

Compensation des Erreurs d'Identification des Dispositifs pour l'Allocation Stochastique de Ressources en Frame Slotted Aloha

Mitigation of User Identification Errors in Stochastic Resource Allocation for Framed Slotted ALOHA

Alix Jeannerot, Malcolm Egan, Jean-Marie Gorce
Inria Lyon
INSA Lyon

The Inria logo is written in a red, cursive script.The INSA logo consists of the letters 'INSA' in a bold, red, sans-serif font.

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON



24 janvier 2023

Introduction

- Contexte : Internet des Objets et Communications de Type Machine.
- Besoin d'accès fiable au canal avec peu de surdébit
⇒ Contention-based protocols (Aloha).
- Beaucoup de dispositifs ⇒ beaucoup de collisions.
- Les collisions sont en parties dues au fait que les ressources sont allouées uniformément entre les dispositifs.
- Une solution : allouer les ressources en fonction des probabilités d'activité des dispositifs.
- Problème : il faut être capable de détecter correctement les dispositifs.

Plan

- 1 Modèle Considéré
- 2 Optimisation de l'Allocation
 - Formulation d'un Problème d'Optimisation
 - Détection des Dispositifs Actifs
- 3 Détection Imparfaite d'Utilisateurs
 - Effet des Erreurs
 - Simulations

État de l'Art sur Aloha

- Anciens protocoles Aloha (Pure Aloha (1970)[1], Slotted Aloha[8](1975), Framed Slotted Aloha[9], ...) regagnent de l'intérêt pour les transmissions de petites données (e.g. pour LoRa [4, 3]).
- Lutte contre les collisions :
 - Écoute du canal (CSMA).
 - Multiple transmissions d'un même paquet :
 - Irregular Repetition Slotted Aloha (2011)(IRSA)[6].
 - Coded-Slotted Aloha (2015)[7].
 - Allocation de ressources en fonction des statistiques du réseau[5, 10].

Protocole de Communication

Variante de Frame Slotted Aloha :

- Temps divisé en trames, trames divisées en créneaux.
- Dispositifs actifs transmettent une seule fois par trame.
- Choix du créneaux en fonction d'une distribution de probabilité.
- Transmission à débit fixe.
- Pas de retransmission si collision.

Allocation de Ressources

N dispositifs ; K ressources orthogonales (créneaux temporels, fréquences, ...) $K < N$.
Dispositifs actifs dans chaque trame : $\mathbf{X} \sim \text{Ber}(\mathbf{p})$.

But : trouver une allocation non uniforme \mathbf{A} maximisant un objectif $T(\mathbf{A})$ (débit).

$$\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{+, N \times K}$$

$$\Pr(\text{dispositif } n \text{ utilise ressource } k | X_n = 1) = a_{n,k}.$$

Contrainte : les lignes définissent des lois de probabilité.

$$\mathcal{H} = \{\mathbf{A} : \sum_{k=1}^K a_{n,k} = 1, \forall n\}$$

Exemples

- $N = 2, K = 2, \mathbf{p} = [1 \ 1]$:

$$\mathbf{A}_{\text{Aloha}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, T(\mathbf{A}_{\text{Aloha}}) = 1 \text{ alors que } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T(\mathbf{A}) = 2$$

- $N = 4, K = 3, \mathbf{p} = [0.3 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.9]$:

$$\mathbf{A}_{\text{Aloha}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

$$T(\mathbf{A}_{\text{Aloha}}) = 1.24$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(\mathbf{A}) = 1.99$$

Remarque : \mathbf{A} n'est pas binaire si les dispositifs sont corrélés ou si l'on considère un autre objectif.

Problème : Calculer \mathbf{A} qui maximise un objectif pour un \mathbf{p} donné.

Plan

- 1 Modèle Considéré
- 2 Optimisation de l'Allocation
 - Formulation d'un Problème d'Optimisation
 - Détection des Dispositifs Actifs
- 3 Détection Imparfaite d'Utilisateurs
 - Effet des Erreurs
 - Simulations

Problème d'Optimisation

$\mathbf{X} = [X_1 \dots X_N] \in \{0, 1\}^N \sim \text{Ber}(\mathbf{p})$: dispositifs actifs dans une trame.
 Trouver \mathbf{A}^* qui maximise le débit :

$$\mathbf{A}^* = \underset{\substack{\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{N \times K, +} \\ \sum_{k=1}^N a_{i,k} = 1}}{\text{arg max}} T(\mathbf{A})$$

$$T(\mathbf{A}) = \mathbb{E}_{\mathbf{X}} \left[\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K X_n A_{nk} \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N (1 - X_m A_{mk}) \right]$$

Proportion de créneaux dans lesquels un seul dispositif est actif.

\mathbf{A}^* peut être trouvé avec une montée de gradient stochastique en ligne.

Optimisation par Montée de Gradient Stochastique

Algorithm 1:

```
1 Allocation initiale  $\mathbf{A}^1 \in \mathcal{H}$ , pas  $\alpha^t > 0$ 
2  $t \leftarrow 1$ .
3 while not converged do
4   | Observer  $\mathbf{X}^t$  et calculer une estimation non biaisé  $g(\mathbf{A}^t; \mathbf{X}^t)$  de  $\nabla_{\mathbf{A}^t} T(\mathbf{A}^t)$ 
5   |  $\mathbf{A}^{t+1} \leftarrow \Pi_{\mathcal{H}}[\mathbf{A}^t + \alpha^t g(\mathbf{A}^t; \mathbf{X}^t)]$ 
6   |  $t \leftarrow t + 1$ 
7 end
```

Garantie de converger vers un point stationnaire.

\mathbf{A} envoyé en liaison descendante de temps en temps.

Besoin d'avoir \mathbf{X}^t sans erreurs.

Détection des dispositifs actifs

Deux possibilités :

- Identification par pilote (couche physique) [2] :
 - Chaque dispositif a un pilote.
 - Transmission du pilote avant les données.
 - Si beaucoup de dispositifs, pilotes non orthogonaux.
⇒ risque d'erreurs de détection
- Identifiant dans le paquet (couche MAC) :
 - Identifiant encapsulé comme une donnée quelconque.
 - Erreur de décodage sur la couche physique ⇒ dispositif manqué.

Peu probable d'avoir \mathbf{X}^t sans erreurs.

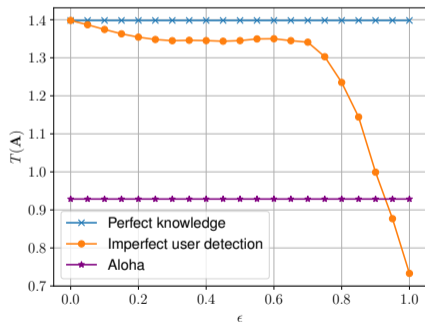
Plan

- 1 Modèle Considéré
- 2 Optimisation de l'Allocation
 - Formulation d'un Problème d'Optimisation
 - Détection des Dispositifs Actifs
- 3 **Détection Imparfaite d'Utilisateurs**
 - Effet des Erreurs
 - Simulations

Effet des Erreurs : Exemple

$$N = 4, K = 2, \mathbf{p} = [0.1 \quad 0.2 \quad 0.6 \quad 0.9],$$

$$\mathbf{p}' = [0.9 \quad 0.3 \quad 0.6 \quad 0.1]. \hat{\mathbf{X}} \sim (1 - \epsilon)\mathbf{p} + \epsilon\mathbf{p}'.$$



$\mathbf{A}^1 \simeq \mathbf{A}_{\text{Aloha}}$, SGA 500 trames

$$\mathbf{A}_{\text{Aloha}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{\epsilon=1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Correction

Si $\hat{\mathbf{X}} \neq \mathbf{X}$ (identification incorrecte), alors $\mathbb{E}_{\hat{\mathbf{X}}}[g(\mathbf{A}^t; \hat{\mathbf{X}}^t)] \neq \nabla_{\mathbf{A}^t} T(\mathbf{A}^t)$: estimation biaisée du gradient $\Rightarrow \mathbf{A}^*$ n'est plus optimal.

Poids de correction : $w(\mathbf{x}) = \frac{\Pr(\mathbf{X}=\mathbf{x})}{\Pr(\hat{\mathbf{X}}=\mathbf{x})}$.

Nouvelle mise à jour :

$$\mathbf{A}^{t+1} = \Pi_{\mathcal{H}}[\mathbf{A}^t + \alpha^t w(\hat{\mathbf{X}}^t) g(\mathbf{A}^t; \hat{\mathbf{X}}^t)]$$

Théorème : converge à nouveau vers un point stationnaire.

Lemme : échantillonnage préférentiel (importance sampling) :

$$\mathbb{E}_{\hat{\mathbf{X}}}[w(\hat{\mathbf{X}})g(\mathbf{A}; \hat{\mathbf{X}})] = \mathbb{E}_{\mathbf{X}}[g(\mathbf{A}; \mathbf{X})] = \nabla T(\mathbf{A}).$$

L'ajout du poids permet de débiaiser l'estimateur du gradient.

Statistiques inconnues

Cependant il faut connaître $\Pr(\mathbf{X} = \mathbf{x})$ et $\Pr(\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{x})$.

Supposons $\Pr(\mathbf{X} = \mathbf{x})$ connu.

Il est difficile de connaître $\Pr(\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{x})$ mais il est possible de l'approximer par Monte Carlo.

Heuristiques :

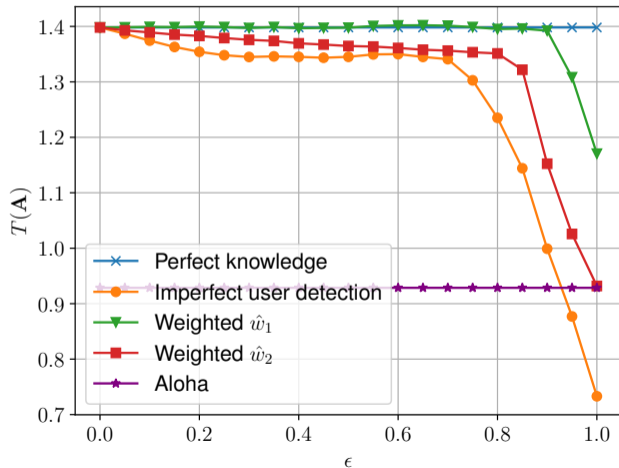
- $\Pr(\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{x}) = (1 - \epsilon(\mathbf{p}))\Pr(\mathbf{X} = \mathbf{x}) + \epsilon(\mathbf{p})\Pr(\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{x})$ (1)

- $\Pr(\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{x}) = (1 - \epsilon(\mathbf{p}))\Pr(\mathbf{X} = \mathbf{x}) + \frac{\epsilon(\mathbf{p})}{2^N - 1}$ (2)

$\epsilon(\mathbf{p})$: probabilité d'erreur moyenne de l'algorithme de détection de dispositifs.

Exemple

Même que précédemment mais avec correction :

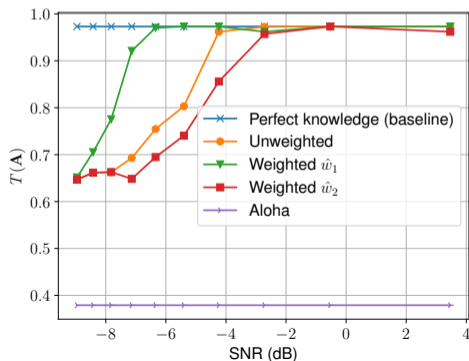


Identification par pilote

$N = 10$, $K = 2$, longueur des pilotes=5, distribution d'activité :

$$\mathbf{p} = [0.07 \quad 0.31 \quad 0.33 \quad 0.34 \quad 0.44 \quad 0.53 \quad 0.57 \quad 0.64 \quad 0.73 \quad 0.94]$$

Détection des dispositifs actifs avec GAMP[2] pour différents niveaux de bruit.



Conclusion

- Allocation non uniforme de ressources permet d'augmenter le débit.
- Les erreurs de détections peuvent affecter le débit résultant.
- Mais il est possible de les compenser partiellement avec l'échantillonnage préférentiel.

Limites :

- Difficile de passer à l'échelle (objectif non convexe).
- Difficile d'avoir des bonnes estimations des statistiques du réseaux.

Prochaines étapes :

- Compromis débit/équité.
- Statistiques variant dans le temps.

Références I

- [1] Norman ABRAMSON. “THE ALOHA SYSTEM: Another Alternative for Computer Communications”. In : *Proceedings of the November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference. AFIPS '70 (Fall)*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 17 nov. 1970, p. 281-285. ISBN : 978-1-4503-7904-5. DOI : 10.1145/1478462.1478502. URL : <https://doi.org/10.1145/1478462.1478502> (visité le 17/01/2023).
- [2] Léo CHETOT, Malcolm EGAN et Jean-Marie GORCE. “Joint Identification and Channel Estimation for Fault Detection in Industrial IoT With Correlated Sensors”. In : *IEEE Access* 9 (2021), p. 116692-116701. DOI : 10.1109/ACCESS.2021.3106736.
- [3] Orestis GEORGIU et Usman RAZA. “Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?” In : *IEEE Wireless Communications Letters* 6.2 (avr. 2017), p. 162-165. ISSN : 2162-2345. DOI : 10.1109/LWC.2016.2647247.
- [4] Soukaina IHIRRI et al. “A Scalable Slotted Aloha for Massive IoT: A Throughput Analysis”. In : *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*. 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Juin 2019, p. 508-513. DOI : 10.1109/IWCMC.2019.8766751.

Références II

- [5] Anders E. KALOR, Osama A. HANNA et Petar POPOVSKI. “Random Access Schemes in Wireless Systems with Correlated User Activity”. In : *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Kalamata : IEEE, juin 2018, p. 1-5. ISBN : 978-1-5386-3512-4. DOI : 10.1109/SPAWC.2018.8445866. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8445866/> (visité le 14/10/2022).
- [6] Gianluigi LIVA. “Graph-Based Analysis and Optimization of Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA”. In : *IEEE Trans. Commun.* 59.2 (fév. 2011), p. 477-487. ISSN : 0090-6778. DOI : 10.1109/TCOMM.2010.120710.100054. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5668922/> (visité le 07/10/2022).
- [7] Enrico PAOLINI, Gianluigi LIVA et Marco CHIARI. “Coded Slotted ALOHA: A Graph-Based Method for Uncoordinated Multiple Access”. In : *IEEE Trans. Inform. Theory* 61.12 (déc. 2015), p. 6815-6832. ISSN : 0018-9448, 1557-9654. DOI : 10.1109/TIT.2015.2492579. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7302046/> (visité le 07/10/2022).
- [8] Lawrence G. ROBERTS. “ALOHA Packet System with and without Slots and Capture”. In : *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 5.2 (1^{er} avr. 1975), p. 28-42. ISSN : 0146-4833. DOI : 10.1145/1024916.1024920. URL : <https://doi.org/10.1145/1024916.1024920> (visité le 17/01/2023).

Références III

- [9] J.E. WIESELTHIER, A. EPHREMIDES et L.A. MICHAELS. “An Exact Analysis and Performance Evaluation of Framed ALOHA with Capture”. In : *IEEE Trans. Commun.* 37.2 (Feb./1989), p. 125-137. ISSN : 00906778. DOI : 10.1109/26.20080. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/20080/> (visité le 07/10/2022).
- [10] Ce ZHENG et al. “Stochastic Resource Optimization of Random Access for Transmitters With Correlated Activation”. In : *IEEE Commun. Lett.* 25.9 (sept. 2021), p. 3055-3059. ISSN : 1089-7798, 1558-2558, 2373-7891. DOI : 10.1109/LCOMM.2021.3090110. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9458251/> (visité le 07/10/2022).