

Sujet de thèse
Université Gustave Eiffel, Laboratoire ESYCOM (UMR CNRS 9007)

Optimisation de la communication radio avec des populations denses d'émetteurs-récepteurs non-linéaires

Encadrants :

Benoit Poussot, Shermila Mostarshedi, Armine Karami, Jean-Marc Laheurte (directeur)

Résumé

Cette thèse propose d'étudier statistiquement le lien radio entre un lecteur radiofréquence et un ensemble dense de systèmes antenne-circuit embarqués (appelés "tags"), aléatoirement répartis, et suivant un protocole d'identification et de communication type RFID. On se propose de déduire de cette étude des règles de conception matérielle des tags et/ou des ajustements de protocole, de sorte d'améliorer la performance de la communication. L'étude tiendra compte de la non-linéarité des circuits de charge des tags et des couplages électromagnétiques entre tags. Le travail de recherche à mener dans cette thèse est axé sur la modélisation, pour chacun des domaines concernés (couplage électromagnétique, canal de propagation et circuit électrique). Il sera complété par des simulations et des mesures expérimentales.

Contexte

Dans de nombreuses applications (logistique, surveillance, ...), des systèmes miniaturisés et communicants sans fil (tags) sont disséminés, et un lecteur doit pouvoir les interroger à distance. Chaque tag est muni d'une antenne et d'un circuit intégré lui permettant de détecter, interpréter, et répondre à une interrogation du lecteur. L'interrogation et la réponse sont encodées en respectant un protocole de communication. Ce protocole permet notamment au lecteur d'identifier chaque tag, et à chaque tag de déterminer s'il est l'objet d'une requête du lecteur (méthode de radio-identification, ou RFID). De plus, en fonction des applications, le protocole peut permettre la transmission de données locales à chaque tag. Par exemple, dans le cadre du "sensing RFID", la valeur d'une quantité physique mesurée par le tag peut être transmise au lecteur.

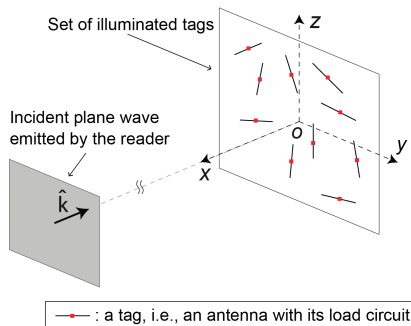


Figure 1 – Ensemble de tags couplés.

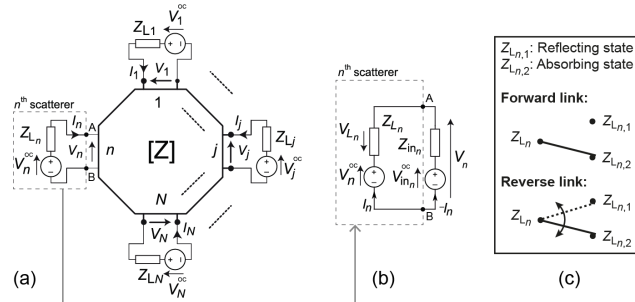


Figure 2 – (a) Réseau à N-ports modélisant le système de tags (b) Modèle équivalent pour le n -ème tag (c) Comportement d'un tag : changement d'impédance

Le contexte est donc celui d'un lecteur interrogeant un ou plusieurs tags par l'émission d'une onde incidente (Fig. 1). La réponse de chaque tag au lecteur est encodée en changeant l'amplitude de l'onde réfléchiée par le tag. Cette modulation d'amplitude encode l'information contenue dans la réponse du tag au lecteur. Ces niveaux d'amplitude de l'onde réfléchiée sont modifiés grâce à la variation de l'impédance de charge locale à chaque tag, en aval de l'antenne. Cette charge variable est réalisée par un circuit intégré à très basse consommation qui est alimenté uniquement par la puissance absorbée de l'onde illuminatrice dans le contexte de la RFID passive.

Si la densité des tags est importante dans la région illuminée, la réponse de chaque tag ne dépend pas seulement de ses propriétés (antenne, circuit de charge), mais également par couplage électromagnétique, de celles des autres tags à proximité. Dans de tels contextes, la réponse individuelle de chaque tag à une illumination dépend donc à la fois de leur comportement individuel *et* de la répartition spatiale de l'ensemble. Le succès de l'interrogation/réponse de chaque tag de l'ensemble dépend donc de ces mêmes paramètres.

À une excitation et une répartition donnée pour l'ensemble des tags peut être associé un circuit équivalent modélisant tous les tags et leurs interactions (Fig. 2a). Les sources de tension V_j^{OC} représentent l'excitation par l'onde incidente lorsque les antennes de tag sont en circuit-ouvert. Elles dépendent des caractéristiques du tag (orientation, position) et de l'onde incidente (comme sa polarisation). La matrice d'impédance $[Z]$ est composée

de l'impédance propre à chaque antenne de tag (termes diagonaux), ainsi que de l'effet des couplages (termes non-diagonaux). Lors de la phase d'interrogation, les circuits de charge des tags Z_{L_j} étant non-linéaires, ces impédances sont également fonction du niveau de puissance incidente. Lors de la phase de réponse, le tag peut modifier la valeur de sa charge en fonction de la réponse à donner à l'interrogation, afin d'implémenter la modulation de l'onde réfléchie (la rétro-modulation) évoquée ci-dessus (Fig. 2c).

Dans des contextes réalistes, la répartition spatiale des tags n'est pas connue et doit être modélisée par une variable aléatoire. Les propriétés électriques et radiatives de la population de tags (comme la matrice d'impédance) héritent ainsi de ce caractère aléatoire : elles suivent donc des lois de probabilités desquelles, si elles étaient connues, on pourrait extraire le taux de lecture moyen, ou la probabilité d'échec de lecture/réponse d'un tag interrogé. Ces deux exemples de quantités peuvent être choisis comme métrique de performance pour évaluer la communication radio.

Positionnement et objectif

Les efforts visant à améliorer la performance dans des environnements denses de tags passifs couvrent plusieurs approches. Au niveau des couches supérieures, les algorithmes anticollision permettent de résoudre une partie du problème lié à la communication entre les tags et le lecteur mais ils s'avèrent inefficaces pour l'activation des tags par le lecteur. Au niveau de la couche physique, il existe des stratégies côté lecteur, par exemple les configurations multi-lecteurs ou multi-antennes [1], exploitant la diversité spatiale mais peu du côté du tag. Néanmoins, nous pouvons citer les techniques incluant l'adaptation d'impédance [2] ou la modulation de charge multiport [3]. Cependant, ces études considèrent généralement des tags isolés et négligent le couplage en champ proche entre tags voisins. Seuls quelques travaux examinent les effets de couplage ou proposent des stratégies d'atténuation partielles de ce dernier, telles que la réduction du couplage par une modification de la topologie de l'antenne [4], sans toutefois traiter les situations où la forte densité de tags est inévitable.

L'objectif principal de cette thèse consiste à la modélisation électrique d'une population de tags, et à la quantification statistique de leur réponse lorsqu'ils sont aléatoirement répartis en intégrant la non-linéarité de leur charge. On exploitera ces modèles afin de donner des règles de conception optimisées au niveau du lecteur et/ou des tag, afin de quantifier les indicateurs de performance de la communication radio et de possiblement améliorer ces derniers.

Travail demandé

Pour atteindre l'objectif mentionné, les grandes étapes de la thèse seront les suivantes :

- déterminer un modèle électrique des tags en tenant compte des non-linéarités du circuit de charge,
- étudier le lien lecture/réponse individuelle d'un tag en tenant compte de la propagation, du circuit non-linéaire de charge, et donner des limites de portée à puissance de lecteur donnée
- étudier le lien lecture/réponse collectif de tags dans des configurations spatiales déterministes, et identifier les configurations dégradant le bilan de liaison par rapport au cas sans couplage,
- établir un modèle statistique de l'onde réfléchie vers le lecteur par les tags, dans un contexte de haute densité de tags aléatoirement répartis et couplés,
- proposer des modifications des architectures matérielles de tags et des protocoles existants existants pour améliorer le lien radio en contexte de tags nombreux.

Ce plan de travail s'inscrit dans la continuité des recherches menées au laboratoire ESYCOM [5], [6]. Le modèle électrique des tags, tenant compte du couplage mutuel, établi et enrichi dans les thèses antérieures, constitue une première base. L'accent dans cette thèse est mis sur l'intégration et l'impact des non-linéarités du circuit de charge. Concernant le volet statistique, l'étude du caractère aléatoire du lien lecture/réponse a déjà été amorcée dans des thèses précédentes, l'apport attendu ici réside dans l'obtention d'un modèle statistique pouvant être utilisé comme estimateur de performance d'un système réel. Les améliorations de la topologie de l'antenne, de l'architecture du tag ou du protocole existant, dans un contexte dense de tags, seraient à notre connaissance entièrement novatrices.

Profil recherché

Étudiant(e) issu(e) d'une formation en physique ou EEA avec un intérêt particulier pour les aspects théoriques et la modélisation. Une exposition préalable à l'un ou plusieurs des champs suivants sera utile : propagation électromagnétique, circuits et systèmes non-linéaires, analyse statistique.

Candidature et contact

Le dossier de candidature incluant, CV, lettres de motivation et de recommandation et l'ensemble des résultats académiques est à adresser par voie électronique à :

- Benoit Poussot, Maître de Conférences, benoit.poussot@univ-eiffel.fr
- Shermila Mostarshedi, Maître de Conférences, shermila.mostarshedi@univ-eiffel.fr
- Armine Karami, Chargé de Recherche CNRS, armine.karami@cnrs.fr

Laboratoire d'accueil

Le laboratoire ESYCOM s'inscrit dans les domaines de l'ingénierie des systèmes de communication, des capteurs et des microsystèmes pour la ville, l'environnement et la personne. Les thèmes abordés sont plus spécifiquement :

- les antennes et propagation en milieux complexes, les composants photoniques - micro-ondes ;
- les microsystèmes pour l'analyse de l'environnement et la dépollution, pour la santé et l'interface avec le vivant ;
- les micro-dispositifs de récupération d'énergie ambiante mécanique, thermique ou électromagnétique.

Bibliographie

- [1] W. Deng, Y. Xia, Z. Li, R. Pu, and W. Pei, "A high-dimensional collided tag quantity estimation method for multi-antenna rfid systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 1, pp. 132–136, 2020.
- [2] N. Barbot, I. Prodan, and P. Nikitin, "A practical guide to optimal impedance matching for uhf rfid chip," *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 8, pp. 145–153, 2024.
- [3] N. Barbot, I. Prodan, and P. Nikitin, "Differential rcs of multi-port tag antenna with synchronous modulated backscatter," *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2025.
- [4] G. Shi, Y. He, B. Yin, L. Zuo, P. She, W. Zeng, and F. Ali, "Analysis of mutual couple effect of uhf rfid antenna for the internet of things environment," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 81451–81465, 2019.
- [5] I. Adjali, A. Gueye, S. Mostarshedi, B. Poussot, F. Nadal, and J.-M. Laheurte, "Matching evaluation of highly coupled dipoles quantified by a statistical approach," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 7, pp. 5044–5051, 2020.
- [6] A. Mughal, J. M. Sudersanan, S. Mostarshedi, B. Poussot, and J.-M. Laheurte, "Statistical evaluation of the coupling effects between tags in a uhf rfid forward link," *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 7, pp. 257–266, 2023.