

Une nouvelle approche IDP pour améliorer la sécurité de la couche physique et l'efficacité énergétique en OFDM

Khaled TAHKOUBIT¹ Jean-Baptiste DORÉ¹ Jules BURGAT¹ Nicolas CASSIAU¹

¹CEA-Leti, Université Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France.

Résumé – Cet article présente une méthode modifiée de réduction du rapport crête-à-puissance moyenne (PAPR) par dichotomie itérative (M-IDP) pour sécuriser les transmissions OFDM tout en améliorant leur efficacité énergétique. Contrairement à la méthode IDP classique, les sous-signaux sont transmis séparément, augmentant ainsi la complexité de reconstruction pour d'éventuels écouteurs malveillants sans dégrader le bénéfice initial de réduction du PAPR. Des simulations montrent que la méthode M-IDP obtient des performances proches de celles obtenues par injection de bruit artificiel et supérieures à la technique OPLAS, mais sans coût supplémentaire en énergie, ce qui en fait une solution particulièrement adaptée aux systèmes OFDM sécurisés et économes en énergie.

Abstract – We propose a Modified Iterative Dichotomy Peak-to-Average Power Ratio (M-IDP) method for secure and energy-efficient OFDM transmission. Unlike traditional IDP, M-IDP transmits sub-signals separately, enhancing physical-layer security and reducing complexity. Simulation results demonstrate significant improvements in both security and energy efficiency compared to existing methods such as Artificial Noise injection and OPLAS.

1 Introduction

La technologie Multiplexage par Répartition Orthogonale de la Fréquence (OFDM) est aujourd'hui incontournable dans les systèmes de communication sans fil modernes grâce à sa grande efficacité spectrale et à sa robustesse face aux affaiblissements dus aux multi-trajets. Cependant, un défi majeur de l'OFDM réside dans son Rapport Crête à Puissance Moyenne (PAPR) élevé, entraînant des pertes d'efficacité énergétique et des distorsions de signal, notamment lors du passage dans un Amplificateur de Puissance (PA) non linéaire. Ceci oblige à faire fonctionner les PA avec un important recul (back-off), réduisant ainsi leur rendement énergétique.

Plusieurs techniques existent pour réduire le PAPR, parmi lesquelles la méthode Amplification Linéaire par Composants non Linéaires (LINC) [1] qui divise le signal original en deux signaux à enveloppe constante facilement amplifiables par des PA très non linéaires. Malgré son efficacité, LINC présente des difficultés liées à la recombinaison des signaux et à la sensibilité aux déséquilibres entre voies d'amplification.

Récemment, la méthode Réduction de PAPR par Dichotomie Itérative (IDP) [2] s'est imposée en réduisant efficacement le PAPR sans nécessiter l'envoi d'informations auxiliaires. Cette technique décompose le signal OFDM en plusieurs sous-signaux à faible PAPR amplifiés séparément puis recombinaison, améliorant ainsi l'efficacité énergétique sans altérer l'intégrité du signal.

Parallèlement à l'efficacité énergétique, la sécurité des communications sans fil attire également l'attention. Traditionnellement assurée par des méthodes cryptographiques aux couches supérieures, la sécurité de la Couche Physique (PHY) représente une alternative prometteuse. Une approche populaire consiste à injecter du Bruit Artificiel (AN) [3] afin de dégrader le signal pour les écouteurs indésirables, sans affecter le récepteur légitime. Cette approche a notamment été étudiée pour améliorer la confidentialité des systèmes Entrées Multiples Sorties

(MIMO) en exploitant les degrés de liberté spatiaux [4]. D'autres techniques comme la Modulation Directionnelle (DM) ont aussi émergé [5], confinant le signal utile à une direction précise. La combinaison de la DM et de la technique LINC a été proposée dans [6] sous le nom d'Signalisation Linéarisée en Réseau déphasé (OPALS).

Dans ce contexte, nous proposons une modification novatrice de la méthode IDP classique, appelée IDP modifiée (M-IDP). Contrairement à l'approche initiale où les sous-signaux sont sommés avant émission, la méthode proposée consiste à transmettre séparément chaque sous-signal par différentes antennes. Cette séparation exploite la nature aléatoire des sous-signaux, rendant ainsi leur interception par des récepteurs non autorisés beaucoup plus complexe. Nous démontrons par simulation que cette transmission séparée améliore considérablement la sécurité tout en maintenant ou améliorant légèrement le gain énergétique comparativement aux méthodes existantes telles que la OPALS.

Le reste du papier est organisé comme suit : la section II présente le modèle du système, la section III décrit la méthode M-IDP proposée, la section IV évalue les performances par simulations, et enfin, la section V conclut le papier et propose des pistes de recherche futures.

2 Modèle du Système

Cette section présente le modèle utilisé, en mettant l'accent sur la méthode IDP appliquée aux systèmes OFDM.

2.1 Modèle de Canal

Le transmetteur dispose de N antennes espacées de $\lambda/2$, avec λ la longueur d'onde du signal transmis. Le canal est supposé de type AWGN avec propagation en visibilité directe (LoS). En champ lointain, dans la direction θ , le signal subit un déphasage successif de $2\pi d/\lambda \sin \theta$. L'effet du canal se traduit par le vecteur :

$$\mathbf{h}_\theta = \left[1, \dots, e^{-2j\pi(N-1)d/\lambda \sin \theta} \right]. \quad (1)$$

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence ANR-22-PEFT-0005 (PEPR-NF-YACARI).

2.2 Représentation du signal OFDM

Le signal OFDM est constitué de K sous-porteuses orthogonales modulées par des symboles complexes. L'échantillon temporel $x(k)$ du signal s'exprime comme :

$$x(k) = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{r=0}^{K-1} d_r e^{j \frac{2\pi r k}{K}}, \quad (2)$$

où d_r est le symbole modulant la sous-porteuse r . Le PAPR du signal est :

$$\text{PAPR} = \frac{\max_t |x(t)|^2}{E\{|x(t)|^2\}}, \quad (3)$$

nécessitant un recul important de l'amplificateur de puissance, réduisant son efficacité.

2.3 Méthode de Réduction IDP

La méthode IDP décompose le signal OFDM à fort PAPR en M sous-signaux à PAPR réduit, amplifiés séparément. En général, $M = 2$ suffit pour atteindre une réduction significative.

Algorithme 1 : La méthode IDP

```

1 Initialisation :  $\varepsilon_0(k) = x(k)$ ,  $m = 0$ ;
2 Étape 1 :  $R_{m+1} = E\{|\varepsilon_m(k)|\}$ ;
3 Étape 2 :  $x_{m+1}(k) = R_{m+1} \cdot e^{j\varphi_m(k)}$ ;
   //  $\varphi_m(k)$  est la phase de  $\varepsilon_m(k)$ 
4 Étape 3 :  $\varepsilon_{m+1}(k) = \varepsilon_m(k) - x_{m+1}(k)$ ;
5 si  $m < M$  alors
6   |  $m = m + 1$ ;
7   | Retourner à l'Étape 2;
8 sinon
9   | Étape 4 : Calculer  $x_m(k)$ ;
10 fin
```

Ainsi, les deux sous-signaux obtenus sont :

$$x_1(k) = R_1 e^{j\varphi_x(k)} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \varepsilon_2(k), \quad (4)$$

$$x_2(k) = R_2 e^{j\varphi_x(k)} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \varepsilon_2(k), \quad (5)$$

avec $\varphi_x(k)$ la phase originale du signal $x(k)$. Évidemment, $x_1(k) + x_2(k) = x(k)$. Cette décomposition réduit efficacement le PAPR sans transmission d'information auxiliaire, malgré une répartition inégale de puissance entre les sous-signaux [7].

3 Schéma proposé

3.1 Description du système

La Fig. 1 présente le schéma bloc du transmetteur basé sur une modulation OFDM. Pour limiter les pics d'amplitude du signal avant traitement IDP, un seuil d'amplitude T est appliqué après le modulateur OFDM. Après la décomposition IDP, un entrelaceur répartit aléatoirement les sous-signaux sur les différentes antennes. Cet entrelacement, actualisé à chaque instant, permet une Erreur Quadratique Moyenne (MSE) dynamique. On suppose un nombre pair d'antennes, la moitié transmettant chaque

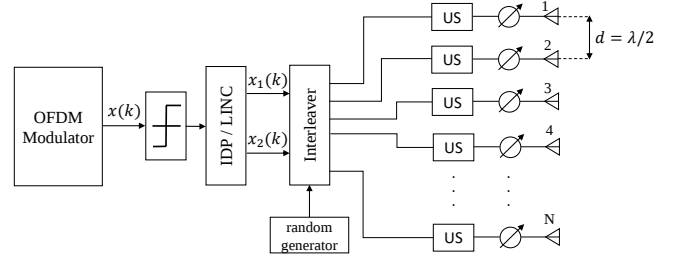


FIGURE 1 : Modèle du système.

sous-signal afin d'assurer une recombinaison parfaite au récepteur légitime.

Ensuite, un Sur-échantillonnage (US) suivi d'une Formation de faisceau (BF) sont appliqués sur chaque antenne. La fonction US perturbe la structure spectrale, produisant un signal pseudo-aléatoire à large bande nécessitant un filtrage pour respecter le masque d'émission. Les poids BF, définis par $\mathbf{w}_{\theta_0} = \exp(-j \arg(\mathbf{h}_{\theta_0}))$, orientent le faisceau dans la direction θ_0 du récepteur légitime.

Contrairement à la méthode IDP classique mono-antenne, qui recombine les composantes $x_1(k)$ et $x_2(k)$ avant émission, notre système transmet séparément ces deux composantes par des antennes distinctes, renforçant ainsi la sécurité de la PHY au prix d'une recombinaison via le canal à la réception. Un facteur ajustable α est introduit pour moduler le seuil IDP initial : $R_1 := \alpha E\{|x(k)|\}$. Ce paramètre contrôle la répartition énergétique entre les composantes, influençant directement le compromis entre sécurité et efficacité énergétique.

3.2 Description mathématique

Le signal reçu dans une direction θ à l'instant k s'écrit :

$$\begin{aligned} y_{\theta}(k) &= \mathbf{h}_{\theta}^t (\mathbf{w}_{\theta_0} \odot [s^0(k), \dots, s^{N-1}(k)]) + \eta(k) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn\tilde{\theta}} s^n(k) + \eta(k), \end{aligned} \quad (6)$$

avec $\tilde{\theta} = 2\pi d(\sin \theta_0 - \sin \theta)/\lambda$ et $\eta(k)$ un bruit AWGN de puissance σ_{noise}^2 . Le produit élément par élément $\odot$ est défini pour $\mathbf{y}, \mathbf{y}' \in \mathbb{C}^N$ par $(\mathbf{y} \odot \mathbf{y}')_n = y_n y'_n$.

Le signal en sortie du US est donné par :

$$s^n(k) = \sum_{m=0}^{L-1} g[m] \cdot \begin{cases} x_{p(k)}^n \left[\frac{k-m}{D} \right], & \text{si } k-m \equiv 0[D] \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (7)$$

où D est le facteur d'US, g le filtre associé, et $x_{p(k)}^n$ désigne $x_1(k)$ ou $x_2(k)$ selon l'entrelaceur dynamique $p(k)$, modélisé par :

$$\mathbf{x}_{p(k)} = \mathbf{\Pi}_k \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

avec $\mathbf{\Pi}_k \in \mathcal{M}_{N \times 2}(\{0, 1\})$, matrice de permutation aléatoire respectant la contrainte d'équilibre ($N/2$ signaux de chaque type).

Dans la direction légitime ($\theta = \theta_0$, donc $\tilde{\theta} = 0$), le signal devient simplement :

$$y_{\theta_0}(k) = \eta(k) + \frac{N}{2} \sum_{m=0}^{L-1} g[m] \cdot \begin{cases} x \left[\frac{k-m}{D} \right], & \text{si } k-m \equiv 0[D] \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (9)$$

Ainsi, le récepteur légitime obtient directement le signal OFDM sur-échantillonné envoyé, indépendamment de l'entrelacement utilisé à l'émission.

Dans une direction arbitraire θ , le signal reçu s'écrit :

$$y_\theta(k) = \eta(k) + \sum_{m=0}^{L-1} g[m] \times \sum_{n=0}^{N-1} \begin{cases} x_{p(k)}^n \left[\frac{k-m}{D} \right] e^{jn\theta}, & \text{si } k-m \equiv 0[D] \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (10)$$

Le signal reçu par un écouteur est donc une combinaison à phase variable de signaux IDP, altérée différemment à chaque instant par l'entrelacement dynamique, générant ainsi un effet de MSE. Chaque composante IDP n'étant qu'une fraction du signal utile, l'écouteur reçoit un signal brouillé s'apparentant à du bruit auto-généré, principe fondateur du schéma proposé pour assurer la sécurité de la PHY.

4 Résultats Numériques

Cette section présente des résultats de simulations comparant la méthode proposée M-IDP aux techniques OPALS et AN en matière de sécurité de la PHY et d'efficacité énergétique. Les simulations considèrent un signal OFDM à K sous-porteuses transmis par un réseau de N antennes.

Le récepteur légitime est placé face au réseau d'antennes (angle 0°), tandis qu'un écouteur potentiel est placé à différents angles pour simuler plusieurs scénarios d'interception.

Pour comparer équitablement les différentes méthodes, nous considérons les métriques suivantes :

- **MSE** en fonction de l'angle de l'écouteur : définie par

$$\text{MSE} = E \left[\left| d_r - \hat{d}_r \right|^2 \right],$$

où $\hat{d}_r$ est le symbole QAM estimé au récepteur. Une MSE élevée indique une meilleure sécurité.

- **Puissance reçue** en fonction de l'angle de l'écouteur : normalisée par rapport à un signal OFDM classique avec BF sans réduction IDP ni LINC dans la direction 0° .
- **Densité Spectrale de Puissance (PSD)** : pour analyser l'empreinte spectrale des signaux.
- **Perte en gain de formation de faisceau (BF Loss)** : indique la dégradation du gain due à la transmission séparée des sous-signaux IDP. Ce résultat est normalisé par rapport au système OFDM classique sans sécurité ajoutée, montrant ainsi la pénalité introduite par les méthodes sécurisées.
- **Rapport Instantané Amplitude-Crête (IAPR)** évalué à une probabilité de dépassement de 10^{-5} .

4.1 Densité spectrale de puissance

La Fig. 2 présente la PSD des différentes formes d'onde : OFDM classique, OPALS, M-IDP ($\alpha = 1$) et OFDM avec injection de AN ($\Gamma = 1$). Le paramètre Γ représente le rapport entre la puissance du bruit injecté et celle

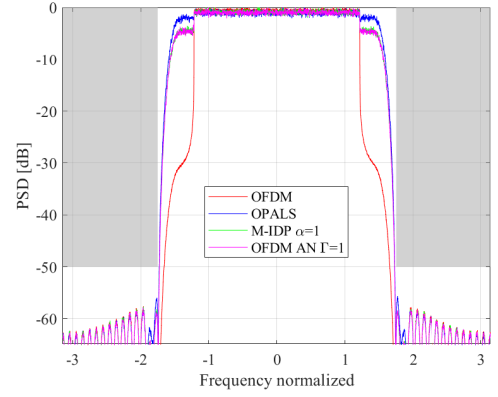


FIGURE 2 : Densité spectrale de puissance de diverses formes d'onde, OFDM, OPALS, IPD avec $\alpha = 1$ et OFDM avec AN avec $\Gamma = 1$.

du signal utile. Comme prévu, toutes les formes d'onde conservent un profil spectral similaire, assurant ainsi le maintien des caractéristiques spectrales fondamentales de l'OFDM, même après réduction du PAPR ou injection d'AN. En particulier, la méthode M-IDP présente des performances spectrales comparables à l'OFDM avec AN.

4.2 Analyse comparative des critères

Le choix du seuil de saturation T après modulation OFDM influence notablement les performances, particulièrement pour la technique OPALS utilisant des signaux à enveloppe constante.

Le Tableau I compare les méthodes OFDM, OFDM avec AN, OPALS et M-IDP selon plusieurs critères essentiels : l'IAPR, la MSE hors axe, et la perte en gain de BF.

4.2.1 Analyse de sécurité : MSE hors axe

La valeur de la MSE aux angles hors axe (2° et 20°) reflète la difficulté pour un écouteur à reconstruire le signal transmis. L'OFDM standard ne fournit aucune sécurité notable (MSE proche de -63 dB). L'AN améliore la sécurité proportionnellement au rapport de puissance injectée Γ , au prix d'une perte d'efficacité énergétique. La technique OPALS offre la meilleure sécurité spatiale, atteignant une MSE de 1.5 dB à 20° , mais entraîne de fortes pertes en gain BF (jusqu'à -9.9 dB). La méthode M-IDP propose un compromis équilibré avec une MSE jusqu'à 0.5 dB à 20° et des pertes BF modérées (entre -2 dB et -4.1 dB). La sécurité augmente avec la valeur du facteur α .

4.2.2 Perte en gain de faisceau (BF Loss)

La perte BF mesure la dégradation dans la direction utile causée par les mécanismes de sécurité. L'injection AN induit une perte variant de -1.7 dB à -3.9 dB selon Γ . OPALS subit les pertes les plus importantes (-9.9 dB), tandis que M-IDP reste modérée (-2 dB à -4.1 dB), confirmant son rôle intermédiaire entre sécurité et performance.

4.2.3 IAPR

L'IAPR, représentant les crêtes instantanées de puissance, est particulièrement élevé pour l'OFDM classique

TABLE 1 : Comparaison des performances des différents systèmes

Méthode	T [dB]	Paramètres (α , Γ)	MSE 0° [dB]	MSE 2° [dB]	MSE 20° [dB]	BF Loss [dB]	IAPR [dB]
OFDM	10	-, -	-63.4	-63.4	-63.4	0.0	10.1
	8	-, -	-43.4	-43.4	-43.4	0.0	9.8
	6	-, -	-30.0	-30.0	-30.0	0.0	8.8
AN	10	-, 0.5	-63.4	-22.2	-0.9	-1.7	10.5
	8	-, 0.5	-43.4	-22.2	-0.9	-1.7	10.3
	6	-, 0.5	-30.0	-21.5	-0.9	-1.7	9.8
	10	-, 1.0	-63.4	-19.2	0.0	-3.0	10.5
	8	-, 1.0	-43.4	-19.2	0.0	-3.0	10.3
	6	-, 1.0	-30.0	-18.9	0.0	-3.0	9.8
	10	-, 1.5	-63.4	-17.5	0.4	-3.9	10.5
	8	-, 1.5	-43.4	-17.5	0.4	-3.9	10.3
	6	-, 1.5	-30.0	-17.2	0.4	-3.9	9.8
OPALS	10	-, -	-63.4	-10	1.5	-6.0	6.6
	8	-, -	-43.4	-12.2	1.3	-7.9	6.4
	6	-, -	-30.0	-14.3	1.0	-9.9	6.3
IDP	10	0.80, -	-63.4	-21.5	-0.7	-2.0	10.3
	8	0.80, -	-43.4	-21.5	-0.7	-2.0	9.8
	6	0.80, -	-30.0	-20.9	-0.7	-2.0	9.1
	10	1.00, -	-63.4	-19.2	0.0	-3.0	10.0
	8	1.00, -	-43.4	-19.1	0.0	-3.0	9.7
	6	1.00, -	-30.0	-18.8	0.0	-3.0	9.0
	10	1.20, -	-63.4	-17.2	0.5	-4.1	9.4
	8	1.20, -	-43.4	-17.2	0.5	-4.1	9.0
	6	1.20, -	-30.0	-17.0	0.5	-4.1	8.5

(10.1 dB), tandis qu'OPALS le réduit fortement (6.3 dB), optimisant l'efficacité énergétique. La méthode M-IDP présente des valeurs intermédiaires (8.5 dB à 10.3 dB) selon le paramètre α . À l'inverse, l'injection AN ne réduit pas l'IAPR, voire l'aggrave légèrement.

4.2.4 Synthèse des compromis

Globalement, la méthode M-IDP apparaît comme un bon compromis entre efficacité énergétique, sécurité de la PHY et performance du BF. Contrairement à OPALS — qui offre une forte distorsion hors axe et une excellente réduction d'IAPR au prix d'une importante dégradation en gain BF —, et aux systèmes à injection de AN — améliorant la sécurité par ajout de puissance avec une augmentation modérée de l'IAPR —, la méthode M-IDP intègre naturellement la sécurité à la structure du signal sans puissance additionnelle. Elle permet un équilibre ajustable entre la distorsion hors axe et la qualité du signal légitime via le paramètre α , offrant aux concepteurs la possibilité d'adapter dynamiquement le compromis sécurité-performance. Comparée à l'OFDM classique, dépourvue de sécurité physique et présentant un fort IAPR, la méthode M-IDP améliore simultanément l'efficacité spectrale, réduit l'IAPR, et limite la perte en gain BF, ce qui en fait une solution prometteuse pour des transmissions OFDM sécurisées et économes en énergie dans les systèmes sans fil de nouvelle génération.

5 Conclusion

Nous avons proposé une méthode M-IDP pour renforcer conjointement la sécurité de la couche physique et l'efficacité énergétique des transmissions OFDM. En transmettant séparément les sous-signaux IDP sur différentes antennes, la reconstruction par un écouteur est complexifiée sans perte notable en efficacité énergétique. Nos résultats

montrent que M-IDP offre un excellent compromis entre la sécurité (MSE hors axe), la réduction d'IAPR et les performances du BF, surpassant les techniques AN et OPALS sans coût énergétique additionnel. Le paramètre ajustable α offre en outre une flexibilité d'adaptation aux besoins opérationnels, rendant cette approche particulièrement attractive pour les futurs systèmes sans fil sécurisés et économes en énergie.

Références

1. COX, D. Linear amplification with nonlinear components. *IEEE transactions on Communications* (1974).
2. TAHKOUBIT, K., ALI-PACHA, A., SHAIK, H. & ROVIRAS, D. Iterative dichotomy PAPR reduction method for multicarrier waveforms. *IEEE Communications Letters* (2019).
3. GOEL, S. & NEGI, R. Guaranteeing secrecy using artificial noise. *IEEE TWC* (2008).
4. AJAYI, I., MEDJAHDI, Y., ZAYANI, R., MROUEH, L. & KADDOUR, F. Z. PAPR-aware artificial noise for secure massive MIMO downlink. *IEEE Access* (2022).
5. SHU, F. *et al.* Directional modulation : A physical-layer security solution to B5G and future wireless networks. *IEEE Network* (2019).
6. TOLLEFSON, E., JORDAN, B. R. & GAEDDERT, J. D. *Out-phased array linearized signaling (OPALS) : A practical approach to physical layer encryption in MILCOM* (2015).
7. TAHKOUBIT, K., SHAIK, H., ROVIRAS, D., FACI, S. & ALI-PACHA, A. Generalized iterative dichotomy PAPR reduction method for multicarrier waveforms. *IEEE Access* (2021).