

تحسين تقنية BO-DPD للهوائي الفائق Massive MIMO في أنظمة الجيل الخامس الخلوية 5G

د.م. فادي غصنة*

م. عدي قاسم**

(تاريخ الإيداع 14 / 9 / 2019 . قُبل للنشر 25 / 10 / 2020)

□ الملخص □

يهتم هذا البحث بدراسة خطية مضخمات الطاقة المستخدمة في أنظمة الإرسال في هوائيات الجيل الخامس الخلوية وتحليل أداء عملها مع الأمواج الميلي مترية. تتألف التقنية من مضخمات طاقة PAS، يسبق كل منها جهاز مشوه رقمي Digital Predistortion، وحلقة تغذية عكسية Feedback، ومزيجات طور Phase shifters، ومبدلات Switches، بالإضافة إلى بقية عناصر نظام الإرسال. جرى تحليل هذه التقنية الجديدة من أجل تحسين خطية مضخمات الطاقة أثناء عملها مع الأمواج الميلي مترية التي تؤثر سلباً وبشكل كبير على خطية المضخمات، وهذا ما سيحسن من اتجاهية الحزمة القلمية الصادرة عن مصفوفة الهوائي، وتم تنفيذ هذه التقنية في هوائي فائق Massive MIMO بتشكيل شعاعي هجين Hybrid Beamforming وباستخدام إشارة بتردد ميلي متري 66GHz، وتمت مقارنة النتائج بتعديل إشارة من النوع OFDM و FBMC.

الكلمات المفتاحية: المشوه الرقمي DPD، الهوائي الفائق Massive MIMO، الأمواج الميلي مترية mm Waves

*أستاذ مساعد في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات، كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، جامعة طرطوس، سوريا

** طالب دراسات عليا (ماجستير) في اختصاص هندسة تكنولوجيا الاتصالات، كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، جامعة

طرطوس، سوريا

A Novel approach for Enhancing BO-DPD Technique of Massive MIMO Antenna in 5G cellular Systems

*Fadi Ghosna
**Odai Kassem

(Received 14 / 9 / 2020 . Accepted 25 / 10/ 2020)

□ABSTRACT□

This work is concerned with studying linearization of power Amplifiers used in transmission systems in 5G Massive MIMO antennas and analyzing its performance with Mm Waves. This technique consists of PAs, Digital Predistortion DPD, Feedback, Phase shifters, Switches, and the rest of transmission equipments.

An original analysis of this novel technique has been investigated to enhance PAs linearity with Mm waves which negatively and extremely affect PAs linearity, which enhance the main pencil beam directionality. This technique has been implemented on 66GHz mmwave Hybrid Beamforming Massive MIMO antenna. The results has been compared between OFDM and FBMS Modulations.

Key words: DPD, Massive MIMO, mm waves.

* Assistant Professor in Department of Communications Technology Engineering, Faculty of Information & Communication Technology Engineering, Tartous University, Syria

* Postgraduate student (Master) in Department of Communications Technology Engineering, Faculty of Information & Communication Technology Engineering, Tartous University, Syria

مقدمة:

تعد تقنية الهوائيات متعددة الدخل والخرج الفائقة Massive MIMO من التقنيات الواعدة في مجال الاتصالات الخلوية، حيث يصل عدد عناصر الهوائيات في الهوائي الفائق إلى بضع مئات وبالتالي لا يمكن تطبيق تشكيل شعاعي رقمي بالكامل وذلك بسبب التكلفة الاقتصادية العالية جداً لتطبيقها، لذلك لابد من اللجوء إلى تطبيق تقنية مناسبة توازن ما بين الموثوقية والفعالية من جهة، وما بين الجدوى الاقتصادية من جهة أخرى. هنا يبرز دور التشكيل الشعاعي الهجين Hybrid Beamforming الذي يعمل على الدمج ما بين التشكيل الرقمي Digital Beamforming والتشكيل التماثلي Analog Beamforming في محاولة للحصول على إيجابيات كلا التقنيتين، وتجاوز السلبيات قدر الإمكان لكل منهما.

يجري الاتجاه إلى استخدام الأمواج الملي مترية mm Waves في هوائيات الجيل الخامس الفائقة لما لها من إيجابيات كبيرة في توفير عرض حزمة أكبر للتطبيقات وتلبية متطلبات التزايد الهائل في أعداد الأجهزة المتصلة بالشبكة، ويؤثر استخدام مثل هذه الأمواج سلباً وبشكل كبير على خطية مضخمات الطاقة المستخدمة في الهوائي المرسل.

هدف البحث:

يهدف هذه البحث إلى تحسين اتجاهية الحزمة الشعاعية الصادرة عن الهوائي الفائق وتحسين كفاءة الطاقة وتوجيهها ضمن الحزمة القلمية المرغوبة والتخفيف قدر الإمكان من استهلاك الطاقة وذلك بتحسين خطية مضخمات الطاقة وفق هيكلية BO-DPD واستبدال مزيجات الطور Phase Shifters بمبدلات Switches، ومن ثم استخدام التعديلين OFDM وFBMC ومقارنة عرض الحزمة وكثافة الطاقة ضمن الحزمة المرغوبة قبل وبعد إجراء التحسينات المقترحة، ومقارنة أداء التعديلين السابقين.

طرائق البحث ومواده:

أولاً- الدراسات المرجعية:

❖ مقارنة بين مزيج الطور Phase Shifter والمبدل Switch:

يدخل مزيج الطور في تصميم هيكلية منظومة الإرسال الراديوية، وفي هيكلية تشكيل الحزمة الهجين Hybrid Beamforming يشكّل مزيج الطور جزءاً من القسم التماثلي ضمن الهيكلية، حيث تتلخص فكرة الهيكلية الهجينة في إدخال شبكة تماثلية Analog Network فيما بين السلاسل الراديوية و مصفوفة الهوائيات، وتتألف الشبكة التماثلية من مزيجات الطور والموازج Combiners ونشير إليها عادة باسم شبكة مزيجات الطور [1,2,3,4] Phase Shifters Network، كما يوجد أيضاً شبكة تماثلية مكونة من مبدلات، وتُسمى بشبكات المبدلات [5] Switches Networks، يمكن استخدام شبكة مكونة من مزيج من مزيجات الطور و المبدلات حيث تتميز المبدلات باستهلاكها المنخفض للطاقة مقارنةً مع مزيجات الطور، لكن يأتي هذا على حساب الأداء حيث يعتبر أداء المبدلات أضعف إلى حد معين من أداء مزيجات الطور [4,5]، وبالمقارنة بين أداء ثلاثة أنواع من الشبكات التماثلية، الشبكة الأولى هي شبكة مزيجات الطور، والشبكة الثانية هي شبكة المبدلات، والشبكة الثالثة هي شبكة مكونة من مزيجات الطور والمبدلات معاً، نجد أن الشبكة المختلطة التي

تضم مزيجاً من المبدلات ومزيجات الطور هي الشبكة التي تقدم الأداء الأفضل [6]، وبالتالي في تشكل خياراً جذاباً من أجل التطبيق العملي.

❖ مقارنة بين التعديل الترددي المتعامد OFDM والتعديل بالمرشحات الحزمية FBMC:

يزداد الضغط على الطيف الترددي يوماً بعد يوم، والمشعب أصلاً بالترددات المشغولة، مع زيادة عدد الأجهزة المتصلة بالشبكة، ودخول أجهزة انترنت الأشياء IOT وانتشارها أيضاً واستخدامها على نحو متزايد للنطاق الترددي المحدود، مما يؤدي إلى نقصان في الترددات الشاغرة، يعتبر التعديل متعدد الحوامل Multicarrier Modulation من أكثر الطرق الشائعة للتعديل من أجل الدخول إلى المجال الترددي [7,8] ويعرّف على أنه صيغة من صيغ التقسيم الترددي، حيث تُرسل البيانات عبر القناة وفق حوامل فرعية subcarriers متعددة، وتتم عملية التعديل متعدد الحوامل وفق طرق متعددة من بينها التعديل الترددي المتعامد OFDM والتعديل بالمرشحات الحزمية [10] FBMC.

تمتلك تقنية OFDM مقاومة عالية للتداخل Interference والضجيج بسبب خاصية الحوامل الفرعية التعامدية، وتدعم مقاومة تداخل الرموز Inter-symbol عبر حزمة حماية Cyclic Prefix قبل وبعد كل رموز من رموز OFDM، وتساهم هذه الحزم أيضاً في تسهيل عملية الإرسال متعدد المسارات Multipath propagation.

يخفف استخدام حزم الحماية من فعالية الطيف الترددي المستخدم، كون هذه الحزم هي ترددات فارغة من أية إشارة، وبالتالي تحجز مكاناً فارغاً ضمن طيف الإشارة المرسل، وتأتي تقنية التعديل بالمرشحات الحزمية FBMC لتحل هذه المشكلة [7,9,11]، حيث أنها لا تستخدم حزم حماية بل يتم ترشيح كل حامل فرعي subcarrier بمفرده وبالتالي تقدم فعالية طيفية أفضل من الفعالية الطيفية التي يقدمها التعديل الترددي المتعامد [10,11].

هيمنت تقنية OFDM على الاتصالات متعددة الحوامل في السنوات الأخيرة، فيما أبدت تقنية المرشحات الحزمية FBMC فعالية أكبر في بعض التطبيقات والظروف، وعلى الرغم من أن تقنية المرشحات الحزمية تمت دراستها قبل ابتكار تقنية OFDM، إلا أنها تعود مؤخراً لتعيد الانتباه إليها بقوة [9].

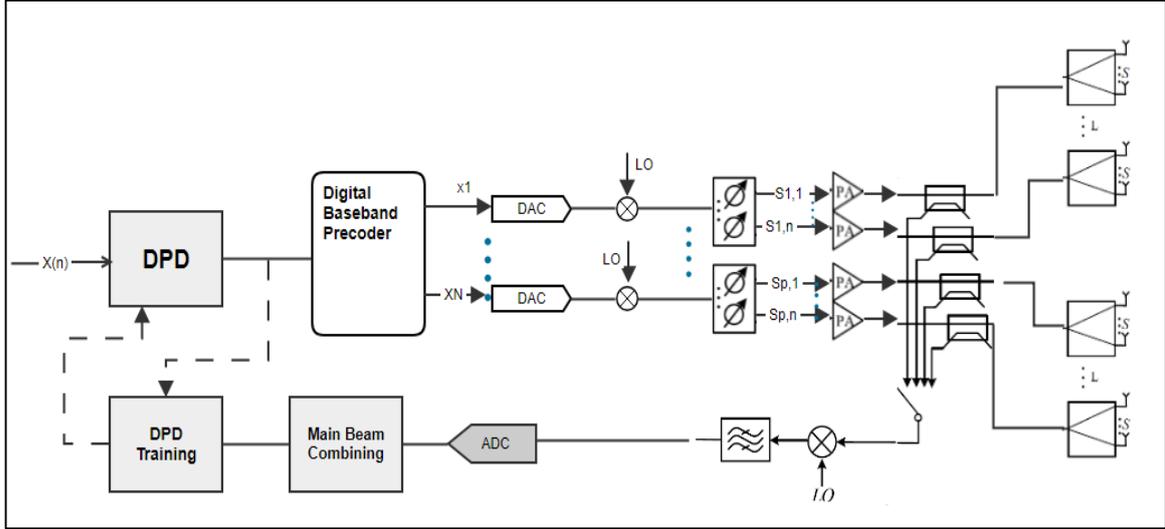
ثانياً- تقنية التشويه الرقمي الموجه بالشعاع Beam-oriented Digital Predistortion:

يجب على مضخم الطاقة في منظومة الإرسال أن يحافظ على خطيته قدر الإمكان، والخطية تعني تضخيم الإشارة دون المساس بمحتواها، فالخطية هنا تعني ربح المضخم بشكل أو بآخر، ومع زيادة التردد المستخدم تنخفض الخطية بشكل ملحوظ، ويصبح ما يسمى بتأثيرات الذاكرة Memory Effects في الترددات الملي مترية المنتظر استخدامها في تطبيقات الجيل الخامس كبيراً بشكل لا يمكن تجاهله [17].

تعد تقنية ما قبل التشويه الرقمي Digital Predistortion (DPD) تقنية مهمة جداً في عملية رفع خطية مضخمات الطاقة PA Linearization [12,13]، حيث يمكن لنموذج DPD أن يتوقع التشوهات غير الخطية لمضخم الطاقة ومن ثم إلغاؤها عبر إضافة إشارة تصحيح لدخل مضخم الطاقة [15,16]، وفي الهوائيات الفائقة فإن عدد السلاسل الرقمية أقل بكثير من عدد مضخمات الطاقة بسبب تطبيق هيكلية التشكيل الشعاعي الهجين Hybrid Beamforming وبالتالي لا يمكن تطبيق حلقة تغذية عكسية لكل مضخم طاقة على حدى ولذلك يتم دمجها بحلقة تغذية عكسية واحدة [17,18]، وتتلخص تقنية BO-DPD في استخدام حلقة تغذية عكسية وحيدة و مشوه Predistorer وحيد مشترك لكل مضخمات الطاقة [19] وهذا ما يبسط من بنية الهوائي الفائق بشكل كبير، وعند استخدام المبدلات في هذه التقنية، فإن ذلك سيزيد من فعالية التغذية العكسية لأنه سيقلل من عدد مضخمات الطاقة المتصلة -حسب مبدأ عمل المبدل- خلال واحدة الزمن إلى النصف، مما يمنح حلقة التغذية العكسية دقة أفضل.

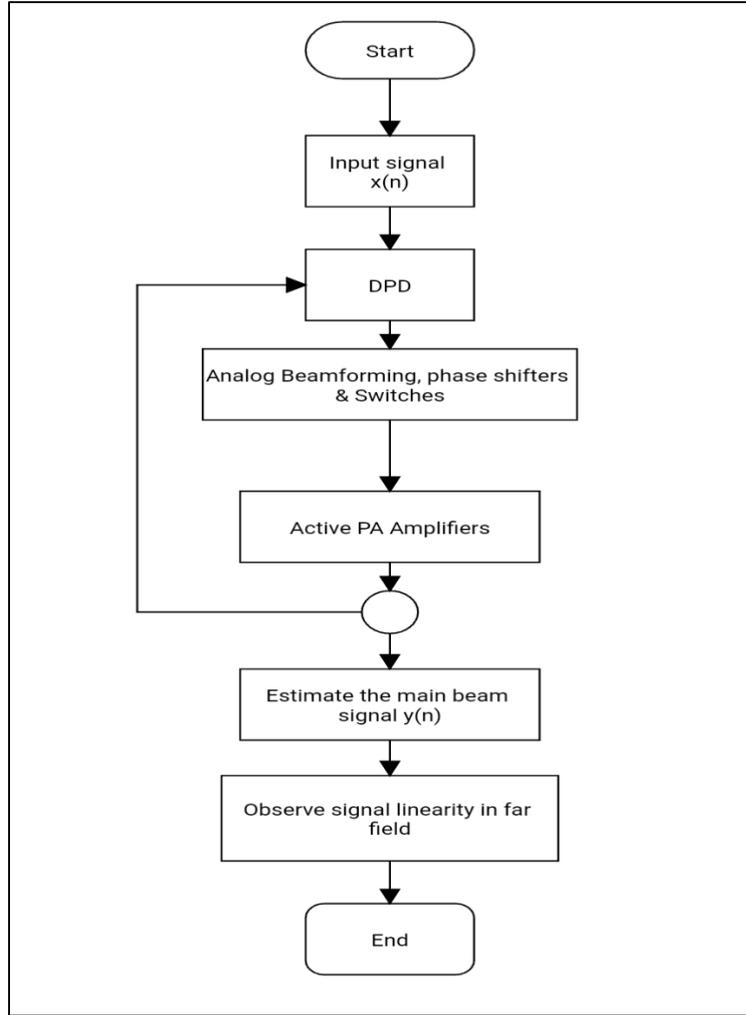
ثالثاً- نموذج المحاكاة:

تم إجراء هذه المحاكاة على برنامج Matlab Simulink 2019a باستخدام هوائي فائق Massive MIMO يعمل بموجة ميلي مترية ترددها 66GHz وفق الهيكلية الهجينة Hybrid Beamforming ، وبتقنية التشوه الرقمي الموجّه بالشعاع BO-DPD المعدّلة باستخدام مبدلات Switches، ونطبّق نظامي تعديل رقمي لتتم المقارنة بين أداء كل منهما ضمن سياق البحث هما التعديل الترددي المتعامد OFDM، والتعديل بالمرشحات الحزمية FBMC ويبين الشكل(1) المخطط بنية مصفوفة الهوائي وفق الهيكلية الهجينة بتقنية التشوه الرقمي الموجّه بالشعاع.



الشكل(1) مصفوفة الهوائي وفق الهيكلية الهجينة بتقنية التشوه الرقمي الموجّه بالشعاع.

وبين الشكل (2) المخطط التدفقي لخوارزمية BO-DPD المعدلة اعتماداً على المبدلات.



تم تعديل الإشارة المرسله في البداية بالتعديل الترددي المتعامد OFDM حيث يمكن كتابة طيف سلسلة فورييه لرمز OFDM كما يلي [20,21]:

$$X_s(w) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X_s[k] \delta_c(w - k\Delta w)$$

وفي المجال الزمني تصبح الإشارة من الشكل:

$$\tilde{x}_s(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T_u}} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} x_s[k] e^{j\Delta w k t} & 0 \leq t < T_u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

وبعد إضافة حزمة حماية Cycle Prefix في بداية ونهاية كل رمز OFDM تصبح الإشارة من الشكل:

$$\tilde{x}'_s = \begin{cases} \tilde{x}_s(t + T_u - T_g) & 0 \leq t < T_g \\ \tilde{x}_s(t - T_g) & T_g < t < T_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

حيث T_g هي الفترة الزمنية لحزمة الحماية، $T_s = T_u + T_g$ هي الفترة الزمنية التي يشغلها رمز OFDM مع حزمتي الحماية قبله وبعده، وبالتالي فإن الإشارة المُرسلة بالشكل العقدي هي مجموع رموز OFDM في المجال الزمني كما يلي:

$$\tilde{S}(t) = \sum_{s=0}^{s-1} \tilde{x}'_s(1 - sT_s)$$

وبعد تحميل الإشارة على تردد الحامل تصبح جاهزة للإرسال بالشكل الآتي:

$$S(t) = \text{Re}\{\tilde{S}(t)e^{j2\pi f_c t}\};$$

أما عند استخدام التعديل بالمرشحات الحزمية FBMC، فلنفترض أنه لدينا $x_{m,n}$ رمز عقدي مُرسل عبر الحامل الفرعي m في الزمن n ، و يمكن التعبير عن الإشارة المرسلّة بالمعادلة الآتية [22]:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M g_{m,n}(t)x_{m,n}(t)$$

$$g_{m,n}(t) = p_{tx}(t - \frac{NT_0}{2})e^{j2\pi F(t-NT_0)}e^{j\theta_{m,n}}$$

حيث p_{tx} هي نبضة التشكيل الأساسية، $g_{m,n}(t)$ هي التردد المُزاح، و T_0 التباعد الزمني، F هو مقدار التباعد في بين الحوامل الفرعية، N هو العدد الكلي للرموز، و M هو العدد الكلي للحوامل الفرعية، ونلاحظ هنا في معادلة الإشارة المرسلّة أننا لم نضع حزم حماية كما فعلنا في تعديل OFDM وبالتالي فإن الفعالية الطيفية في تعديل FBMC أفضل منها في تعديل OFDM مما يشكل خياراً جذاباً للتطبيق العملي بدلاً من تعديل OFDM.

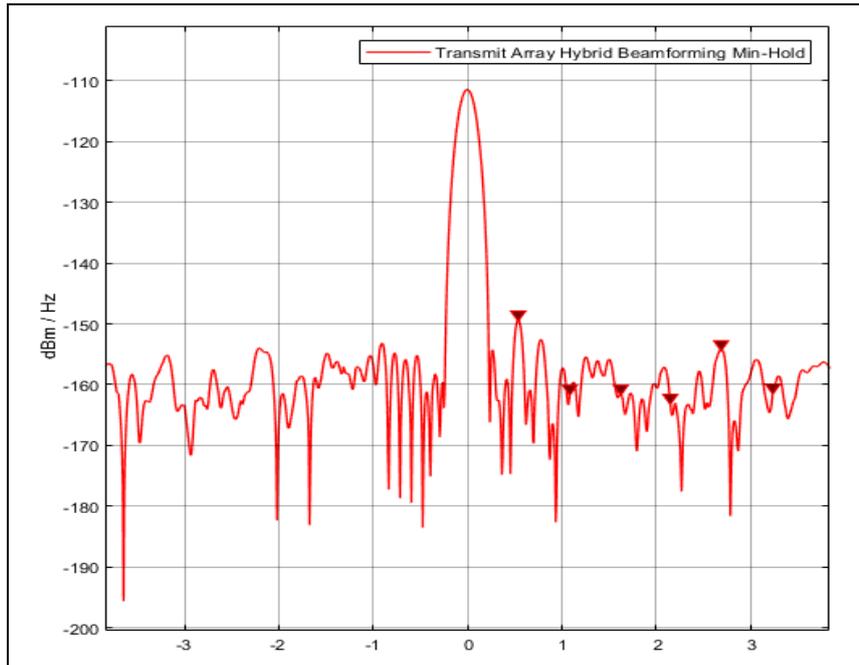
النتائج والمناقشة:

تم إجراء المحاكاة من أجل الحصول على أفضل هيكلية ممكنة تحقق اتجاهية أعلى للحزمة القلمية pencilBeam الصادرة عن مصفوفة الهوائي الفائق، مع التخفيف من الوريقات الجانبية قدر الإمكان وبالتالي زيادة فعالية الطاقة المُستهلكة، وتمت المقارنة بين سيناريوهات عديدة: حيث يتضمن السيناريو الأول الهيكلية المقترحة ويتعديل OFDM قبل إجراء التعديل على تقنية (BO-DPD) Without Switch OFDM Modulation)، ويتضمن السيناريو الثاني تطبيق التعديل المقترح وتطبيق تعديل OFDM على الإشارة وباستخدام مبدلات مثالية عديمة استهلاك الطاقة وعديمة الضياعات، أما السيناريو الثالث فيتضمن نفس الإجراءات وفق السيناريو السابق لكن باستخدام التعديل بالمرشحات الحزمية، في حين أن السيناريو الرابع يتم بمبدلات حقيقية موصولة بطريقة الوصل الجزئي Sub-connected switch وتعديل OFDM للإشارة، أما السيناريو الخامس فيتضمن تطبيق تعديل المرشحات الحزمية على الإشارة وبمبدلات حقيقية موصولة بطريقة الوصل الجزئي أيضاً، في حين ان السيناريوهين الأخيرين مشابهان للسيناريوهين السابقين من حيث نوع التعديل المستخدم فيما نستخدم مبدلات حقيقية موصولة بطريقة الوصل الكلي fully-connected switch، ونركز في المقارنة على متغيرين هما طاقة القناة Channel power وعرض الحزمة التي تشغلها القناة، ونجد في الجدول الآتي النتائج التي حصلنا عليها كما يلي:

الجدول (1) ملخص نتائج المحاكاة من أجل اختبار أداء تقنية BO-DPD بأنماط توصيل ميدلات مختلفة وينمطي تعديل مختلفين OFDM و FBMC

	Channel power (dBm)	Channel power (Watt)	Occupied BW (KHz)
Without Switch OFDM Modulation	-71.319	$19.300 * e^{-12}$	312.827
With ideal Switch OFDM Modulation	-72.898	$13.944 * e^{-12}$	312.687
With ideal Switch FBMC Modulation	-72.855	$14.080 * e^{-12}$	340.8021
Real sub-connected Switch OFDM Modulation	-80.346	$9.234 * e^{-12}$	320.1014
Real sub-connected Switch FBMC Modulation	-80.117	$9.734 * e^{-12}$	320.839
Real fully-connected Switch OFDM Modulation	-59.306	$23.564 * e^{-12}$	312.243
Real fully-connected Switch FBMC Modulation	-59.305	$23.570 * e^{-12}$	312.529

يبين الجدول (1) أن تطبيق المبدلات بطريقة التوصيل الكلي Fully-connected قد حقق النتائج الأفضل من حيث عرض القناة الأصغر وبالتالي الاتجاهية الأفضل - بالإضافة إلى طاقة قناة أكبر، مع فارق بسيط جداً بين التعديل الترددي المتعامد والتعديل بالمرشحات الحزمية. تبدو الوريقة الرئيسية الصادرة عن مصفوفة الهوائي بطريقة التوصيل الكلي كما هو مبين في الشكل الآتي، ونلاحظ فيها الاتجاهية العالية للوريقة الرئيسية وتركيز كثافة الطاقة وفق اتجاهية عالية.



الشكل (2) كثافة الطاقة الصادرة عن مصفوفة الهوائي وفق طريقة التوصيل الكلي.

إن تطبيق مبدلات مثالية (معدومة الضياع والضجيج بالتداخل والتسريب) يعطي نتائج جيدة فيما يخص عرض حزمة القناة عند تعديل الإشارة وفق التعديل الترددي المتعامد، لكن نلاحظ انخفاض طاقة القناة، وذلك بسبب انخفاض عدد عناصر الهوائيات الفعالة بمقدار النصف خلال واحدة الزمن، وذلك حسب مبدأ عمل المبدل.

الاستنتاجات والتوصيات المستقبلية:

من أجل إجراء تحسين على اتجاهية الحزمة الشعاعية الصادرة من مصفوفة هوائي فائق Massive MIMO قمنا بإجراء تحسين على تقنية BO-DPD بإدخال المبدلات إلى هيكلية التشكيل الشعاعي الهجين Hybrid Beamforming والتي نُفّذت على ثلاث طرق وهي: تطبيق المبدلات المثالية، المبدلات بطريقة الوصل الجزئي Sub-Connected Switches، والمبدلات بطريقة الوصل الكلي Fully-Connected Switch، وقمنا بمقارنة أداء عمل نظام الهوائي وفق سيناريوهات تتضمن الطرق السابقة مع تعديل الإشارة المرسله بالتعديل الترددي المتعامد OFDM، وبالتعديل بالمرشحات الحزمية FBMC.

تظهر النتائج أن ربط المبدلات بطريقة Fully-Connected Switch مع تعديل الإشارة المرسله بالتعديل OFDM هي الطريقة الأفضل من أجل الحصول على اتجاهية أفضل وتحسين كفاءة الطاقة المستهلكة.

المراجع:

- [1] O. El Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. Heath, "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," IEEE transactions on wireless communications, vol. 13, March 2014.
- [2] C. Rusu, R. Mendez-Rial, N. Gonz´alez-Prelcic, and R. Heath, "Low complexity hybrid precoding strategies for millimeter wave communications systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, Dec 2016.
- [3] X. Yu, J.-C. Shen, J. Zhang, and K. B. Letaief, "Alternating minimization algorithms for hybrid precoding in millimeter wave mimo systems," J. Sel. Topics Signal Processing, vol. 10, no. 3, pp. 485–500, 2016.
- [4] F. Sohrabi and W. Yu, "Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays," IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 10, pp. 501–513, April 2016.
- [5] R. M´endez-Rial, C. Rusu, N. Gonz´alez-Prelcic, A. Alkhateeb, and R. Heath, "Hybrid MIMO architectures for millimeter wave communications: Phase shifters or switches?," IEEE Access, vol. 4, Jun 2016.

- [6] Yi Jiang Yimeng Feng, Mahesh K. Varanasi, "Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Unified Solution for Both Phase Shifter and Switch Networks", IEEE 2018
- [7] T. Luo, F. Lin, T. Jiang, M. Guizani, and W. Chen, "Multicarrier modulation and cooperative communication in multihop cognitive radio networks," IEEE Wireless Communications, vol. 18, pp. 38–45, Feb. 2011.
- [8] S. P. Hanna Bogucka, Alexander M. Wyglinski and A. Kliks, "Spectrally agile multicarrier waveforms for opportunistic wireless access," IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 6, pp. 108–115, 2011.
- [9] B. Farhang-Boroujeny, "OFDM versus filter bank multicarrier," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 28, pp. 92–112, May 2011.
- [10] J. A. Viholainen and M. Renfors, "Implementation of parallel cosine and sine modulated filter banks for equalized transmultiplexer systems," IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 6, pp. 3625–3628, 2001.
- [11] A. Viholainen, T. Ihalainen, T. H. Stitz, M. Renfors, and M. Bellanger, "Prototype filter design for filter bank based multicarrier transmission", 17th European Signal Processing Conference, pp. 1359–1363, Aug. 2009.
- [12] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, pp. 186–195, Feb. 2014.
- [13] S. Chen, B. Ren, Q. Gao, S. Kang, S. Sun, and K. Niu, "Pattern division multiple access (PDMA)—A novel non-orthogonal multiple access for fifth-generation radio networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 66, no. 4, pp. 3185–3196, Apr. 2017.
- [14] S. Amin, P. N. Landin, P. Handel, and D. Rönnow, "Behavioral modeling and linearization of crosstalk and memory effects in RF MIMO transmitters," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 62, no. 4, pp. 810–823, Apr. 2014.
- [15] F. M. Ghannouchi and O. Hammi, "Behavioural modeling and predistortion," IEEE Microw. Mag., vol. 10, no. 7, pp. 52–64, Dec. 2009.
- [16] L. Ding et al., "A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials," IEEE Trans. Commun., vol. 52, no. 1, pp. 159–165, Jan. 2004.
- [17] S. Choi and E.-R. Jeong, "Digital predistortion based on combined feedback in MIMO transmitters," IEEE Commun. Lett., vol. 16, no. 10, pp. 1572–1575, Oct. 2012.
- [18] L. Cabria, J. A. García, A. Tazón, and A. Mediavilla, "Nonlinear distortion reduction in active arrays taking advantage of their spatial power-combining properties," Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng., vol. 16, no. 9, pp. 24–33, Jan. 2006.
- [19] Xin Liu, Qian Zhang, Wenhua Chen, Haigang Feng, Long Chen, Fadhel M. Ghannouchi, and Zhenghe Feng, "Beam-Oriented Digital Predistortion for 5G Massive MIMO Hybrid Beamforming Transmitters", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, 2018
- [20] M. I. Rahman et al., "Comparison of Various Modulation and Access Schemes under Ideal Channel Conditions", JADE Project Deliverable, D3.1[1], Aalborg University, Denmark, July 2004.
- [21] R. V. Nee and R. Prasad, "OFDM for Wireless Multimedia Communications", Artech House Publishers, Norwood, MA, USA, 2000.
- [22] R. Nissel, S. Schwarz, and M. Rupp, "Filter Bank Multicarrier Modulation Schemes for Future Mobile Communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 35, no. 8, pp. 1768–1782, 2017.