



**HAL**  
open science

## Influence du commutateur RF dans une architecture radio combinant modulation spatiale et full duplex

Yanni Zhou, Florin Doru Hutu, Guillaume Villemaud

► **To cite this version:**

Yanni Zhou, Florin Doru Hutu, Guillaume Villemaud. Influence du commutateur RF dans une architecture radio combinant modulation spatiale et full duplex. JNM 2022 - Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. pp.934 - 938. hal-03697933

**HAL Id: hal-03697933**

**<https://hal.science/hal-03697933v1>**

Submitted on 17 Jun 2022

**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.

# Influence du commutateur RF dans une architecture radio combinant modulation spatiale et full duplex

Yanni ZHOU, Florin Doru HUTU, Guillaume VILLEMAUD

Univ Lyon, INSA Lyon, Inria, CITI, 6 avenue des Arts, 69621 Villeurbanne  
{nom.prenom}@insa-lyon.fr

**Résumé** — Les approches de type FDSM (Full Duplex et Modulation Spatiale) sont de bonnes candidates pour augmenter les performances des systèmes de communications de type massive MIMO (Multiple Input Multiple Output). L'élément principal dans la mise en place de la partie SM, le commutateur RF, présente des non-idéalités telles que le temps de latence, les pertes d'insertion et l'isolation entre les différentes voies qui peuvent dégrader les performances du système FDSM dans sa globalité. Dans cet article, à travers des simulations système réalistes, l'impact des non-idéalités du commutateur RF sur les performances des récepteurs FDSM est mis en évidence. Le critère d'évaluation choisi est le TEB (taux d'erreur binaire) extrait en fonction du rapport signal à bruit.

## 1. Introduction

Les nouvelles générations de téléphonie mobile doivent toujours adresser des problématiques classiques telles que le temps de latence, la consommation d'énergie et l'efficacité spectrale. La modulation spatiale (Spatial Modulation - SM) en tant que nouvelle technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) a été proposée dans [1]. Une seule chaîne RF est nécessaire pour la SM, ce qui évite les fortes interférences inter-canaux et réduit la consommation d'énergie de la partie analogique du front-end radio. Pour ce type de modulation, les bits d'information sont transmis à la fois par la position de l'antenne activée et par les techniques de modulation traditionnelles.

En ce qui concerne les communications de type full duplex (FD), elles ont été développées pour doubler le débit de données et l'efficacité spectrale de la liaison radio grâce à une transmission bidirectionnelle, simultanée et sur le même canal de communication [2]. Le principal défi des systèmes FD est l'élimination du signal d'auto-interférence (Self-Interference - SI). Étant donné que le signal d'émission local et celui reçu à partir de l'émetteur distant utilisent le même canal de communication et que l'antenne d'émission locale est beaucoup plus proche de celle de réception, le signal d'émission local provoque une forte interférence avec le signal d'intérêt. Différentes techniques se basant sur la connaissance a priori des caractéristiques de ce signal d'auto interférence ainsi que des caractéristiques du canal de propagation (plus spécifiquement du canal d'auto-interférence) permettent d'atténuer

le signal d'auto-interférence jusqu'à des niveaux qui permettent la réception du signal distant.

La combinaison des techniques FD et SM est intéressante car lorsqu'une seule chaîne RF est mise en œuvre, la complexité de l'annulation d'auto-interférence (SIC) n'augmente pas par rapport aux systèmes à entrée unique et sortie unique (Single Input Single Output - SISO), l'efficacité spectrale est alors doublée et la consommation énergétique diminue grâce à l'approche SM. Les avantages du système FDSM sont discutés en détails dans [3, 4].

Dans un récepteur classique, un commutateur RF (duplexeur) est utilisé pour basculer entre l'antenne émettrice et celle utilisée en réception. Dans les émetteurs-récepteurs modernes, un commutateur RF est utilisé pour basculer entre deux antennes réceptrices afin de mettre en place des techniques de diversité d'antenne. Dans le cas de la modulation spatiale, le commutateur RF sera utilisé pour choisir une antenne d'émission parmi plusieurs ce qui permettra d'encoder une partie de l'information à transmettre.

Dans l'état actuel des recherches impliquant des systèmes FDSM, le réalisme dans le fonctionnement du commutateur RF est la plupart du temps ignoré malgré le fait qu'il joue un rôle clef en tant que support pour la sélection d'antennes de la partie SM. Une des caractéristiques importantes d'un commutateur RF est le temps de latence, c'est-à-dire le temps entre le moment où la commande de changer d'antenne émettrice est donnée et le moment où l'antenne commence effectivement à émettre. Pour garantir les performances d'un système FDSM, ce temps de latence doit être nettement inférieur à la période de symbole, ce qui n'est pas le cas systématiquement.

Une autre caractéristique du commutateur RF qui peut impacter les performances du système FDSM est sa perte d'insertion qui traduit les atténuations rajoutées par le commutateur aux signaux qui le traversent. L'impact des pertes d'insertion du commutateur RF sur les performances des techniques de modulation spatiale a été analysé dans [5].

Enfin, une mauvaise isolation entre les différentes sorties du commutateur RF peut augmenter le niveau du signal d'auto interférence, malgré un bon découplage entre l'antenne d'émission et celle de réception.

Dans cette communication, l'impact sur les performances d'une transmission FDSM engendré par les im-

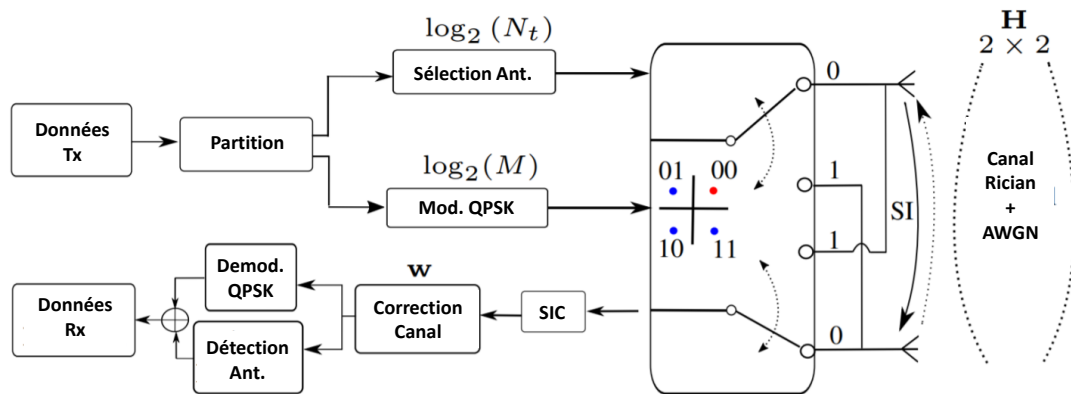


FIGURE 1. Schéma fonctionnel d'un système FDSM 2x2

perfections du commutateur RF est analysé. La section 2 présente la structure de l'émetteur-récepteur FDSM et la place du commutateur RF dans cette chaîne. Les imperfections des commutateurs RF ainsi que leur impact sur le TEB sont discutés en détail dans la section 3. Dans la même section, un moyen de réduire l'impact du temps de latence du commutateur sur les performances du système FDSM est proposé. La section 4 donne la conclusion et souligne quelques pistes d'exploration envisagées.

## 2. Système FDSM avec commutateur RF

Afin d'étudier l'impact des différentes non-idéalités du commutateur RF sur les caractéristiques d'un système de type FDSM, nous considérons une transmission FDSM  $2 \times 2$  (chaque nœud possède deux antennes qui peuvent être utilisées soit à l'émission soit à la réception) sur un canal à évanouissement de Rice. Nous considérons également le fait que les deux nœuds FDSM (*Node A* et *Node B*) ont les mêmes caractéristiques notamment coté front-end radio analogique. Au niveau du récepteur, un module de correction de canal (entre le *Node A* et le *Node B*) et un module d'annulation d'auto-interférence sont implémentés. Pour cette étude, il est supposé une connaissance parfaite du canal de transmission entre le *Node A* et le *Node B*. Il est également considéré le fait que le ratio entre le niveau d'auto-interférence et celui du bruit (self-Interference to Noise Ratio - INR) est de 40 dB.

Le schéma fonctionnel d'un nœud de communication FDSM est présenté sur la Figure 1. A l'émission, le flux binaire à transmettre est séparé en groupes de trois valeurs. Dans ce groupe, le premier bit sera utilisé pour choisir une parmi les deux antennes qui sera utilisée à l'émission. Les deux autres valeurs binaires vont former un des quatre symboles de type QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) qui sera émis par l'antenne choisie. L'autre antenne du nœud de communication FDSM sera utilisée pour récep-

tionner la transmission faite par le nœud distant. Le canal d'auto-interférence est estimé séparément en utilisant un algorithme de type moindres carrés appliqué à une séquence binaire d'une longueur  $10^5$ . Ensuite, une annulation de l'auto-interférence (SIC) analogique est mise en place.

La correction de canal peut être effectuée en utilisant la même stratégie : l'utilisation d'un préambule et d'un algorithme de type moindres carrés. Pour les résultats proposés dans cet article, une connaissance parfaite de la matrice de canal  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$  est considérée.

Dans l'étape de transmission principale, pour déterminer l'antenne du nœud distant qui a émis ainsi que le symbole qui a été transmis, une comparaison entre le symbole reçu et les huit symboles possibles est effectuée. Premièrement, une comparaison entre les quatre symboles et les deux sorties du canal de communication permet de déterminer quelle antenne a émis. Autrement dit, comme la connaissance du canal est parfaite, la sortie du canal qui donne une correspondance parfaite entre un des quatre symboles indique l'antenne d'émission.

Ensuite, en utilisant un estimateur du maximum de vraisemblance, les deux valeurs binaires qui correspondent au symbole reçu sont extraites. Enfin, le résultat de la démodulation du symbole QPSK est concaténé avec celui de la détection d'antenne d'émission.

Le commutateur RF ainsi que les différentes non-idéalités qui peuvent apparaître sont donnés sur la Figure 2. Sur cette figure,  $T_C$  correspond au temps de réponse du commutateur, les atténuations  $A_1$  et  $A_2$  correspondent aux pertes d'insertion entre l'entrée commune et les deux sorties du commutateur.  $I_s$  correspond à la mauvaise isolation entre les deux sorties du commutateur. A titre d'illustration, sur le Tableau 1 sont regroupées les non-idéalités de trois commutateurs RF du commerce.

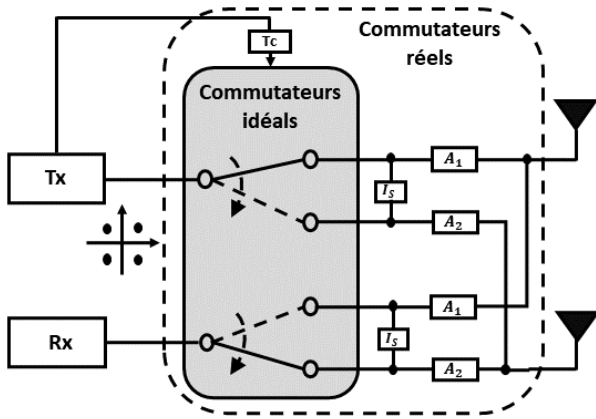


FIGURE 2. Commutateurs RF d'un système FDSM  $2 \times 2$

### 3. Analyse des imperfections des commutateurs RF

Pour les systèmes FDSM, un temps de commutation  $T_c$  non nul dégrade les performances car il augmente les erreurs de détection de symbole. Afin de contrecarrer cette dégradation, une solution serait de réduire le débit de symbole pour tenir compte de ce temps de commutation. Cette affirmation est démontrée par l'étude théorique qui suit.

Dans le cas général, pour un système FDSM, le commutateur RF est censé choisir une antenne d'émission parmi les  $N_t$  antennes disponibles. Chaque antenne peut être considérée comme pouvant être sélectionnée avec une probabilité égale. Pour une antenne  $n_k \in N_t$ , la probabilité  $P_s$  que le commutateur reste en position pour la transmission du symbole suivant peut s'exprimer comme suit :

$$P_s = \frac{1}{N_t}. \quad (1)$$

La probabilité  $P_c$  que le commutateur change de position pour transmettre le symbole qui suit peut être exprimée par :

$$P_c = 1 - P_s = 1 - \frac{1}{N_t}. \quad (2)$$

Pour le premier cas, le temps de transmission du symbole peut être considéré comme  $T_s$ . Pour le second cas, un temps de réponse de commutation supplémentaire  $T_c$  doit être considéré. Par conséquent, la valeur effective du

TABLEAU 1. Exemples de non idéalités type des commutateurs RF du commerce

Réf.	$I_s$ [dB]	$A_1, A_2$ [dB]	$T_C$ [nsec]
RFSP2TRDC12G	35	1.2	150
RFSP2TR0125M	60	1.0	1200
RFSP2TR0002M	70	0.8	5500

temps de transmission pour chaque symbole,  $T_e$ , est :

$$\begin{aligned} T_e &= P_s T_s + P_c (T_s + T_c) \\ &= T_s + T_c - \frac{T_c}{N_t}. \end{aligned} \quad (3)$$

Par conséquent, le taux de symbole moyen exprimé en symboles/seconde, est :

$$R_e = \frac{1}{T_e} = \frac{N_t}{(T_s + T_c) N_t - T_c}. \quad (4)$$

A partir des équations (3) et (4), on peut remarquer le fait que si le temps de symbole  $T_s$  et le temps de commutation  $T_c$  sont fixes, l'augmentation du nombre d'antennes émettrices  $N_t$  allongera le temps effectif de transmission  $T_e$ . De plus, pour un nombre grand d'antennes ( $N_t \rightarrow \infty$ ) le temps effectif de transmission d'un symbole devient :

$$T_e = T_s + T_c \quad (5)$$

Afin de quantifier la dégradation des performances du système FDSM due au temps de commutation non négligeable, une étude de la variation du TEB en fonction du ratio  $E_b/N_0$  est faite en considérant une configuration simple de type 2x2. Pour un jeu de valeurs  $T_s$  et  $T_c$ , cette configuration permet d'obtenir le temps d'émission moyen de symbole le plus court. Les paramètres principaux de la série de simulations sont données dans le tableau 2 et sont présentés en détail dans [6].

TABLEAU 2. Les paramètres principaux de la simulation du système FDSM  $2 \times 2$

Paramètre	Valeur
Fréquence porteuse	2.4 GHz
Type de modulation	QPSK
$T_s$	100 nsec
Nb. val. binaires	$10^6$
Estimation canal auto-interférence	$10^5$
INR	40 dB

Les performances du système FDSM sont analysées selon quatre scénarios. Premièrement, pour avoir une référence, nous considérons un commutateur idéal, c'est à dire  $T_c = 0$ . Ensuite, nous considérons deux scénarios dans lesquels le temps de commutation est une fraction du temps de symbole :  $T_c = 0.1 \cdot T_s$  et  $T_c = 0.2 \cdot T_s$ . Enfin, le dernier scénario étudié est celui pour lequel au niveau du récepteur, la période du symbole est étendue à  $T_e$  tout en gardant un temps de commutation  $T_c = 0.1 \cdot T_s$ .

La Figure 3 montre les performances en termes de taux d'erreur binaire (TEB) dans les quatre scénarios mentionnés. Ces résultats montrent le fait que le TEB augmente à mesure que le temps de commutation augmente. Comme l'on peut remarquer, l'impact du temps de commutation sur les performances du système FDSM peut être réduit si, au niveau du récepteur, le temps de symbole considéré est augmenté à  $T_e$ .

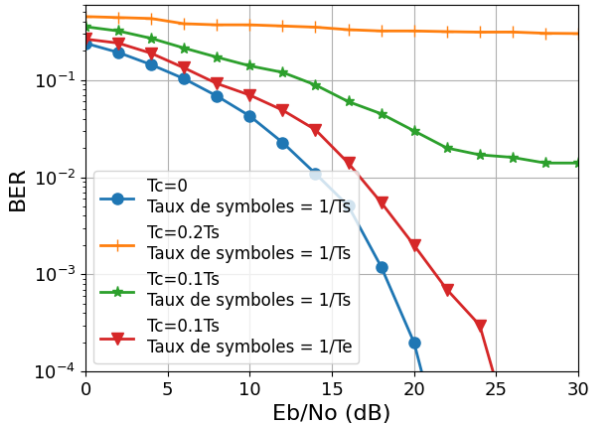


FIGURE 3. TEB du système FDSM en tenant compte du temps de réponse du commutateur ( $T_C$ )

Si on considère le cas simple dans lequel les pertes d'insertion des deux voies du commutateur RF sont identiques,  $A_1 = A_2 = A$ , ces pertes peuvent être considérées comme une atténuation supplémentaire ( $A$ ) dans la chaîne de transmission, et la solution pour résoudre ce problème est triviale. En effet, la solution la plus simple serait de tenir compte de ces pertes d'insertion dans le bilan de puissance global et le compenser par un gain coté émission.

Comme il peut être remarqué à partir des données catalogue des commutateurs RF, leurs atténuations  $A_1$  et  $A_2$  peuvent être différentes entre elles. Plus précisément,  $A_2 = A_1 + \delta \cdot A_1$ . La Figure 4 montre le fait que ces atténuations différentes peuvent dégrader la qualité d'une transmission de type FDSM et, comme attendu, plus l'écart  $\delta$  est grand, plus la dégradation est importante.

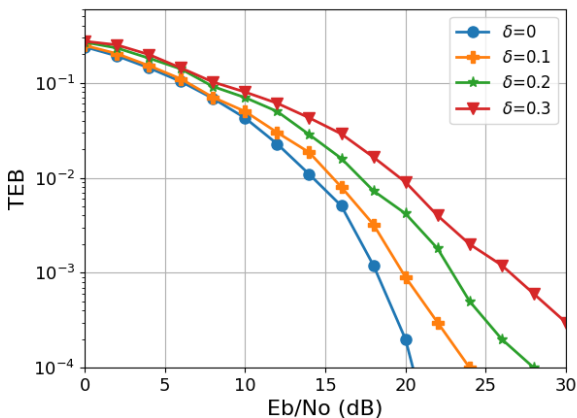


FIGURE 4. TEB du système FDSM pour différents écarts  $\delta$  entre les pertes d'insertion du commutateur

Comme dans le cas des radios FD, les systèmes FDSM nécessitent un très haut degré d'isolation  $I_S$  du commutateur, surtout si le niveau d'auto-interférence est élevé. La puissance du signal d'intérêt provenant de l'extrémité distante peut être inférieure au signal résiduel causé par une mauvaise isolation, ce qui rend difficile la détection ultérieure.

riure.

Comme pour le cas FD classique, diverses techniques d'annulation de l'auto-interférence peuvent être envisagées, notamment des techniques implémentées en analogique ou dans le domaine numérique. L'avantage d'implémenter un algorithme d'annulation de l'auto-interférence dans le domaine numérique est que cette technique pourra prendre en compte des faibles variations de ces pertes d'insertion autour de leur valeur nominale [7].

#### 4. Conclusion

Dans cet article, l'impact des non-idéalités d'un commutateur RF sur les performances des systèmes FDSM est étudié pour la première fois. Les non-idéalités considérées sont le temps de réponse du commutateur, les pertes d'insertion et l'isolation entre les différentes sorties du commutateur. Le critère d'analyse de performances est le TEB et les résultats obtenus quantifient d'une certaine manière la dégradation des performances du système FDSM en présence de ces non-idéalités. De plus, cet article propose une solution pour améliorer les performances du système par rapport au temps de réponse, ce qui entraîne une diminution du TEB. Par la suite, une confrontation des résultats obtenus en simulation avec des résultats expérimentaux est envisagée.

#### Références

- [1] R. Y. Mesleh *et al.*, "Spatial modulation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 2228–2241, 2008.
- [2] X. Xia *et al.*, "A 5G-Enabling Technology : Benefits, Feasibility, and Limitations of In-Band Full-Duplex mMIMO," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, pp. 81–90, 06 2018.
- [3] S. Narayanan *et al.*, "Simultaneous Uplink/Downlink Transmission Using Full-Duplex Single-RF MIMO," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 88–91, 2016.
- [4] J. Zhang *et al.*, "On the Performance of Full-Duplex Two-Way Relay Channels With Spatial Modulation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 12, pp. 4966–4982, 2016.
- [5] O. Hiari and R. Mesleh, "Impact of RF-Switch Insertion Loss on the Performance of Space Modulation Techniques," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 958–961, 2018.
- [6] Y. Zhou *et al.*, "Full Duplex Spatial Modulation System Performance Depending on Self-interference Cancellation Accuracy," in *2020 14<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2020, pp. 1–5.
- [7] D. Korpi *et al.*, "Digital self-interference cancellation under nonideal RF components : Advanced algorithms and measured performance," in *2015 IEEE 16<sup>th</sup> International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2015, pp. 286–290.