



HAL
open science

ThingSat : une passerelle IoT LoRa spatiale

Olivier Alphand, Didier Donsez, Aymeric Brochier, Tan-Phu Vuong, Imane El Khantouti, Thierry Sequies, Jean-Louis Monin

► **To cite this version:**

Olivier Alphand, Didier Donsez, Aymeric Brochier, Tan-Phu Vuong, Imane El Khantouti, et al.. ThingSat : une passerelle IoT LoRa spatiale. CoRes 2023 - 8èmes Rencontres Francophones sur la Conception de protocoles, l'évaluation de performances et l'expérimentation de Réseaux de communication, May 2023, Cargèse, France. hal-04097677

HAL Id: hal-04097677

<https://hal.science/hal-04097677>

Submitted on 15 May 2023

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.

ThingSat : une passerelle IoT LoRa spatiale

Olivier ALPHAND¹, Didier DONSEZ¹, Aymeric BROCHIER¹, Tan-Phu VUONG², Imane EL KHANTOUTI³, Thierry SEQUIES³, Jean-Louis MONIN³

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LIG, 38000 Grenoble, France

²IMEP-LAHC Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, Grenoble, France

³CSUG, Université Grenoble Alpes, 38000 Grenoble, France

Le regain d'intérêt pour les constellations satellites et le succès des réseaux terrestres LPWAN (Low-Power Wide Area Network) a ouvert la voie à un nouveau paradigme de communication (DtS-IoT[†]) : l'échange direct de données entre objets connectés au sol et des satellites à orbite terrestre basse (LEO) dédiés à ce trafic IoT (Internet of Things). Dans ce contexte, la technologie LoRa fait partie des technologies les plus prometteuses. Sa longue portée, sa faible consommation et son faible coût permettent son intégration au sein de cubesats, satellites fortement contraints en volume/poids et en consommation électrique. Ces derniers, par des temps de développement et des coûts de lancement réduits, rendent ainsi abordables le prototypage de satellites DtS-IoT. Dans ce contexte, le projet ThingSat a consisté à réaliser une passerelle IoT (carte de communication LoRa, son logiciel embarquée et une antenne patch bi-bande 868MHz/2.4GHz) capable de fonctionner en mode "store-carry-and-forward" afin de la tester en orbite LEO. Nous proposons ainsi de partager un premier retour d'expérience sur la phase allant de sa réalisation jusqu'à sa mise en orbite en tant que charge invitée au sein du cubesat STORK-1.

Mots-clefs : LoRa, Satellite en orbite terrestre basse (LEO), Expérimentation, Cubesat

1 Introduction

Les communications DtS-IoT entre des objets connectés au sol et satellites en orbite LEO sont maintenant envisageables grâce à deux révolutions conjuguées (i) le développement fulgurant des réseaux terrestres LPWAN d'une part et (ii) des cubesats (1 unité de base ou 1U = cube de 10 cm d'arête, 1kg, 1W) d'autre part. Parmi les technologies LPWAN, le LoRa avec sa modulation de type « Chirp Spread Spectrum » (CSS) et ses records de distance de plusieurs centaines de kilomètres à partir de capteurs (25mW) embarqué dans des ballons sondes (30km d'altitude) est rapidement apparue comme une technologie possible pour les communications DtS-IoT.

Le coût "réduit" (pour le spatial) de fabrication et de lancement des cubesats a permis à des projets universitaires tel que NORBY (400MHz) [ZDG⁺22] ou à la constellation de la start-up [Lacuna Space](#) de voir le jour. Dans la lignée de NORBY, le projet ThingSat a réalisé une passerelle IoT qui dans son mode opératoire le plus élaboré en 868MHz est capable de fonctionner en mode "store-carry-and-forward". Peu de papiers détaillant le design de leur payload LoRa spatiale, nous proposons de partager un premier retour d'expérience allant de la réalisation de cette charge utile jusqu'à sa mise en orbite en tant que charge invitée au sein du cubesat [STORK-1](#). Dans un souci de synthèse, nous nous concentrerons principalement dans la suite du papier sur la partie 868MHz.

2 ThingSat

Le projet Thingsat a démarré courant 2019 avec des tests de performance radio au moyen d'objets LoRa embarqués dans des [ballons stratosphériques](#) du CNES (Mai 2019, Septembre 2020, Avril 2021). Les résultats montrent des communications LoRa à très longues distances (> 600 kms) en atmosphère (jusqu'à 32 kms d'altitude) sur les bandes de fréquence ISM 433 MHz, 868 MHz et 2400 MHz. En Décembre

[†]. Direct-to-Satellite IoT

2019, le LIG, l’IMEP-LaHC et le CSUG ont constitué un consortium académique et industriel pour financer la réalisation et la mise en orbite d’une carte de communication LoRa et une antenne patch bi-bande (868MHz/2.4GHz) pour cubesat. Cette carte de communication consiste en une passerelle LoRa 868 Mhz avec un concentrateur Semtech SX1302 et un terminal LoRa 2.4 GHz avec un émetteur/récepteur Semtech SX1280. L’objectif est de caractériser les liens LoRa spatiaux descendants et montants et de permettre la réalisation de cas d’usage précis.

Mécanique orbitale et bilan de liaison en 868MHz: Cette caractérisation est nécessaire car la technologie LoRa n’a pas été conçue initialement pour communiquer avec des satellites à orbite basse. La figure 1 résume les principales contraintes que posent ce nouveau contexte : (i) une vitesse de défilement de 25000km/h non négligeable pour l’effet Doppler par exemple, (ii) une connectivité intermittente due à une fenêtre de visibilité du cubesat au maximum de 30s à 10min par passage avec 4 à 5 passages par jour au dessus d’une même zone (iii) des distances allant de 525km (au zenith, élévation de 90°) à 2500km (horizon, élévation 0°) impactant le bilan de liaison et (iv) une empreinte au sol de l’ordre de 1500km de diamètre posant des problèmes d’accès au médium.

La figure 1 détaille notamment le bilan de liaison en 868MHz d’un cas limite qui est celui d’un capteur avec un module LoRa im880b relié à une antenne aux dimensions raisonnables (10cm de diamètre et 1cm de hauteur) à polarisation circulaire [FTT22] transmettant en SF12 au cubesat avec une élévation de 30°. Dans ce cas de figure, pour le lien montant, la puissance reçue par le satellite est de -134dBm soit 19dBm (puissance d’émission du capteur) + 0dBic (gain antenne à une élévation de 30°) - 150dBm (perte en espace libre sur 950km à 868MHz) + 0.5dB (gain antenne ThingSat à 53° par rapport au nadir). Entre la sensibilité de réception du SX1302 (-141dBm en SF12) et la puissance reçue (-134dBm), il ne reste que 8dBm de marge permettant de compenser d’éventuelles pertes non anticipées. Afin de dépasser ce cas limite et tester des SF plus petits ainsi que des cas d’usage plus variés décrits dans le paragraphe suivant, le bilan de liaison peut évidemment être amélioré en considérant des antennes de tailles plus importantes voire dotées d’un système de poursuite de satellite et l’utilisation de puissances plus importantes. Deux points sont à noter. D’une part, la polarisation circulaire est indispensable afin (i) ne pas avoir à aligner l’antenne au sol avec la polarisation de l’antenne du cubesat et (ii) de n’être pas affecté par les sources de dépolarisation (e.g. effet Faraday de l’ionosphère). D’autre part, le cubesat est doté d’un système de contrôle d’attitude assurant que notre antenne pointe toujours vers le centre de la Terre.

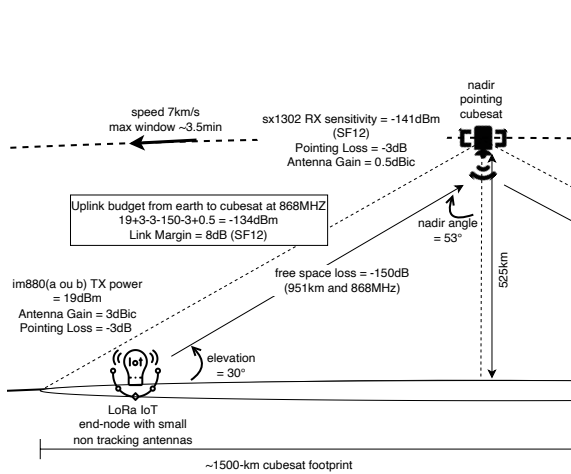


FIGURE 1: caractéristiques d’une orbite polaire à 525km d’altitude et bilan de liaison en 868MHz

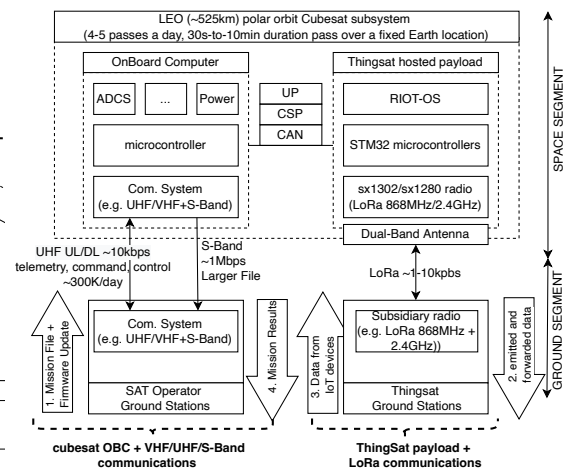


FIGURE 2: Schéma fonctionnel de la charge utile ThingSat au sein du cubesat

Design de la carte électronique ThingSat et son antenne: La figure 2 donne une vision simplifiée de la charge utile et de son interfaçage avec l’ordinateur de bord (OBC) au sein du cubesat. La carte électronique de 96x96mm occupant 1/8U comporte (i) un concentrateur Semtech SX1302 permettant d’écouter simul-

ThingSat : une passerelle IoT LoRa spatiale

tanément sur tous les canaux LoRa en 868MHz ainsi que tous les SF et (ii) un émetteur-récepteur Semtech SX1280 pour effectuer des expérimentations en 2.4GHz. Les deux sont pilotés par 2 microcontrôleurs STM32. La communication avec l'OBC du cubesat se fait via un bus CAN. Le circuit de la carte électronique a été réalisée sous KiCad. Outre les microcontrôleurs et les modules LoRa, des circuits de protection anti latch-up sont introduits dans le design des alimentations et les composants additionnels sont choisis dans la mesure du possible parmi des gammes automobiles pour résister aux vibrations mécaniques. Le modèle de vol (cf. figure 3) a été réalisé sur PCB adapté au spatial pour une tenue au vide et à la dissipation thermique. Une antenne patch bi-bande 868MHz/2.4GHz (cf. figure 4) à polarisation circulaire a été créée sur mesure. Elle devait tenir sur un carré de 10cm x 10cm et d'environ 1mm d'épaisseur afin d'être collée sur la face externe du cubesat pointant vers le sol et à proximité de la carte ThingSat. Elle a été conçue grâce au simulateur CST Microwave Studio et réalisée sur un substrat Rogers (RO4360G2). A 868MHz, l'antenne a un gain maximum de 0.6dBic avec une ouverture de 117.3° et, pour 2.4GHz, un gain maximum de 5.51dBic et une ouverture de 67.3°.

Les missions: Les différentes missions couvertes par ThingSat impliquaient le fonctionnement de la carte ThingSat selon différents modes opératoire en 868MHz (i) soit un simple noeud IoT émettant des trames au sol (ii) soit un sniffeur LoRa en orbite (iii) soit une passerelle LoRa en mode "store-carry-and-forward". Les modes (i)/(ii) (étapes 2./3. sur la figure 2) permettent d'émettre/recevoir des train de paquets à différentes puissances/SF/fréquences/positions satellite/... afin de mieux caractériser le lien LoRa descendant/montant en les croisant avec les informations des paquets reçus/émis au sol (RSSI, SNR, pertes de paquet, distance satellite-station, ...). Le mode (ii) permet également d'écouter passivement le trafic LoRa des zones survolées. Enfin, dans le mode (iii), notre charge utile est capable de recevoir un paquet du sol, de le stocker ("Store"), le conserver ("Carry") jusqu'à parvenir au dessus de la zone destinatrice où il sera relayé ("Forward") au sol vers une passerelle ThingSat ou LoRaWan classique. La planification de ces différentes missions (démarrage/arrêt au dessus de région d'intérêt, bascule entre modes opératoires, ...) se fait au sol et un plan hebdomadaire de mission est envoyé à l'OBC via le segment UHF (étape 1. sur la figure 2). La carte ThingSat récupère le plan de mission pour la semaine en cours auprès de l'OBC, l'exécute, stocke, compresse les données relatives aux différentes expérimentations et les envoie à travers l'OBC via la S-BAND au centre de contrôle ThingSat terrestre (étape 4. sur la figure 2).

Le logiciel embarqué sur ThingSat: Une autre contribution majeure est le logiciel (firmware) pilotant la carte basé sur [RIOT-OS](#) un système d'exploitation léger, open-source et temps réel pour les systèmes embarqués. Les développements ont compris (i) le portage du pilote pour la radio SX1280 et (ii) du pilote pour le [concentrateur SX1302](#) ainsi que du relayer de paquet LoRa et le développement du mode Store-Carry-and-Forward, (iv) le portage de la [librairie CSP](#) (Cubesat Space Protocol) sur bus CAN et du protocole propriétaire UP (Universal Platform) pour dialoguer avec l'OBC, (v) un mécanisme de mise à jour distante (over the space) de manière sécurisée et fiable respectant le [RFC SUIT](#) appelé [CubeDate](#) et enfin (vi) un planificateur de mission capable d'exécuter des scénarios mission ordonnancés par le centre de contrôle sol en fonction des points d'intérêt au sol. Le code source du firmware Thingsat destiné à être libéré majoritairement en open-source est rendu progressivement public sur le dépôt [github ThingSat](#). La taille du firmware est d'environ 250kB et la taille du code C produit ou modifié est de l'ordre de 20000 lignes.

Segment Terrestre: Outre le segment spatial (carte Thingsat + son logiciel + antenne), le projet ThingSat a également mis en place une architecture au sol composée (i) d'un serveur LoRa ThingSat basé sur Chirp-stack que nous opérons pour centraliser les données échangées sur le réseau ThingSat et (ii) nous avons conçu des [stations au sol](#) (cartes de communication) compactes, peu coûteuses et faciles à installer afin de pouvoir les distribuer aisément à nos différents partenaires et volontaires radio-amateurs. Ces dernières sont compatibles avec le réseau de mini-stations de suivi de satellites [TinyGS](#).

Éléments de suivi de projet et de budget: La réalisation de cette première phase du projet ThingSat (Réalisation jusqu'à la mise en orbite) s'est faite autour d'une équipe resserrée d'enseignants-chercheurs non spécialistes de tous les domaines requis pour le projet (électronique, mécanique orbitale, ...) et d'une cheffe de projet dédiée au suivi de plusieurs projets du CSUG dont ThingSat. Des dizaines de stagiaires ont oeuvré sur le design de la carte et de l'antenne ainsi que le développement du logiciel embarqué. Un

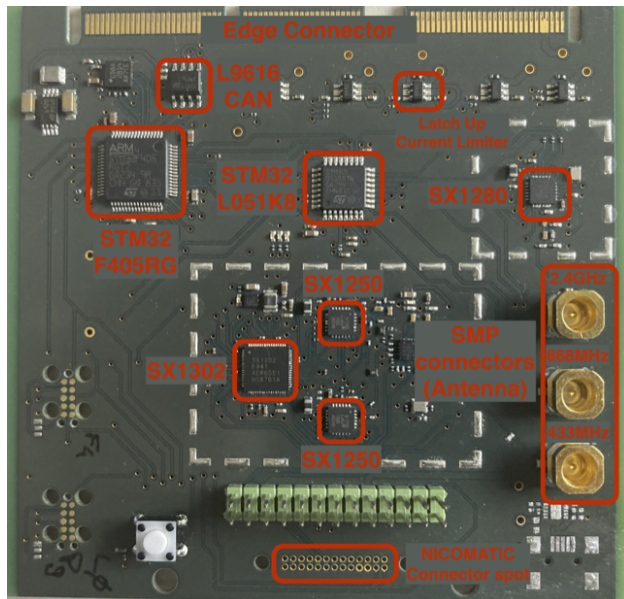


FIGURE 3: Le modèle de vol ThingSat

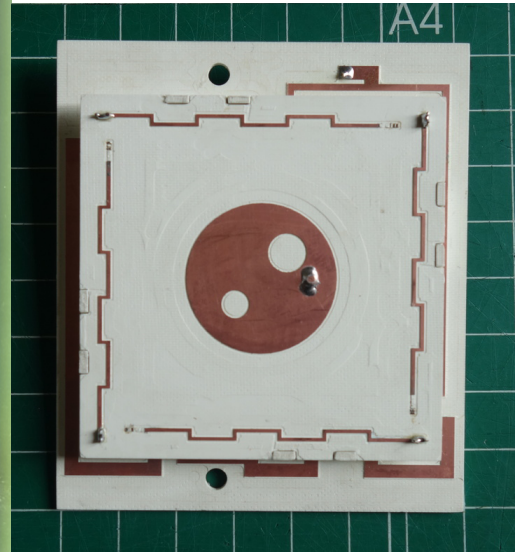


FIGURE 4: Le modèle de vol ThingSat

travail administratif conséquent (déclaration de fréquence, interactions avec le platformiste, pénuries de composant en période COVID, réunions hebdomadaires d’avancement, ...) a été nécessaire afin de tenir les temps. Hormis les coûts humains, les éléments notables du budget sont la fabrication d’un modèle de vol (~ 4000€) et le prix d’une charge invitée de 1/8U (interaction platformiste + intégration + mise en orbite soit ~ 100k€).

3 Conclusions

La première phase du projet (réalisation carte spatiale/logiciel embarqué/antenne + suivi de projet (stagiaires, financement, interaction platformiste,...) + architecture au sol) a été réalisée en un temps record (2 ans). Le design de la carte, sa réalisation et le développement du logiciel embarqué ont été effectués durant l’année 2021. L’antenne patch bi-bande a également été réalisée durant l’année 2021. La carte Thingsat hébergée en tant que charge invitée du cubesat [STORK-1](#) du platformiste [SatRevolution](#) a décollé le 13 Janvier 2022 avec une centaine d’autres satellites à bord d’un lanceur [Falcon 9](#) de [SpaceX](#) et son transporteur [D-Orbit](#) l’a placé à une orbite quasi-polaire héliosynchrone avec une inclinaison de 97.5° à une altitude approximative de 525km le 31 janvier 2022. Des difficultés de communication avec STORK-1 (vraisemblablement dues à la [tempête solaire](#) début février 2022) diffèrent la phase de mise en service des composants systèmes de STORK-1 jusqu’au 10 novembre 2022. Les équipes de SatRev s’occupent désormais de la mise en service des charges invitées (dont la charge Thingsat). Les premières expérimentations de communication LoRa commenceront courant 2023.

References

- [FTT22] Fabien Ferrero, L.H. Trinh, and T. Telkamp. Antenne compacte à polarisation circulaire pour communication IoT par satellite. 22ième Journées Nationales Microondes, June 2022.
- [ZDG+22] Alexander M. Zadorozhny, Alexander A. Doroshkin, Vasily N. Gorev, Alexander V. Melkov, Anton A. Mitrokhin, Vitaliy Yu. Prokopyev, and Yuri M. Prokopyev. First Flight-Testing of LoRa Modulation in Satellite Radio Communications in Low-Earth Orbit. *IEEE Access*, 2022.