13 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Implémentation du codage à minimum d'énergie pour les wake-up radios

Nour El Hoda DJIDI, Matthieu GAUTIER, Antoine COURTAY, Olivier BERDER

Univ Rennes, CNRS, IRISA,
6 rue de Kerampont, 22300 Lannion, France
{nour-el-hoda.djidi,matthieu.gautier,antoine.courtay,olivier.berder}@irisa.fr

Résumé – Les Wake-up Radios (WuR) sont une des solutions les plus prometteuses pour permettre une consommation d'énergie ultra faible dans les réseaux de capteurs sans fil. Cependant, les WuR ont plusieurs limitations telles que leur faible sensibilité, induisant une mauvaise réception du signal de réveil, et donc une dégradation des performances de l'ensemble du système. Ce travail introduit l'utilisation d'un codage à minimum d'énergie afin d'améliorer la fiabilité des WuR tout en étant économe en énergie. Le décodage est implémenté sur le micro-contrôleur faible consommation de la WuR utilisée. Il est démontré, en combinant des modèles analytiques et des mesures expérimentales, une amélioration de la fiabilité jusqu'à 22% et une économie d'énergie totale de 42% lorsque le codage à minimum d'énergie est utilisé.

Abstract – Wake-up Radios (WuRs) represent one of the most promising solutions for allowing an ultra-low power consumption in wireless sensor networks. However, WuRs have several limitations such as low sensitivity, inducing a miss-interpret of the wake-up signal, and thus a performance degradation of the whole system. This work introduces the use of minimum energy coding in order to enhance the WuR reliability while being energy efficient. The decoding is implemented on the micro-controller of the used WuR platform. It is shown, by combining analytical models and experimental measurements, an enhancement on the reliability up to 22% and a total energy saving of 42% while applying minimum energy coding.

1 Introduction

La consommation d'énergie des communications radios est un verrou au déploiement des réseaux de capteurs sans fils lorsqu'ils sont fortement contraints en énergie. Apparues ces dernières années, les Wake-up Radios (WuR) sont une technologie sans fil prometteuse, qui permet une communication asynchrone entre les nœuds de capteurs avec une faible consommation électrique et une latence réduite [1]. Une WuR est un récepteur radio secondaire qui écoute en permanence le canal de communication, tout en consommant moins d'énergie (plusieurs ordres de grandeur) que les récepteurs traditionnels. La WuR réveille le récepteur principal de son état de veille lorsqu'un signal spécifique, appelé Wake-Up Beacon (WUB) est reçu. Le WUB est composé d'un préambule et d'une adresse de destination. Le préambule réveille le micro-contrôleur (MCU) Ultra Low Power (ULP) de la WuR qui décode ensuite l'adresse reçue. Si l'adresse décodée correspond à celle du destinataire, une interruption est envoyée au nœud principal qui sort de son état de veille.

Cependant, la très faible consommation des WuR est obtenue au prix d'un débit réduit et d'une faible sensibilité, induisant une mauvaise réception du signal de réveil. Le signal WUB est donc sujet aux erreurs de transmission qui induisent soit des *réveils manqués* (lorsque la WuR reçoit une adresse incorrecte et ne réveillera pas le nœud principal alors qu'elle le devrait) soit des *faux réveils* (quand la WuR réveillera le nœud principal alors qu'elle ne le devrait pas). Ces erreurs peuvent être réduites par l'utilisation du codage de canal et nous proposons dans ce travail de profiter des capacités de calcul de la WuR et d'ajouter un codage de canal léger au WUB afin d'améliorer la fiabilité de la WuR. Rakovic et al. ont évalué dans [2] les performances de certains codages de canal (Hamming, répétition et Walsh) pour améliorer les WuR. L'étude montre que le code Walsh donne les meilleures performances, mais nécessite une taille d'adressage élevée (32B) et donc un coût mémoire pratiquement impossible en pratique.

Nous proposons dans ce travail d'utiliser le codage à minimum d'énergie (ME)[3] et de l'appliquer aux WuR. Le principe de ce codage est de ne transmettre qu'un seul bit à '1' par mot de code permettant de réduire la consommation d'énergie de l'émetteur et du récepteur. Ce schéma fonctionne uniquement pour des WuR basées sur la modulation On-Off Keying (OOK) et a donc été implémenté sur le MCU de la carte WuR conçue dans [1] afin de montrer expérimentalement la faisabilité de son utilisation.

Ce papier présente dans un premier temps l'architecture de la WuR considérée et le principe du codage ME. Ensuite, la modélisation énergétique de la transmission d'un WUB est présentée. Enfin, des résultats combinant les modèles analytiques et des mesures expérimentales permettent de montrer les gains en portée et en énergie du codage ME.

2 Wake-up radio et codage à minimum d'énergie

2.1 Architecture d'une wake-up radio

Une WuR se compose d'un récepteur ultra basse consommation qui écoute en permanence le canal pendant que le nœud principal est en mode veille. Généralement, les WuR démodulent des signaux On-Off Keying (OOK) et transforment donc le signal radio en bits de données numériques qui sont ensuite traités par un ULP-MCU ou un corrélateur. La WuR considérée dans ce travail a été conçue dans [1] et est décrite dans la Figure 1. Le premier bloc est un filtre d'adaptation qui permet un transfert maximal de la puissance de l'antenne vers le circuit récepteur à 868 MHz. Ensuite, un détecteur d'enveloppe redresse le signal en un signal en bande de base. Ce signal est comparé à un seuil pour reconstruire les bits du WUB qui sont ensuite traités par l'ULP-MCU. Un détecteur de préambule sert à envoyer une interruption à l'ULP-MCU, qui est réveillé de l'état de veille et peut alors décoder l'adresse embarquée sur le WUB. L'ULP-MCU est un micro-contrôleur PIC12LF1552.

Lorsque l'émetteur veut envoyer des données à une destination, il envoie d'abord un WUB. Le WUB contient un préambule et l'adresse du nœud de destination. Si le codage canal est utilisé, la séquence de l'adresse est convertie sur un mot de code conformément au schéma de codage. Si aucun codage n'est utilisé, l'ULP-MCU de la WuR vérifie uniquement l'adresse reçue. Lorsqu'un codage canal est utilisé, l'ULP-MCU décode le mot de code reçu sur le symbole d'origine, puis vérifie si l'adresse est valide. La Figure 1 montre le traitement supplémentaire requis pour le décodage canal. Si l'adresse reçue est la bonne, la WuR réveille le nœud principal via une interruption. Le codage canal améliore la transmission des données et donc une meilleure détection du WUB. Un codage canal à faible complexité doit donc être choisi afin de maintenir la consommation WuR la plus faible possible tout en améliorant sa sensibilité.

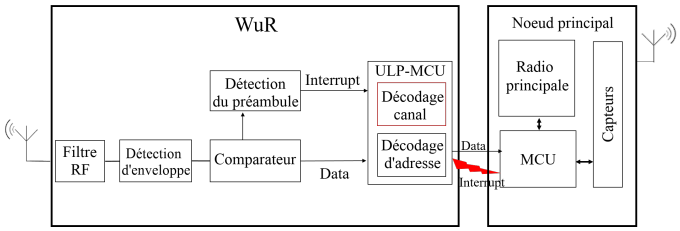


FIGURE 1 – Architecture d'un nœud communicant utilisant une WuR.

2.2 Codage à minimum d'énergie

Le codage ME consiste à associer chaque mot de k bits d'information à un mot de n bits contenant un seul bit à '1' comme détaillé dans la Table 1. La position du '1' dans le mot de code correspond au nombre binaire du mot d'entrée. Le mot de code contient donc un total de $2^k - 1$ bits.

Traditionnellement, lorsqu'un mot de code reçu contient plus d'un bit à '1', l'unité de traitement du récepteur choisit un symbole aléatoire [3]. Cependant, dans notre cas, l'unité de traitement n'attendra pas de recevoir tout le mot de code qui contient plus d'un bit à '1' pour le décoder. Lorsque le premier est reçu, il est directement mappé sur son symbole d'origine en fonction de sa position, puis l'unité de traitement s'éteint pour économiser de l'énergie et réduire la latence. Lorsque l'on considère un émetteur utilisant la modulation OOK qui éteint l'amplificateur de puissance lors de la transmission de '0', la consommation d'énergie de l'émetteur lors de l'application du codage ME est réduite car plus de '0' sont envoyés que de '1'. De plus, nous utilisons un transmetteur de ST [4] qui peut s'éteindre et s'allumer facilement quasiment sans coût supplémentaire en énergie.

TABLE 1 – Table de codage à minimum d'énergie.

Symbole source (k)	Symbole codé ($n = 2^k - 1$)
00..00	0000..000
00..01	0000..001
...	...
...	...
...	...
11..10	0100..000
11..11	1000..000

3 Modèle énergétique

Une communication point-à-point entre un émetteur et une WuR est considérée. L'émetteur transmet le même paquet N_{tx} fois jusqu'à ce qu'il soit reçu avec succès. N_{tx} est exprimé comme :

$$N_{tx} = \frac{1}{1 - MWR}, \quad (1)$$

avec MWR le taux de réveils manqués (Missed Wake-up Rate).

La consommation électrique moyenne de l'émetteur et du WuR est modélisée pour un schéma sans codage et lorsque le codage ME(n, k) est utilisée.

3.1 Puissance consommée moyenne sans codage

Puissance consommée par l'émetteur : La puissance consommée moyenne $P_{tx}^{uncoded}$ de la transmission d'un WUB jusqu'à sa réception avec succès est :

$$P_{tx}^{uncoded} = N_{tx}\lambda t_b \cdot \left(P_{tx_1} \cdot (l_{pr} + \frac{k}{2}) + P_{tx_0} \cdot \frac{k}{2} \right), \quad (2)$$

avec P_{tx_1} et P_{tx_0} la puissance consommée par l'envoi d'un '1' et d'un '0', respectivement, l_{pr} le nombre de bits du préambule, t_b la durée d'un bit, k le nombre de bits de l'adresse et λ le taux de transmission de paquet.

Puissance consommée par la WuR : La puissance consommée moyenne $P_{WuR}^{uncoded}$ de la WuR est :

$$\begin{aligned} P_{WuR}^{uncoded} &= N_{tx}\lambda t_b(l_{pr}+k)\cdot P_{rx}^{wur} \\ &+ (1-N_{tx}\lambda t_b(l_{pr}+k))\cdot P_{idle}^{wur}, \end{aligned} \tag{3}$$

avec P_{rx}^{wur} la puissance consommée par la WuR lors de la réception et du traitement du WUB, et P_{idle}^{wur} la puissance consommée par la WuR en écoute du canal (lorsque le ULP-MCU est en sommeil).

3.2 Puissance consommée moyenne avec le codage ME(n,k)

Puissance consommée par l'émetteur : La puissance consommée moyenne P_{tx}^{ME} de la transmission d'un WUB jusqu'à sa réception avec succès est :

$$P_{tx}^{ME} = N_{tx}\lambda t_b \cdot \left(P_{tx_1}\cdot(l_{pr}+\frac{n}{n+1}) + P_{tx_0}\cdot(\frac{n^2}{n+1}) \right). \tag{4}$$

Puissance consommée par la WuR : La puissance consommée moyenne P_{WuR}^{ME} de la WuR avec le codage ME est :

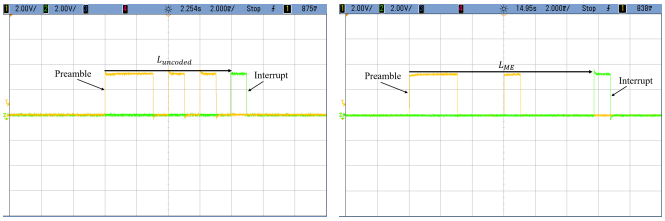
$$\begin{aligned} P_{WuR}^{ME} &= N_{tx}\lambda t_b(l_{pr}+n)\cdot P_{rx}^{wur} \\ &+ (1-N_{tx}\lambda t_b(l_{pr}+nt_b))\cdot P_{idle}^{wur}. \end{aligned} \tag{5}$$

4 Évaluation des performances

4.1 Mesures expérimentales des réveils manqués

Le codage/décodage ME(7,3) a été implémenté sur la WuR conçue dans [1]. La Figure 2 montre à l'oscilloscope la réception d'un WUB lorsque l'adresse `0b101` est envoyée avec le codage ME(7,3) (`0b0010000`) et sans codage (`0b101`). L'adresse est précédée d'un préambule de 3 bits et d'un bit au niveau bas qui permet de déclencher l'ULP-MCU et de démarrer le décodage à partir du passage par zéro. On peut voir la latence respective avant de transmettre une interruption au nœud principal qui est plus importante avec le codage ME que sans codage. L'étude de cette latence est détaillée dans [6].

La probabilité de réveil manqué MWR a été mesurée expérimentalement pour 7215 paquets envoyés à un rythme de 4 paquets/s. La probabilité de réveil manqué représente le nombre



(a) Sans codage (b) ME

FIGURE 2 – Réception d'un WUB contenant l'adresse `0b101`.

FIGURE 3 – Environnement des expérimentations.

de paquets non reçus sur le total des paquets transmis. La WuR et l'émetteur sont placés à une distance de 1 m l'un de l'autre dans une chambre anéchoïque comme illustré par la Figure 3. Les MWR sont mesurés pour différentes puissances de transmission allant de -13 dBm à -19,5 dBm et ces résultats sont traduits ensuite en une portée théorique en considérant la formule de Friis et une puissance d'émission de 10 dBm. La Figure 4 donne le MWR en fonction de la portée. On peut voir qu'en dessous d'une portée de 22 m, le taux MWR est nul pour les 2 schémas, avec et sans codage. Lorsque la portée dépasse 22 m, le codage ME(7,3) améliore le MWR par rapport au schéma sans codage. À une portée de 28m, le MWR est réduit de 22%.

4.2 Consommation d'énergie

Pour évaluer la consommation, l'émetteur de ST [4] considéré a des puissances P_{tx_1} et P_{tx_0} égales à 3,8 mW et 420 μW, respectivement. La WuR conçue par [1] a des puissances P_{rx}^{wur} et P_{idle}^{wur} égales à 284 μW et 1,83 μW, respectivement. t_b est égal à 1 ms et λ est fixé à 1 paquet/s. Ces valeurs sont utilisées dans les modèles donnés dans la section précédente.

La Figure 5(a) donne la consommation électrique moyenne de l'émetteur par paquet reçu avec succès avec l'utilisation des schémas sans codage et ME (7,3). On peut voir que le codage ME consomme moins que le schéma sans code, car avec le codage ME, même si le paquet est plus long, il est composé

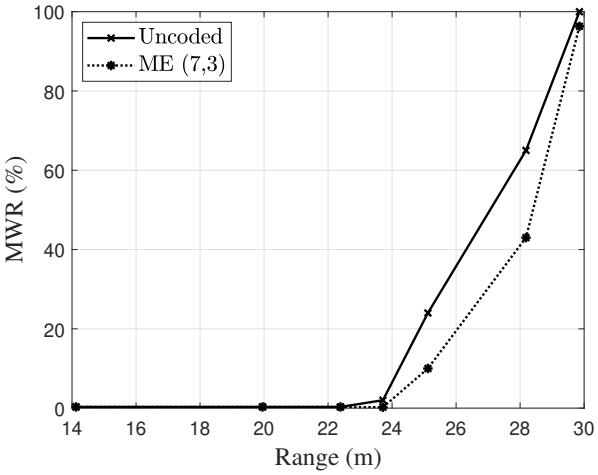
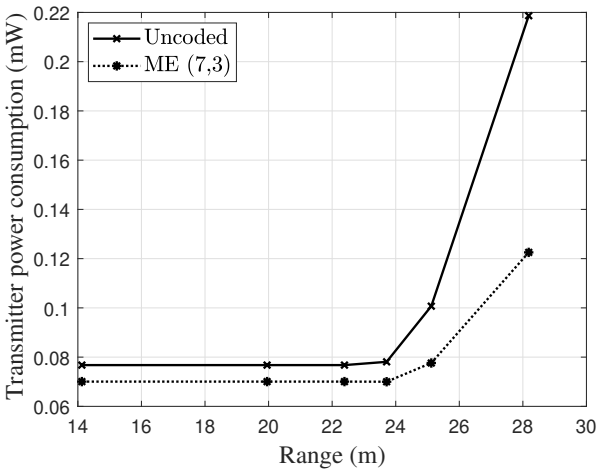
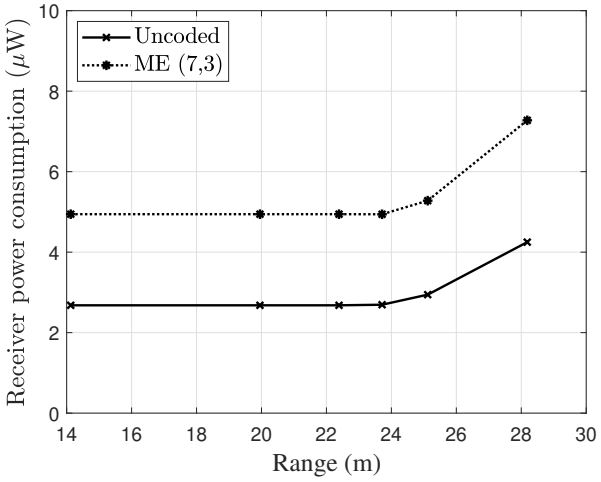


FIGURE 4 – Mesure de MWR en fonction de la portée.



(a) Émetteur.



(b) Réception avec la WuR.

FIGURE 5 – Puissance consommée moyenne par paquet reçu avec succès.

principalement de '0' qui consomment moins d'énergie que les '1'. Lorsque la portée est inférieure à 22m, ME(7,3) consomme 8,7% de moins que le schéma sans code, et au-delà de 22 m le gain devient plus important et atteint 43,9% pour une distance de 28 m, car, plus la portée augmente, plus la transmission sans codage a un MWR élevé et doit donc retransmettre plus de paquets qu'avec le codage ME(7,3).

La Figure 5(b) illustre la consommation électrique moyenne de la WuR par paquet reçu avec succès. On peut voir que le codage ME consomme plus que le schéma sans codage car la WuR doit décoder un paquet plus long avec le codage ME. Il consomme 43% de plus que le schéma sans code, mais cette consommation est de l'ordre de quelques micro-watts.

En considérant l'émission et la réception, la consommation électrique moyenne totale du schéma sans code est supérieure à celle du codage ME. Plus la portée est élevée, plus l'énergie est économisée avec le codage ME. Pour une portée inférieure à 22 m, le codage ME économise 5,58% d'énergie, et à une portée de 28 m, 41,76% d'énergie est économisée.

5 Conclusion

Cet article présente l'implémentation du codage à minimum d'énergie dans une wake-up radio avec une étude détaillée de la consommation d'énergie grâce à des expérimentations. Les mesures expérimentales ont montré une amélioration de la fiabilité jusqu'à 22% et une économie d'énergie totale de 42% lorsque le codage à minimum d'énergie est utilisé. Pour aller plus loin, la probabilité d'erreur de ce schéma est donnée dans [5] alors que la réduction de la latence et les performances énergétiques sont abordées dans [6]. Cette technique est également améliorée par l'ajout d'un filtrage du préambule décrit dans [7].

Références

[1] M. Magno, V. Jelicic, B. Srbinovski, V. Bilas, E. Popovici, et L. Benini, "Design, Implementation, and Performance Evaluation of a Flexible Low-Latency Nanowatt Wake-Up Radio Receiver," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 633–644, April 2016.

[2] V. Rakovic, R. Adamovski, A. Risteski, et L. Gavrilovska, "Improving Energy Efficiency and Reliability in WuR-Based IoT Systems : An Error Correction Approach," *Wireless Personal Communications*, 2020.

[3] Q. Tang, S. Gupta, et L. Schwiebert, "BER performance analysis of an on-off keying based minimum energy coding for energy constrained wireless sensor applications," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2005.

[4] ST, *Ultra-low power high performance sub-1 GHz transceiver Datasheet*, 2019, accessed : 2020-05-19. [Online]. Available : `\url{https://www.st.com/content/st\_com/en.html}`

[5] N. E. H. Djidi, M. Gautier, A. Courtay et O. Berder, "Enhancing Wake-Up Radio Range Through Minimum Energy Coding," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2021.

[6] N. E. H. Djidi, M. Gautier, A. Courtay et O. Berder, "MEES-WuR : Minimum Energy Coding with Early Shutdown for Wake-up Receivers," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 1502–1513, Sept. 2021.

[7] N. E. H. Djidi, M. Gautier, A. Courtay et O. Berder, "Enhancing Wake-Up Receivers Reliability Through Preamble Filtering and Minimum Energy Coding," *International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2021.