HAL
open science

Performance théorique de réseaux IoT basés sur UNB avec Path Loss

Yuqi Mo, Claire Goursaud, Jean-Marie Gorce

To cite this version:

Yuqi Mo, Claire Goursaud, Jean-Marie Gorce. Performance théorique de réseaux IoT basés sur UNB avec Path Loss. GRETSI2017, Sep 2017, Juan-les-Pins, France. hal-01610525

HAL Id: hal-01610525

https://inria.hal.science/hal-01610525v1

Submitted on 4 Oct 2017

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.

Performance théorique de réseaux IoT basés sur UNB avec Path Loss

Yuqi MO[1,2], Claire GOURSAUD[1], Jean-Marie GORCE[1]

[1]CITI Labs, INSA-Lyon, Villeurbanne, France

[2]Sigfox Company, Building E-volution, Labège, France

mo.yuqi@insa-lyon.fr; claire.goursaud@insa-lyon.fr; jean-marie.gorce@insa-lyon.fr

Résumé – L'UNB (Ultra Narrow Band) est une technologie dédiée aux réseaux de l'IoT. Elle permet la transmission sur de longues distances à base consommation. L'accès au canal d'UNB est appelé Random-FTMA, car les nœuds sélectionnent leur instant et fréquence de transmission d'une manière aléatoire et continue. Ce caractère continu en fréquence conduit à un nouveau modèle d'interférence. Dans ce papier, nous dérivons une expression théorique de la probabilité de coupure, en considérant à la fois le path-loss et cette interférence spectrale spécifique.

Abstract – UNB (Ultra Narrow Band) is dedicated to long range and low power transmission in IoT networks. The channel access is Random-FTMA, where nodes select their time and frequency in a random and continuous way. This randomness leads to a new behavior of the interference. In this paper, in order to quantify the system performance, we derive and exploit a theoretical expression of the outage probability in a UNB based IoT network, when taking into account both interference due to the spectral randomness and path loss due to the propagation.

1 Introduction

L'internet des objets (IoT) a pour objectif de permettre à n'importe quel objet physique de communiquer. La majorité de ces objets collecte les données puis les transmet, pour des applications variant de smart metering à la surveillance de véhicules [1]. Ces noeuds sont généralement alimentés sur batterie, et ont une petite quantité de données à transmettre à chaque réveil. Le défi pour le réseau de l'IoT est donc de pourvoir connecter des nœuds à grand échelle, tant sur le nombre de transmissions simultanées que de surface couverte, tout en garantissant une faible consommation d'énergie. Ainsi, les technologies LPWAN (Low Power Wide Area Network) comme LoRa [2] et Ultra Narrow Band (UNB) [3] ont émergé. UNB permettant d'avoir une plus grande couverture que LoRa [4], nous considérons UNB dans cette étude.

L'accès naturel au canal pour une transmission UNB est de type Random-FTMA (Random Frequency and Time Multiple Access), où les nœuds transmettent aléatoirement en temps et en fréquence [5]. Cela conduit à des pertes de paquets lors de transmissions simultanées dans la même zone fréquentielle. Cette interférence spécifique a été étudiée et modélisée dans [6], ainsi que la performance du réseau dans [7], en considérant des canaux parfaits. En pratique, le canal induit une atténuation, dont le path-loss est le contributeur principal. Ainsi, nous étudions la performance du réseau en considérant à la fois le path-loss, et l'interférence spécifique à UNB.

Les nœuds étant positionnés aléatoirement dans la zone étudiée, nous utilisons la géométrique stochastique comme outil pour quantifier l'impact du path-loss [8]. Cependant, les études sur la géométrie stochastique sont toutes basées sur un découpage parfait en canaux [9]-[13]. Aucune d'entre elles ne considère des collisions partielles dans le domaine fréquentiel.

Ainsi, nous présentons dans ce papier le calcul de la probabilité de coupure (OP) pour des collisions fréquentielles partielles. La contribution de cette étude est de fournir une expression théorique de la performance du réseau UNB, en prenant en compte à la fois l'impact du path-loss et du comportement spécifique de l'interférence spectrale.

Nous modélisons le réseau et 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

2.1 Topologie du réseau

Dans cette étude, le réseau est limité à une unique BS (Base Station) qui collecte les données des nœuds à sa portée. Comme illustré dans la Fig. 1, les nœuds sont distribués uniformément dans un disque, dont la portée est $[r_m, r_M]$. La BS est supposée être constamment en mode réception, et capable de scanner toute la bande B pour des transmissions potentielles. Nous considérons que N nœuds sont actifs à un instant donné, et qu'ils transmettent tous avec la même puissance d'émission.

Toutes les transmissions sont réalisées en UNB, et les nœuds choisissent aléatoirement et indépendamment leur fréquence porteuse. Les données sont modulées en BPSK, avec un débit très bas (e.g. 100 bps). Chaque transmission occupe une bande beaucoup plus étroite ($b = 100$ Hz environ) que la bande totale (192kHz typiquement).

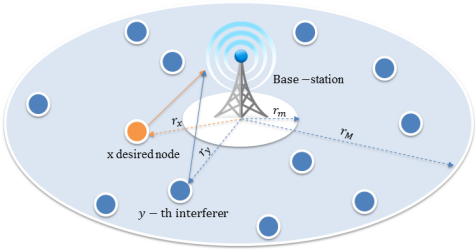

FIGURE 1 – Exemple de topologie : la zone couverte est $[r_m, r_M]$, en orange le nœud désiré situé à la distance r_x ; en bleu les interférents à une distance r_y

2.2 Modèle d'interférence

Nous considérons que le nœud x est *le nœud désiré*, et que tous les autres sont des *interférents* potentiels.

Le signal reçu à la BS est la somme des signaux transmis par chaque nœud de l'ensemble des actifs $\mathcal{A}$:

$$\begin{aligned} r(t) &= h_x(t) * g(f_x, t) * s_x(t) \\ &+ \sum_{y \in \{\mathcal{A}-x\}} h_y(t) * g(f_y, t) * s_y(t) + w(t) \end{aligned} \tag{1}$$

pour chaque nœud actif $i \in \mathcal{A}$, $s_i(t)$ est le vecteur des symboles BPSK. $g(f_i, t)$ est un filtre FIR centré sur la porteuse f_i ; $h_i(t)$ est la réponse du canal ; $*$ est l'opérateur de convolution, et $w(t)$ est un bruit blanc Gaussien. Le bruit est négligé, car le signal est très étroit, donc sa contribution est très basse par rapport à l'interférence.

Du coté de la BS, après avoir filtré le signal reçu autour de la fréquence du nœud désiré f_x, le signal devient :

$$\begin{aligned} r'(f_x, t) &= g(f_x, t) * r(t) \\ &= h_x \cdot g(f_x, t) * g(f_x, t) * s_x(t) \\ &+ \sum_{y \in \{\mathcal{A}-1\}} h_y \cdot g(f_y, t) * g(f_x, t) * s_y(t) \end{aligned} \tag{2}$$

Après filtrage, la puissance du signal du nœud désiré x est :

$$P_s = h_x \cdot \beta(f_x, f_x) \cdot P_0 \tag{3}$$

avec $\beta(f_x, f_x)$ le filtre d'auto-corrélation, en considérant que le filtre de transmission et celui de réception sont centrés sur la même fréquence, et P_0 la puissance d'émission.

Similairement, le niveau d'interférence I_y dû à un seul interférent s'écrit :

$$I_y = h_y \cdot \beta(f_x, f_y) \cdot P_0 \tag{4}$$

$\beta(f_x, f_y)$ est le *coefficient de réjection* qui représente la portion de signal émis restant après le filtrage. Il dépend de l'écart fréquentiel $\Delta f = |f_x - f_y|$. L'expression exacte de ce coefficient de réjection dépend de la forme du filtre. En prenant en compte les filtres utilisés dans les transmissions de SigFox, le niveau d'interférence peut être approximé par une fonction Gaussienne [14], qui dépend de Δf :

$$\beta(\Delta f) = \frac{150}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp^{\frac{-\Delta f^2}{2\sigma^2}} \tag{5}$$

avec $\sigma = 60$ [6].

3 Analyse théorique

Dans cette section, nous donnons les principales étapes pour dériver l'expression théorique de l'OP (Outage Probability) en considérant le path-loss et l'interférence spectrale spécifique de la technique UNB. Nous modélisons le niveau d'interférence par la fonction Gaussienne (5).

Un paquet est considéré perdu si son SIR (Signal to Interference Ratio) est inférieur à un seuil prédéfini γ^* (le bruit étant négligé). Donc, l'OP s'écrit :

$$OP = \mathbb{P}(\text{SIR} \leq \gamma^*) \tag{6}$$

Nous considérons tout d'abord le cas où seuls deux nœuds sont actifs (un nœud désiré x, et un interférent y). À partir de (3) et (4), nous pouvons exprimer le SIR du nœud désiré :

$$SIR = \frac{P_s}{P_I} = \frac{r_x^{-2} \cdot P_0}{r_y^{-2} \cdot \beta(\Delta f) \cdot P_0} = \left(\frac{r_y}{r_x}\right)^2 \frac{1}{\beta(\Delta f)} \tag{7}$$

Un paquet est considéré perdu si son $SIR \leq \gamma^*$, i.e. quand :

$$r_y \leq r_x \sqrt{\gamma^* \beta(\Delta f)} \tag{8}$$

Nous décomposons (8) en appliquant la formule des probabilités totales en fonction de Δf. L'OP devient :

$$OP = \int_0^B \mathbb{P}\left(r_y \leq r_x \sqrt{\gamma^* \beta(\Delta f)} | \Delta f\right) \mathbb{P}(\Delta f) \, \mathrm{d}\Delta f \tag{9}$$

Nous exprimons tout d'abord $\mathbb{P}(\Delta f)$. Le nœud désiré et l'interférent choisissent leur fréquence f_x et f_y aléatoirement, indépendamment et uniformément dans $[0, B]$. Donc, l'écart fréquentiel Δf suit la distribution suivante :

$$\mathbb{P}(\Delta f) = \begin{cases} \frac{2}{B}\left(1 - \frac{\Delta f}{B}\right) & \text{for } \Delta f \in [0, B] \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \tag{10}$$

Nous calculons ensuite $\mathbb{P}\left(r_y \leq r_x \sqrt{\gamma^* \beta(\Delta f)} | \Delta f\right)$. Les nœuds sont supposés être distribués selon un processus ponctuel de Poisson. Leur distance respective à la BS suit donc une distribution linéaire. $\mathbb{P}(r)$ représente la probabilité qu'un nœud soit à la distance (rayon) r dans une surface discoïde $[r_m, r_M]$:

$$\mathbb{P}(r) = \begin{cases} \frac{2r}{r_M^2 - r_m^2} = \frac{2r}{k^2} & \text{for } r \in [r_m, r_M] \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \tag{11}$$

avec $k^2 = r_M^2 - r_m^2$.

Pour un nœud désiré situé à la distance r_x et pour un Δf donné, nous pouvons dériver la probabilité conditionnelle que r_y soit suffisamment petit pour créer une collision. Selon la

valeur de $r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)}$, on identifie 3 cas :

$$\mathbb{P}\left(r_y \leq r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)}|\Delta f\right)$$
$$= \begin{cases} \int_{r_m}^{r_m} \mathbb{P}(r_y)\,\mathrm{d}r_y & \text{if } r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)} \leq r_m, \\ \int_{r_m}^{r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)}} \mathbb{P}(r_y)\,\mathrm{d}r_y & \text{if } r_m \leq r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)} \leq r_M \\ \int_{r_m}^{r_M} \mathbb{P}(r_y)\,\mathrm{d}r_y & \text{if } r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)} \geq r_M \end{cases}$$
$$= \begin{cases} 0 & \text{if } r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)} \leq r_m, \\ \dfrac{{r_x}^2\gamma^*\beta(\Delta f) - {r_m}^2}{k^2} & \text{if } r_m \leq r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)} \leq r_M \\ 1 & \text{if } r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)} \geq r_M \end{cases} \quad (12)$$

Nous intégrons la probabilité précédente sur Δf, en mettant à jour (9) avec (12), et (5). Ainsi, l'OP devient :

$$\begin{aligned} OP &= \int_0^B \mathbb{P}\left(r_y \leq r_x\sqrt{\gamma^*\beta(\Delta f)}|\Delta f\right)\mathbb{P}(\Delta f)\,\mathrm{d}\Delta f \\ &= 0 + \int_{b_1}^{b_2}\left(\frac{{r_x}^2\gamma^*\beta(\Delta f) - {r_m}^2}{k^2}\right)\mathbb{P}(\Delta f)\,\mathrm{d}\Delta f + \int_{b_0}^{b_1} 1\cdot\mathbb{P}(\Delta f)\,\mathrm{d}\Delta f \\ &= \left[75a\gamma^*\,\mathrm{erf}\left(\frac{\Delta f}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) + \frac{150a\gamma^*\sigma}{B\sqrt{2\pi}}\exp\left(\frac{-\Delta f^2}{2\sigma^2}\right) + e\frac{\Delta f^2}{2} - eB\Delta f\right]_{b_1}^{b_2} \\ &\quad + \frac{B}{2}\left[\Delta f - \frac{\Delta f^2}{2B}\right]_{b_0}^{b_1} \end{aligned} \quad (13)$$

avec les constantes suivantes :

$$d = \frac{2{r_x}^2}{Bk^2}, \qquad e = \frac{2{r_m}^2}{B^2k^2}, \qquad b_0 = 0$$
$$b_1 = min\left(\beta^{-1}\left(\left(\frac{r_M}{r_x}\right)^2\frac{1}{\gamma^*}\right), B\right), \quad b_2 = min\left(\beta^{-1}\left(\left(\frac{r_m}{r_x}\right)^2\frac{1}{\gamma^*}\right), B\right)$$

Les bornes d'intégrale b_0, b_1 et b_2 sont liées aux trois conditions de (12), et au fait que Δf est restreint par $[0, B]$. Nous notons que $\beta(\Delta f) \in [0, 1]$. Par conséquent, b_1 existe seulement quand $\left(\frac{r_M}{r_x}\right)^2 \leq \gamma^*$. Dans le cas contraire, b_1 est nul et cela rend le dernier terme de l'intégrale nul.

Nous étendons (13) au cas où $N > 2$ nœuds sont actifs. Cependant, nous considérons que l'interférence nécessaire à la perte d'un paquet provient d'un seul interférent, car c'est le cas le plus fréquent dans un système de UNB. Dans ce cas, n'importe lequel de ces $N-1$ (tous les nœuds sauf celui désiré) peut être l'interférent. En conséquence, la probabilité de succès est la probabilité qu'aucun de ces $N-1$ n'interrompe le nœud désiré. Donc la probabilité de coupure devient :

$$OP_{(N)} = 1 - (1 - OP)^{N-1} \quad (14)$$

L'OP dérivée dans (14) concerne un r_x donné. Cependant, en pratique, la distance du nœud désiré peut varier dans toute la cellule. Pour calculer l'OP moyenne pour toute la cellule, il faut moyenner aussi sur r_x. L'expression de l'OP moyenne est présentée dans [14].

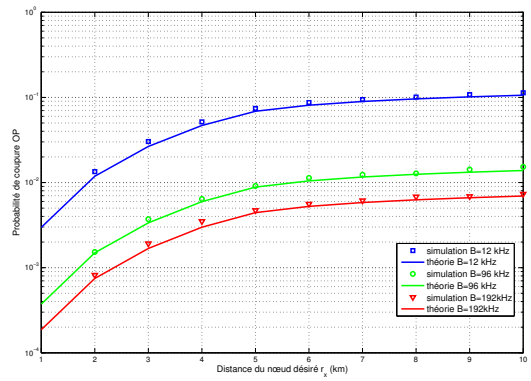

FIGURE 2 – OP vs la distance du nœud désiré r_x, avec différentes B, $N = 6$, $r_m = 1$ km, $r_M = 10$ km, $\gamma^* = 6.8$ dB.

4 Validation et résultats numériques

4.1 Validation

Dans cette section, nous validons $OP_{(N)}$ (14) en la comparant avec les résultats de simulation basés sur les configurations de SigFox. Plusieurs paramètres sont considérés : la distance du nœud désiré r_x, le nombre de nœuds actifs N, la bande totale B, le seuil de SIR γ^*, et la portée de la BS $[r_m, r_M]$.

Nous présentons dans les Fig. 2-3 l'évolution de $OP_{(N)}$ en faisant varier r_x, N et B. D'un point de vue global, nous observons que les simulations (symboles) coïncident avec les théories (traits). Nous pouvons donc en déduire que l'expression (14) est validée.

Les phénomènes classiques sont aussi vérifiés dans les Fig. 2-3 : la croissance de l'OP est induite par la croissance de r_x et N, ou la diminution de B. En effet, quand les transmissions simultanées sont nombreuses, ou quand la bande totale est trop étroite, les nœuds ont plus de chance d'être en collision. De même, quand le nœud désiré est trop loin de la BS, l'interférent potentiel a plus de chance d'avoir une puissance plus élevée. L'OP du nœud désiré est donc plus élevée.

Nous avons enfin comparé sur la Fig. 3 l'OP moyen sur la cellule [14] avec l'OP pour un r_x donné (14). Nous observons que l'OP se rapproche de l'OP moyen quand r_x est grand. En effet, les nœuds ont plus de chance de tomber dans les zones où r_x est grand, donc en moyenne leur comportement est plus représentatif que ceux situés dans la zone de faible r_x. L'OP en bord de cellule est donc une borne supérieure mais aussi une bonne approximation des performances de la cellule.

4.2 Exploitation du résultat

Enfin, nous exploitons l'expression théorique (14) pour trouver la capacité maximale (i.e. le nombre maximal de nœuds N_{max} que le système peut supporter, pour une OP donnée). Nous pouvons remarquer sur la Fig. 4 que pour la même OP demandée, la capacité dépend presque linéairement de B. Ce résultat est intéressant, parce qu'il permet de définir la bande B en fonction du nombre de nœuds que nous voulons servir.

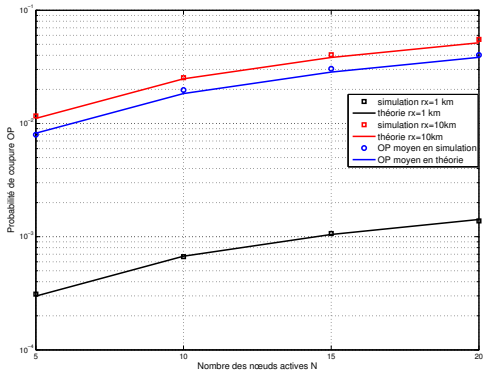

FIGURE 3 – OP vs N, en comparaison avec l'OP moyenne, $B = 96$ kHz, $\gamma^* = 6.8$ dB, $r_m = 1$ km, $r_M = 10$ km.

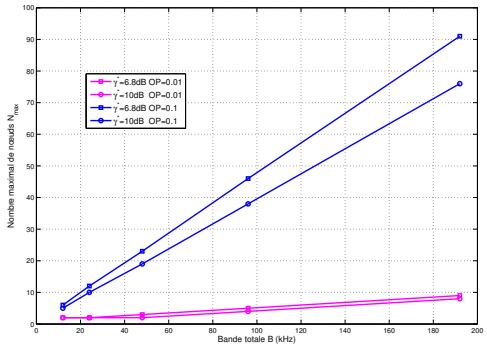

FIGURE 4 – N_{max} vs B, avec différents seuils de SIR γ^* et OPs, $r_x = 7$ km, $r_m = 1$ km, $r_M = 10$ km.

5 Conclusion

Dans ce papier, nous avons analysé théoriquement la probabilité de coupure d'un réseau UNB pour une distance du nœud désiré donnée, en considérant l'interférence spectrale et le path-loss. Nous avons dérivé l'expression théorique de l'OP, et l'avons validée par simulations basées sur des configurations réalistes. Nous en avons déduit la capacité du réseau. Ce travail est une première et nécessaire base pour de futures études, comme par exemple l'annulation d'interférence.

Remerciement

Les auteurs remercient Christophe Fourtet (SigFox) pour les valeurs réalistes fournies de paramètres.

Références

[1] L. Da Xu, W. He, S. Li, "Internet of Things in industries : A survey" in IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10(4), 2014, pp2233-2243.

[2] http ://lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology (accessed 2017/03/16)

[3] http ://www.sigfox.com/en/#!/technology (accessed 2017/03/16)

[4] C. Goursaud and J. M. Gorce, "Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges", *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, vol. 15, no. 1, October 2015

[5] C. Goursaud, and Y. Mo "Random Unslotted Time-Frequency ALOHA : Theory and Application to IoT UNB Networks," *in 23rd International Conference on Telecommunications (ICT), 2016*, 16-18 May 2016.

[6] M.-T. Do, C. Goursaud, and J.-M. Gorce, "Interference modelling and analysis of random fdma schemes in ultra narrow band networks," *in The Tenth Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2014*, pp. 132-137, July 2014.

[7] 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)*, pp. 672-677, 12-16 May 2014.

[8] M. Haenggi, J. G. Andrews, F. Baccelli, O. Dousse and M. Franceschetti, "Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 27, no. 7, pp. 1029-1046, September 2009.

[9] F. Baccelli, B. Blaszczyszyn and P. Muhlethaler, "An Aloha protocol for multihop mobile wireless networks," in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 2, pp. 421-436, Feb. 2006.

[10] H. Q. Nguyen, F. Baccelli and D. Kofman, "A Stochastic Geometry Analysis of Dense IEEE 802.11 Networks," IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications, Anchorage, AK, 2007, pp. 1199-1207.

[11] C. h. Lee and M. Haenggi, "Interference and Outage in Poisson Cognitive Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 11, no. 4, pp. 1392-1401, April 2012.

[12] A. H. Sakr and E. Hossain, "Cognitive and Energy Harvesting-Based D2D Communication in Cellular Networks : Stochastic Geometry Modeling and Analysis," in IEEE Transactions on Communications, vol. 63, no. 5, pp. 1867-1880, May 2015.

[13] H. ElSawy, E. Hossain and M. Haenggi, "Stochastic Geometry for Modeling, Analysis, and Design of Multi-Tier and Cognitive Cellular Wireless Networks : A Survey," in IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 15, no. 3, pp. 996-1019, Third Quarter 2013.

[14] 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)*, 4-9 Sep. 2016.