

INSPIRE : Optimisation bayésienne distribuée pour l'amélioration de la réutilisation spatiale des WLANs denses

Anthony Bardou^{1†} et Thomas Begin¹

¹Univ. Lyon, ENS de Lyon, UCBL, CNRS, LIP, 42 allée d'Italie, 69007, Lyon, France

Le manque de place dans les bandes de fréquence utilisées par les réseaux locaux sans fil (WLANs) donne lieu à des problèmes de performance. En réponse, la norme IEEE 802.11ax et ses amendements ultérieurs visent à augmenter la réutilisation spatiale d'un canal radio en permettant la mise à jour dynamique de deux paramètres clés de la transmission sans fil : la puissance de transmission (TX_POWER) et le seuil de sensibilité (OBSS_PD). Dans cet article, nous présentons INSPIRE, une solution bayésienne distribuée basée sur des processus gaussiens pour améliorer la réutilisation spatiale dans les WLANs. INSPIRE ne fait aucune hypothèse explicite sur la topologie des WLANs et favorise les comportements altruistes des points d'accès, les amenant à maximiser leur performance tout en minimisant leur impact sur les points d'accès voisins. Nous démontrons la supériorité d'INSPIRE sur les autres stratégies de l'état de l'art avec le simulateur ns-3 et plusieurs exemples inspirés de déploiements réels de WLANs denses. Nos résultats montrent qu'en quelques secondes seulement, INSPIRE est capable d'augmenter drastiquement la qualité de service des WLANs en améliorant leur équité et leur débit.

Mots-clefs : processus gaussien, apprentissage par renforcement, apprentissage en ligne, réutilisation spatiale, WLANs

1 Introduction

Durant la dernière décennie, le réseau local sans fil (WLAN) est devenu le moyen privilégié d'accéder à Internet. Actuellement, l'architecture des WLANs est définie par le standard IEEE 802.11 (ou Wi-Fi) et met en relation des points d'accès (APs) avec nos appareils, appelés des stations (STAs). APs et STAs communiquent avec des ondes électromagnétiques situées dans une bande de fréquence spécifique. Pour éviter les interférences, ces bandes de fréquence sont souvent découpées en canaux et des algorithmes d'allocation de canaux s'assurent que deux APs voisins ne partagent pas le même canal pour pouvoir communiquer simultanément sans se gêner. De plus, chaque noeud s'assure que son canal est libre avant d'émettre son message. Pour ce faire, il effectue un Clear Channel Assessment (CCA) en mesurant le niveau d'énergie sur le canal radio. Si celui-ci dépasse un seuil (noté OBSS_PD dans cet article) historiquement fixé à -82 dBm, la transmission est reportée. Notons que la puissance de transmission (notée TX_PWR dans cet article) est historiquement fixée également, à 20 dBm. Cependant, l'allocation de canaux ne suffit plus à empêcher les interférences au sein de WLANs situés dans des endroits très denses (stades, centre commerciaux...) et des noeuds parfois très proches se voient contraints de se partager un même canal radio. En réponse à ce problème, l'amendement 802.11ax autorise, entre autres, la mise à jour dynamique de TX_PWR et OBSS_PD pour que chaque noeud puisse contribuer à la réutilisation spatial de son canal radio.

Dans ce travail, nous proposons INSPIRE, un algorithme distribué basé sur des processus gaussiens et capable d'augmenter drastiquement les performances des WLANs denses par une mise à jour bayésienne de TX_PWR et OBSS_PD. Nous démontrons également la supériorité d'INSPIRE sur les autres solutions constituant l'état de l'art en simulant un contexte technologique réaliste avec le simulateur de référence ns-3.

[†]Soutenu par le LABEX MILYON (ANR-10-LABX-0070) de l'Université de Lyon, dans le cadre du programme "Investissements d'Avenir" (ANR-11-IDEX-0007) de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

2 Solution distribuée

Considérons un ensemble de WLANs \mathcal{W} constitués de K APs. Nous souhaitons augmenter la réutilisation spatiale de \mathcal{W} . Pour ce faire, nous faisons quelques hypothèses simples. Tout d'abord, nous supposons que chaque AP peut communiquer avec les APs dans sa portée radio. Notons \mathcal{N}_k les APs avec lesquels l'AP k peut communiquer, à savoir lui-même et les APs à portée radio. Ensuite, nous supposons qu'il existe au moins un AP k ayant un autre AP dans sa portée radio ($\exists k \in [1 \dots K], |\mathcal{N}_k| > 1$). Dans le cas contraire, la réutilisation spatiale de \mathcal{W} est déjà maximale. Enfin, nous supposons que des mesures du débit des STAs peuvent être réalisées par leur AP associé à intervalles réguliers de période Δt .

2.1 Quantification altruiste de la qualité d'une configuration locale

Chaque AP est paramétré par un couple (OBSS_PD, TX_PWR) pris dans $C = [-82 \dots -62] \times [1 \dots 21]$ et l'ensemble des APs dans \mathcal{N}_k au temps t est paramétré par une configuration $x_k^t \in C^{|\mathcal{N}_k|}$. Chaque AP k peut observer sans surcoût de communication les débits $T_k(x)$ des STAs associées avec lui pour une configuration x donnée. Il peut alors calculer une métrique de performance individuelle, notée f_k , basée sur les débits de ses STAs. L'équité proportionnelle ($PF_k(x) = \prod_{T_i \in T_k(x)} T_i$) est un bon candidat car elle permet d'atteindre un compromis naturel entre débits élevés et partage équitable des ressources du canal entre les STAs. Cependant, elle est souvent décriée pour sa trop grande variabilité, car $\frac{\partial PF_k}{\partial T_i} = \prod_{T_j \in T_k(x), T_j \neq T_i} T_j$. Pour pallier ce problème, nous considérons le logarithme de l'équité proportionnelle, afin de réduire sa variabilité tout en préservant ses bonnes propriétés. En effet, $\frac{\partial \log PF_k}{\partial T_i} = \frac{1}{T_i}$ est bien plus faible. Enfin, nous normalisons ce critère dans $[0, 1]$ en considérant le maximum des débits T^* pouvant être obtenus par les STAs. L'Équation 1 nous donne alors l'expression de f_k , avec $\lambda_k = \sum_{T_i^* \in T_k^*} \log T_i^*$.

$$f_k(x) = \frac{1}{\lambda_k} \sum_{T_i \in T_k(x)} \log T_i \quad (1)$$

Afin de construire un critère altruiste tenant compte de l'impact d'un AP sur son voisinage, un AP k récupère alors les couples (λ_i, f_i) et calcule R_k selon l'Équation 2.

$$R_k(x) = \frac{1}{\sum_{i \in \mathcal{N}_k} \lambda_i} \sum_{i \in \mathcal{N}_k} \lambda_i f_i(x) \quad (2)$$

Il est facile de voir que R_k correspond à la fonction f_k de l'Équation 1 calculée sur le débit des STAs associées aux APs dans \mathcal{N}_k . Il s'agit donc d'un critère plus altruiste, préférable pour améliorer la réutilisation spatiale à l'échelle globale. À présent, chaque AP k cherche des configurations maximisant R_k tout au long du processus d'optimisation. Ceci peut-être modélisé comme un problème Multi-Armed Bandit (MAB) où chaque configuration constitue un bras et où chaque AP k a pour objectif de trouver une politique π_k qui minimisera son regret cumulé Γ_k , donné en Équation 3 pour un processus d'optimisation de D étapes.

$$\Gamma_k(\pi) = D - \sum_{t=1}^D R_k(\pi_k(t)) \quad (3)$$

2.2 Maximisation du critère local

Afin de permettre à l'AP k de maximiser son objectif R_k , nous le dotons d'un processus gaussien \mathcal{GP}_k . Ce dernier peut être défini comme une collection de variables aléatoires indexées par les configurations des APs dans \mathcal{N}_k : $\{Y_c, c \in C^{|\mathcal{N}_k|}\}$ telle que n'importe quelle collection $Y_{c_1, \dots, c_n} = (Y_{c_1}, \dots, Y_{c_n})$ soit distribuée selon une gaussienne multivariée. Comme démontré par [WR95], un processus gaussien peut-être vu comme une priure sur un espace fonctionnel et permet par conséquent de faire de l'estimation bayésienne d'une fonction. Nous supposons une moyenne nulle pour \mathcal{GP}_k , il est alors entièrement caractérisé par sa fonction de covariance $\Sigma : C^{|\mathcal{N}_k|} \times C^{|\mathcal{N}_k|} \rightarrow \mathbb{R}^+$. Nous choisissons de définir Σ comme un noyau de Matérn [Gen02] de paramètre $\nu = \frac{3}{2}$ et dont les autres hyperparamètres seront estimés par maximum de vraisemblance pendant l'optimisation. Cette fonction de covariance garantit l'isotropie de notre processus

gaussien et ne pose pas de contraintes trop fortes sur sa régularité, une propriété souhaitée puisque R_k peut présenter des effets de seuil inhérents au problème de l'amélioration de la réutilisation spatiale.

Afin de minimiser son regret cumulé Γ_k , un AP k définit sa politique π_k à l'aide d'une fonction d'acquisition A , construite pour gérer le dilemme exploration-exploitation inhérent aux problèmes MAB. Parmi les candidats aux fonctions d'acquisition (GP-UCB, Knowledge Gradient (KG) et Expected Improvement (EI)), nous choisissons EI [JSW98] car le coût de calcul de KG est prohibitif et GP-UCB a donné de moins bons résultats dans nos simulations. Nous donnons la forme close de EI en Équation 4, avec $\mu(x)$ la fonction de moyenne de \mathcal{GP}_k , $\sigma^2(x)$ la fonction d'écart-type de \mathcal{GP}_k , $R_{k,t}^* = \max_{1 \leq i \leq t} R_k(x_i)$ et $Z = \frac{\mu(x) - R_{k,t}^*}{\sigma(x)}$

$$EI_k^t(x) = (\mu(x) - R_{k,t}^*)\Phi(Z) + \sigma(x)\phi(Z) \quad (4)$$

L'Équation 4 est différentiable et peut par conséquent être maximisée par descente de gradient sur $-\nabla EI_k^t$. Nous définissons alors $\pi_k(t) = \arg \max_{x \in \mathcal{C}^{|N_k|}} EI_k^t(x)$.

2.3 Aggrégation des prescriptions locales

Dans les sections précédentes, nous avons vu que chaque AP k utilise un processus gaussien pour trouver la configuration des APs de son voisinage N_k maximisant son critère altruiste local R_k . Une fois déterminée, cette configuration est envoyée en guise de prescription aux APs voisins. Cependant, comme la collection des N_k ne forme pas une partition de l'ensemble des APs dans les WLANs, plusieurs configurations seront prescrites au même AP, comme on peut le voir en Figure 1. Les voisinages $(N_k)_{k \in [1..5]}$ ne forment pas une partition de l'ensemble des APs. Par conséquent, l'AP 1 recevra par exemple sa propre prescription, celle de l'AP 2 et celle de l'AP 4. Il doit alors trouver un consensus entre ces différentes prescriptions. Afin d'établir un consensus efficace, nous pouvons remarquer que l'impact des APs sur la qualité de la

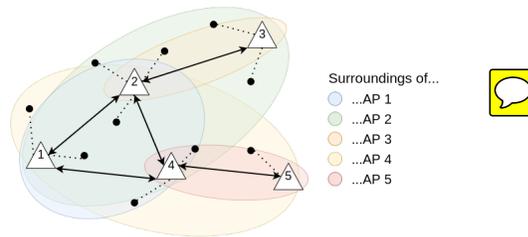


FIGURE 1 : Un WLAN représenté par un graphe composé d'APs (triangles numérotés) accompagnés de leurs STAs associées. Il existe un lien entre deux APs lorsqu'ils sont à portée radio l'un de l'autre. Enfin, les voisinages $(N_k)_{k \in [1..5]}$ sont affichés en couleur.

réutilisation spatiale des WLANs n'est pas identique : un AP possédant plus de STAs aura un plus grand impact sur ce critère. Cette propriété nous amène à considérer la moyenne des prescriptions pondérées par le nombre de STAs associées à l'AP prescripteur comme un consensus acceptable. Ainsi, en notant s_i le nombre de STAs de l'AP i et P_j^i sa prescription pour un AP j , un AP k peut calculer sa configuration au temps t x_k^t grâce à l'Équation 5.

$$x_k^t = \frac{1}{\sum_{i \in N_k} s_i} \sum_{i \in N_k} s_i P_k^i \quad (5)$$

3 Évaluation de performance

Nous évaluons INSPIRE en comparaison avec d'autres stratégies constituant l'état de l'art de la réutilisation spatiale dans les WLANs : l'algorithme distribué WCNC'15 [AGVLA⁺15] ainsi que JNCA'19 [WBB⁺19] et MSWiM'21 [BBB21] utilisant toutes deux l'échantillonnage de Thompson. Nous considérons également DEFAULT qui, à chaque AP, associe la configuration par défaut de 802.11 : -82 dBm pour

OBSS_PD et 20 dBm pour TX_PWR. L'évaluation se fait sous ns-3, avec des simulations de 30 secondes découpées en 400 pas d'optimisation ($\Delta t = 75$ ms).

Plusieurs topologies ont été considérées. Dans cet article, nous en présentons une issue du déploiement par Cisco d'un WLAN dense dans leur bureau de San Francisco, avec quelques résultats associés en Figure 2. Nous observons qu'INSPIRE domine significativement les autres stratégies, réduisant le regret cumulé de plus de 70% comparé à DEFAULT. De même, plus d'une vingtaine de STAs sont sorties de la famine par INSPIRE, correspondant à une réduction de près de 80% des STAs en famine comparé à DEFAULT.

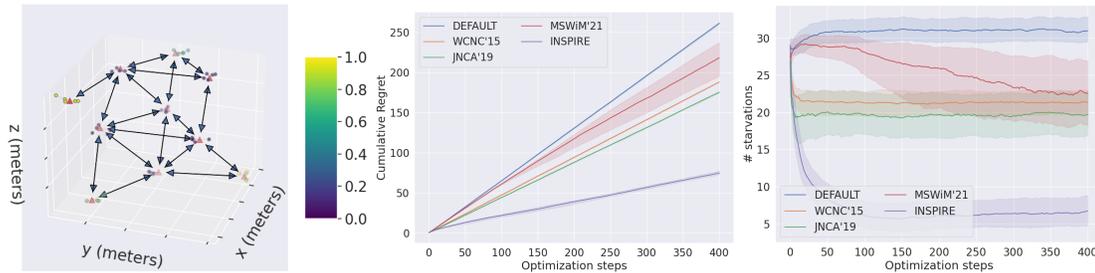


FIGURE 2 : (Gauche) Graphe de la topologie de test utilisée, les APs sont représentés par des triangles rouges et les STAs associés par des points colorés selon la qualité de leur débit : les points de couleur jaune ont un débit satisfaisant tout au long de la simulation. (Milieu) Regret cumulé Γ . (Droite) Nombre de stations dont le débit est en dessous d'un seuil de famine de 2.5 Mbps.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté INSPIRE, un algorithme distribué permettant une amélioration significative de la réutilisation spatiale dans les WLANs gérés par le protocole 802.11ax. Grâce à un processus gaussien et un consensus simple, un AP utilisant INSPIRE prescrit aux APs dans sa portée radio des configurations issues d'une maximisation bayésienne d'un critère local et altruiste. Les résultats obtenus en simulation sous ns-3 démontrent la supériorité d'INSPIRE sur les solutions constituant l'état de l'art de la réutilisation spatiale dans les WLANs et encouragent son déploiement sur du matériel pour attester de ses bonnes performances en conditions réelles.

Références

- [AGVLA⁺15] M. S. Afaqui, E. Garcia-Villegas, E. Lopez-Aguilera, G. Smith, and D. Camps. Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for ieee 802.11ax. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'15)*, pages 1060–1065, 2015.
- [BBB21] A. Bardou, T. Begin, and A. Busson. Improving the spatial reuse in ieee 802.11ax wlans : A multi-armed bandit approach. In *ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM'21)*, 11 2021.
- [Gen02] M. G. Genton. Classes of kernels for machine learning : a statistics perspective. *Journal of Machine Learning Research*, 2, 3 2002.
- [JSW98] D. R. Jones, M. Schonlau, and W. J. Welch. Efficient global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global Optimization*, 13 :455–492, 1998.
- [WBB⁺19] F. Wilhelmi, S. Barrachina-Muñoz, B. Bellalta, C. Cano, A. Jonsson, and G. Neu. Potential and pitfalls of multi-armed bandits for decentralized spatial reuse in wlans. *Journal of Network and Computer Applications*, 127 :26–42, 2019.
- [WR95] C. K. I. Williams and C. E. Rasmussen. Gaussian processes for regression. In *Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS'95)*, 1995.