



Bénéfice de l'Annulation Successive d'Interférence pour des Réseaux Ultra Narrow Band: Théorie et Application à l'IoT

Yuqi Mo, Claire Goursaud, Jean-Marie Gorce

► To cite this version:

Yuqi Mo, Claire Goursaud, Jean-Marie Gorce. Bénéfice de l'Annulation Successive d'Interférence pour des Réseaux Ultra Narrow Band: Théorie et Application à l'IoT. ALGOTEL 2018 - 20èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications, May 2018, Roscoff, France. pp.1-4. hal-01783923

HAL Id: hal-01783923

<https://hal.science/hal-01783923>

Submitted on 2 May 2018

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.

Bénéfice de l'Annulation Successive d'Interférence pour des Réseaux Ultra Narrow Band: Théorie et Application à l'IoT

Yuqi MO^{1,2}, Claire GOURSAUD¹, and Jean-Marie GORCE¹

¹*CITI Labs, INSA-Lyon, Villeurbanne, France*

²*Sigfox Company, Building E-volution, Labège, France*

Ultra-Narrow-Band (UNB) est une solution de communication prometteuse pour l'IoT. Elle permet de la transmission d'information à longue distance et à basse consommation. Son accès au canal est RFTMA (Random Frequency and Time Multiple Access), où les nœuds transmettent d'une manière aléatoire en temps et en fréquence, sans écoute préalable du canal. Cela conduit à de potentielles interférences et collisions. Dans ce papier, nous proposons d'utiliser le SIC (Successive Interference Cancellation) pour réduire les contributions d'interférence. Nous étudions théoriquement la performance du réseau basé sur UNB, en prenant en compte conjointement le SIC et RFTMA. Enfin, nous évaluons la capacité du SIC à améliorer la performance du système de UNB.

Mots-clefs : Sigfox, Ultra-Narrow-Band, Random-FTMA, Successive Interference Cancellation

1 Introduction

Exploitée et déployée par la compagnie Sigfox, Ultra-Narrow-Band (UNB) a attiré beaucoup d'attention récemment dans le monde de l'Internet des Objets. Cette technologie vise à réaliser des transmissions à longue distance et basse consommation, de même que, CSS (LoRa) et RPMA (Ingenu) [GG15]. La spécificité d'un système UNB, est que l'occupation spectrale du signal est très petite (typiquement 100 Hz), comparée aux systèmes classiques. Cela permet d'avoir une portée de transmission très large (jusqu'à 50km), et une consommation d'énergie ultra basse. UNB est donc adapté pour des objets qui envoient des messages de petite taille (typiquement 100 à 200 bits), et qui ont besoin d'une autonomie de 10 à 20 ans.

La principale caractéristique de UNB est liée à un phénomène typique dans des objets électroniques : l'imprécision des oscillateurs lors de la génération de la fréquence porteuse. Actuellement, l'oscillateur le plus précis de notre connaissance (0.25 ppm) a toujours une incertitude de 217Hz à la fréquence de 868MHz, ce qui est plus large que la bande individuelle de UNB [DGG14a]. De ce fait, la séparation du spectre en canaux n'est plus pertinente. Par conséquent, l'accès au canal est RFTMA (Random Frequency and Time Multiple Access), où les objets choisissent leur moment d'émission et leur fréquence porteuse d'une manière aléatoire et continue. D'un côté, cela permet de s'affranchir des échanges nécessaires à l'allocation de ressources, mais d'un autre côté, cela ne protège pas des interférences et collisions.

Afin de mutualiser les ressources nécessaires, nous nous concentrons sur la réduction des interférences du côté BS (station de base). Nous considérons le SIC (Successive Interference Cancellation), une technologie qui permet d'enlever les interférences d'une manière récursive, en exploitant la dynamique des puissances reçues. Le SIC a été démontré comme très avantageux pour des transmissions à bas débit [ZH14], et les réseaux l'IoT en particulier [ZZ12]. Néanmoins, ces études ne peuvent pas être directement appliquées aux transmissions UNB. En effet, le modèle spécifique d'interférence doit être pris en compte.

Dans ce papier, nous proposons d'analyser le bénéfice du SIC dans des réseaux UNB. Nous exploitons les résultats dans [MGG16], qui caractérise la performance de UNB sans SIC. Nous donnons toutes les hypothèses dans la Section 2. Ensuite, nous évaluons théoriquement la performance du système dans la Section 3. Puis nous validons l'analyse et présentons les résultats numériques dans la Section 4. Finalement, nous concluons dans la Section 5.

2 Modélisation et Hypothèse

Nous considérons une cellule avec une seule BS en son centre. La BS est constamment en mode réception, et scanne toute la bande B pour détecter toute transmission. Les nœuds sont distribués aléatoirement et uniformément dans le disque, de rayon $[r_m, r_M]$, avec r_m définissant une zone d'exclusion où aucun nœud est déployé. Nous supposons que N nœuds sont actifs (chacun envoie un paquet) au moment observé, et que leur paquets sont émis avec les même puissance et gain d'antenne. La propagation étant supposée se faire en espace libre, la puissance perçue à la BS dépend uniquement de la distance parcourue.

Les nœuds sélectionnent leur fréquence porteuse aléatoirement et indépendamment. Il a été montré que l'interférence nécessaire pour perdre un paquet était généralement imputable à un seul interférent [DGG14b]. Pour 2 nœuds transmettant simultanément, le niveau d'interférence perçue dépend de l'écart fréquentiel entre le paquet désiré (à la fréquence f_x) et le paquet interférent (à f_y) : $\Delta f = |f_x - f_y|$. Nous avons modélisé le facteur d'interférence à partir du filtre réaliste de Sigfox, en utilisant une fonction Gaussienne :

$$\beta(\Delta f) = \frac{150}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-\Delta f^2}{2\sigma^2} \quad (1)$$

avec $\sigma = 60$ pour une transmission de 100 bit/s [DGG14b].

3 Analyse théorique

Pour mesurer la performance du réseau, nous utilisons la métrique *OP* (Outage Probability).

Nous considérons deux nœuds actifs au moment d'observation : un nœud désiré x (resp. interférent y) à la distance r_x (resp r_y). En espace libre, le SIR (Signal to Interference Ratio) du paquet désiré (celui envoyé par le nœud désiré) s'écrit :

$$SIR_x = \frac{P_0 \left(\frac{r_0}{r_x}\right)^2}{P_0 \left(\frac{r_0}{r_y}\right)^2 \beta(\Delta f)} = \left(\frac{r_y}{r_x}\right)^2 \frac{1}{\beta(\Delta f)} \quad (2)$$

avec P_0 la puissance à la distance de référence r_0 .

L'OP est la probabilité que le SIR du nœud d'intérêt soit inférieur au seuil prédéfini γ^* :

$$OP = P(SIR_x < \gamma^*) = P\left(r_y < r_x \sqrt{\gamma^* \beta(\Delta f)}\right) \quad (3)$$

L'expression de l'OP dans le cas d'un récepteur simple a été dérivée dans [MGG16]. Dans ce cas, seulement le paquet le plus fort pouvait être décodé (si son SIR était supérieur à γ^*). Avec un récepteur SIC, ce paquet va être reconstruit et sa contribution retirée du signal reçu. Ce processus continue tant qu'un nouveau paquet peut être décodé. Cependant, dans cette analyse théorique, nous nous concentrons sur une seule itération du SIC, puisque que nous avons fait l'hypothèse qu'il y a un seul interférent. Nous supposons que le récepteur SIC retire parfaitement les paquets décodés. Ainsi, quand deux paquets interfèrent mutuellement, une fois que l'un est correctement décodé, l'autre va aussi être décodé grâce au SIC.

Pour que le paquet du nœud désiré x soit perdu malgré la présence du SIC, il faut que les SIR de x et de y soient tous les 2 inférieurs à γ^* . L'OP du paquet d'intérêt avec SIC donc s'écrit :

$$OP_{SIC} = P(SIR_x < \gamma^* \cap SIR_y < \gamma^*) = P\left(r_y < r_x \sqrt{\gamma^* \beta(\Delta f)} \cap r_y > \frac{r_x}{\sqrt{\gamma^* \beta(\Delta f)}}\right) \quad (4)$$

Puisque le SIR du x et y dépendent d'un même Δf , ces probabilités sont corrélées. Nous ne pouvons donc pas les traiter indépendamment. Nous calculons l'OP avec SIC en utilisant la loi de la probabilité totale : avec comme variables d'intégration r_y , r_x et Δf , avec $P(r)$ la densité de probabilité de la distance r entre un nœud et la BS, et $P(\Delta f)$ celle de l'écart fréquentiel entre deux fréquences choisies aléatoirement dans le plage de $[0, B]$:

$$P(r) = \begin{cases} \frac{2r}{r_M^2 - r_m^2} & \text{pour } r \in [r_m, r_M] \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} ; \quad P(\Delta f) = \begin{cases} \frac{2}{B} \left(1 - \frac{\Delta f}{B}\right) & \text{pour } \Delta f \in [0, B] \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

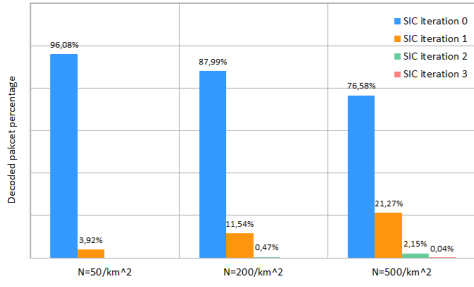


Fig. 1: Pourcentage de paquets décodés vs itération du SIC, pour différents nombres de nœuds, $B = 96$ kHz, $r_m = 30$ m, $r_M = 1000$ m, $\gamma^* = 6.8$ dB.

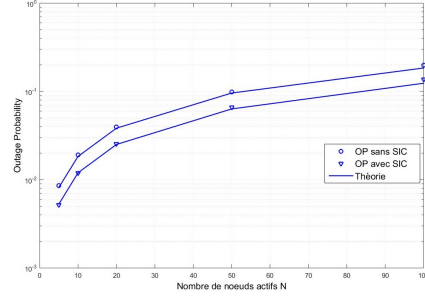


Fig. 2: OP sans SIC vs avec SIC, pour différents nombres de nœuds N , $B = 96$ kHz, $r_m = 30$ m, $r_M = 1000$ m, $\gamma^* = 6.8$ dB.

L'intégration a été faite en décomposant le calcul sur plusieurs supports d'intégration selon la valeur de $\sqrt{\gamma^* \beta}(\Delta f)$ (plus de détails peuvent être trouvés dans [MGG17]). Enfin, nous étendons (4) au cas de N utilisateurs (dont un nœud désiré, et $N - 1$ interférents potentiels). Dans ce cas-là, le paquet du nœud désiré est correctement reçu si aucun de ces $N - 1$ l'interrompt. L'expression finale de l'OP avec du SIC devient :

$$OP_{SIC(N)} = 1 - (1 - OP_{SIC})^{N-1} \quad (5)$$

L'obtention de cette expression est montrée dans [MGG17]. Elle dépend de plusieurs paramètres : la taille du cellule $[r_m, r_M]$, la bande totale B , le nombre de nœuds actifs N , et le seuil du SIR γ^* .

4 Validation et résultats numériques

4.1 Validation

Nous avons lancé des simulations de Monte Carlo pour valider (5). La topologie du réseau et les hypothèses restent identiques à celles de la théorie. Dans un premier temps, nous n'imposons pas de limitation sur les itérations du SIC. Nous avons évalué le pourcentage des paquets décodés par rapport à différentes itérations du SIC sur Fig. 1. L'itération 0 correspond au décodage d'un récepteur simple, et les itérations supérieures au SIC. Nous observons que les itérations nécessaires augmentent lors que le nombre de nœuds accroît. Néanmoins, c'est toujours la 1ère itération qui apporte l'amélioration la plus importante. Cela confirme la pertinence de l'hypothèse d'une seule itération dans la Section 3.

La Fig. 2 présente la performance du récepteur simple et celle du SIC, théoriquement et par simulation. Nous pouvons voir que les simulations du SIC (points) coïncident parfaitement avec la théorie (ligne). Nous avons obtenus les mêmes comportements en variant B et γ^* (non présents ici par manque de place). Par conséquent, l'expression théorique (5) est validée. En plus, nous vérifions les comportements classiques, par exemple l'OP augmente quand le nombre de nœuds augmente. En effet, quand le trafic est plus dense, la performance du réseau se dégrade.

4.2 Analyse de la performance du SIC

Nous analysons l'efficacité du SIC dans cette partie. Nous définissons $\frac{OP_{noSIC} - OP_{SIC}}{OP_{noSIC}}$ comme le *gain* du SIC, pour caractériser l'amélioration relative du SIC sur le récepteur simple. Pour généraliser l'étude, nous caractérisons l'activité du réseau par la densité normalisée de nœuds, i.e. l'occupation spectrale moyenne. Cela est défini par l'occupation spectrale de tous les nœuds actifs sur la bande totale $\frac{100N}{B}$ (un signal de UNB occupe 100 Hz typiquement).

Nous avons évalué ce gain en maintenant la densité normalisée constante. Comme montré dans la Fig. 3, peu importe à quel ordre de grandeur est le nombre de nœuds, l'amélioration apportée par le SIC est identique une fois que la densité normalisée reste constante. De plus, nous avons vérifié l'évolution du gain quand la densité de nœuds n'est plus constante. Comme nous pouvons voir dans Fig. 4, la performance du SIC dégrade lors que la densité normalisée ou le seuil du SIR augmente.

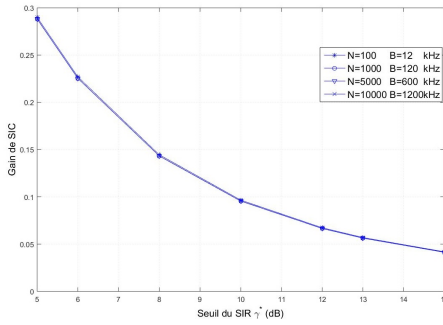


Fig. 3: Gain de SIC, pour différents seuils de SIR γ^* (dB), et la densité de nœuds $\frac{100N}{B}$ constante, $r_m = 30$ m, $r_M = 1000$ m.

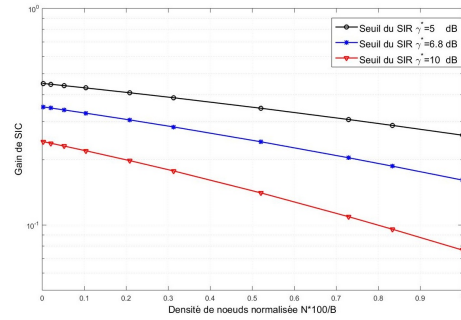


Fig. 4: Gain de SIC, pour différentes densités de nœuds $\frac{100N}{B}$, et différents seuils du SIR γ^* (dB), $r_m = 30$ m, $r_M = 1000$ m.

Ces résultats peuvent être directement exploités pour ajuster les paramètres du système en fonction du trafic visé. Par exemple, pour un nombre de nœuds donné, nous pourrions adapter la bande passante totale pour atteindre les performances attendues.

5 Conclusion

Dans ce papier, nous avons considéré un réseau basé sur UNB, dont l'accès au canal est aléatoire en temps et en fréquence. L'interférence est donc une limitation du système. Nous avons proposé d'utiliser le SIC pour atténuer l'impact des interférences. Nous avons dérivé l'expression théorique de la probabilité de coupure avec SIC, en prenant en compte l'aspect aléatoire en fréquence. Nous avons validé cette théorie par des simulations. Selon les résultats théoriques et numériques, le SIC a effectivement réduit les erreurs dans un système UNB. Nous soulignons que l'augmentation de la densité de nœuds dégrade la performance du SIC; et que l'efficacité du SIC reste constante pour la même occupation spectrale moyenne, peu importe l'échelle du nombre de nœuds.

Références

- [DGG14a] M. T. Do, C. Goursaud, and J. M. Gorce. On the benefits of random FDMA schemes in ultra narrow band networks. In *2014 12th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, pages 672–677, May 2014.
- [DGG14b] Minh-Tien Do, Claire Goursaud, and Jean-Marie Gorce. Interference modelling and analysis of random fdma scheme in ultra narrowband networks. In *AICT 2014*, 2014.
- [GG15] Claire Goursaud and Jean-Marie Gorce. Dedicated networks for iot : Phy/mac state of the art and challenges. *EAI endorsed transactions on Internet of Things*, 2015.
- [MGG16] Y. Mo, C. Goursaud, and J. M. Gorce. Theoretical analysis of unb-based iot networks with path loss and random spectrum access. In *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–6, September 2016.
- [MGG17] Y. Mo, C. Goursaud, and J. M. Gorce. On the benefits of successive interference cancellation for ultra narrow band networks : Theory and application to iot. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, May 2017.
- [ZH14] X. Zhang and M. Haenggi. The performance of successive interference cancellation in random wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 60(10) :6368–6388, October 2014.
- [ZZ12] A. Zanella and M. Zorzi. Theoretical analysis of the capture probability in wireless systems with multiple packet reception capabilities. *IEEE Transactions on Communications*, 60(4) :1058–1071, April 2012.