

Etude comparative des différentes techniques d'annulation de l'auto-interférence au niveau RF/antennaire pour application Full-Duplex

Allan Pen^{1,3,4}, Marc Le Roy¹, Raafat Lababidi², Denis Le Jeune², André Perennec¹, Jean-Luc Issler³, Kevin Elis³, Adrien Gay³, Jean-Hervé Corre⁴

¹Univ Brest, ²ENSTA-Bretagne, Lab-STICC, UMR 6285, CNRS, F-29200 Brest

³Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Toulouse ; ⁴Syrlinks, Rennes
allan.pen@univ-brest.fr

Résumé – Dans cet article, plusieurs topologies d'annulation d'auto-interférence au niveau RF/antennaire pour communications Full-Duplex (FD) sont comparées. L'importance du premier niveau de réduction de la Self-Interférence (couplage de l'émission TX vers la réception RX) au niveau antennaire/RF est mise en avant pour différentes applications. Ainsi, plusieurs configurations multi-antennaires sont comparées en mettant en évidence leurs avantages/inconvénients respectifs dans le but d'identifier les techniques les plus pertinentes pour la mise en œuvre d'une liaison FD ISL (Inter-Satellite-Link) entre nano-satellites.

1. Introduction

Une transmission Full-Duplex (ou In Band Full-Duplex) consiste à transmettre et à recevoir simultanément dans la même bande de fréquence. Ce principe a longtemps été considéré comme irréalisable de par le fort niveau de puissance de Tx noyant ou masquant le signal Rx de niveau plus faible. En FD, il est théoriquement possible de diviser la bande de fréquence utilisée par 2 ou de permettre un flux de données double en conservant la même bande de fréquences. Des études récentes ont ouvert la voie à des réalisations pratiques de FD [1]-[2] pour des transmissions bande étroite et à faibles distances. Ces objectifs ont pu être atteints en intervenant à 3 niveaux distincts (Figure 1) du front-end pour obtenir le niveau d'annulation de SI requis :

i) Le premier niveau consiste à obtenir la meilleure isolation possible entre Tx et Rx sur la partie antennaire de manière topologique en générant une forte isolation par opposition d'ondes des Tx sur le Rx [1]-[3]. Ce 1^{er} niveau de SIC (Self-Interference Cancellation) est nécessaire pour ne pas dégrader et saturer les plages dynamiques des composants RF du Rx et du CAN. Il sera mis en évidence par la suite de l'étude l'intérêt d'une telle méthode pour réaliser du Full-Duplex, ainsi que les possibilités de déployer ce concept pour des satellites.

ii) D'autres techniques [4] interviennent au niveau analogique (RF ou bande de base) en recopiant en interne une partie du signal transmis pour le soustraire sur la voie de réception. Dans un cas général, il s'agit de voies d'atténuations et de retards permettant, à la fois, d'adapter le signal transmis en amplitude mais également de générer une opposition de phase de 180°. Ces signaux

sont alors ajoutés à la voie de réception et corrigent la perturbation liée à la SI.

iii) Le niveau de SI final souhaité est en général atteint par un dernier étage de correction numérique. Les algorithmes utilisés permettent d'obtenir une SIC adaptative particulièrement efficace en environnement changeant pour prendre en compte les trajets multiples (NLOS).

Notre objectif est d'étudier la faisabilité d'une transmission Full-Duplex entre nano-satellites (ISL : Inter-Satellite-Link). Dans ce contexte, le niveau de SIC total souhaité est très important, de l'ordre de 110-130dB au minimum, dépendant directement de la distance entre satellites. Plus la distance est importante, plus la différence de puissance de puissance entre Tx et Rx est forte, et plus l'isolation doit être élevée. Le 1^{er} étage antennaire/RF de SIC est donc crucial pour ne pas saturer et/ou introduire de non-linéarités au niveau des composants du front-end et aussi pour obtenir un C/I > -50 dB en entrée de la partie numérique pour espérer obtenir un C/N correspondant à un ENOB de 10 bits au moins. La section suivante de ce papier présente un état de l'art des techniques multi-antennaires de SIC indépendamment des applications visées, puis la section 3 détaille une première approche proposée en contexte ISL FD. Enfin, la conclusion permettra d'établir un premier bilan des limitations de cette approche et de dégager des perspectives.

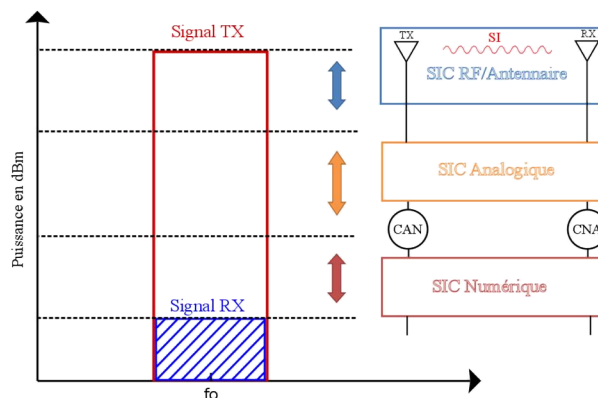


Figure 1. 3 Niveaux d'isolation pour une communication FD.

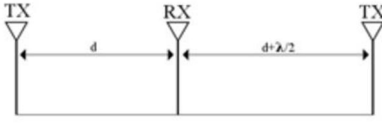
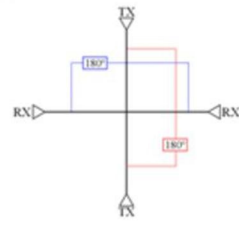
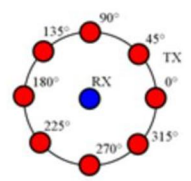
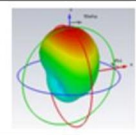
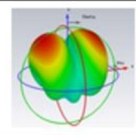
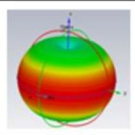
Références	[1]	[2]	[3]
Topologie			
SIC	45 dB	45 dB	55 dB
Bande-passante	40 MHz centré sur 2.45 GHz	625 kHz centré sur 2.45 GHz	0,1 GHz centré sur 2,45GHz
Gain d'antenne			
Avantages	Réalisation simple. Emission/réception possible dans la même direction 1 seul lobe principal	Mise en réseau (MIMO) des antennes possibles	Réseau d'antenne en Tx
Inconvénients	Bandes passantes faibles. Dégradation du lobe principal due à l'espacement inter-antenne Tx	Direction de Tx et Rx différentes Bande passante faible	Gain d'antennes Tx 1 seule antenne en RX

Tableau 1: Récapitulatif de différentes techniques FD multi-antennaires

2. Système FD multi-antennaires

Le système [1] (Tableau 1) décrit une technique d'isolation entre Tx et Rx avec 3 antennes pour que les ondes émises par les 2 Tx soient en opposition de phase au point de placement de Rx. Cette opposition est réalisée grâce au décalage d'une des antennes Tx vers Rx de $\lambda/2$ par rapport à l'autre. Cette technique forcément faible-bande est difficile à étendre à plus de 3 antennes mais a l'avantage de permettre une transmission et une réception dans la même direction.

L'architecture "MIDU" (MIMO and Duplex) à 4 antennes proposée en [2] utilise le même principe conjointement sur les voies Tx et Rx mais à l'aide d'inverseurs (ou déphaseurs de π), ce qui a priori permet un fonctionnement potentiellement large-bande mais ne permet pas un pointage de Tx et Rx vers la même direction. En effet, les 2 Tx émettent en opposition de phase pour créer un minimum de rayonnement au niveau de l'axe des Rx et de manière identique de Rx vers Tx. Une étape intermédiaire peut être réalisée en combinant les avantages de ces deux premières structures. C'est-à-dire, concilier l'avantage d'une transmission et une réception dans la même direction, mais également d'isoler sur les deux axes perpendiculaires les antennes Tx/Rx afin d'obtenir un gain équivalent en transmission et en réception (Figure 2). Les simulations avec des patches microrubans ont montré la possibilité d'obtenir une isolation de 45 dB entre les antennes pour un gain proche de 10 dB. Il est également possible de gagner en isolation en déséquilibrant légèrement l'amplitude d'une seule antenne Tx (pour compenser la distance supplémentaire de $\lambda/2$) et ainsi obtenir les mêmes niveaux lors de la recombinaison des champs sur l'axe de réception.

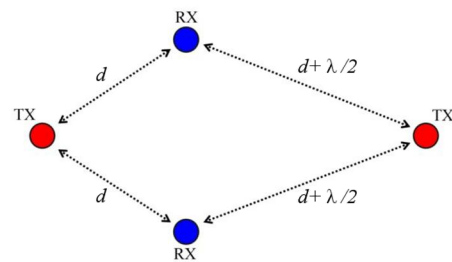


Figure 2. Schéma d'antennes Tx et Rx isolées par un décalage de $\lambda/2$.

Le système STAR (Simultaneous Transmit And Receive) [3] utilise un réseau de monopôles en transmission (point rouge) au-dessus d'un plan de masse circulaire et une antenne de réception (point bleu) surélevée par un réflecteur cylindrique. Les antennes de transmission disposées sous forme d'anneau sont alimentées avec un déphasage progressif couvrant 360° (Ring Antenna) pour générer un champ nul au point de l'antenne Rx. La littérature aborde également un aspect mono-antennaire pour le FD [5]-[6], mais ces techniques ne permettent pas la mise en application de réseaux d'antennes indispensable pour l'obtention d'un gain suffisant dans l'application nanosat.

3. FD dans un contexte ISL

Les contraintes liées à une liaison ISL en nanosat sont notamment d'avoir un gain d'antenne élevé pour une taille maximale de $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ (1U). Un nanosat est un satellite de type LEO (Low Earth Orbit), défini par une orbite inférieure à 2000 km d'altitude. Pour s'affranchir des phénomènes liés aux pertes atmosphériques (scintillations ionosphériques, effet Doppler...) et minimiser les effets de multitrajets, le contexte de l'étude a été défini pour une liaison de

communication ISL. Les normes associées à cette liaison exigent de communiquer dans la bande 25.60-27.35 GHz. Une étude préliminaire a permis de démontrer la faisabilité d'une communication FD dans un contexte de nanosat [4]. Un rapide bilan de liaison permet de mettre en perspectives les attentes concernant l'isolation nécessaire de l'étage RF/antennaire (Figure3) :

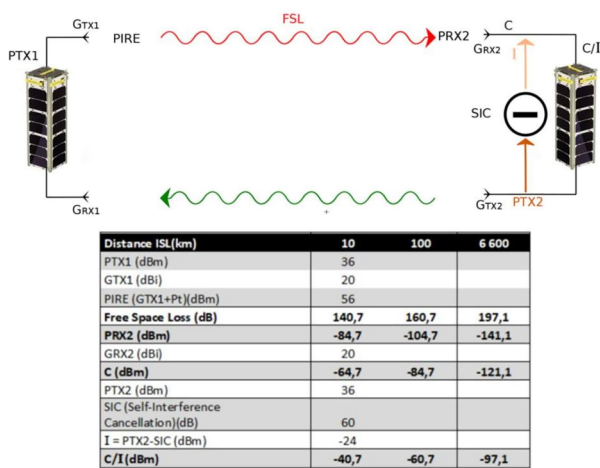
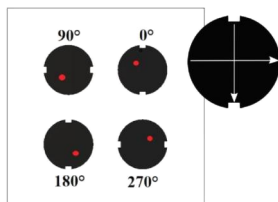


Figure 3. Bilan de liaison d'une communication ISL intégrant une isolation Tx/Rx de 60 dB .

Plusieurs distances ISL sont étudiées pour quantifier l'isolation au niveau du front-end RF nécessaire à une conversion numérique acceptable. L'exemple de SIC choisis étant de 60 dB, le niveau final à atteindre de C/I reflète l'impact de la distance entre 2 nanosats communicants. Plusieurs enjeux sont donc à prendre en compte dans un contexte de satellite à petite plateforme. D'abord un gain important nécessitant la mise en réseau des antennes en Tx et en Rx, ensuite, une forte isolation entre ces deux éléments.

Ainsi en s'inspirant du concept d'opposition d'ondes, un premier prototype a été initié pour un fonctionnement en bande Ka en polarisation circulaire. Les simulations des modèles électromagnétiques sont réalisées avec le logiciel CST Studio.



Les antennes conçues pour la partie Tx sont des antennes patchs microrubans circulaires avec une excitation décalée physiquement de 90° selon le sens antihoraire (Figure 4). Ces points d'excitation sont donc physiquement

opposés selon les diagonales. Les encoches permettent à la fois d'obtenir une polarisation circulaire gauche pour chaque antenne et d'élargir la bande passante en excitant 2 modes orthogonaux. L'antenne Rx est un patch carré servant à quantifier le niveau de SI. Le gain en Tx est de 8dBi et l'isolation obtenue (courbe noire) est supérieure à 36 dB sur la bande 25.40-26.55 GHz (Figure 5). Les contraintes en taille limitent l'espacement entre les Tx et le Rx et apportent un couplage important entre ces

éléments. L'isolation augmente en éloignant les antennes mais en dégradant le diagramme de rayonnement. Le cas le plus défavorable pour une communication ISL correspond à 7 nanosats équirépartis sur une orbite circulaire avec un intervalle de 6 600km et faisant un angle entre eux de 26°, ce qui correspond environ à l'angle d'inclinaison des quatre lobes dans le plan θ .

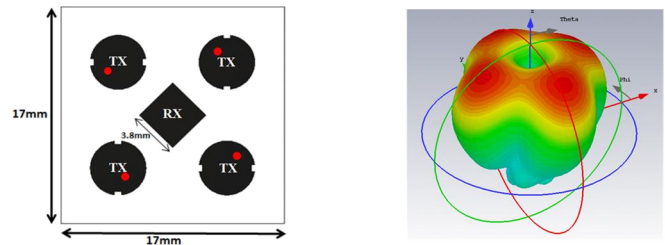


Figure 4. Vue de dessus et diagramme de rayonnement du réseau.

Cette solution n'est cependant pas optimale car uniquement compatible avec cette configuration de nanosats et la puissance est répartie selon 4 lobes principaux.

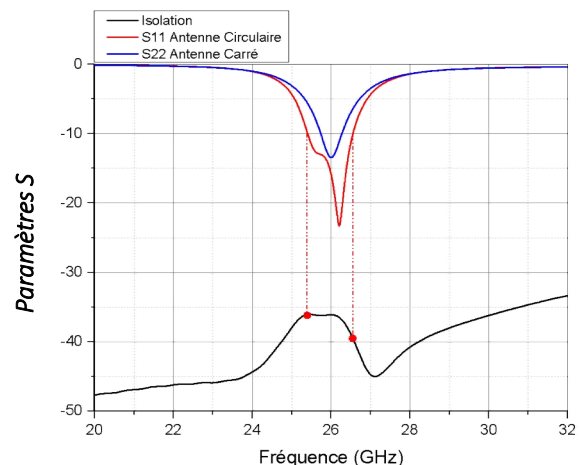


Figure 5. S_{11} des systèmes TX (4 antennes) et RX ; Isolation générée entre Tx (port1) et l'antenne carrée Rx (port 2)

4. Conclusion

Une étude des différentes techniques de réduction de SI au niveau RF/antennaire a été présentée et montre que ce 1^{er} niveau de SIC est capital en FD, tout particulièrement pour une communication ISL nanosat avec une distance importante entre chaque satellite. Dans ce contexte, peu de solutions actuelles offrent de solutions entre fort gain, SIC suffisant et diagramme de rayonnement mono-lobe. En perspective, une autre structure est en cours d'étude sur la base d'un système multi-antennaires TX/RX permettant d'obtenir un seul lobe dans une seule direction commune à l'émission et à la réception, tout en annulant les interférences en champs proche. Cette technique permettra également d'assurer le même gain en émission et en réception.

Références

- [1] M. Jain *et al.*, "Practical real-time full duplex wireless", Proc. ACM MobiCom, 2011
- [2] E. Aryafar, *et al.*, "MIDU: Enabling MIMO full duplex", Proc. ACM MobiCom, 2012.
- [3] K. E. Kolodziej, *et al.*, "Ring array antenna with optimized beamformer for simultaneous transmit and receive", Proc. IEEE APSURSI, 2012
- [4] E. Grayver, *et al.*, "Feasibility of full duplex communications for LEO satellite", *IEEE Aerospace Conference*, 2015.
- [5] H. Nawaz et I. Tekin, « Dual-Polarized, Differential Fed Microstrip Patch Antennas With Very High Interport Isolation for Full-Duplex Communication », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, n° 12, p. 7355-7360, déc. 2017.
- [6] M. E. Knox, « Single antenna full duplex communications using a common carrier », in *WAMICON 2012 IEEE Wireless Microwave Technology Conference*, 2012, p. 1-6.