



HAL
open science

Utilisation conjointe de différents facteurs d'étalements en LoRa 2.4 GHz: problématiques et (une) solution

Augustin Bonnel, Jose-Ernesto Gomez-Balderas, Martin Heusse

► To cite this version:

Augustin Bonnel, Jose-Ernesto Gomez-Balderas, Martin Heusse. Utilisation conjointe de différents facteurs d'étalements en LoRa 2.4 GHz: problématiques et (une) solution. CORES 2026 - 11es Rencontres Franco-phones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performances et l'Expérimentation des Réseaux de Communication, Jun 2026, Mandelieu-la-Napoule, France. <hal-05599921>

HAL Id: hal-05599921

<https://hal.science/hal-05599921v1>

Submitted on 22 Apr 2026

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.



Copyright - All rights reserved

Utilisation conjointe de différents facteurs d'étalements en LoRa 2.4 GHz: problématiques et (une) solution

Augustin Bonnel¹ et Jose-Ernesto Gomez-Balderas² et Martin Heusse³

¹Univ. Grenoble Alpes, LIG, Gipsa-LAB, Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, Gipsa-LAB, Grenoble, France

³Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LIG, Grenoble, France

« *The Spreading Factor and Bandwidth must be known in advance on both transmit and receive sides...* », cette phrase, tirée de la documentation du SX1280 (composant Semtech pour le LoRa en 2,4 GHz), tend à être souvent mal interprétée. En effet, elle semble impliquer qu'une seule modulation est utilisable pour une application donnée. En mêlant échantillonnage de préambule et répétition de trame côté transmission avec des échantillonnages rapides sur deux *spreading factors* côté réception, nous montrons qu'il est possible d'échanger des trames SF5 et SF12 sans coordination entre les nœuds. Nous obtenons deux canaux de transmission avec des propriétés différentes mais complémentaires, sans avoir à choisir entre débit et portée de transmission.

Mots-clefs : LoRa 2.4 GHz, Facteurs d'étalements, Échantillonnage de préambule, Répétitions

1 Introduction

La modulation LoRa, très connue dans la bande sub-GHz, a fait son apparition dans la bande ISM 2,4 GHz. Ceci afin de garantir une interopérabilité planétaire et de s'affranchir des contraintes de rapport cyclique imposées par la bande sub-GHz. Cette nouvelle bande présente de nombreux avantages [Der] tout en conservant les caractéristiques de la modulation LoRa sub-GHz dont la cohabitation avec peu d'interférences entre différents facteurs d'étalement quasi-orthogonaux entre eux. Ce paramètre de modulation amène aussi une certaine flexibilité, car en jouant sur la robustesse et corrélativement sur la durée d'un symbole, on peut changer la portée et le débit de communication.

Cependant en LoRa 2,4 GHz, il n'existe pas de matériel spécifique permettant l'écoute et la réception simultanées de trames utilisant des facteurs d'étalement différents. Les propositions actuelles reposent uniquement sur l'agrégation de plusieurs émetteur-récepteurs SX1280 et la planification d'écoute au préalable : [LoR], [Cal], [ZDPPSG]. Ainsi, pour des applications avec un trafic bidirectionnel et de fortes contraintes de coûts et de poids, mais qui bénéficieraient de la flexibilité offerte par les différents facteurs d'étalement, il apparaît nécessaire de développer un protocole permettant d'écouter et de transmettre des trames modulées par différents facteurs d'étalement avec un seul émetteur-récepteur SX1280.

Dans la fiche technique du SX1280 [SX1], il est spécifié : « *The Spreading Factor and Bandwidth must be known in advance on both transmit and receive sides...* ». Cette phrase signifie qu'à un instant t , le SX1280 ne peut écouter que sur un seul facteur d'étalement désigné mais, au cours du temps, il peut changer le facteur d'étalement sur lequel il écoute.

En nous focalisant sur le facteur d'étalement 5 et 12 (pour avoir le plus grand contraste entre portée et débit), nous proposons ci-dessous une solution pour permettre la transmission et la réception de trames SF5 et SF12 sans aucune synchronisation et avec un seul SX1280 sur chaque nœud. L'objectif est de profiter conjointement du débit offert par SF5 et de la portée obtenue grâce à l'utilisation de SF12.

Ces travaux préliminaires s'inscrivent dans un projet qui a pour but d'étudier les capacités d'un réseau Ad Hoc maillé utilisant la technologie LoRa 2.4 GHz pour un essaim de drones.

2 Fonctionnement du protocole

Comme il est impossible que le SX1280 écoute simultanément des trames SF5 et SF12, il faut donc qu'il soit capable d'écouter un canal SF5 et un canal SF12 l'un à la suite de l'autre le plus rapidement possible, afin de détecter l'arrivée d'une trame sur l'un des canaux pour la recevoir. Ceci a pour but d'imiter la simultanéité requise. Cette manière d'écouter le canal entraîne forcément des modifications du format des trames envoyées sur SF5 et SF12.

2.1 Réception

Pour détecter l'arrivée d'une trame, le SX1280 doit détecter au moins 8 symboles de préambule. Comme un symbole SF12 est 128 fois plus long qu'un symbole SF5, le temps nécessaire pour détecter une trame SF5 est beaucoup plus court. Simplement écouter 8 symboles à SF5 et 8 à SF12 augmenterait grandement la probabilité de rater une trame SF5. Pour l'éviter, il faudrait allonger considérablement son préambule pour augmenter la probabilité de réception, avec une baisse significative du débit SF5.

À l'inverse, nous proposons d'avoir la même période d'écoute sur SF5 et SF12, la plus courte possible. Nous utilisons la fonction *Channel Activity Detect (CAD)* du SX1280 qui permet de détecter l'activité sur un canal (symboles de préambule ou non) en écoutant durant 1, 2, 4, 8 ou 16 symboles. Nous avons ainsi une possible détection d'activité sur le canal plus courte que 8 symboles. En choisissant un temps de détection de 4 symboles, on obtient, grâce à la formule donnée dans la *datasheet* [SX1] du SX1280, un temps d'échantillonnage de canal SF12 de :

$$T_{\text{sampling}} = \left(cad_{\text{symboles}} + \frac{2 \times SF + 3}{32} \right) \times T_S, \quad (1)$$

avec T_{sampling} la durée de détection d'activité sur le canal, cad_{symboles} le nombre de symboles utilisés pour le CAD, SF le facteur d'étalement du canal sondé et T_S la durée d'un symbole modulé avec les mêmes paramètres que ceux du canal sondé. Ce qui donne pour un canal SF12, de 812.5kHz de large avec 4 symboles de détection : $T_{\text{sampling}} \approx 24.42$ ms. Si dès que le SX1280 arrive sur un canal SF12, il lance un CAD, il sera alors capable de décréter 24.42 ms plus tard s'il y a de l'activité sur ce canal, et qu'il faut y rester pour écouter cette activité.

Par contre le CAD ne permet pas au SX1280 de basculer directement en réception, il faut donc le faire basculer en mode réception et qu'il se verrouille sur un préambule. Le CAD permet donc de réduire le temps passé à savoir s'il y a de l'activité sur un canal SF12, et donc de mieux imiter l'écoute simultanée sur SF5 et SF12.

Pour détecter de l'activité sur un canal SF5, comme le SX1280 dispose de $T_{\text{sampling}} \approx 24.42$ ms il peut écouter le canal en attendant les 8 symboles de préambule SF5.

Pour un canal SF12 : si le CAD est positif, le SX1280 étend sa période d'échantillonnage pour essayer de se verrouiller sur les 8 symboles de préambule, s'il y arrive il reçoit alors la trame, puis il reprend son cycle d'échantillonnage SF5/SF12.

Pour un canal SF5 : si le SX1280 détecte 8 symboles de préambule, il se verrouille alors en réception et reçoit la trame. Au vu du temps alloué, il est capable de recevoir plusieurs trames sans casser son cycle d'échantillonnage. Par contre s'il venait à se verrouiller sur une trame entrante en fin de période d'échantillonnage, il casserait alors son cycle d'échantillonnage pour écouter la trame SF5 entrante et le reprendrait à la fin de cette dernière.

2.2 Émission

Le problème à résoudre est celui de radios en écoute sur le canal de façon sporadique. L'échantillonnage de préambule permet d'y répondre [BDWL10, BSB⁺06]. En s'en inspirant, on peut allonger le préambule des trames afin de couvrir toute la plage du cycle d'échantillonnage. Les nœuds à portée détectent des symboles de préambules et passent en réception. Cette solution convient pour les trames SF12, car la durée du cycle d'échantillonnage est proche de la durée de préambules SF12 de tailles acceptables. Par contre pour SF5, couvrir la durée du cycle d'échantillonnage reviendrait à avoir un préambule de taille excessive qui réduirait fortement le débit. Comme la période d'échantillonnage de SF5 est longue par rapport à la

Utilisation conjointe de différents facteurs d'étalement en LoRa 2.4 GHz

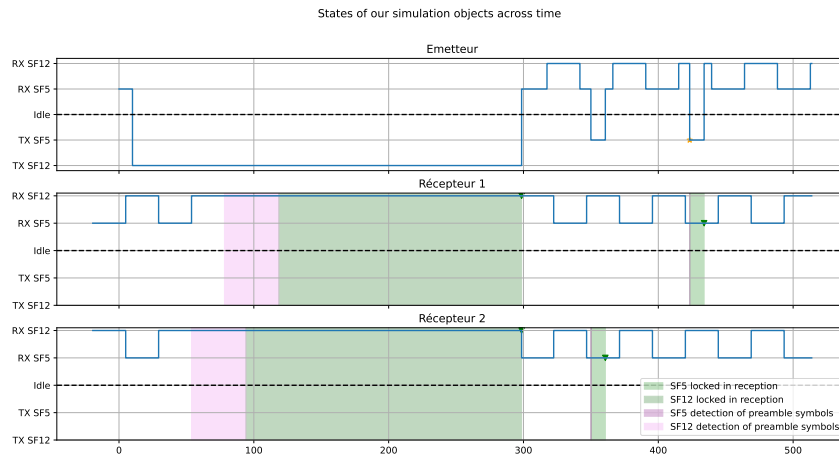


FIGURE 1 : Réception d'une trame SF12 et d'une trame SF5 émise par l'Émetteur par deux Récepteur 1 et Récepteur 2, RxSF12 correspond à l'écoute sur SF12, RxSF5 correspond à l'écoute sur SF5, TxSF12 correspond à l'envoi sur SF12, TxSF5 correspond à l'envoi sur SF5. Récepteur 1 ne voit pas la trame SF12 sur son premier échantillonnage de SF12 car il manque 1 symbole pour que la détection soit positive, il la reçoit bien par la suite. Récepteur 1 ne voit pas la première émission de la trame SF5 mais reçoit bien la répétition. Récepteur 2 ignore la répétition de la trame SF5 mais a bien reçu la première occurrence, comme attendu.

durée d'une trame SF5 et que les nœuds à portée sont soit en train d'échantillonner le canal SF5 ou SF12 (s'il ne sont pas en train d'envoyer ou de recevoir une trame), il suffit de répéter la trame SF5 avec un délai d'un multiple impair de la période d'échantillonnage T_{sampling} .

En considérant qu'un CAD démarrant juste avant le début de l'activité sur le canal n'indiquerait pas d'activité sur ce dernier, les nœuds qui commenceraient à échantillonner juste avant le début du préambule rateraient la trame. Pour éviter cela, il faut allonger notre préambule pour que ces nœuds détectent la transmission lorsqu'ils reviendront échantillonner SF12 après avoir échantillonné SF5. À cela il faut rajouter les 8 symboles de préambule nécessaires pour que le SX1280 se verrouille en réception :

$$T_{PSF12} = 3 \times T_{\text{sampling}} + T_{PRxMode}. \quad (2)$$

Avec T_{PSF12} la durée du préambule SF12, $T_{\text{sampling}} = T_{\text{samplingSF5}} = T_{\text{samplingSF12}}$ la durée d'une période d'échantillonnage calculée dans 2.1 et $T_{PRxMode}$ la durée de 8 symboles de préambules nécessaire pour le verrouillage en réception. On obtient alors $T_{PSF12} \approx 113.59$ ms, et donc à minima 23 symboles de préambules. Empiriquement cette valeur a été étendue à 25 symboles pour permettre à un nœud de pouvoir recevoir une trame SF5 de 255 octets avant de recevoir une trame SF12.

Concernant SF5, il faut également un préambule de 16 symboles pour que les nœuds qui ratent de peu la première occurrence de la trame puissent la voir à la deuxième. On a donc une trame de 16 symboles de préambules qui sera répétée une fois à $3 \times T_{\text{sampling}}$ après sa première émission. Ceci implique de facto une baisse du débit de moitié par rapport au débit maximal atteignable par SF5, mais c'est toujours bien meilleur que d'utiliser un préambule long comme pour SF12.

Pour SF12 la baisse de débit qu'engendrerait une répétition est supérieure à celle engendrée par le long préambule.

3 Estimation de la capacité

Pour avoir une idée de la capacité du protocole, nous mettons en place une simulation à événements discrets retranscrivant le fonctionnement du SX1280 (en suivant les périodes temporelles de la *datasheet* [SX1]), et les mécanismes du protocole. En augmentant progressivement le nombre de radios, il est possible de voir l'évolution de la probabilité de réception des trames SF5 et SF12.

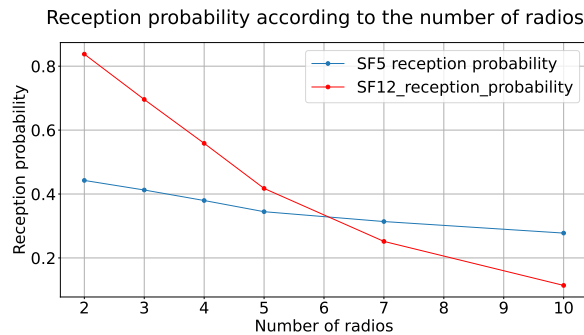


FIGURE 2 : Évolution des probabilités de réception en fonction du nombre de radios. Comme les trames SF5 sont répétées mais reçues qu’une seule fois par chaque radio, la probabilité de réception ne peut pas excéder 50%. Les probabilités baissent avec l’augmentation du nombre de radios notamment à cause des collisions entre les trames. Les trames SF12 étant très longues, les collisions sont plus fréquentes.

3.1 Simulateur et configuration

Les dates d’émission des paquets SF5 et SF12 suivent des distributions de poissons avec des moyennes différentes. La probabilité de réception de trames d’un SF correspond au nombre total d’évènements de bonne réception d’une trame divisé par le nombre de récepteurs et le nombre total d’émissions. Le temps simulé correspond à 5 minutes. Les radios envoient en moyenne une trame SF5 toutes les demi-secondes, tandis que la moyenne d’envois d’une trame SF12 est de une par seconde. L’instant d’initialisation de leur cycle d’échantillonnage est uniformément réparti sur un cycle d’échantillonnage. La simulation est réalisée pour un nombre de radios allant de 2 à 10.

L’envoi des trames se fait sans aucun mécanisme d’écoute préalable à l’envoi : lorsqu’une radio émet une trame, elle le fait jusqu’au bout de la trame quelque soit ce qu’il y a sur le canal. L’émission est prioritaire par rapport à l’échantillonnage mais pas par rapport à la réception. Par contre si une trame SF5 était supposée être envoyé mais que la radio est déjà occupée, sa répétition est quand même programmé au cas où la répétition puisse être envoyée.

3.2 Résultats

Comme attendu la probabilité de réception d’une trame baisse avec le nombre de radios mises en jeu. Aussi la probabilité de réception d’une trame SF5 ne dépasse pas les 50% car chaque trame SF5 est émise 2 fois mais reçus une seule fois par chaque radios. Atteindre les 50% revient donc à que chaque radio ait reçu 100% des paquets uniques circulant sur le réseau.

La diminution de la probabilité de réception pour SF5 et SF12 vient d’abord de l’augmentation du nombre de collisions entre trames sur le canal. Lorsqu’une radio est en cours d’émission d’une trame, alors elle n’échantillonne plus le canal, ce qui lui fait peut-être manquer des symboles de préambules ou de l’activité sur le canal. La baisse de probabilité de réception des trames SF12 est plus conséquente que pour les trames SF5, car les trames SF12 sont beaucoup plus longues et les collisions sont bien plus fréquentes.

4 Conclusion

Il n’est pas toujours possible de savoir à l’avance quel facteur d’étalement utiliser pour communiquer en LoRa 2,4 GHz. Pour ne pas avoir à choisir, nous proposons de sacrifier un peu de capacité pour, en contrepartie, conserver la possibilité à tout moment de communiquer à courte et grande distance, à haut ou bas débit. Dans ce but, nous combinons différentes techniques classiques, comme l’échantillonnage de préambule et la répétition de trames. Nous montrons que si la perte de capacité n’est pas négligeable, l’utilisation conjointe de deux SF est viable et apporte une flexibilité inédite.

Pour approfondir l’analyse de ce protocole, nous allons dans le futur comparer ses performances avec : des nœuds utilisant un unique facteur d’étalement, des nœuds utilisant deux radios (une pour chaque facteur d’étalement). Aussi, des tests sur matériel réel sont envisagés.

5 Remerciements

This work was supported by the French National Research Agency (ANR) under the "France 2030" program (ANR-15-IDEX-02), within the LabEx PERSYVAL (ANR-11-LABX-0025-01)

Références

- [BDWL10] Abdelmalik Bachir, Mischa Dohler, Thomas Watteyne, and Kin K Leung. MAC Essentials for Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(2) :222–248, 2010.
- [BSB⁺06] Abdelmalik Bachir, Ludovic Samper, Domninique Barthel, Martin Heusse, and Andrzej Duda. Link Cost and Reliability of Frame Preamble MAC Protocols. In *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pages 632–638, Reston, VA, USA, 2006. IEEE.
- [Cal] P Calvet. LoRa® 2.4GHz 3 Channels Single SF Reference Design - Performance Report.
- [Der] Gwendoline Hochet Derévianckine. Feasibility and Performance of a LoRa 2.4 GHz Network.
- [LoR] LoRa2G4 3 Channels Single SF User Guide V1.
- [SX1] SX1280 - Datasheet.
- [ZDPPSG] Dimitrios Zorbas, Luigi Di Puglia Pugliese, Ruana Saduakhas, and Francesca Guerriero. Gateway configuration in 2.4 GHz LoRa networks. 31 :101567.