

Optimisation énergétique d'un système de communication dédié à un réseau de capteurs

Mickaël CARTRON¹, Olivier SENTIEYS¹

¹ENSSAT/IRISA

6 rue de Keramont, BP 80518, 22305 Lannion Cedex, France

cartron@irisa.fr, sentieys@irisa.fr

Résumé – Cet article présente une méthode d'optimisation énergétique d'un système de communication mobile utilisé dans un contexte de réseau de capteurs. Plus particulièrement, il se focalise sur l'optimisation de l'expression de l'énergie consommée par les couches liaison et physique réalisant la communication entre deux nœuds en liaison directe. Les fonctions du niveau liaison comprennent dans notre cas la correction d'erreurs et la retransmission automatique des paquets erronés. Les moyens de modéliser l'énergie totale (dynamique et statique) d'un système sont détaillés. Des points de fonctionnements optimaux sont ensuite déterminés à l'aide d'expressions liant les performances et la consommation de notre système.

Abstract – This article presents an energetic optimization method of a sensor network's communication system. It focuses on the optimization of the expression of the energy consumed by the link and physical levels. These two levels realize a direct communication between nodes sharing the same channel. The link level functions include error correction and automatic retransmission of wrong packets. Several methods of evaluation of the total power (dynamic and static) of systems are exposed. Then, optimal functioning points are found using expressions involving the performance and the consumption of our system.

1 Introduction

La recherche dans le domaine des capteurs subit actuellement une révolution importante, ouvrant des perspectives d'impacts significatifs dans de nombreux domaines d'applications (sécurité, santé, environnement, sécurité alimentaire, fabrication, télécommunications, robotique, etc.). Les progrès dans le domaine des communications numériques sans fil nous permettent d'imaginer des réseaux de capteurs ad-hoc totalement autonomes avec des durées de vie importantes. L'augmentation de l'autonomie des capteurs est le principal centre d'intérêt de la recherche dans ce domaine et c'est celui qui est développé dans cet article. Dans une première partie, nous présenterons le concept de réseau de capteurs après quoi nous décrirons l'architecture générique et globale d'un capteur. Dans une troisième partie, nous ferons la description algorithmique des couches basses de la pile de protocole réseau d'une chaîne de communication adaptée à un réseau de capteurs. Enfin nous montrerons comment optimiser la partie radio du capteur, ce qui permettra la définition de modules globaux de contrôle d'énergie, selon une méthodologie de conception globale telle que celle décrite dans [1]. Cette méthodologie consiste à envisager un système de transmission dans sa globalité plutôt qu'un ensemble de blocs séparés, afin de se situer dans un espace d'optimisation plus vaste. Notre méthode d'optimisation est similaire à celle présentée dans [2], mais dans un cas plus général et sans imposer la norme IEEE 802.11a. De plus, nous allons plus loin, comme dans [3], car nous intégrons la retransmission automatique des erreurs dans nos calculs.

2 Présentation générale des réseaux de capteurs

Un réseau de capteurs est un ensemble de capteurs communicants qui est dispersé dans un environnement afin de le surveiller. Depuis quelques années, les réseaux de capteurs ont suscité un intérêt croissant dans le monde des télécommunications, du traitement du signal et des réseaux sans fil. En effet, les progrès technologiques rendent possible sur le papier de concevoir des objets communicant sans fil et ayant néanmoins des autonomies de fonctionnement très élevées, de l'ordre d'une ou plusieurs années. Un réseau de capteurs est donc constitué d'un ensemble de nœuds qui remplissent deux rôles : un rôle de source d'informations et un rôle de relais pour le reste du réseau. Les réseaux de capteurs doivent être *ad-hoc*, tout d'abord dans un souci de simplicité d'installation, mais aussi et surtout dans le souci de permettre au réseau de rester opérationnel même après des défaillances ponctuelles de nœuds. Ils doivent pouvoir s'auto-gérer, en utilisant des protocoles permettant d'apprendre des éléments tels que la topologie du réseau, le positionnement relatifs des capteurs au sein du réseau [4], les routes possibles pour communiquer avec d'autres nœuds donnés [5]. Les communications multi-étapes de courte portée sont privilégiées par rapport à une transmission directe avec une station de base.

De nombreuses applications ont déjà été imaginées, dans des domaines variés (agriculture, bâtiments, transports, défense, sécurité civile, etc.).

3 Architecture générique d'un nœud de communication

L'architecture générique d'un capteur a été définie en grande partie à partir de [6]. Elle se compose d'une partie chargée de l'alimentation des circuits avec éventuellement un système de récupération d'énergie, d'un ou plusieurs capteurs et leurs convertisseurs analogiques numériques associés, d'un bloc de traitement numérique composé d'un processeur éventuellement associé avec un composant de traitement spécialisé de type ASIC ou FPGA avec des blocs mémoire associés. Enfin, un module radio analogique permet de réaliser les communications.

4 Description algorithmique d'un élément du réseau

Nous avons subdivisé l'ensemble des traitements en trois niveaux. Le premier niveau est appelé niveau application et il comprend trois classes de tâches haut niveau, utilisatrices de l'accès sans fil. On distingue trois tâches. La première est la tâche de positionnement qui permet à un capteur de déterminer sa position géographique en réalisant des mesures de distances et des triangulations. La deuxième tâche a pour rôle la gestion du routage des messages au sein du réseau ad-hoc. Enfin, la troisième tâche du niveau application est la tâche de gestion des valeurs mesurées, pour lancer des requêtes locales et calculer des moyennes, par exemple. Le niveau intermédiaire est le niveau liaison. Son rôle est de fournir aux niveaux supérieurs une communication réussie entre deux éléments en liaison directe. Il doit gérer le contrôle d'erreurs et les ré-émissions automatiques de paquets et l'accès au média. L'accès au média est contrôlé par un protocole de type CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Ensuite, le niveau le plus bas du traitement est le niveau physique dont le rôle est de mettre en forme les signaux par la modulation et la génération de porteuses. Pour réaliser le contrôle d'erreurs, nous avons sélectionné deux techniques : un codage/décodage en bloc à l'aide d'un code de Hamming d'une part et un codage convolutif associé à un décodage de Viterbi d'autre part. Une chaîne sans correction d'erreur a également été envisagée. La ré-émission automatique employée est basée sur la technique SACK (Selective Acknowledgement) [3], avec laquelle les paquets erronés sont ré-émis et seulement ceux-ci. Ensuite, le niveau le plus bas du traitement est le niveau physique dont le rôle est de mettre en forme les signaux par la modulation et la génération de porteuses. L'algorithme que nous étudions inclut le niveau liaison et le niveau physique. Le niveau liaison est réalisé avec des composants numériques et sa consommation sera modélisée par les termes P_{dyn} et P_{stat} , respectivement pour les consommations dynamique et statique. Le niveau physique est constitué de composants analogiques et sa consommation sera modélisée par les termes P_{an} et P_{amp} , respectivement pour la puissance consommée par la mise en forme du signal analogique et les circuits de réception, d'une part et par la puissance

consommée par l'amplificateur de puissance d'émission, d'autre part.

5 Performances conjointes des niveaux liaison et physique

Les objectifs de l'étude sont multiples : il faut exprimer l'énergie consommée par bit transmis en fonction des paramètres choisis dans le but de mettre en évidence une configuration des paramètres du système permettant d'obtenir un minimum en terme d'énergie par bit transmis. Ces résultats pourront être ensuite utilisés pour donner les moyens à une application de définir ses besoins en terme de qualité de transmission ou de taux de transmission et d'intervenir ainsi directement sur la puissance d'émission, les tailles de paquets, et d'autres paramètres via une interface système adéquate. Des travaux similaires on déjà été menés dans [3] et [2]. L'article [3] combine les corrections d'erreurs et la ré-émission automatique, mais envisage uniquement une cible processeur, et s'appuie sur des modèles de consommation assez grossiers, sans prendre en compte l'énergie statique dans le calcul. Mais dans le contexte d'un réseau de capteur, cette hypothèse ne peut être maintenue. L'article [2] s'appuie sur la norme IEEE 802.11a, et cherche à adapter au mieux les paramètres de choix de codage et de puissance d'émission, pour diminuer l'énergie sous diverses contraintes d'applications. Par contre, l'énergie due aux ré-émissions n'y est pas prise en compte.

5.1 Expressions de la consommation

Pour évaluer la puissance consommée par un traitement, on peut utiliser trois méthodes. Dans le cas général on peut donner l'expression suivante, en négligeant les pertes statiques :

$$E_{\text{dyn}} = E_{\text{op}} \cdot N_{\text{opérations}} = a \cdot C_s \cdot A_{\text{op}} \cdot V_{\text{dd}}^2 \quad [J] \quad (1)$$

avec E_{dyn} qui représente l'énergie dynamique de l'algorithme, E_{op} l'énergie consommée pour une opération "moyenne", $N_{\text{opérations}}$ le nombre d'opérations de l'algorithme, a l'activité du circuit, A_{op} la surface de l'opérateur "moyen" et V_{dd} la tension d'alimentation.

Si on souhaite raffiner l'évaluation de la consommation, il faut alors prendre en compte la puissance statique. La part de la puissance statique est d'ailleurs loin d'être négligeable dans un contexte comme celui d'un réseau de capteurs où le taux d'activité est très faible. Dans ce cas, il faut introduire un terme de puissance statique dans l'expression de l'énergie de l'algorithme. E_{algo} est l'énergie consommée pour exécuter une fois l'algorithme considéré, P_{stat} est la puissance statique totale du circuit réalisant le traitement, T_{algo} est le temps d'exécution de l'algorithme à l'aide du circuit considéré, F_{clk} représente la fréquence de l'horloge, $N_{\text{opérateurs}}$ est le nombre d'opérateurs utilisés pour le calcul et β est un coefficient de consommation statique par unité de surface.

$$E_{\text{algo}} = (\beta \cdot A_{\text{op}} \cdot N_{\text{opérateurs}} + P_{\text{dyn}}) \cdot T_{\text{algo}} \quad [J] \quad (2)$$

$$T_{\text{algo}} \geq \frac{N_{\text{opérations}}}{N_{\text{opérateurs}} \cdot F_{\text{clk}}} \quad [s] \quad (3)$$

Ce qui nous permet d'exprimer une *borne inférieure* pour l'expression de l'énergie de l'algorithme :

$$E_{\text{algo}} \geq N_{\text{opérations}} \cdot \left(\frac{\beta \cdot A_{\text{op}}}{F_{\text{clk}}} + E_{\text{op}} \right) \quad [J] \quad (4)$$

Cette expression qui correspond à une description haut niveau est certes un peu grossière, mais elle est cependant riche d'enseignements quant aux directions architecturales à prendre pour réaliser un système réellement basse consommation. De plus ce modèle est bien adapté pour avoir une idée de la consommation d'un gros système. Cependant, si on souhaite plus de précision, il faut alors définir exactement le matériel employé pour chaque bloc de traitement. Dans ce cas, la puissance consommée pendant l'exécution de l'algorithme peut s'exprimer :

$$P_{\text{algo}} = \sum_{j \in \mathcal{D}_f} \left(\sum_{i \in \mathcal{D}_{sys}} nb_{i,j} \cdot E_{\text{op}_{i,j}} \cdot F_j + \sum_{i \in \mathcal{D}_{sys}} nb_{i,j} \cdot p_{\text{stat}_i} \right) [W] \quad (5)$$

avec \mathcal{D}_f l'ensemble des fréquences de fonctionnement, F_j la fréquence de fonctionnement du domaine j , \mathcal{D}_{sys} l'ensemble des sous-systèmes (e.g. opérateur arithmétique, registre etc.) fonctionnant à F_j , $nb_{i,j}$ le nombre d'opérateurs de type i fonctionnant à la fréquence du domaine j , $E_{\text{op}_{i,j}}$ l'énergie dynamique d'une opération du type i et du domaine j et p_{stat_i} la puissance statique dépensée par un système de type i sous tension. Nous avons utilisé ce dernier modèle, plus précis, pour les calculs de consommation des circuits de codage et de décodage de canal.

5.2 Modélisation fonctionnelle et énergétique du problème

Une retransmission est nécessaire lorsqu'un paquet transmis comporte au moins une erreur. Soit lp le nombre d'éléments binaires d'un paquet, TEB le taux d'erreur binaire et $nberr$ le nombre d'erreurs dans un paquet donné, la probabilité qu'un paquet transmis comporte au moins une erreur est le taux d'erreur par paquet (TEP) et s'exprime :

$$TEP = 1 - \text{prob}(nberr = 0) = 1 - (1 - TEB)^{lp} \quad (6)$$

Soit NbP , le nombre de paquets d'information à transmettre et deb le débit binaire de transmission du système actif, le temps mis pour une transmission réussie du premier coup d'un paquet d'information s'exprime de la façon suivante :

$$T_{\text{ideal}} = \frac{NbP \cdot lp}{deb} \quad [s]. \quad (7)$$

Le temps réel de transmission doit donc tenir compte du pourcentage de temps additionnel nécessaire pour les retransmissions. Lors d'une tentative d'envoi, le paquet a la probabilité TEP d'être faux, l'expression du temps réel de transmission est donc :

$$T_{\text{reel}} = T_{\text{ideal}} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} TEP^i = \frac{T_{\text{ideal}}}{1 - TEP} \quad [s] \quad (8)$$

Afin de réaliser une optimisation énergétique du système de communication, la grandeur à étudier est l'énergie par bit transmis avec succès. Celle-ci est définie par l'expression :

$$E_{\text{bit}} = \frac{P}{deb \cdot (1 - \frac{1}{2} \cdot \text{erfc}(\sqrt{RSB}))^{lp}} \quad [J] \quad (9)$$

dans laquelle nous avons considéré une modulation de type BPSK, permettant ainsi d'exprimer TEB en fonction du rapport signal sur bruit RSB . P est la puissance globale du système en communication incluant les puissances dynamique et statique consommées par les circuits numériques et analogiques.

$$P = P_{\text{algo}} + P_{\text{an}} + P_{\text{amp}} \quad [W], \quad (10)$$

avec P_{an} représentant une constante associée à l'ensemble des circuits analogiques et P_{amp} représentant la puissance consommée par le système d'amplification de puissance précédant l'antenne d'émission.

P_{amp} doit tenir compte de l'efficacité du système d'amplification et dépend de son régime de fonctionnement. Nous avons utilisé un modèle exponentiel tel que celui proposé dans [2] pour représenter cette efficacité. Soit eff l'efficacité du couple amplificateur/antenne et P_{diff} la puissance du signal diffusée par l'antenne, on a alors, avec $A = 0.02$ et $B = 0.140$:

$$P_{\text{amp}} = P_{\text{diff}} \cdot eff = P_{\text{diff}} \cdot A \cdot \exp(B \cdot 10 \log_{10}(P_{\text{diff}})) \quad (11)$$

Nous avons également utilisé un autre modèle obtenu à partir des données constructeur d'un composant commercial, le Chipcon CC1020. Nous avons déterminé la somme $P_{\text{an}} + P_{\text{amp}}$ pour ce composant. On a alors $P_{\text{an}} = 0.102$ W, $A = 0.008$ et $B = 0.001$. On peut tout de suite remarquer l'ordre de grandeur très différent pour P_{an} . La consommation très importante du CC1020 peut s'expliquer de plusieurs façons. Tout d'abord, le CC1020 gère sa propre horloge, est doté d'une PLL, de plus il s'agit d'un composant très polyvalent.

5.3 Résultats

L'expression 9 que nous avons déterminée précédemment nous permet de tracer l'énergie par bit transmis avec succès en fonction de paramètres de la chaîne de transmission. Ces paramètres d'étude sont la distance entre les nœuds de communication, le type de canal, le bruit au niveau du récepteur, la taille des paquets, le type de codage de canal employé et la puissance d'émission. L'analyse des tracés nous permet de déduire le point de fonctionnement optimal de la transmission d'un point de vue de l'efficacité énergétique. Un module de gestion de l'énergie peut alors être défini en utilisant ces résultats et être utilisé au moment du déploiement du réseau et après chaque modification des conditions comme après des mouvements ou des pannes.

La figure 1 représente un résultat de simulation obtenu à partir des expressions analytiques décrites précédemment, pour une distance de 10 mètres, une puissance de bruit de -90 dB, une taille de paquets correspondant à la norme ATM. La puissance d'émission est en abscisse. Le

choix de cette distance a été fait dans l’optique de transmissions multi-étapes. En effet, l’objectif est de réaliser des communications sur de longues distances par plusieurs transmissions à courte distance, avec de faibles puissances d’émission, plutôt que de rares transmissions plus gourmandes en énergie. En Wi-Fi, le réglage le plus faible de la puissance d’émission (-20 dBm) permet d’assurer des taux d’erreurs raisonnables jusqu’à une distance d’environ 10 mètres, c’est pourquoi cette distance nous intéresse. La droite verticale représente la limite de Shannon, c’est à dire la limite théorique minimale de la puissance d’émission pour pouvoir avoir une transmission aussi fiable que nécessaire. Les trois autres courbes représentent l’énergie par bit transmis en fonction de la puissance du signal diffusé à l’antenne. Toutes les courbes ont le même comportement global. La partie gauche, pour des puissances d’émission faibles, est décroissante. Dans cette zone, les paquets sont souvent transmis avec des erreurs, et les retransmissions augmentent le temps nécessaire pour transmettre une quantité d’information donnée. La partie droite des courbes correspond à une puissance d’émission relativement plus élevée, qui permet de réduire le *TEP*. Les paquets nécessitant une ré-émission deviennent rares, mais, en contrepartie, la puissance instantanée du système en fonctionnement est plus élevée puisque l’amplificateur doit délivrer plus de puissance. Le bon compromis se situe au minimum de chacune des courbes. On voit sur l’exemple qu’il est possible de gagner de l’ordre de 30 % d’énergie en choisissant un codage de canal de type Viterbi et en se positionnant au point optimal comparé à une absence de codage de canal. En considérant cette fois une gestion optimale de la puissance d’émission comparée à un choix au pire cas dans lequel on maximiserait la puissance d’émission pour assurer la connectivité, on peut alors économiser 87 % d’énergie.

La figure 2 montre le même style de courbe pour une couche physique différente, dont le modèle a été extrait d’un composant du commerce. On peut constater que la mise en forme du signal consomme la plus grande part de l’énergie et prédomine sur les autres facteurs de consommation. Cette part fixe de consommation de fonctionnement et de mise en forme du signal est peu adaptée à des réseaux de capteurs. Il y a donc beaucoup à gagner à optimiser cette partie. Dans cette optique, de nouvelles normes émergent notamment IEEE 802.15.4 et Zigbee, redéfinissant les couches basses de réseaux mieux adaptées aux réseaux de capteurs.

6 Conclusion

Après avoir présenté la problématique des réseaux de capteurs, une architecture générique d’un élément d’un réseau de capteurs a été décrite. Dans le but d’optimiser sa puissance, nous avons établi des modèles de consommation utilisables en pratique et nous avons utilisé ces modèles pour caractériser un système de communication candidat pour un réseau de capteurs. Ensuite, nous avons élaboré des modèles théoriques liant les performances et la consommation de notre système, en fonction de para-

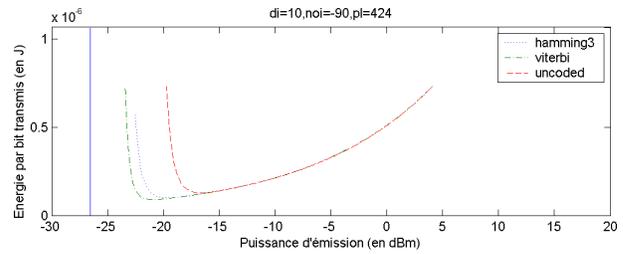


FIG. 1 – Énergie par bit transmis en fonction de la puissance d’émission, pour plusieurs types de codeurs/décodeurs et pour des paquets de type ATM, modèle de couche physique fin

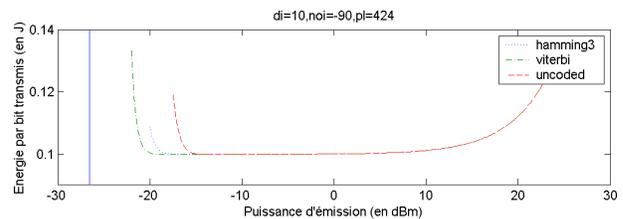


FIG. 2 – Énergie par bit transmis en fonction de la puissance d’émission, pour plusieurs types de codeurs/décodeurs et pour des paquets de type ATM, modèle de couche physique typique du commerce

mètres et des besoins applicatifs. Nous utilisons ensuite ces modèles pour trouver les points de fonctionnement optimaux.

Références

- [1] Andrea Goldsmith and Stephen Wicker, “Design Challenges for Energy-Constrained Ad Hoc Wireless Networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 9, no. 4, pp. 8–27, August 2002.
- [2] Daji Qiao, Sunghyun Choi, Amjad Soomro, and Kang G. Shin, “Energy-Efficient PCF Operation of IEEE 802.11a Wireless LAN,” in *INFOCOM’02*. IEEE, 2002.
- [3] Paul Lettieri, Christian Fragouli, and Mani Srivastava, “Low Power Error Control for Wireless Links,” in *MOBICOM’97*. ACM, 1997.
- [4] Chris Savarese, Jan Rabaey, and Jan Beutel, “Locationing in Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks,” in *ICASSP*. IEEE, 2001.
- [5] Jamal Al-Karaki and Ahmed Kamal, “Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 6–28, December 2004.
- [6] Rex Min, Seong-Hwan Cho, Manish Bhardwaj, Eugene Shih, Alice Wang, and Anantha Chandrakasan, “Power-aware Wireless Microsensor Networks,” in *Power-aware Design Methodologies*, Massoud Pedram and Jan Rabaey, Eds., chapter 12, pp. 335–372. Kluwer Academic Publishers, 2002.