



الجمهورية العربية السورية

جامعة طرطوس

كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات

قسم هندسة الاتصالات

# تحسين أنظمة هوائيات MIMO في الجيل الخامس باستخدام تقنيات التشكيل الشعاعي الهجين

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة تكنولوجيا الاتصالات – قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات-كلية  
هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات

إعداد المهندس:

**عدي خليل قاسم**

بإشراف الدكتور المهندس:

**فادي جودت غصنة**

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

2021/2020م

1443/1442هـ

للعام الدراسي

قُدِّمَ هذا البحث استكمالاً لمتطلبات نيل درجة الماجستير في اختصاص هندسة الاتصالات في كليّة هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات جامعة طرطوس.

This thesis has been submitted as partial fulfillment of the requirements for Master degree of Communication Engineering at the Faculty of information and Communications Engineering, Tartous University.

# الشكر والنقابة

عرفانا بالجميل وتقديراً للجهد والعطاء يتقدم الباحث بأسمى آيات الشكر إلى مناهل العلم:

رئاسة جامعة طرطوس

كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات "عمادة وهيئة تدريسية وإداريين"

قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات "رئيس القسم وأعضاء الهيئة التدريسية"

واجب العرفان بالجميل يقتضي من الباحث أن يتقدم بمجزيل الشكر والامتنان للسيد:

## الدكتور فادي جودت خصنه

الذي تفضل بالإشراف على هذه الرسالة

كما يشكر الباحث عائلته وأصدقائه وكل من مَدَّ يد العون لإنجاز هذا البحث

## المُلخَص

تعد تقنية الهوائيات متعددة الدخل والخرج الكثيفة Massive MIMO من التقنيات الواعدة في مجال الاتصالات الخلوية، وتنعقد الآمال حولها في رفع معدل نقل البيانات إلى مستوى أعلى تلبي حاجة المستخدم، ويتجلى ذلك في شبكات الجيل الخامس.

تستخدم أنظمة هوائيات MIMO العادية تقنيات رقمية بشكل كامل في تشكيل الحزمة الشعاعية للهوائي Digital beamforming، لكن مع هوائيات Massive MIMO التي يصل عدد عناصر الهوائيات فيها إلى بضع مئات فإن التقنية الرقمية تصبح هنا صعبة التطبيق، وذلك بسبب التكلفة الاقتصادية العالية جداً لتطبيقها، لذلك لا بد من اللجوء إلى تطبيق تقنية مناسبة توازن ما بين الموثوقية والفعالية من جهة، وما بين الجدوى الاقتصادية من جهة أخرى، وهنا 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.

إن استخدام الأمواج الملي مترية في هوائيات Massive MIMO يؤثر بشكل سلبي على خواص مضخمات الطاقة الخطية، مما يجعل أداءها أقل خطية وهذا يترك أثراً سلبياً على فعالية المنظومة وخاصة فيما يتعلق باتجاهية الوريقة الرئيسية للشعاع الصادر عن الهوائي وعدد الوريقات الجانبية الغير مرغوبة والتي تزيد من ضياع الطاقة، لذلك لا بد من التخفيف من الآثار السلبية هذه.

يتضمن هذا البحث مقترحاً لتحسين هيكلية التشكيل الشعاعي الهجين بشكل يزيد من اتجاهية الحزمة الشعاعية وتركيز الطاقة ضمن الوريقة الرئيسية للشعاع، كما يتضمن البحث مقارنة بين أداء النظام باستخدام تقنية التعديل الترددي المتعامد OFDM وتقنية المرشحات الحزمية FBMC وتحديد التقنية الأفضل والأنسب من نواحي متعددة أهمها فعالية الطيف الترددي وتخفيض استهلاك الطاقة.

**كلمات مفتاحية:** الهوائي الكثيف، التشكيل الشعاعي الهجين، المشوّه الرقمي، مُزيج الطور، التعديل بالمرشحات الحزمية، الأمواج الملي مترية.

## جدول المحتويات

الصفحة	الموضوع
iii	شكر وتقدير
iv	الملخص
v-iiiv	قائمة المحتويات
iiiiv-x	قائمة الأشكال
xi	قائمة الجداول
xii-xiii	جدول المصطلحات
xiv	جدول الاختصارات
٩-١	<b>الفصل الأول: الإطار العام للبحث</b>
٢	١-١-١- مقدمة
٣	١-٢-١- مشكلة البحث
٣	١-٣-١- هدف البحث
٤	١-٤-١- أهمية البحث
٥	١-٥-١- مبررات البحث
٥	١-٦-١- فروض البحث
٥	١-٧-١- متغيرات البحث
٥	١-٨-١- أدوات البحث
٦	١-٩-١- الدراسات السابقة
٨	١-١٠-١- ملخص الدراسات المرجعية
٩	١-١١-١- محتويات الرسالة
٢٧-١٠	<b>الفصل الثاني: التشكيل الشعاعي الهجين في أنظمة الجيل الخامس الخلوية</b>
١١	٢-١-١- مقدمة
١٣	٢-٢-١- الاختيار البسيط للهوائي
١٤	٢-٣-١- البنية الهيكلية للسلسلة الراديوية
١٦	٢-٤-١- التشكيل الهجين في أنظمة اتصال نقطة إلى نقطة
١٧	٢-٥-١- الهوائيات الكثيفة
١٨	٢-٦-١- أنظمة الأمواج الميلي مترية

١٩	٧-٢- الهوائيات الكثيفة بالأمواج الملي مترية
٢٠	٨-٢- النمذجة السلوكية
٢٣	٩-٢- التشوّه الرقمي الموجه بالشعاع
٢٤	١٠-٢- التعديل الترددي المتعامد في مواجهة المرشحات الحزمية متعددة الحوامل
٢٥	١١-٢- النموذج التحليلي لنظام مرسل
٢٧	١٢-٢- التعديل متعدد الحوامل بالمرشحات الحزمية FBMC
٢٨	١٣-٢- خلاصة
٤٥-٢٩	<b>الفصل الثالث: القسم العملي</b>
٣٠	١-٣- مقدّمة
٣٠	٢-٣- التحديات التي تواجه تصميم الهوائي الكثيف في الجيل الخامس
٣١	٣-٣- تصميم مصفوفة هوائي ذكي بالتشكيل الشعاعي
٣١	٤-٣- التشكيل الشعاعي الهجين
٣٣	٥-٣- تصميم المصفوفة
٣٥	٦-٣- وصف نموذج النظام
٣٦	٧-٣- مرسل QPSK
٣٨	٨-٣- المرسل الراديوي
٤٤	٩-٣- المشكل الشعاعي لمصفوفة الإرسال
٤٥	١٠-٣- مصفوفة الإستقبال
٤٥	١١-٣- مستقبل التعديل
٤٦	١٢-٣- خلاصة
٦٠-٤٧	<b>الفصل الرابع: النتائج العملية</b>
٤٨	١-٤- مقدمة
٤٨	٢-٤- سيناريوهات العمل
٤٩	١-٢-٤- السيناريو الأول بدون تطبيق أية تعديلات
٥٠	٢-٢-٤- السيناريو الثاني بتطبيق تقنية BO-DPD وتعديل الإشارة بتعديل OFDM
٥١	٣-٢-٤- السيناريو الثالث بتطبيق تقنية BO-DPD وتعديل الإشارة بتعديل FBMC
٥٢	٤-٢-٤- السيناريو الرابع بتطبيق مبدلات مثالية مع تعديل FBMC
٥٣	٥-٢-٤- السيناريو الخامس بتطبيق مبدلات مثالية مع تعديل OFDM
٥٤	٦-٢-٤- السيناريو السادس بتطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي مع تعديل الإشارة بتعديل OFDM

٥٥	٧-٢-٤- السيناريو السابع تطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي مع تعديل الإشارة بتعديل FBMC
٥٦	٨-٢-٤- السيناريو الثامن تطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الكلي مع تعديل الإشارة بتعديل OFDM
٥٧	٩-٢-٤- السيناريو التاسع تطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي مع تعديل الإشارة بتعديل FBMC
٥٧	٣-٤- النتائج
٦٠	٤-٤- خلاصة
٦٣-٦١	<b>الفصل الخامس:</b>
٦٢	١-٥ مقدمة
٦٢	٢-٥ الملخص والخاتمة
٦٣	٣-٥ المقترحات والتوصيات
٦٤	<b>المراجع</b>
٧٠	<b>الملاحق</b>

## قائمة الأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	الرقم
١٢	مخطط صندوقي لرمز رقمي	١-٢
١٣	مخطط صندوقي لرمز تشابهي	٢-٢
١٤	أنماط توصيل مزيجات الطور	٣-٢
١٥	هيكليات السلاسل الراديوية	٤-٢
١٦	المخطط الصندوقي لنظام ارسال واستقبال هجين وفق سيناريو نقطة إلى نقطة	٥-٢
٢١	مخطط صندوقي للمشوه الرقمي والمضخم	٦-٢
٢٢	العلاقة العكسية بين الخطية والفعالية في مضخم الطاقة	٧-٢
٢٢	مخطط موسّع لمضخم الطاقة مع آلية لزيادة الخطية	٨-٢
٢٣	تقنية BO-DPD	٩-٢
٢٧	المخطط التحليلي لمراحل إرسال رمز OFDM	١٠-٢
٣٢	هيكلية التشكيل الشعاعي بالنمط الهجين	١-٣
٣٤	الواجهة الرئيسية لتطبيق sensor Array Analyzer App	٢-٣
٣٥	مصفوفة إرسال راديوي مع البارامترات ضمنها	٣-٣
٣٦	مرسل ومستقبل راديوي للأموح الميلي مترية بالتشكيل الشعاعي الهجين	٤-٣
٣٧	النظام المرسل الفرعي بتعديل OFDM	٥-٣
٣٨	النظام المرسل الفرعي بتعديل FBMC	٦-٣
٣٩	مصفوفة الإرسال	٧-٣

٤٠	مصفوفة إرسال جزئية	٨-٣
٤٢	ربط المبدلات وفق طريقة الربط الكلي	٩-٣
٤٣	ربط المبدلات بالطريقة الجزئية	١٠-٣
٤٤	المشكل الشعاعي لمصفوفة الإرسال	١١-٣
٤٥	مصفوفة الاستقبال	١٢-٣
٤٦	مستقبل التعديل QPSK	١٣-٣
٤٩	طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بدون إجراء تعديلات	١-٤
٥٠	طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتطبيق تقنية BO-DPD	٢-٤
٥١	طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتعديل FBMC وبدون مبدلات	٣-٤
٥٢	طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتطبيق مبدلات مثالية وتعديل FBMC	٤-٤
٥٣	طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتطبيق مبدلات مثالية وتعديل OFDM	٥-٤
٥٤	طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي وتعديل OFDM	٦-٤
٥٥	طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي وتعديل FBMC	٧-٤
٥٦	طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بمبدلات موصولة بطريقة الربط الكلي وتعديل OFDM	٨-٤

٥٧	طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسلية بمبدلات موصولة بطريقة الربط الكلي وتعديل FBMC	٩-٤
٥٩	نتائج المحاكاة من أجل اختبار أداء تقنية BO-DPD بأنماط توصيل مبدلات مختلفة و بنمطي تعديل مختلفين OFDM و FBMC	١٠-٤
٥٩	المدة الزمنية للسيناريوهات أثناء عملية المحاكاة	١١-٤

## فهرس الجداول

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

## جدول المصطلحات

المعنى باللغة الانكليزية	المعنى باللغة العربية
Massive MIMO	النظام متعدد المداخل والمخارج الكثيفة
Channel Capacity	سعة القناة
Digital Beamforming	تشكيل الحزمة الرقمي
Analog Beamforming	تشكيل الحزمة التماثلي
Radio Frequency (RF) Chain	سلسلة التردد الراديوي
Spatial Multiplexing	تعدد الإرسال المكاني
Hybrid Beamforming	تشكيل حزمة الشعاع الهجين
Power Amplifier (PA)	مضخم الطاقة
Digital Chain	السلاسل الرقمية
Spectral Broadening	التوسع الطيفي
In-band Distortion	تشويه الحزمة
OFDM	التعديل الترددي المتعامد
Memory Effects	تأثيرات الذاكرة
Crossover Predistorter (CO-DPD)	المشوه التصالبي
Crosstalk Canceling Predistorter(CTC-DPD)	المشوه المزيل للتسميع
Beam-Oriented DPD	المشوه الرقمي شعاعي التوجه
Filter Bank Multicarrier (FBMC)	المرشحات الحزمية متعددة الحوامل
Cycle Prefix	البادئة الدورية
Carrier Aggregation	تجميع الحوامل
Phase shifters	المزيجات الطورية
Ultra Dense Networks UDNs	الشبكات عالية الكثافة
mmWave Massive MIMO	الهوائيات الكثيفة بالأمواج الملي مترية
Beamforming	التشكيل الشعاعي
Mixer	مازج
Digital Precoder	مرمّز رقمي
Channel Matrix	مصفوفة القناة

Hard selection	الاختيار المعقد
Soft Selection	الاختيار البسيط
Phase Shifter	مزيج الطور
Sub-connected structure	البنية ذات الاتصال الجزئي
Fully-connected structure	البنية ذات الاتصال الكلي
Spectral Efficiency	الفعالية الطيفية
Phased Array	المصفوفة الطورية
Frequency-dependent Loss	الضياع المتعلق بالتردد
Channel State Information	معلومات حالة القناة
Spectrum allocation	تجميع الطيف الترددي
Multicarrier modulation	التعديل متعدد الحوامل
Attenuation	التضعيف
Inter symbol Interference	تداخل الرمز
Nonlinearity	اللاخطية
Digital Predistortion	ما قبل التشويه الرقمي
Behavioral Modeling	النمذجة السلوكية
Inverse DFT	تحويل فورييه العكسي
Cyclic Prefix	حزمة الحماية
Analysis Filters	مرشحات التحليل
Synthesis Filters	مرشحات التوليف
Bandpass Filters	مرشحات تمرير الحزمة
Mutual Coupling	الاقتران المتبادل
Natural Imperfections	النواقص الطبيعية

## جدول الاختصارات

الاختصار	المعنى باللغة الانكليزية	المعنى باللغة العربية
RF Chain	Radio Frequency Chain	سلسلة التردد الراديوي
PA	Power Amplifier	مضخم الطاقة
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	التعديل الترددي المتعامد
UDNs	Ultra-dense Networks	الشبكات عالية الكثافة
Mm Waves	Millie Meter Waves	الأمواج الملي مترية
ADC	Analog-to-Digital Converter	محول تشابهي رقمي
DAC	Digital to Analog Converter	محول رقمي تشابهي
SE	Spectral Efficiency	الفعالية الطيفية
CSI	Channel State Information	معلومات حالة القناة
MCM	Multicarrier modulation	التعديل متعدد الحوامل
ISI	Inter Symbol Interference	تداخل الرمز
DFT	Discrete Fourier Transform	تحويل فورييه
CP	Cycle Prefix	حزمة الحماية

الفصل الأول  
الإطار العام للبحث

# الفصل الأول

## ١ - الإطار العام للبحث

### ١-١- مقدمة:

مع الازدياد المستمر في عدد أجهزة الاتصال والخدمات التي تقدمها هذه الأجهزة، أصبحت نظم الاتصالات الخلوية في حاجة أكبر لتلبية متطلبات أكبر للمستخدمين، كمعدلات نقل بيانات أعلى، وتأخير زمني أقل، ويعتبر النظام الخلوي من الجيل الخامس المنتظر تطبيقه مع بداية عام ٢٠٢٠ النظام المنتظر لحل معظم هذه المعضلات التقنية، والذي يتطلب تغيير جوهري في البنية التحتية للشبكات الخلوية الموجودة حالياً، ومن التقنيات المتوقعة تطبيقها في الجيل الخامس هي أنظمة الهوائيات متعددة الدخل والخرج الكثيفة massive MIMO [١]. والتي تعتبر نموذج من هوائيات MIMO متعددة المستخدمين لكن مع عدد هوائيات أكبر بكثير مما يعطيها إمكانيات أكبر في تحقيق معدلات نقل بيانات أعلى، وتحقيق اتجاهية أفضل للشعاع الصادر عن مصفوفة الهوائيات وبالتالي فعالية أكبر للطيف الترددي [٢].

يمكن للهوائيات من النوع Massive MIMO زيادة سعة قناة الاتصال Channel capacity إلى عشرة أضعاف سعة الشبكة الخلوية من الجيل الرابع 4G، ويحسن من فعالية الحزمة الترددية المنتشرة من الهوائيات إلى مئة ضعف، وهذه الزيادة في السعة تنتج بشكل أساسي من خاصية التضعيف المكاني spatial multiplexing لدى هوائيات Massive MIMO [٣].

وعلى الرغم من المميزات الهامة التي تقدمها هوائيات Massive MIMO، إلا أن تنفيذها على أرض الواقع يتطلب تكلفة عالية جداً واستهلاك مرتفع للطاقة لذلك يهدف بحثنا هنا إلى مناقشة التخفيف من هذه السلبيات المفروضة من خلال استخدام تقنية التشكيل الشعاعي الهجين Hybrid Beamforming واقتراح حلول تخلق توازن بين زيادة فعالية الطيف الترددي، التخفيف من استهلاك الطاقة، والتكلفة الاقتصادية الأقل في نفس الوقت ويمكن تحقيق ذلك عبر مجموعة من التقنيات وعبر تعديل بنية تصميم الهوائي المرسل، مع الأخذ بعين الاعتبار الحيز الفيزيائي المحدود للهوائي.

## ١-٢-١ - مشكلة البحث:

تعد هوائيات Massive MIMO خياراً عملياً في أنظمة الأمواج الملي مترية، وذلك لأن المسافات الفاصلة بين عناصر الهوائي هي عدد صحيح من طول الموجة، وبالتالي يتيح لنا تطبيق الأمواج الملي مترية توزيع عدد كبير من عناصر الهوائيات ضمن مساحة فيزيائية صغيرة جداً.

نلاحظ أن طاقة الإشعاع للهوائي ستكون منخفضة بسبب صغر حجم الهوائي، كما أن الإشارات الملي مترية تتعرض لتخامد Attenuation أكبر على طريق انتشارها، لذلك لا بد من استخدام هوائيات عالية الاتجاهية لتركيز طاقة الإرسال في اتجاه محدد حتى يسهل اكتشافها من قبل المستقبل.

يؤدي استخدام الأمواج الملي مترية دوراً سلبياً بالنسبة للخاصية الخطية لمضخمات الطاقة Power Amplifier، لذلك لا بد من الحفاظ على خطية مضخم الطاقة قدر الإمكان ويتم ذلك عبر تقنيات متعددة منها تقنية ما قبل التشويه الرقمي Digital Predistortion، التي تتطلب وجود تغذية عكسية لكل مضخم طاقة، لكن في هوائيات Massive MIMO يبدو من الواضح أن تطبيق تغذية عكسية لكل مضخم طاقة خياراً غير واقعي بالمطلق، وذلك بسبب العدد الكبير لعناصر الهوائي وبالتالي العدد الكبير لمضخمات الطاقة، والسبب الثاني يعود لكون عدد المضخمات أكبر بكثير من عدد السلاسل الرقمية Digital chains، لذلك وفقاً للتقنية Beam-Oriented Digital Predistortion فإنه يتم تصميم تغذية عكسية واحدة مشتركة لكل المضخمات وبالتالي تحسين الخطية للحزمة الشعاعية الرئيسية بدلاً من تحسين الخطية لكل مضخم طاقة على حدى، وبالتالي فهي لا تعطي نفس النتائج الجيدة التي يعطيها تطبيق تغذية عكسية لكل مضخم على حدى.

## ١-٣-١ - هدف البحث:

يعد تشكيل حزمة الشعاع للهوائي بشكل رقمي تماماً Digital Beamforming الحالة المثالية للحصول على أفضل نتيجة من حيث اتجاهية الشعاع وتقليل الوريقات الجانبية الغير مرغوبة والحصول على أفضل فعالية للطيف الترددي، وفيه يكون كل عنصر من عناصر مصفوفة الهوائيات متصلاً إلى سلسلة تردد راديوي RF Chain خاصة به، مما يسمح بالتحكم بطور ومطال كل إشارة في كل عنصر هوائي، لكن هذه الهيكلية تعد مكلفة للغاية، بينما تعد هيكلية تشكيل الشعاع الراديوي بالشكل التماثلي

Analog Beamforming هي الطريقة الأبسط والأقل تعقيداً، حيث تتصل جميع عناصر مصفوفة الهوائيات الى سلسلة تردد راديوي RF Chain وحيدة، الا أن هذه الطريقة لا تحقق مبدأ تعدد الإرسال المكاني Spatial multiplexing.

يمكن تحقيق الموازنة بين الهيكليتين السابقتين في هيكلية تشكيل حزمة الشعاع الهجينة Hybrid Beamforming والتي تعد مزيجاً من الهيكليتين السابقتين، في محاولة للحصول على إيجابيات كل هيكلية والموازنة فيما بينهما.

رغم الميزات الكبيرة التي حققتها الهيكلية الهجينة في تحقيق الموازنة بين ميزات تشكيل الحزمة الرقمي والتماثلي الا أن استخدام الأمواج الملي مترية في التقنيات المقترحة للجيل الخامس يخلق مشاكل عديدة قد تؤثر سلباً وتخفض الى حد بعيد من الميزات التي تم الحصول عليها في تقنية التشكيل الهجين، فحيث أن خطية مضخمات الطاقة PAS المستخدمة تتناقص مع تزايد التردد المستخدم، سيزيد استخدام الأمواج الملي مترية من المشكلة مما يؤثر بشكل مباشر على اتجاهية وحدة الحزمة القلمية الناتجة عن الهوائي .

إن استخدام حلقة تغذية عكسية وحيدة كما في تقنية Beam-oriented Digital Predistortion يعد الخيار الأكثر واقعية والقابل للتطبيق على أرض الواقع، لكنه لا يعطي الخطية المطلوبة والتي يحققها تطبيق تغذية عكسية لكل مضخم طاقة على حدى، وانطلاقاً من هذه المشكلة يهدف بحثنا هنا الى محاولة تحسين تقنية Beam-oriented بشكل يزيد من خطية الحزمة الرئيسية ويحقق أقرب نتائج من النتيجة المثالية.

## 1-2- أهمية البحث:

تعد تقنية Beam-oriented Digital predistortion من أهم التقنيات التي تجعل من التشكيل الشعاعي الهجين تقنية قابلة للتطبيق العملي على أرض الواقع، وتقدم حلاً جيداً لزيادة خطية الحزمة الرئيسية للشعاع الراديوي الصادر عن الهوائي من النوع Massive MIMO، وتوازن ما بين التكلفة العالية و تحقيق الأداء الأمثل لعمل الهوائي الكثيف، كما يحقق استخدام هذه التقنية حلاً جيداً للتخفيف من التأثيرات اللاخطية التي تنشأ خاصة في مضخمات الطاقة في هوائي الإرسال، وتؤثر سلباً في فعالية الهوائي نتيجة استخدام الأمواج الملي مترية.

## 1-5- مبررات البحث:

إن هوائيات شبكات الجيل الخامس الخلوية سوف تعتمد على استخدام الأمواج الملي مترية ذات التخامد المرتفع والتأثر العالي بالضجيج، وبالتالي فإن تغطية الخلية الواحدة ستكون صغيرة جداً بالنظر إلى صعوبة انتشار الأمواج الملي مترية إلى مسافات بعيدة، ولأن الهوائي الكثيف مكون من عدد كبير من عناصر الهوائيات القريبة جداً من بعضها البعض ضمن بنية الهوائي المصفوفي، لذلك سيكون من المفروض في هذه الحالة زيادة اتجاهية الحزمة الشعاعية لكي تكون كل حزمة موجّهة بشكل أفضل نحو المستقبل منعاً لتراكب الإشارات الصادرة عن عناصر الهوائيات المتقاربة ضمن المصفوفة وتداخلها، بالتالي تعد زيادة اتجاهية الحزمة الشعاعية للهوائي من أهم العمليات التي تساهم في حل هذه المشاكل من خلال تركيز طاقة الإشعاع في جهة محددة.

## 1-6- فروض البحث:

- تحسين تقنية BO Digital Predistortion.
- تطبيق التعديل الترددي المتعامد OFDM على النموذج المقترح.
- تطبيق المرشحات الحزمية متعددة الحوامل FBMC على النموذج المقترح.
- مقارنة أداء النموذج المقترح بالنسبة للتقنيتين السابقتين من حيث فعالية الطيف الترددي واتجاهية الحزمة القلمية لشعاع الهوائي.
- تطبيق تحسينات في بنية وتصميم الهوائي الكثيف ومقارنة التحسينات المقترحة وفق عدة سيناريوهات فيما بينها.

## 1-7- متغيرات البحث:

تم في هذا البحث اعتبار متغير هو تقنية التعديل المستخدمة مع النموذج المقترح حيث تتم المقارنة بين التعديل OFDM وFBMC، كما تم تغيير في هيكلية تصميم الهوائي الكثيف المرسل وفق تقنية Bo-DPD باستخدام المبدلات Switches المتصلة فيما بينها وفق هيكليات مختلفة وفقاً لعدة سيناريوهات متغيرة، بحيث يؤثر التعديل في آلية تخفيض اللاخطية لمضخمات الطاقة وبالتالي يكون

كل سيناريو مختلفاً عن الآخر من حيث اتجاهية الحزمة الكلية الصادرة عن الهوائي المرسل وطاقة الحزمة الصادرة عنه، حيث أن استخدام المبدلات يعد خياراً أفضل من ناحية التكلفة الاقتصادية.

## 1-8- أدوات البحث:

تم استخدام البيئة البرمجية (MATLAB) بنسخة (64 bit 2019a)، من أجل تطبيق الطريقة المقترحة برمجياً، ومقارنة نتائجها مع نتائج باقي الخوارزميات وذلك لما يقدمه هذا البرنامج من إمكانيات كبيرة في مجال الاتصالات وخاصة فيما يتعلق بشبكات الجيل الخامس الخليوية.

تمتاز بيئة العمل المختارة بتوافر مكتبة واسعة من التوابع التي يمكن استثمارها لتطبيق الخوارزميات المختلفة كما توفر دعماً خاصة في بناء مصفوفات الهوائيات المختلفة التي سنحتاجها في تطبيق النموذج المقترح مثل تطبيق Antenna designer المتضمن في MATLAB وتطبيق RF budget analyzer الذي يقدم دعماً كبيراً في تصميم السلاسل الراديوية RF Chains.

على الرغم من الميزات الجيدة جداً للبيئة المقترحة (MATLAB 2019a 64bit)، إلا أنه من الملاحظ استهلاكها الكبير لموارد الجهاز (ذاكرة عشوائية، قدرة معالجة، ذاكرة دائمة على القرص الصلب).

## 1-9- الدراسات السابقة:

بينت الدراسات السابقة قيام الباحثين بمحاولات حثيثة للوصول الى تبني نموذج نهائي يشكل معياراً قياسياً لتطبيق تقنية الجيل الخامس مع بداية العام 2020.

في وقت تعتبر فيه تقنية تشكيل الحزمة الرقمية Digital Beamforming هي التقنية المثالية في هوائيات MIMO، إلا أنها تواجه العديد من العقبات في هوائيات Massive MIMO كتعقيد التصميم نظراً للعدد الكبير لعناصر الهوائيات، استهلاك الطاقة المرتفع، والتكلفة العالية، لذلك فإن البنية الرقمية والتمثالية الهجينة قد تكون خياراً أفضل لتلافي هذه العقبات، وقد قدم الباحثون S. Han, C. I. I, Z. Xu, and C. Rowell بحثاً بعنوان " Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G " [4] للمقارنة فيما بين تقنيات تشكيل الحزمة الرقمية، التمثالية، والهجينة فيما بينهما باستخدام الأمواج الملي مترية و وجدو أن التقنية الهجينة تعد الخيار الأفضل للتطبيق في أنظمة الجيل الخامس الخليوية.

لكن مع الاتجاه نحو استخدام الأمواج الملي مترية التي تحقق العديد من الميزات لهوائيات Massive MIMO [٤] [٥]، والحاجة الى عرض حزمة أكبر برزت مشاكل تتعلق بخواص مضخمات الطاقة Power Amplifier.

من المعروف أن مضخمات الطاقة عناصر بطبيعتها غير خطية، ويوجد علاقة عكسية تقريباً بين فعالية المضخم وبين خطيئته، هذا يعني أنه للحصول على مضخم طاقة PA فعال سيكون الثمن لذلك هو المزيد من اللاخطية، وتفترض أغلب البنى أن مضخمات الطاقة تمتلك فقط لاخطية من النوع عديم الذاكرة Memoryless Nonlinearity، لكن مع الاتجاه نحو تطبيقات الحزمة العريضة مثل تقنية OFDM تصبح التأثيرات ذات الذاكرة موجودة ومؤثرة لدرجة لا يمكن تجاهلها. وهذا يسبب انتشار (توسع) طيفي Spectral Broadening، والذي بدوره يؤدي الى تداخل القنوات الراديوية المتجاورة وتشويه الحزمة الراديوية نفسها In-band Distortion.

ركز الباحثون L. Ding, G. Zhou, D. Morgan في بحثهم " A Robust Digital Baseband " Predistorter Constructed Using Memory Polynomials [٦] على بنية المشوه الرقمي واقترحوا نموذجاً متعدد الحدود بذاكرة Memory polynomial model وقاموا بتطبيقه باستخدام حلقة تغذية عكسية للتعلم غير المباشر.

وفي سياق متصل قدم الباحثون Sh. Amin, P. Landin, P. Händel, and D. Rönnow في بحثهم " Behavioral Modeling and Linearization of Crosstalk and Memory Effects in RF MIMO " Transmitters [٧] نموذجاً للتخفيف من التسميع الخطي وغير الخطي بين مضخمات الطاقة والمسارات المرتبطة بها، وقاموا بتطبيق تجربتهم باستخدام مرسل يحوي هوائي MIMO بأبعاد ٢×٢. كما قدم الباحثون S. Bassam, M. Helaoui, and F. Ghannouchi في بحثهم "Crossover Digital Predistorter for the compensation of crosstalk and nonlinearity in MIMO transmitter" [٨] نموذجاً للمشوه Predistorter للتعامل مع ظاهرة التسميع التي تحصل قبل وبعد مضخم الطاقة وأيضاً للتخفيف من لاخطية المضخمات.

وقدم الباحثان P. Suryasarman, and A. Springer في بحثهما " A Comparative Analysis of " Multiple Antenna Transmitters Digital Predistortion Algorithms for Adaptive crosstalk [٩] مقارنة بين المشوه التصالبي (CO-DPD) crossover predistorter والمشوه المزيل للتسميع crosstalk

(CTC-DPD) canceling predistorer، ووجدا أنه في وجود التسميع المرتبط بتردد معين يكون أداء CTC-DPD أفضل من أداء المشوه CO-DPD.

اقترح الباحثون S. Lee, M. Kim, Y. Sirl, E. Jeong, S. Hong في بحثهم " Digital Predistortion " Hybrid MIMO Systems with Antenna Subarrays for Power Amplifiers in Adaptive Predistorer لكل مصفوفة فرعية subarray من نظام الهوائي الهجين Hybrid MIMO System واستطاعوا تخفيض مجموع مربع الخطأ بين الدخل والخرج لكل عناصر الهوائيات وتوصلوا الى نتيجة مفادها أن النموذج المقترح يعطي نتائج افضل من النموذج الذي يعتمد على تصميم مشوه بناء نتائج اختباره مع مضخم طاقة واحد فقط .

وقدم الباحثان H. Yan and D. Cabric بحثاً بعنوان " DIGITAL PREDISTORTION FOR MILLIMETER-WAVE MASSIVE HYBRID PRECODING ARCHITECTURE IN MIMO SYSTEMS" [١١] تم فيه اقتراح نموذج مضخم طاقة متعدد الحدود مع ذاكرة لنمذجة سلوك مضخم الطاقة في العمل مع الإشارات الملية مترية ودراسة التداخل على الموجة والتداخل على الرمز في هيكلية هجينة، واقترحا خوارزمية عمل للمشوه للتقليل من التداخل الحاصل.

كما قدم الباحثون L. LIU, W. CHEN, L. MA, He SUN بحثاً بعنوان "Single-PA-Feedback Digital Predistortion for Beamforming MIMO Transmitter" [١٢] اقترحوا فيه طريقة مبسطة للمشوه الرقمي تعتمد على تصميم تغذية عكسية لمضخم طاقة وحيد يتم اعتماده من أجل تحسين الخطية في الهوائي المرسل وحصلوا على نتائج أفضل فيما يخص خطية المضخمات.

قدم الباحثان X. Liu, Q. Zhang, W. Chen بحثاً بعنوان " Beam-Oriented Digital Predistortion for 5G Massive MIMO Hybrid Beamforming Transmitter" [١٣] اقترحوا فيها تقنية للمشوه الرقمي شعاعي التوجه Beam-oriented DPD لمضخم الطاقة في الهيكلية الهجينة للهوائي الكثيف Massive MIMO والتي تستطيع تحقيق خطية للإشارة المرسله في الاتجاه الرئيسي للحزمة.

أما الباحثان A. Farhang, N. Marchetti, L. Doyle and B. Farhang-Boroujeny فقد قدّموا بحثاً بعنوان "Filter Bank Multicarrier for Massive MIMO" [١٤] قدموا فيه تقنية المرشحات الحزمية متعددة الحوامل Filter Bank Multicarrier (FBMC) كتقنية مرشحة بقوة في تطبيقات الهوائيات الكثيفة Massive MIMO لامتلاكها ميزات تتجاوز فيها تقنية التعديل الترددي المتعامد OFDM، حيث أن غياب البادئة الدورية Cycle Prefix في تقنية المرشحات الحزمية يزيد من فعالية عرض الحزمة، بالإضافة الى أن المرشحات الحزمية تسمح بتطبيق تقنية تجميع الحوامل Carrier Aggregation بسهولة وبساطة.

## ١٠-١- ملخص الدراسات المرجعية:

- لم تتطرق أي من الدراسات المرجعية المذكورة أعلاه الى موضوع الية تطبيق التغذية العكسية بوجود هذه العدد الهائل من مضخات الطاقة.
- لم يتم التطرق في أي من المراجع السابقة الى الية التخفيف من استهلاك الطاقة في المزيحات الطورية Phase Shifters.
- لم يتم التطرق الى إمكانية تعديل الهيكلية الهجينة للتخفيف من استهلاك الطاقة او للتخفيف من تعقيد البنية في أي من المراجع السابقة.
- لم تبحث أي من الدراسات السابقة في إمكانية التعويض عن المزيحات الطورية بمكونات أخرى مماثلة لها بالأداء أو شبيهة بها من حيث الوظيفة و السلوك.
- لم يتم مقارنة أداء عمل النظام الهجين المقترح في أي من المراجع السابقة بين تقنية المرشحات الحزمية وتقنية التعديل الترددي المتعامد.

## ١١-١- محتويات الرسالة:

احتوت الرسالة على خمسة فصول، عرض الفصل الأول مقدمة عامة عن البحث وأهمية الجيل الخامس الخليوي في الاتصالات الخليوية، وقدم الفصل الثاني هيكلية التشكيل الشعاعي الهجين وشرحاً عن الهوائي الكثيف بالأموج الميلي مترية وأهمية استخدام هذه الأمواج في هوائيات الجيل الخامس، وعرضاً لتقنية التعديل الترددي المتعامد وتقنية المرشحات الحزمية مع مقارنة بينهما من عدة جوانب، وقدم الفصل الثالث عرضاً للنظام المقترح والأنظمة الفرعية المكوّنة له ومراحل تنفيذه عملياً، وأخيراً الفصل الرابع قمناً فيه بإجراء المحاكاة العملية للنظام الذي صمّمناه وفق عدة سيناريوهات وجمع نتائج المحاكاة لكل سيناريو وإجراء المقارنة اللازمة فيما بينها للوصول إلى السيناريو الذي يقمّ الأداء الأفضل، أما الفصل الخامس ويعرض ويناقش النتائج العملية التي توصل إليها النظام المقترح وأهم التوصيات المقترحة لتطوير هذا البحث.

## الفصل الثاني

التشكيل الشعاعي الهجين في أنظمة الجيل الخامس الخليوية

### **Hybrid Beamforming in 5G Systems**

## الفصل الثاني

### ٢- التشكيل الشعاعي الهجين في أنظمة الجيل الخامس الخليوية

#### ٢-١- مقدمة:

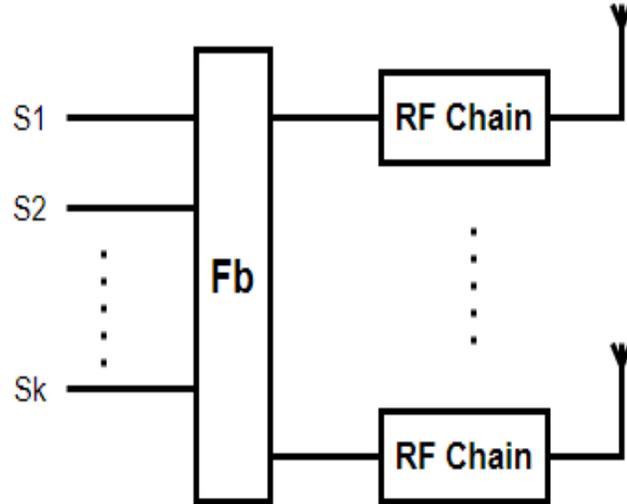
يعرّف التشكيل الشعاعي Beamforming بأنه الإجراءية التي يتم من خلالها توجيه أغلبية الإشارة المولدة من مصفوفة الهوائيات المرسلّة إلى الاتجاه الزاوي المقصود [٢٧].

يكون التشكيل الشعاعي عبارة عن نوع من أنواع التصفية المكانية Spatial Filtering تهدف إلى استغلال الخواص المكانية للإشارات من قبل العديد من المستشعرات (المستقبلات)، ويمكن تطبيق التشكيل الشعاعي للحصول على إشارة واحدة في الاتجاه المرغوب، ونستطيع تقريب مفهوم مصطلح التشكيل الشعاعي إلى القول بأنه يعبر عن التقنية التي يتم فيها زيادة نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR في المرسل والمستقبل.

يعتمد الطلب المتزايد لأنظمة الاتصالات اللاسلكية بشكل أساسي على الفعالية الطيفية Spectral Efficiency (SE)، وتعمل كل التقنيات اللاسلكية في حزم ضمن مجال يتراوح بين ٣٠٠ MHz هرتز إلى ٣ GHz هرتز [٢٩]، وبما أن تكنولوجيا الطبقة الفيزيائية قد لامست سعة شانون [٣٠]، فإن عرض حزمة النظام تمثل الخيار الذي يمكننا اكتشافه والعمل عليه، لذلك فإن مفتاح تقنية الجيل الخامس الخليوية تعتمد على اكتشاف واستخدام ترددات عالية يتراوح مجالها من ٣ GHz إلى ٣٠٠ GHz.

يتصل كل عنصر هوائي في أنظمة هوائيات MIMO العادية إلى معالج Baseband processor وحيد، وهذا يتطلب مزج Mixer مخصص له، محول تشابهي رقمي (Analog-to-Digital Converter(ADC)، أو محول من رقمي إلى تشابهي (Digital to Analog Converter(DAC)، بالإضافة إلى المرشحات و المضخمات اللازمة لكل عنصر هوائي بمفرده، وتسمّى هذه السلسلة من المكونات التي تصل كل عنصر هوائي بمولد الإشارة بسلسلة التردد الراديوي (Radio Frequency Chain (RF)، لذلك نستطيع التحكم في مطال وطور الإشارة في كل عنصر هوائي وهو ما يُعرف بالتشكيل الرقمي Digital Beamforming، ويبين الشكل (٢-١) مخطط صندوقي لمرمّز رقمي Digital precoder مكون من

N عنصر هوائي متصل مع N سلسلة راديوية RF Chain، حيث يتصل كل هوائي بسلسلة راديوية ويوفر بذلك مجالاً واسعاً من الحرية في تشكيل الحزمة الراديوية لكل هوائي.



الشكل رقم (٢-١): مخطط صندوقي لرمز رقمي

مع ازدياد عدد الهوائيات يزداد ربح مصفوفة الهوائيات ونحصل على شروط وظروف عمل أفضل بالنسبة لمصفوفة القناة Channel Matrix [٢٣,٢٤]، وأكثر من ذلك فإننا بالحصول على ربح توجيه أعلى نستطيع تخفيض كمية الطاقة الإجمالية المرسلة.

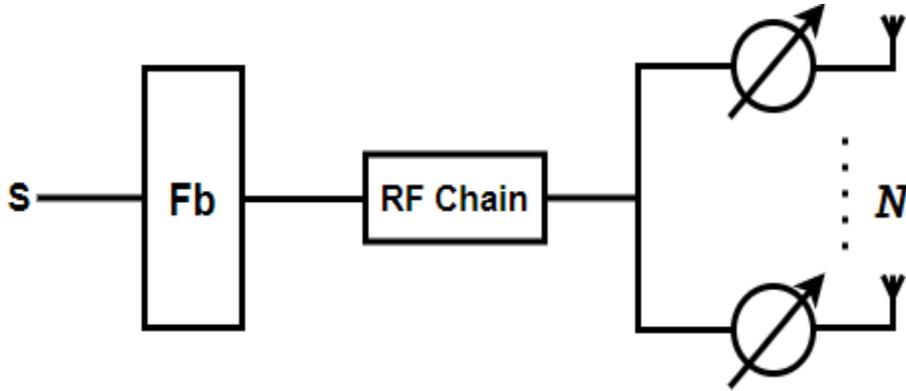
تعاني السلاسل الراديوية من استهلاك عالي للطاقة وخاصة في أنظمة الأمواج الملي مترية التي تمتلك عرض حزمة واسع [٢٢,٢٥]، ويصبح عاملاً التكلفة واستهلاك الطاقة عاملين حاضرين بقوة ومؤثرين في سيناريوهات تطبيق أنظمة الهوائيات الكثيفة بالتشكيل الشعاعي الرقمي.

ولتخفيض عدد السلاسل الراديوية في أنظمة الهوائيات الكثيفة، تم اقتراح تقنيتين لذلك هما تقنية الاختيار المعقد Hard selection، وتقنية الاختيار البسيط Soft selection [٢٦]. ففي التقنية الأولى (الاختيار المعقد) يتم ربط السلاسل الراديوية بعناصر الهوائيات عبر شبكة من المبدلات Switches، يتم عن طريقها التبديل بين عناصر الهوائيات في وضعية التشغيل وعد التشغيل، وتكمن السلبية في هذه الطريقة أنه يصبح من غير الممكن الحصول على ربح التشكيل الشعاعي Beamforming Gain الكافي عندما يكون عدد الهوائيات أكبر بكثير من عدد السلاسل الراديوية RF Chains.

وترتبط السلاسل الراديوية في تقنية الاختيار البسيط مع الهوائيات بشبكة من مُزيحات الطور Phase Shifters [٢٥,٢٦].

## ٢-٢- الاختيار البسيط للهوائي Soft Antenna Selection:

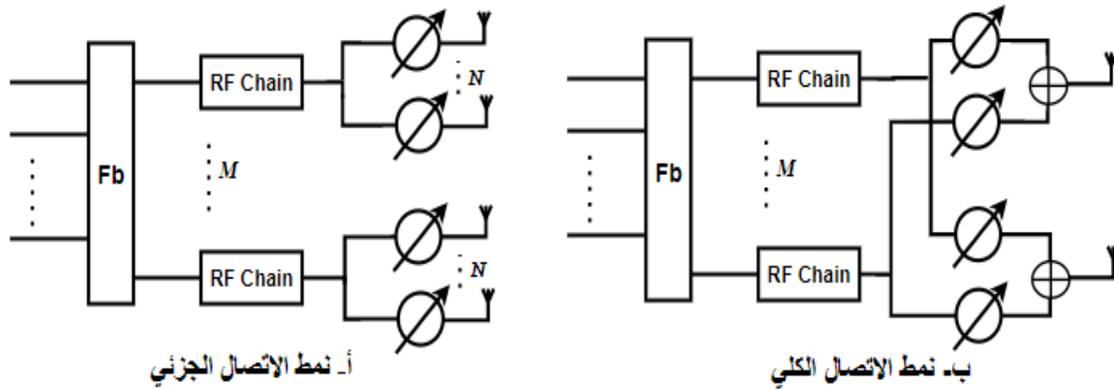
تُستخدم في هذه الطريقة شبكة من مُزيحات الطور Phase Shifters لربط منبع المعطيات بمصفوفة الهوائيات، وعندها يتم تقسيم عملية التشكيل الشعاعي Beamforming إلى التشكيل الشعاعي الرقمي Digital Beamforming، والتشكيل الشعاعي الراديوي (التشابهي) RF Beamforming، ويطبَّق التشكيل الشعاعي التشابهي باستخدام دارات تشابهية تقوم بتغيير طور الإشارات الواردة إلى الهوائيات، وفي بحثنا هنا سيتم تزويد كل عنصر هوائي بمزيج طور، ويبين الشكل ٢,٢ المخطط الصندوقي لمرمِّز تشابهي Analog Beamformer ويمثل الشكل الأبسط لتقنية الاختيار البسيط، وفيه يرتبط كل هوائي مع مزيج طور، وترتبط شبكة مُزيحات الطور بأكملها مع سلسلة راديوية واحدة، وبضبط مزيج الطور لكل عنصر هوائي يتم تخفيض التداخل interference وزيادة نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR لكل مستخدم.



الشكل رقم (٢-٢): مخطط صندوقي لمرمِّز تشابهي

من أجل إيجاد الموازنة بين الأداء والتكلفة المادية في مشكلات الحزمة الرقمية والتماثلية، تم اقتراح هيكلية هجينة تجمع بين النمطين، وفي هذه البنية نلاحظ وجود عدد قليل من السلاسل الراديوية متصل بعدد كبير من الهوائيات عبر شبكة من مُزيحات الطور، كما هو موضح في الشكل (٢-٣)، ويوجد نمطان لتوصيل مُزيحات الطور مع الهوائيات هما البنية ذات الاتصال الجزئي Sub-Connected Structure ونمط الاتصال الكلي Fully-Connected Structure [٢٨].

تكون كل سلسلة راديوية في نمط الاتصال الجزئي متصلة الى مجموعة من الهوائيات حيث يكون كل عنصر هوائي متصلاً بمُزيج طور وحيد كما في الشكل (٢-٣-أ)، أما في نمط الاتصال الكلي فتكون كل سلسلة راديوية متصلة بجميع عناصر الهوائيات الموجودة كما في الشكل (٢-٣-ب)، وبالتالي نحتاج هنا إلى عدد أكبر من مُزيجات الطور، لكن هذا النمط من التوصيل يوفر ربح تشكيل حزمة أعلى ويحقق فعالية طيفية أفضل بالمقارنة مع نمط الاتصال الجزئي، وعلى الرغم من ذلك يعدّ نمط الاتصال الكليّ صعب التطبيق أكثر بكثير من نمط الاتصال الجزئي لحاجته الى مسارات راديوية اكثر بكثير بالإضافة إلى استهلاكه للطاقة بشكل أكثر بقليل [٢٨].

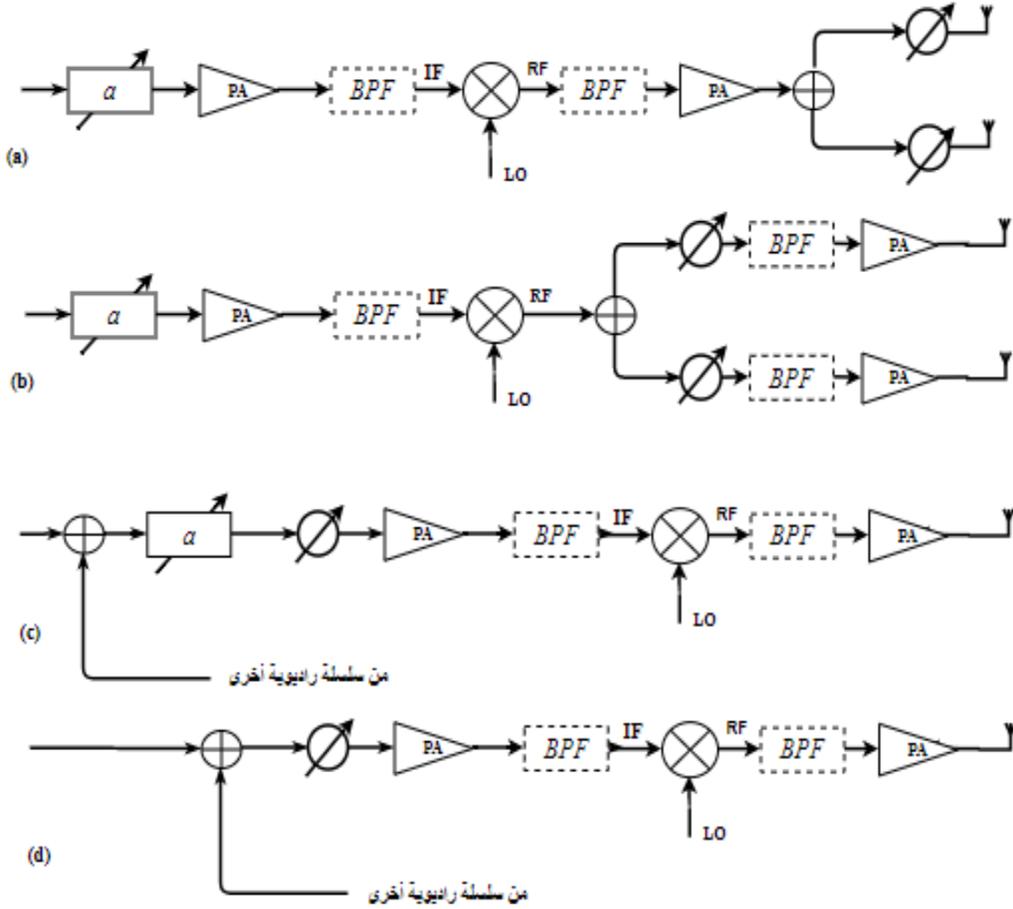


الشكل رقم (٢-٣): أنماط توصيل مزيجات الطور

### ٣-٣- البنية الهيكلية للسلسلة الراديوية RF Chain Architecture

تكن الطريقة الأبسط في تطبيق مصفوفة تشابهية والحصول على تشكيل شعاعي تشاهبي فيما يسمّى المصفوفة الطورية Phased Array، والتي يتم فيها التحكم بطور وتأخير كل إشارة بشكل دقيق جداً، وبشكل مثالي يمكن القول إن الحزمة القلمية للإشارة يتم توليدها بتأخير الزمن الحقيقي في كل عنصر هوائي، ويزداد تحقيق هذا الأمر صعوبةً عند استخدام الأمواج الملي مترية، ولتطبيق مبدأ تأخير الزمن الحقيقي، تتضمن بعض التقنيات الواعدة الحديثة خطوط نقل متغيرة الطول عبر مبدلات ميكروية الكترونية و ميكانيكية RF Microelectromechanical switches وخطوط ذات سرعات نقل متغيرة، وعلى الرغم من ذلك تبقى هنالك العديد من المشاكل ضمن السلاسل الراديوية مثل محدودية المساحة الفيزيائية والضياغ المتعلق بالتردد Frequency-dependent Loss في حاجة إلى حل، ويبين

الشكل (٢-٤) هيكليات متنوعة للسلسلة الراديوية في المرسل - حيث سنركز في بحثنا على طرف الإرسال - فيما نعتبر استخدام مرشح تمرير الحزمة اختياريًا غير أنه قد يكون مطلوباً لتحديد الحزمة لإشارة المازج التردد المتوسط IF بعد إجراء عملية تحويل التردد.



الشكل رقم (٢-٤): هيكليات السلاسل الراديوية

يبين الشكل (٢-٤-٤) أبسط هيكلية ممكنة للسلسلة الراديوية، حيث يكون فيها فقط مزيج الطور وعنصر الهوائي مستقلين، فيما تكون بقية عناصر السلسلة الراديوية مشتركة بين عناصر مصفوفة الهوائيات، وهذا ما يخفّض من استهلاك الطاقة، فيما يمثل الشكل (٢-٤-٥) تعديلاً في الهيكلية السابقة حيث يخصص لكل عنصر هوائي مرسل مضخم طاقة خاص به وهذا ما يخفض بشكل ملحوظ من الضجيج ويزيد من قوة الإشارة الصادرة عن العنصر الهوائي المرسل [٣١، ٣٢].

تبدو الهيكلية في الصنفين (c) و (d) قابلة للتطبيق العملي بشكل أفضل، حيث يتم تنفيذ المزيج الطوري في مرحلة التردد المتوسط، ويوفّر ٣٦٠ درجة لتبديل الطور.

## ٤-٢- التشكيل الهجين في أنظمة اتصال نقطة إلى نقطة Hybrid Beamforming for point to point systems

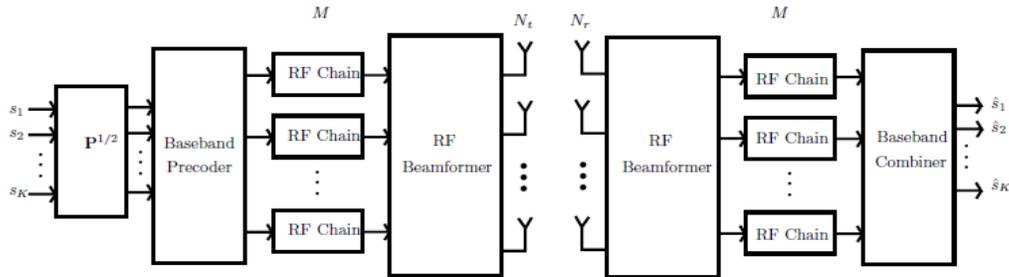
يُطلق على هذا السيناريو أيضاً اسم هوائي MIMO وحيد المستخدم Single-User MIMO وفيه يجهّز المرسل والمستقبل بمشكّل شعاعي هجين Hybrid Beamformer، وتتألف عملية التشكيل الشعاعي الهجين من مرحلتين رئيسيتين:

### ١- خوارزمية تقدير القناة Channel Estimation Algorithm:

وفيها يتم تطبيق تقنية تقدير القناة المناسبة اعتماداً على خواص القناة اللاسلكية وعلى العتاد الصلب للمنظومة، وكمثال على ذلك، تكون تقنية البحث الشامل لمحاذاة الشعاع في الأنظمة التي تعمل بالأمواج الملي مترية هي الطريقة الأمثل في فعالية توفير الطاقة لأنها تعتمد على ربح مصفوفي Array Gain أعظمي في جهة المرسل والمستقبل.

### ٢- توليد الحزمة Beam Generation:

بالنظر إلى القيود التي يفرضها العتاد الصلب، فإنه يجب على مشكّل الحزمة Beamformer أن يكون قادراً على توليد الحزم المرغوبة لخوارزمية التقدير الشعاعي المقترحة، فعلى سبيل المثال يجب أن يكون المرسل قادراً على توليد حزم متغيرة العرض باتجاه الزوايا المرغوبة مع الأخذ بعين الاعتبار العدد المحدود للسلاسل الراديوية، مزيجات الطور والهوائيات المتوفرة، ويبين الشكل (٥-٢) المخطط الصندوقي لنظام ارسال واستقبال وفق سيناريو نقطة إلى نقطة.



الشكل رقم (٥-٢): المخطط الصندوقي لنظام ارسال واستقبال هجين وفق سيناريو نقطة إلى نقطة

## ٣-٥- الهوائيات الكثيفة Massive MIMO:

من المقرر أن تكون تقنية الهوائي الكثيف Massive MIMO المكون الأساسي من مكونات شبكة الجيل الخامس الخلوية فائقة السرعة والتي بدأت في الانتشار مع نهاية العام ٢٠١٩.

### ما هو الهوائي الكثيف؟

يشير مصطلح الهوائي الكثيف Massive MIMO إلى السيناريو الذي يكون فيه عدد الهوائيات في المحطة base station أكبر بكثير من عددها في جهاز المستخدم User Equipment، وتهدف هذه التقنية إلى زيادة الفوائد العائدة من استخدام هوائيات MIMO العادية، ولعب دور حاسم في موضوع زيادة الفعالية الطيفية، وتحقيق أنظمة آمنة ومتمينة [٣٣].

يتوقف أداء الهوائي الكثيف بشكل رئيسي على معلومات حالة القناة Channel State Information (CSI) والتي تعرف على أنها مجموعة الخصائص المعروفة لوصلة الاتصالات، وهي مجموعة المعلومات التي تصف كيف تنتقل الإشارة من المرسل إلى المستقبل، وتمثل مزيج من التأثيرات، على سبيل المثال، التبعثر Scattering، التخماد Fading، وهبوط الطاقة مع ازدياد المسافة وهذه الصفات وهذا ما يعرف بتقدير القناة Channel Estimation، ويجب دائماً الحصول على هذه المعلومات CSI في المستقبل، وعادة يجري تكميمها Quantized وردها كتغذية عكسية إلى المرسل، ومن أجل الحصول على هذا البارامتر في سيناريو استخدام الهوائي الكثيف Massive MIMO، من المفترض بشكل شائع أن النظام سيعمل وفقاً لطريقة تقسيم الزمن المزدوج Time-Division Duplex (TDD)، وفي هذه الحالة تقوم المحطة القاعدية Base Station بتقدير القناة خلال الوصلة الصاعدة Uplink ثم استخدام هذه البارامترات التي جمعها في إرسال الوصلة الهابطة Downlink.

وعلى عكس ذلك، يزيد استخدام نمط التقسيم الترددي المزدوج Frequency-Division Duplex (FDD) من تعقيد المهمة في الهوائيات الكثيفة بسبب ازدياد الفترة الزمنية اللازمة لتقدير القناة مع ازدياد عدد الهوائيات في المرسل، لذلك يعد النمط TDD أفضل [٣٤] لأنه يجعل تصميم النظام أبسط، عندما تحصل المحطة Base station على معلومات تقدير القناة CSI، تصبح قادرة على تطبيق تقنيات التشكيل الشعاعي لتحسين فعالية الطيف والطاقة للنظام.

## ٦-٢ - أنظمة الأمواج الميلي مترية mmWave Systems:

شيئاً فشيئاً تصبح أنظمة الاتصالات بالأمواج الميكروية مشبعة وغير قادرة على استيعاب هذا الكم الهائل من الأجهزة المتصلة مع الشبكة، ولم يكن من الممكن استيعاب هذه الزيادة المتواصلة إلا باستكشاف طيف الترددات الميلي مترية الغير مستخدمة والغير محجوزة لحد الآن، ومن المتوقع من هذه الأنظمة أن تُستخدم في الشبكات المحلية والشخصية ذات المجال الصغير [٣٩]، وقد أجريت العديد من الأبحاث لنمذجة وتحليل سلوك عملية الإرسال في قنوات الاتصال بالأمواج الميلي مترية، وعانت الإشارة المرسلّة الكثير من التخامد والضياعات، وكانت حساسة جداً للمعوقات الفيزيائية على طريق الإشارة [٤٠,٤١].

لتطبيق تكنولوجيا الأمواج الميلي مترية في أنظمة الاتصالات التجارية (التطبيق العملي) لابد من تذليل العديد من العقبات [٢٥,٤٠,٤٢,٤٣]، بدءاً بإرسال الإشارة وخصائص قناة الاتصال، حيث تعاني الأمواج الميلي مترية من تضعيف Attenuation عبر القنوات اللاسلكية بسبب الطبيعة الكهرومغناطيسية للأمواج عند هذه الترددات العالية [٤٠,٤١]، لذلك من الضروري جداً استخدام هوائيات عالية اربح والاتجاهية للتعويض عن خسائر المسار والتضعيف الذي تعانيه هذه الإشارات، وتستطيع هذه الهوائيات التقليل من التأخير Delay وتداخل الرمز Inter-symbol interference (ISI) الذي تعانيه الإشارات وزيادة أداء نظام الإرسال بشكل فعّال [٤٤].

إن الهوائيات المصفوفية هي واحدة من التقنيات المعروفة للحصول على هوائيات قابلة للتوجيه بحزمة إشعاع ضيقة، وبما أن الأبعاد الفيزيائية بين عناصر المصفوفة يجب أن تكون أعداد صحيحة من نصف طول الموجة الميلي مترية، فإن هذا يعد ميزة إضافية للأمواج الميلي مترية ذات طول الموجة الصغير جداً، وبالتالي يمكن من خلالها تركيب عدد كبير من عناصر الهوائيات ضمن مساحة صغيرة جداً، حيث أنه كلما كان تردد الإشارة المرسلّة أكبر كلما كان طول موجتها أصغر و بالتالي كلما استخدمنا نطاق ترددي أعلى كلما كانت أطوال موجات الإشارات المرسلّة أصغر وبالتالي نستفيد من هذه الميزة للتردد الميلي متري في الحصول على أبعاد هوائي أصغر وفي تصميم عدد عناصر هوائيات ضمن المصفوفة أكبر، علاوة على الميزات الأخرى التي تتمتع بها الترددات الميلي مترية في كونها غير مستخدمة على نطاق واسع في مجال الاتصالات الخلوية حتى الآن.

## ٣-٧- الهوائيات الكثيفة بالأمواج الملي مترية mm Wave

### :Massive MIMO

مرّت أنظمة الاتصالات اللاسلكية تاريخياً بثورة وتطور دوري كل عقد من الزمن، وذلك تحت ضغط متطلبات السوق تارة، وتارة أخرى بسبب تطور التقنيات المستخدمة، ونحن الآن نشهد بدء تطبيق الجيل الخامس من الاتصالات الخلوية، ويفرض السوق حالياً على شبكة الجيل الخامس 5G أن تدعم سعة نظام أعلى بحوالي (100-1000X) مرة من السعة الحالية التي توفرها شبكات الجيل الرابع 4G [١٥].

لتحقيق الأهداف المرجوة من شبكة الجيل الخامس، تقترح نظرية المعلومات أنه يوجد في الغالب ثلاثة مقاربات رئيسية يمكن اتباعها لزيادة سعة النظام [١٦,١٥]: الشبكات عالية الكثافة Ultra-dense Networks (UDNs)، وموضوع الكثافة ضمن الشبكة تمت مناقشته في شبكات الجيل الرابع الخلوية، والمقاربة الثانية تتمثل في مجال واسع جديد من عرض الحزمة، حيث أن الانتقال إلى ترددات أعلى سيعطي عرض حزمة أوسع وتوفر سعة أعلى، وتعتبر الأمواج الملي مترية (Mm waves) بتردد الحامل الذي يتراوح بين (30-300 GHz) منافساً قوياً [١٧,١٨].

وتتلخص المقاربة الثالثة في فعالية طيف ترددي أعلى: وذلك باستخدام عدد أكبر من عناصر الهوائيات (100 هوائي أو أكثر)، كما في الهوائي الكثيف Massive MIMO والذي يحسن فعالية الطيف الترددي بشكل كبير [١٩,٢٠].

وعلى نحو منفصل، يُتوقع من واحدة من هذه المقاربات السابقة أن تقود إلى زيادة في سعة النظام الخلوي عما هو عليه حالياً في شبكة الجيل الرابع الخلوية.

ولحسن الحظ فإن هذه المقاربات الثلاثة تشترك في نواحي عديدة [٢١,١٦]، حيث يعتبر طول الموجة القصير جداً لترددات الأمواج الملي مترية جذاباً للهوائيات الكثيفة وذلك لأن الحجم الفيزيائي لمصفوفة الهوائيات يمكن تصغيره، وتعتبر مناسبة تماماً للخلايا صغيرة الحجم اللازمة للاتصالات قصيرة المدى التي تحقق المقاربة الأولى، فيما يأتي الربح العالي لمصفوفة الهوائيات الكثيفة ليعوض بشكل كبير ومفيد جداً من خسارة المسار الحاد جداً في الأمواج الملي مترية، وبالتالي أصبح تكنولوجيا الأمواج

الميلي مترية التي تأخذ التصميم الأساسي لتكنولوجيا الهوائيات المتعددة الدخل والخرج وبذلك تجعل تستخدم حزمة الأمواج الميلية مترية في الهوائيات الكثيفة، وهذه التكنولوجيا مجتمعة لن تساعدنا في تحسين ربح نظام الهوائيات الكثيفة فحسب، وإنما تساعدنا أيضاً في التخفيف من خسارة المسار للأمواج الميلية مترية وبالتالي تسمح للخلايا الصغيرة بالظهور وبنطاق تغطية يساوي ٢٠٠ متراً [١٧،١٨]. وهكذا يمكن القول أنه من الخطوات الطبيعية ان نقوم بدمج اتصالات الأمواج الميلية مترية والهوائيات الكثيفة لتسخير خصائص كلتا التقنيتين للحصول على خلايا نقاط الوصول Small Cell Hotspots ذات الأمواج الميلية مترية.

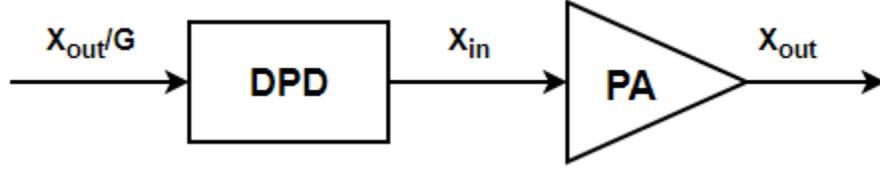
على الرغم من الإمكانيات التي تقدمها الأمواج الميلية مترية، يبقى هنالك العديد من التحديات التي تقف في وجه تطبيق تكنولوجيا الهوائيات الكثيفة بالأمواج الميلية مترية، حيث أن العدد الهائل من عناصر الهوائيات يزيد من تعقيد تصميم العتاد الصلب للهوائي ومن استهلاكه للطاقة [٢٢]، كما تنخفض فعالية مضخمات الطاقة بشكل كبير مع زيادة الترددات المستخدمة في الهوائيات، ومع استخدام الأمواج الميلية مترية تتأثر خطية مضخمات الطاقة سلباً وبشكل كبير بفعل ما يُعرف بتأثير الذاكرة Memory Effect الذي بشكل لم يعد من الممكن تجاهله [٤٥].

### ٢-٨- النمذجة السلوكية Behavioral Modeling:

نستطيع تحقيق كفاءة طيفية عالية في الهوائيات الكثيفة بالأمواج الميلية مترية بمتطلبات أكثر صرامةً فيما يخص أداء الواجهة الأمامية لسلسلة الإرسال الراديوية، في الحقيقة إن غلاف المطال الناتج غير ثابت، والإشارات ذات التعديل المطالي تزيد اللاخطية Nonlinearity في المُرسَل بشكل كبير لا يمكن تجنبه [٤٥]، وتُولد هذه اللاخطية بشكل رئيسي بواسطة مضخم الطاقة PA الذي يعمل في المنطقة القريبة من نقطة الإشباع لفعالية التضخيم للطاقة.

ينتج عن عمل مضخم الطاقة في النمط الخطي مع الإشارات ذات التعديل الترددي مثل OFDM -والتي تمتلك نسبة قمة إلى متوسط (PAPR) عالية- فعاليات طاقة منخفضة جداً، ويعتمد تصميم مضخم الطاقة على الموازنة بين الخطية وفعالية الطاقة [٤٥،٤٦]، وتتكون أغلب أنظمة مضخمات الطاقة من مضخم طاقة من النوع Doherty PA لتقديم أكبر فعالية ممكنة على الخرج،

ومن مشوّه إشارة مسبق رقمي Digital Predistorter من أجل استعادة الخطية المطلوبة [٤٥,٤٧]،  
وبين الشكل الآتي مخطط مبسط للمضخم والمشوّه المسبق للإشارة.



الشكل رقم (٢-٦): مخطط صندوقي للمشوّه الرقمي والمضخم

نجد من الشكل السابق أنه يمكننا الحصول على إشارة دخل المشوّه الرقمي من خرج مضخم الطاقة بحسب العلاقة الآتية:

$$x_{in\_DPD}(n) = \frac{x_{out}(n)}{G} \quad (1-2)$$

حيث  $x_{out}(n)$  و  $G$  هما خرج المضخم و ربحه على التوالي، وبحسب النمذجة السلوكية نعرّف التابع  $f$  الذي يجب أن يحقق المساواة الآتية:

$$f(x_{in}(n)) = x_{out}(n) \quad (2-2)$$

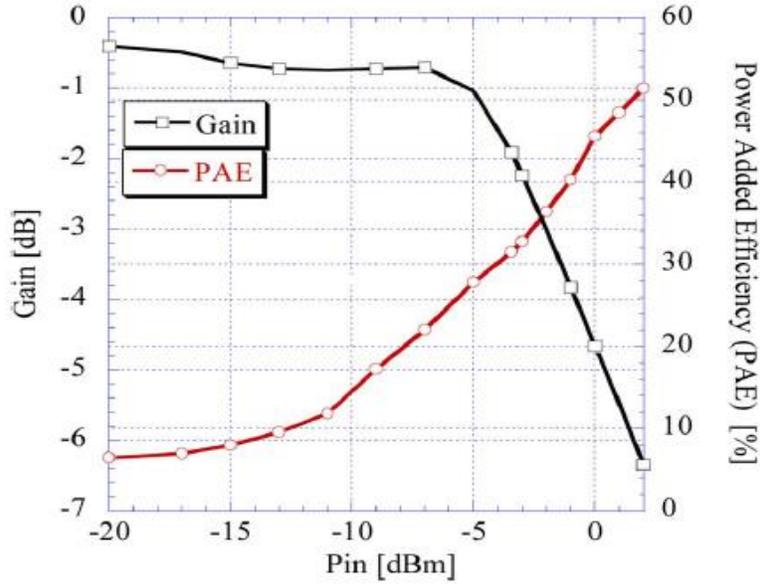
وعندها يكون التابع التحليلي المعبر عن المشوّه الرقمي مساوياً للعلاقة الآتية:

$$f\left(\frac{x_{out}(n)}{G}\right) = x_{in}(n) \quad (3-2)$$

وتعتمد الطريقة الأكثر شيوعاً في حساب التابع التحليلي للمشوّه الرقمي على تعريف هذا التابع بشكل مباشر انطلاقاً من أنه يمكن حساب دخل وخرج المشوّه الرقمي ببساطة من خلال قياس إشارة الدخل والخرج لمضخم الطاقة [٤٥,٤٨].

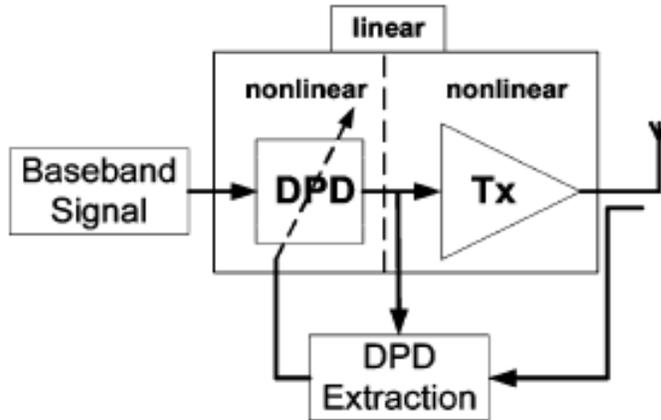
يصاحب زيادة فعالية مضخم الطاقة تدهور في خطيته [٤٥,٤٩]، حيث أنه بزيادة تردد الإشارة المرسلة والتي تمر عبر مضخم الطاقة، تنخفض خطية المضخم وتصبح ما تُسمّى بتأثير الذاكرة Memory effects (وهي تغيرات الطاقة تنتج ضمن مضخمات الطاقة نتيجة لتأثير مرور الإشارات السابقة ضمن المضخم، وتكون مهمة في حالة الترددات المنخفضة، لكنها تصبح غير مهمة ولها تأثير مباشر في انخفاض خطية مضخم الطاقة عند الترددات العالية وخاصة عند استخدام الأمواج

الميلي مترية ذات التردد الأعلى من 60 GHz) كبيرة بشكل لا يُمكن تجاهلها، لذلك وكما يوضح المخطط الآتي، يجب الأخذ بعين الاعتبار أنه هنالك مبادلة Tradeoff بين الخطية والفعالية بالنسبة لمضخم الطاقة [٤٩].



الشكل رقم (٧-٢): العلاقة العكسية بين الخطية والفعالية في مضخم الطاقة

وللحفاظ على فعالية عالية للمضخم مع خطية جيدة قدر الإمكان، يجب تمديد المنطقة الخطية أو الحفاظ على الخطية قدر الإمكان للمضخم وهذا يتم عبر المشوه الرقمي DPD.

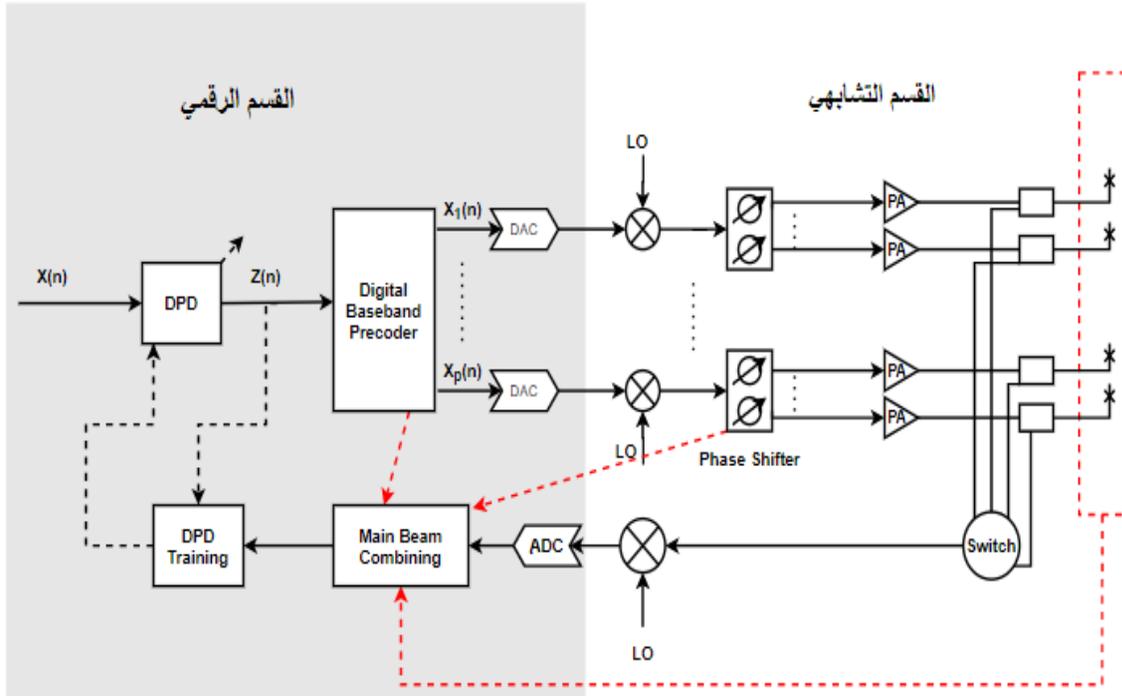


الشكل رقم (٨-٢): مخطط موسَّع لمضخم الطاقة مع آلية لزيادة الخطية

يقوم المشوه الرقمي بهذه المهمة عبر خطوتين رئيسيتين: الخطوة الأولى تتلخص بتمثيل المُرسَل بوجود السلوك اللاخطي، والمرحلة الثانية هي إيجاد التابع التحليلي للمشوه الرقمي وذلك عبر عكس نموذج المرسل (تغذية عكسية) [٤٥,٥٠]، ويبين الشكل السابق مخطط صندوقي مبسّط لآلية زيادة الخطية في المُرسَل حيث يُلاحظ أن كل صندوق من المخطط يملك تابع لا خطي فيما يكون التابع المُمثَل للمخطط ككل تابعاً خطياً، ويمكننا أن نتخيل حجم التعقيد الذي سنواجهه في تصميم هوائي كثيف يضم المئات من مضخمات الطاقة، مع الأخذ بعين الاعتبار أيضاً محدودية الأبعاد الفيزيائية لهذا الهوائي، لذلك كان لابد من التفكير في تصميم معين يخلق الموازنة بين تحقيق الأداء الأمثل بأبسط بنية ممكنة في تصميم الهوائي.

## ٢-٩- التشوه الرقمي الموجه بالشعاع Beam-Oriented DPD :

اقترحت تقنية التشوه الرقمي الموجه بالشعاع BO-DPD في مضخمات الطاقة الموجودة في جهة الإرسال في مصفوفة هوائي كثيف بتشكيل شعاعي هجين من أجل تحسين خطية الإشارة المرسل في الحزمة النهائية الناتجة عن مصفوفة الهوائيات مجتمعة [٥١].



الشكل رقم (٢-٩): تقنية BO-DPD

نجد في المشوه الرقمي التقليدي أنه يتم تعديل خطية كل مضخم طاقة على حدى، وهذه الطريقة تعتبر غير عملية في هوائي كثيف يعمل بالتشكيل الهجين لكون عدد السلاسل الرقمية أقل من عدد السلاسل الراديوية، ولذلك تستطيع تقنية BO-DPD حل هذه المعضلة ببناء و تعديل خطية الحزمة النهائية ككل بدلاً من تعديل خطية كل مضخم طاقة بمفرده، حيث يتم أخذ عينة توجيهه من كل عنصر هوائي ويقوم خط التغذية العكسية الوحيد بدمج هذه العينات المأخوذة من خرج مضخمات الطاقة ودمجها معاً للحصول على تقدير لحزمة الإشارة الرئيسية من أجل معالجتها ضمن عملية ما قبل التشويه DPD، ويبين الشكل السابق مخططاً مبسطاً يوضح آلية تنفيذ هذه التقنية.

يمكننا أن نلاحظ من المخطط السابق الشكل المختصر الذي حققته هذه التقنية بالمقارنة مع تطبيق تغذية عكسية لكل مضخم طاقة على حدى، وهذا ما يُبسّط في تعقيد البنية الفيزيائية للهوائي ويأخذ بعين الاعتبار محدودية الأبعاد الفيزيائية الصغيرة فيما بين عناصر الهوائي.

يلعب نوع التعديل المستخدم في دوراً محورياً في تحديد هوية الإشارة المرسله وآلية التعامل معها مع ما ينتج عن ذلك من تأثير مباشر في فعالية الطيف الراديوي ويتعدى ذلك إلى التأثير في كيفية استهلاك الطاقة وفعالية استثمارها بالشكل الأمثل [٣٦]، لذلك لابد من البحث في كيفية تحسين الهوائي باستخدام التعديل الأنسب.

## **٣-١٠- التعديل الترددي المتعامد في مواجهة المرشحات الحزمية متعددة الجوانب:**

يُعتبر الطيف الترددي من الموارد المحدودة على الرغم من وجود آليات تنظيم استخدامه مثل آلية تجميع الطيف Spectrum allocation ، ومع ازدياد عدد الأجهزة التي تعتمد على الوصول الى طيف الترددات الراديوية، يزداد الضغط على هذا الطيف الترددي المشبع أصلاً والمليء بالترددات المشغولة، مما يؤدي إلى نقصان في الترددات الشاغرة، ومع تطور خدمات الجيل الثالث والرابع الخلوية ازدادت حركية البيانات الخلوية ضمن النطاق العريض بشكل كبير جداً، وهذا ما دفع بمشغولية الطيف الترددي إلى حدها الأقصى، وقد أُجريت دراسة مفصلة للطيف الراديوي أظهرت أنه لا يجري استخدام هذا الطيف دفعة واحدة بشكل مستمر، وبيّنت أيضاً أنه لا يجري تجميع الطيف وفق طرق فعالة بما فيه الكفاية [٣٥].

يعتبر التعديل متعدد الحوامل Multicarrier Modulation من أكثر الطرق الشائعة للتعديل من أجل الدخول إلى المجال الترددي [٣٦,٣٧] 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 FBMC [٣٦].

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 وبقوة [٣٨].

### ٣-١١- النموذج التحليلي لنظام مُرسل OFDM Transmitter:

نقوم بتوليد إشارة OFDM من الناحية العملية باستخدام تحويل فورييه العكسي في البداية Inverse DFT، ونفترض في النموذج التالي أن المُرسل مثالي أي أن مرحلة أخذ العينات ومرحلة الترشيح لا تؤثران على الإشارة المُرسلة [٥٢,٥٣]، ويحتوي كل رمز من رموز OFDM على عدد  $N$  من الحوامل الفرعية، حيث  $N$  هو عدد زوجي (غالباً يكون من قوى العدد ٢)، والفترة الزمنية التي يشغلها كل رمز من رموز OFDM تعادل  $T_u$  من الثواني، والمسافة التي يشغلها كل حامل فرعي  $\Delta w$  [٥٢]، وبالتالي فإن أقصر فترة زمنية تحقق الشروط المطلوبة في نظام OFDM تُعطى بالعلاقة:

$$T_u = \frac{1}{\Delta w} \Leftrightarrow \Delta w = \frac{1}{T_u} = \Delta f \quad (4-2)$$

وبالاستناد إلى العلاقة السابقة فإنه يمكن كتابة طيف سلسلة فورييه  $X_S(w)$  لرمز OFDM كما يلي:

$$X_S(w) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X_S[k] \delta_c(w - k\Delta w) \quad (5-2)$$

وفي المجال الزمني تصبح الإشارة من الشكل:

$$\tilde{x}_S(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T_u}} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} x_S[k] e^{j\Delta w k t} & 0 \leq t < T_u \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (6-2)$$

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

$$\tilde{x}'_s = \begin{cases} \tilde{x}_s(t + T_u - T_g) & 0 \leq t < T_g \\ \tilde{x}_s(t - T_g) & T_g < t < T_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7-2)$$

حيث:

$T_g$  هي الفترة الزمنية لحزمة الحماية

$T_s = T_u + T_g$  : هي الفترة الزمنية التي يشغلها رمز OFDM مع حزمتي الحماية.

وبالتالي فإن الإشارة المُرسلة بالشكل العقدي  $\tilde{S}(t)$  هي مجموع رموز OFDM في المجال الزمني كما يلي:

$$\tilde{S}(t) = \sum_{s=0}^{S-1} \tilde{x}'_s(t - sT_s) \quad (8-2)$$

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

$$S(t) = \text{Re}\{\tilde{S}(t)e^{j2\pi f_c t}\}; \quad (9-2)$$

حيث  $S(t)$  تمثل الإشارة الراديوية المرسلّة وفق التعديل OFDM، و  $f_c$  هو التردد الحامل للإشارة وفي الأنظمة ذات القفزات الترددية Frequency Hopping Systems يتغير التردد الحامل وفق العلاقة الآتية:

$$f_c[s] = f_{c,0} + f_h[s] \quad (10-2)$$

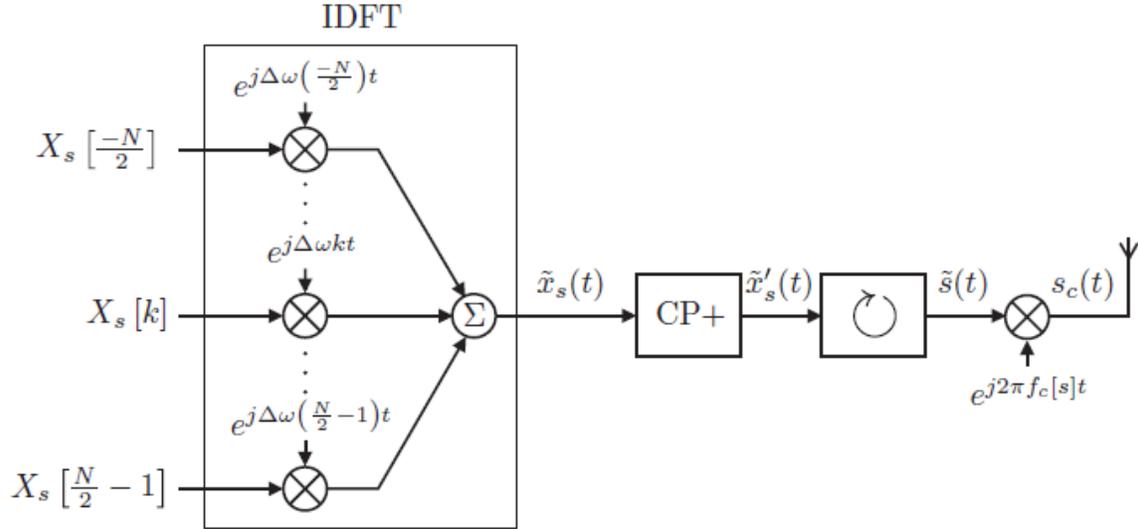
حيث:

$f_c[s]$  : التردد الحامل لرمز OFDM ذو الترتيب S

$f_{c,0}$  : التردد الحامل المركزي للحزمة ككل

$f_h[s]$  : مقدار انحراف التردد عن التردد المركزي للحزمة عند الرمز ذو الترتيب S

ويبين الشكل الآتي المخطط التحليلي لمراحل إرسال رمز OFDM مع الأخذ بعين الاعتبار تسلسل العمليات وفق المعادلات السابقة:



الشكل رقم (٢-١٠): المخطط التحليلي لمراحل إرسال رمز OFDM

سينتج لدينا الكثير من حزم الحماية Cyclic Prefix وهي مسافات فارغة من أيّة بيانات ضمن المجال الترددي وبالتالي فهي عديمة الفائدة بالنسبة لفعالية نقل البيانات وتخفض من فعالية الطيف الترددي بالمقارنة مع الحاجة الملحة له مع تطور أجيال الاتصالات وخاصة في الجيل الخامس الخلوي، وبالتالي كان لابد من البحث عن طريقة أخرى أو نوع تعديل محدد يزيد من فعالية استخدام الطيف الترددي، وهنا من غير الممكن تجاهل دور التعديل بالمرشحات الحزمية FBMC الذي يلغي الحاجة الى حزم الحماية كما سنرى في بحثنا هنا.

## ٢-١٢- التعديل متعدد الحوامل بالمرشحات الحزمية FBMC:

يعد التعديل بالمرشحات الحزمية متعدد الحوامل تقنية من تقنيات التعديل متعدد الحوامل والذي يتم فيها استخدام مجموعة من مرشحات التحليل Analysis Filters ومرشحات التوليف Synthesis Filters في المرسل والمستقبل على التوالي [٥٤،٥٥]، وعادة ما تكون هذه المرشحات من نوع مرشحات تمرير الحزمة Bandpass Filters، والتي تكون مُزاحة ترددياً او نوعاً معدلاً من مرشحات تمرير الحزمة المنخفضة Modulated low pass filters، وسنركز في بحثنا هنا على النوع المعدل من مرشحات

تمرير الحزمة المنخفضة، ويقدم التعديل بالمرشحات الحزمية FBMC فعالية طيفية وفعالية عرض حزمة أفضل من التعديل الترددي المتعامد OFDM، وبالتالي انتقائية ترددية أفضل [٥٥,٥٦]، ولنفترض لدينا رمز عقدي مُرسل عبر الحامل الفرعي  $m$  في الزمن  $n$ ، و يمكن التعبير عن الإشارة المرسله بالمعادلة الآتية [٥٧]:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M g_{m,n}(t) x_{m,n}(t) \quad (11-2)$$

$$g_{m,n}(t) = p_{tx} \left( t - \frac{NT}{\nu} \right) e^{j2\pi F(t-NT)} e^{j\theta_{m,n}} \quad (12-2)$$

حيث  $p_{tx}$  هي نبضة التشكيل الأساسية،  $g_{m,n}(t)$  هي التردد المُزاح، و  $T$  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 المرسله أننا لم نضيف حزم حماية كما فعلنا في تعديل OFDM وبالتالي نلاحظ أن الفعالية الطيفية في تعديل FBMC أفضل منها في تعديل OFDM وهو يشكل خياراً جذاباً للتطبيق العملي بدلاً من تعديل OFDM.

## ٢-١٣- خلاصة:

يتبين لدينا من خلال الدراسة النظرية أن تعديل المرشحات الحزمية يوفر فعالية طيف أفضل من التعديل الترددي المتعامد لكونه لا يستخدم حزم الحماية والتي هي عبارة عن ترددات فارغة ضمن الطيف الترددي، لكن لا يجب أن نغفل أيضاً أن التعديل الترددي المتعامد يتميز بقدرته العالية على مقاومة التداخل وبالتالي يحسن من معدل خطأ البت BER ونسبة الإشارة إلى الضجيج، كما يمكن ملاحظة أن التعديل الترددي المتعامد يعمل بكفاءة أكبر مع الترددات العالية ومقاومة أفضل للضجيج في ظروف وبيئات مختلفة، مما يُحسن من نسبة الإشارة إلى الضجيج بشكل واضح.

الفصل الثالث

القسم العملي

**Practical Section**

## الفصل الثالث

### ٣- القسم العملي

#### ٣-١- مقدمة :

يمكن لشبكات الجيل الخامس الخليوية أن تكون أكثر اتساعاً وفعاليةً، لتستطيع بذلك تقديم الكثير من الخدمات والسيناريوهات الفعّالة على الرغم من التحسينات والتطور الذي طرأ على شبكات الجيل الرابع 4G، ويشكل استخدام الهوائي الكثيف Massive MIMO علامة فارقة في الشبكات الخليوية، فعبّره يمكننا تشغيل عدد كبير من الهوائيات ضمن محطة بث Base Station واحدة، وتحقق بذلك فعالية وأداء أفضل بكثير من شبكة الجيل الرابع.

تم استخدام برنامج Matlab Simulink 2019a في عملية نمذجة هوائي كثيف للجيل الخامس مصمم وفق هيكلية التشكيل الشعاعي الهجين، وقمنا ببناء منظومة مؤلفة من مرسل ومستقبل وقناة اتصال، ويتم إرسال رسالة معينة من طرف الإرسال واستقبالها في جهة الاستقبال، وتم اعتماد أسلوب المحاكاة والنمذجة باستخدام Matlab Simulink لكونه أكثر قدرة على تمثيل المنظومة بتفاصيلها ومراحل عملها، وأكثر فعالية في محاكاة عمل المنظومة وتمثيل خطوات العمل و آليات الإرسال بأسلوب أقرب إلى الواقع و أسهل للفهم والتتبع، ويمكننا القول إن الحصول على نتائج أكثر دقة ومقاربة إلى الواقع هي الهدف الأهم، ويقدم Matlab Simulink هذه الأهداف والمميزات مجتمعة في بيئة عمل واحدة.

#### ٣-٢- التحديات التي تواجه تصميم الهوائي الكثيف في الجيل

#### الخامس:

تستمر معايير شبكات الجيل الخامس الخليوية في التطور بشكل متواصل، وبأهداف واضحة متمثلة في تحقيق معدلات نقل بيانات Data Rate أعلا، تأخير أقل في الدّخول للشبكة Low Latency Network Access، وفعالية طاقة Power Efficiency أكبر، تقودنا معدلات نقل البيانات الأعلى إلى الحاجة إلى أنظمة ذات عرض حزمة أكبر، وتعد الأنظمة المتوفرة ذات عرض الحزمة ضمن الطيف

الترددى حتى 6GHz غير كافية لتحقيق هذا الهدف، وهذا ما قاد إلى التفكير بمستوى ترددي أعلى هو الأمواج الملي مترية.

### ٣-٣ - تصميم مصفوفة هوائى ذكي بالتشكيل الشعاعى:

تُمكّن أطوال الموجات الأصغر الناتجة عن الترددات العالية جداً للأمواج الملي مترية من تطبيق عناصر هوائيات بأبعاد مصنعية صغيرة جداً، ولكن ومع ذلك، تزداد التحديات المرتبطة بمسار الإشارة والإرسال عبر هذه الترددات العالية جداً، فعلى سبيل المثال يبلغ التضعيف attenuation الناتج عن امتصاص الغاز عند طول الموجة 60GHz الملي مترية 10 dB/km، في حين يبلغ التضعيف عند طول الموجة 700MHz العادية 0,1 dB/km [58]، ويمكن تجاوز هكذا عقبات من خلال تصميم مصفوفة الهوائيات الذكية، واستخدام تقنيات معالجة الإشارة المكانية، ومن ضمنها تقنيات التشكيل الشعاعى Beamforming، ويتم تمكين هذه التقنية مع مصفوفة الهوائيات الكثيفة لتحقيق أعلى ربح هوائى يعوض الفقد الذي تعاني منه الإشارة بسبب التضعيف وخسارة المسار وغيرها.

ولتصميم مصفوفة هوائيات مع أكبر قدر من المرونة والتحكم عبر التشكيل الشعاعى، فإنه من المفضل الحصول على وزن تحكم Weighting Control مستقل لكل عنصر من عناصر مصفوفة الهوائى، وهذا يتطلب وحدة إرسال واستقبال منفصلة لكل عنصر من عناصر المصفوفة، وفي مصفوفة الهوائى الكثيف يبدو هذا المقترح غير منطقي وغير قابل للتطبيق عملياً بسبب الكلفة العالية ومحدودية الأبعاد الفيزيائية لمصفوفة الهوائى ومحدودية الطاقة، ومثال على ذلك، فإن استخدام محولات رقمية تشابهية ومحولات تشابهية رقمية عالية الأداء ومضخمات طاقة متغيرة لكل قناة متصلة بكل عنصر هوائى من المصفوفة قد يرفع التكلفة واستهلاك الطاقة بشكل كبير جداً [58].

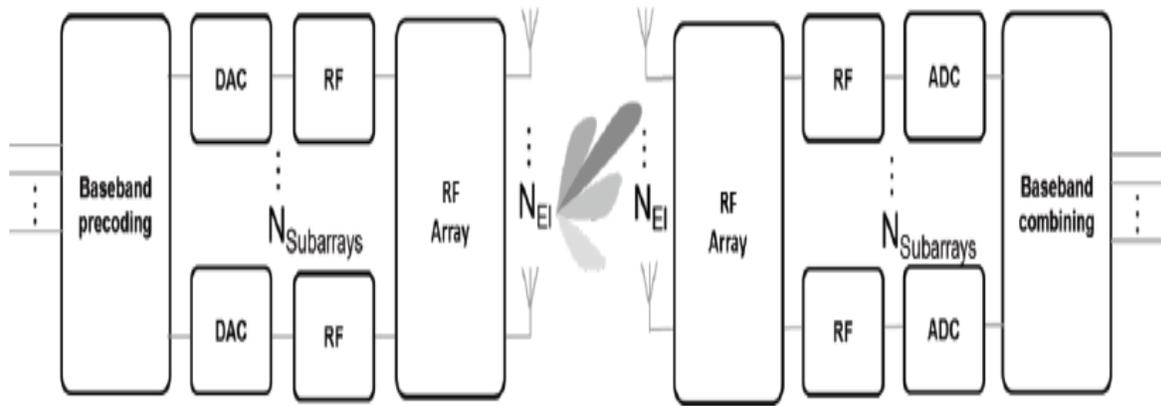
### ٣-٤ - التشكيل الشعاعى الهجين Hybrid Beamforming:

إن التشكيل الشعاعى الهجين هو تقنية يتم من خلالها تجزئة عملية التشكيل الشعاعى بين المجالين الرقمية والتشابهى، ويقوم مصممو النظام عادة بتطبيق التشكيل الشعاعى الهجين للموازنة بين المرونة والتكلفة، يتم تطوير تقنية التشكيل الشعاعى الهجين عادة بدمج مجموعة من عناصر مصفوفة الهوائيات في مصفوفات جزئية subarray، ويخصص لكل مصفوفة جزئية وحدة إرسال واستقبال مستقلة، وبهذا

نخفّض عدد هذه الوحدات في النظام بشكل ملحوظ، ويتم اختيار عدد العناصر وتوزّع هذه العناصر ضمن المصفوفات الجزئية بشكل يضمن تحقيق النظام للمجال الذي يشمل زوايا التوجيه Steering Angels كلّها.

لنأخذ سلسلة الإرسال كأول مثال لنا، حيث يتصل كل عنصر هوائي ضمن المصفوفة الجزئية بمزيج طور موجود ضمن القسم التماثلي من السلسلة الراديوية، فيما يتكون القسم الرقمي من عوامل وزن عقدية يتم تطبيقها على الإشارات التي تغذي المصفوفة الجزئية كلّها، ويبين الشكل (١-٣) الهيكلية الهجينة.

يسمح التشكيل الشعاعي الرقمي Digital Beamforming بالتحكم بمطال وطور الإشارة الصادرة عن كل مصفوفة جزئية، ولأسباب تتعلق بتعقيد هيكلية النظام، يقتصر التحكم الراديوي بالإشارة لكل عنصر على التحكم بطور هذه الإشارة فقط.



الشكل رقم (١-٣): هيكلية التشكيل الشعاعي بالنمط الهجين

إن تصميم ومحاكاة أنظمة معقدة مثل النظام الموضح في الشكل (١-٣) هي عملية صعبة جداً، ومعقدة من حيث النمذجة والتصميم، حيث يتوجب علينا نمذجة وتصميم مصفوفة الهوائي الكثيف وربطها بالسلاسل الراديوية اللازمة ومع البنى الرقمية المتصلة بها للتحكم بتعقيد البنية الكلية والتخفيف منها بما يشكّل ما يُسمّى بالهيكلية الهجينة للتشكيل الشعاعي، لذلك نستخدم برنامج Matlab 2019a لقدرته على تصميم النظام بشكله الكامل وبأسلوب دقيق وبأبسط صيغة ممكن وأقربها إلى الواقع، معتمدين أسلوب النمذجة باستخدام Simulink الذي يتمتع بمرونة عالية ويتصميم أقرب ما يكون من

الواقع من حيث أسلوب العرض والنتائج، ويمكن من خلاله محاكاة بيئة العمل لنظام مرسل ومستقبل ضمن شروط محددة، كما يعطينا خيارات واسعة لتصميم منظومة ارسال واستقبال متكاملة من حيث البارامترات الأساسية واللازمة في عملية تصميم الهوائيات وسلاسل الإرسال والإستقبال الراديوي ومعدّلات الإشارة المرسله وكاشفات تعديلها، وسنبدأ بعرض بعض ميزات البرنامج في تصميم مصفوفة الهوائي الكثيف مع استخدام البارامترات المعروفة في وسط الجيل الخامس الخلوي.

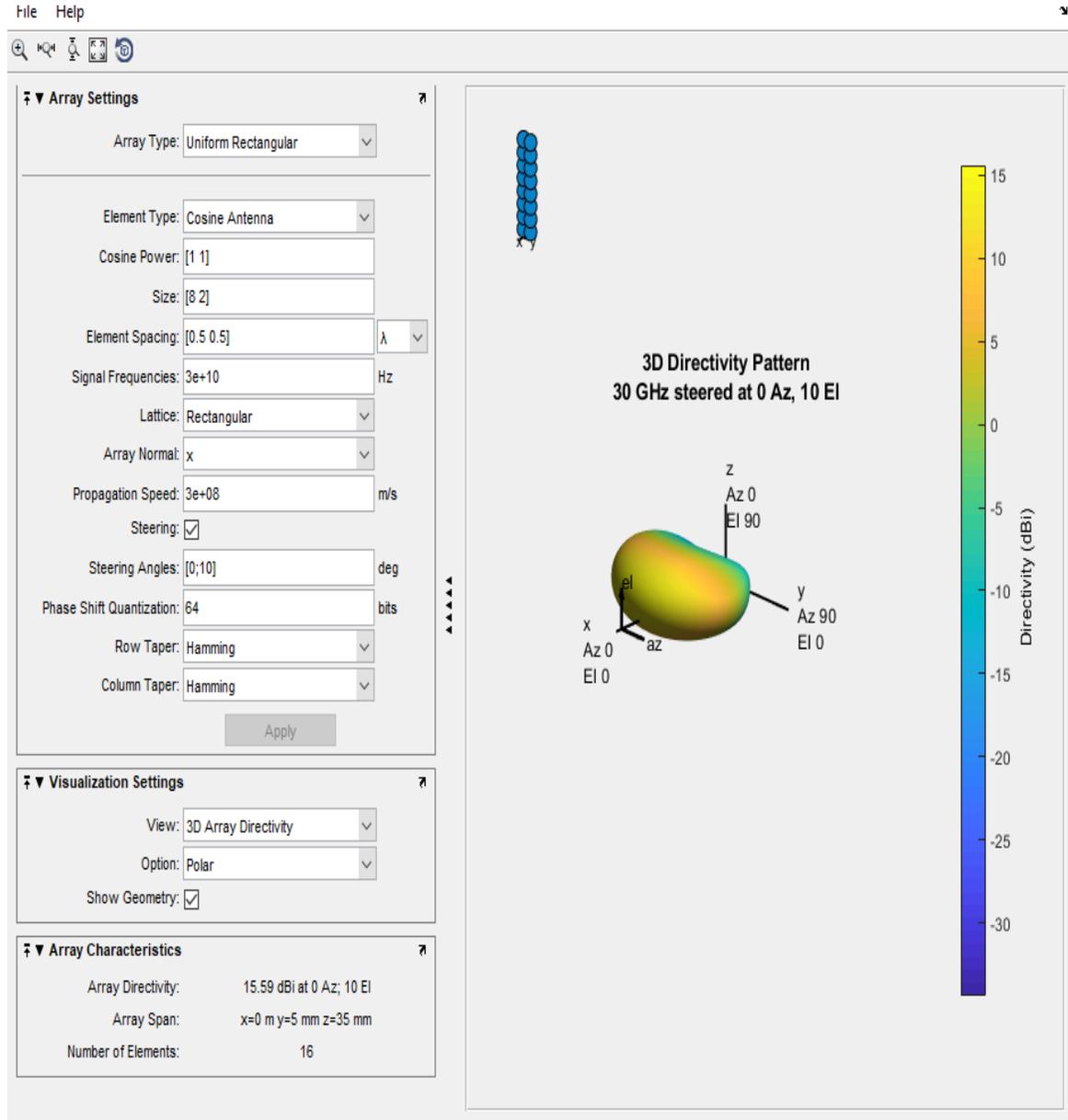
### ٣-٥- تصميم المصفوفة :

توجد العديد من العوامل التي تجب مراعاتها عند تصميم مصفوفة هوائي كثيف، حيث يتضمن التصميم بارامترات محدّدة مثل أبعاد المصفوفة، المسافة بين عناصر المصفوفة، وأبعاد العنصر الواحد. وباستخدام الأمواج الملي مترية تتقص أبعاد المصفوفة تبعاً لطول الموجة كما ذكرنا سابقاً، فعلى سبيل المثال، يمكننا القول أن المصفوفة المصممة للعمل بالأمواج الملي مترية أصغر بمئة مرة من المصفوفة المصممة للعمل بالأمواج الميكروية [٥٨][٥١]، وبزيادة عدد عناصر المصفوفة نستطيع أن نحصل على ربح تشكيل شعاعي Beamforming Gain أعلا، و يجب أن نأخذ بعين الاعتبار أيضاً ظاهرة الاقتران المتبادل mutual coupling عند تصميم المصفوفة من أجل الحد منها قدر الإمكان،

يتم تقييم أداء التقسيم المعماري في تصميم المصفوفة على أداء النظام ككل، فكلما زاد عدد عناصر الهوائي كلما زاد ربح الهوائي، وكلما زادت دقة الحزمة القلمية الصادرة عن مصفوفة الهوائي الكثيف واتجاهيتها كلما انخفض فقد المسار الناتج عن استخدام الترددات العالية وزادت قدرة توجيه الحزمة نحو الاتجاه المطلوب، وهذا ما سعينا إلى تحقيقه قدر الإمكان في بحثنا هنا.

للبدء بعملية تصميم مصفوفة الهوائي الكثيف، يمكن الاستعانة بتطبيق ضمن برنامج ماتلاب مخصص لهذا الغرض يسمى Sensor Array Analyzer والذي يمكن فتحه عبر كتابة الأمر sensorArrayAnalyzer في نافذة الأوامر في الواجهة الرئيسية لبرنامج ماتلاب، أو من خلال واجهة التطبيقات المتوفرة ضمن ماتلاب والتي تكون موجودة ضمن قائمة التطبيقات على النافذة الرئيسية للبرنامج ، ويبيّن الشكل الآتي الواجهة الرئيسية لهذا التطبيق والخيارات المتاحة لإجراء التعديلات للحصول على المصفوفة المرغوبة، كنوعية المصفوفة(خطية أو غير خطية، مربعة أو مستطيلة)، ونوع عنصر الهوائي الواحد، وحجم المصفوفة والتباعد الفيزيائي بين عناصر المصفوفة، والتردد

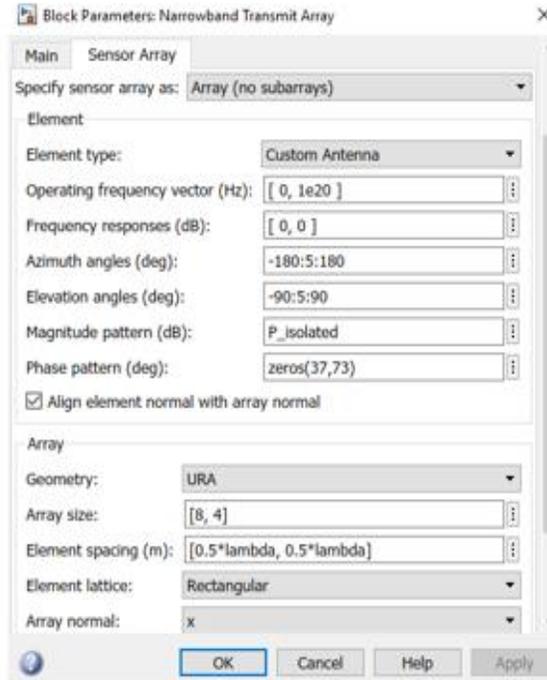
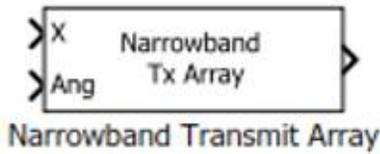
المستخدم وزوايا التوجيه Steering Angels، ويمكن ببساطة تعديل طريقة عرض النتائج وهيكلية التصميم النهائي بطريقة العرض ثنائي البعد 2D وثلاثي البعد 3D والحصول على مخطط حلقات التداخل.



الشكل رقم (٣-٢): الواجهة الرئيسية لتطبيق sensor Array Analyzer App

بما أننا سنعمل على تصميم النظام في برنامج Matlab Simulink لذلك يبدو تصميم المصفوفة وفق النمذجة مختلفاً بعض الشيء، حيث يمكننا تصميم المصفوفة المطلوبة باستخدام الصندوق

المسمى Narrowband Transmit Array ، ويحتوي بداخله على الخواص والبارامترات التي تحدد شكل ومزايا المصفوفة المراد تصميمها والعمل من خلالها، حيث يمكننا تحديد نوع عناصر الهوائي، وزوايا السمات والارتفاع للإشارة المرسله من الهوائي، وكيفية توزع عناصر الهوائيات ضمن المصفوفة (توزع خطي أو غير خطي أو توزع محدد مسبقاً)، والأبعاد الفيزيائية فيما بين عناصر المصفوفة وعلاقتها بطول الموجة للإشارة المرسله، ويبين الشكل الآتي الصندوق المعبر عن مصفوفة الإرسال، وصفحة البارامترات الخاصة به، والتي يمكن من خلالها التعديل في تصميم المصفوفة وخواصها، وفي النظام الذي قمنا بتصميمه



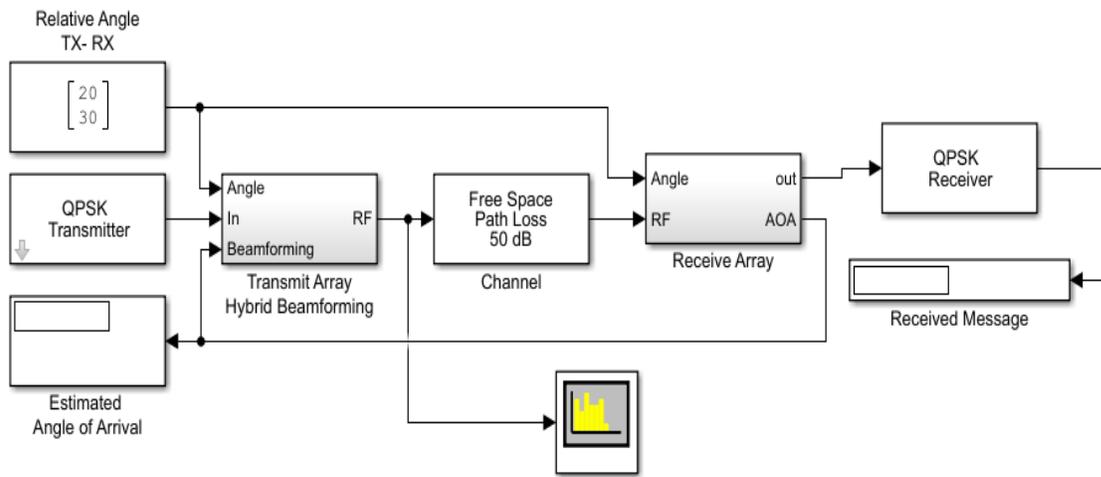
الشكل رقم (٣-٣): مصفوفة إرسال راديوي مع البارامترات ضمنها

### ٣-٦ - وصف نموذج النظام:

يتألف المستوى الأعلى من النظام من ستة أنظمة فرعية يحتوي كل منها مجموعة من البلوكات Blocks والتي تؤدي مهام معينة، بلوك مستقل للتحكم بالزاوية النسبية بين المرسل والمستقبل، و شاشتي عرض لإظهار نتائج المحاكاة:

- نظام فرعي قمنا بتسميته اختصاراً بمُرسل التعديل QPSK لأنه يعمل على توليد إشارة عشوائية وتعديلها وفق التعديل QPSK في معظم حالات المحاكاة التي نقوم بها.
- نظام مرسل تردد راديوي RF Transmitter مكون من مراحل الإرسال الراديوي المعروفة من عملية مزج وتعديل بالتردد المتوسط وتضخيم للإشارة، يضاف إلى كل ذلك تقنية التشكيل الشعاعي الهجين مع دائرة التحكم بها، كما يتضمن نموذج النظام المرسل الراديوي نواقص طبيعية للنظام، Natural Imperfections كالضجيج Noise، التأثيرات غير الخطية Non Linear Effects، والاقتران المتبادل Mutual Coupling.
- قناة اتصال مثالية تتخامد فيها الإشارة المُرسلة وفق نموذج خسارة مسار حر محدد.
- مستقبل راديوي RF Receiver مزود بمصفوفتي هوائيات استقبال، محول تشابهي رقمي ADC بدقة 12 bits، وبخوارزمية معينة لتقدير زاوية وصول الإشارة.
- مستقبل QPSK Receiver يتضمن مزامنة الحامل والإطارات، وآلية إلغاء التعديل وفك ترميز البيانات.
- بلوك يضع مستخدم النظام فيه الزاوية بين المرسل والمستقبل.
- بلوك تحليل الطيف الترددي Spectrum Analyzer، يرسم من خلاله طيف كثافة الطاقة الكهربائية الصادرة عن مصفوفة الإرسال.

ويبين الشكل الآتي النظام الكلي والبلوكات المراقبة التي سنعمل من خلالها.

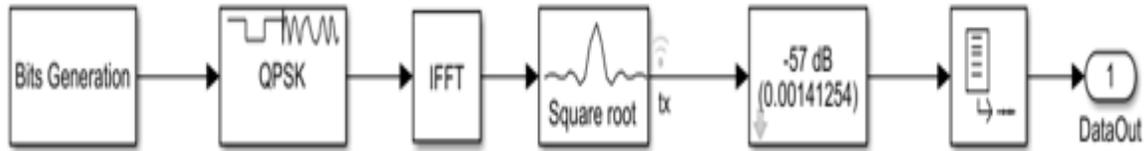


الشكل رقم (٣-٤): مرسل ومستقبل راديوي للأموح الميلي مترية بالتشكيل الشعاعي الهجين

### ٣-٧- مرسل QPSK:

يتضمن المرسل نظاماً فرعياً لتوليد البتات العشوائية قمنا بتسميته Bit generation subsystem، يحتوي على مجموعة من البلوكات والتي من غير المهم الإسهاب في شرحها هنا- تقوم بتوليد سلسلة دورية من البتات التي تشكّل رسالة رقمية معينة يمكن تطبيق التعديل اللازم عليها وإرسالها، كما يحتوي النظام الفرعي على بلوك يقوم بإجراء تعديل QPSK على الإشارة الداخلة اليه، وهو بلوك موجود مسبقاً ضمن مكتبة البرنامج، بلوك تحويل فورييه العكسي IFFT في حال استخدام نظام التعديل الترددي المتعامد OFDM، مرشح تمرير جبهة التجيب الصاعدة Raised Cosine Filter من أجل تشكيل النبضة وتضخيم طاقة الإشارة المرسلّة على حساب النبضات الصغيرة الخاصة بالضجيج، وبلوك الربح Gain Block من أجل التخفيف من الضياعات ضمن النظام الفرعي و تحسين جودة الإشارة المرسلّة في هذه المرحلة.

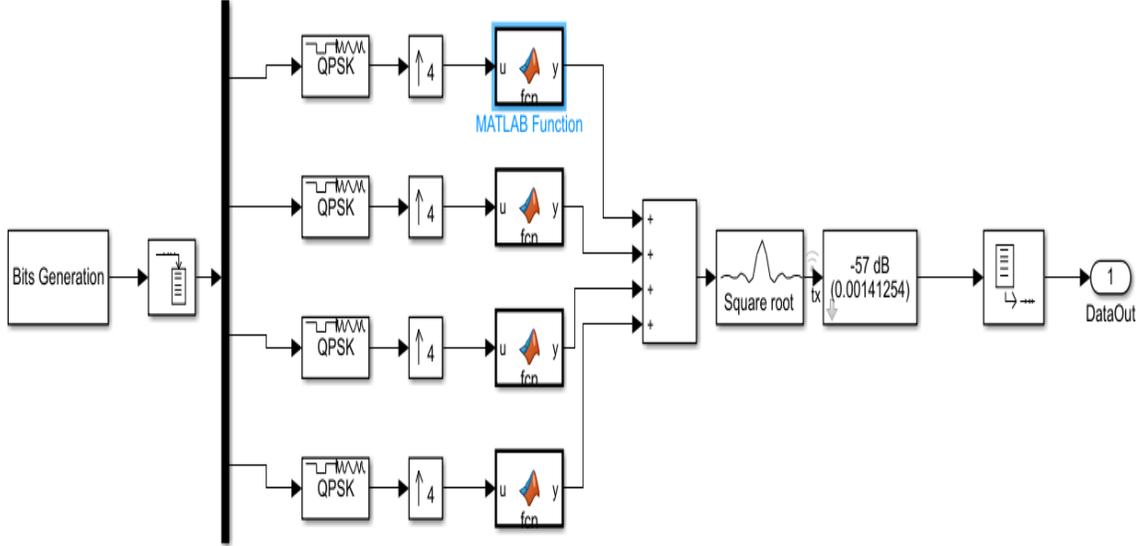
يقوم بلوك توليد البتات بتوليد إطارات وكل إطار مكون من رأس Header من ٢٦ بت، ومن ١٧٤ من البتات العشوائية، ويبين الشكل الآتي النظام المرسل الفرعي وكيفية اتصال البلوكات ضمنه وترتيبها.



الشكل رقم (٣-٥): النظام المرسل الفرعي بتعديل OFDM

أما في حال استخدام التعديل بالمرشحات الحزمية فإن بنية النظام المرسل تختلف حيث أننا هنا نطبق عملية التعديل على كل إشارة من مجموعة الإشارات الفرعية المرسلّة والتي تختلف عن بعضها البعض فقط بفارق في الطور مقداره  $\frac{\pi}{4}$ ، ويتم الحصول على كل إشارة من الإشارات السابقة بعد تعديلها بمعدل QPSK مستقل لكل منها ومن ثم رفع معدل أخذ العينات بمعامل مقداره ٤، وفي المرحلة الأخيرة ترشيح كل إشارة بمرشح تمرير منخفض Low Pass Filter تم تصميمه وفق كود برمجي كما

في الشكل الآتي، حيث نلاحظ أننا استغنيا عن استخدام البلوك الخاص بتحويل فورييه العكسي، لأننا هنا نقوم بترشيح كل حامل فرعي على حدى قبل إرساله.

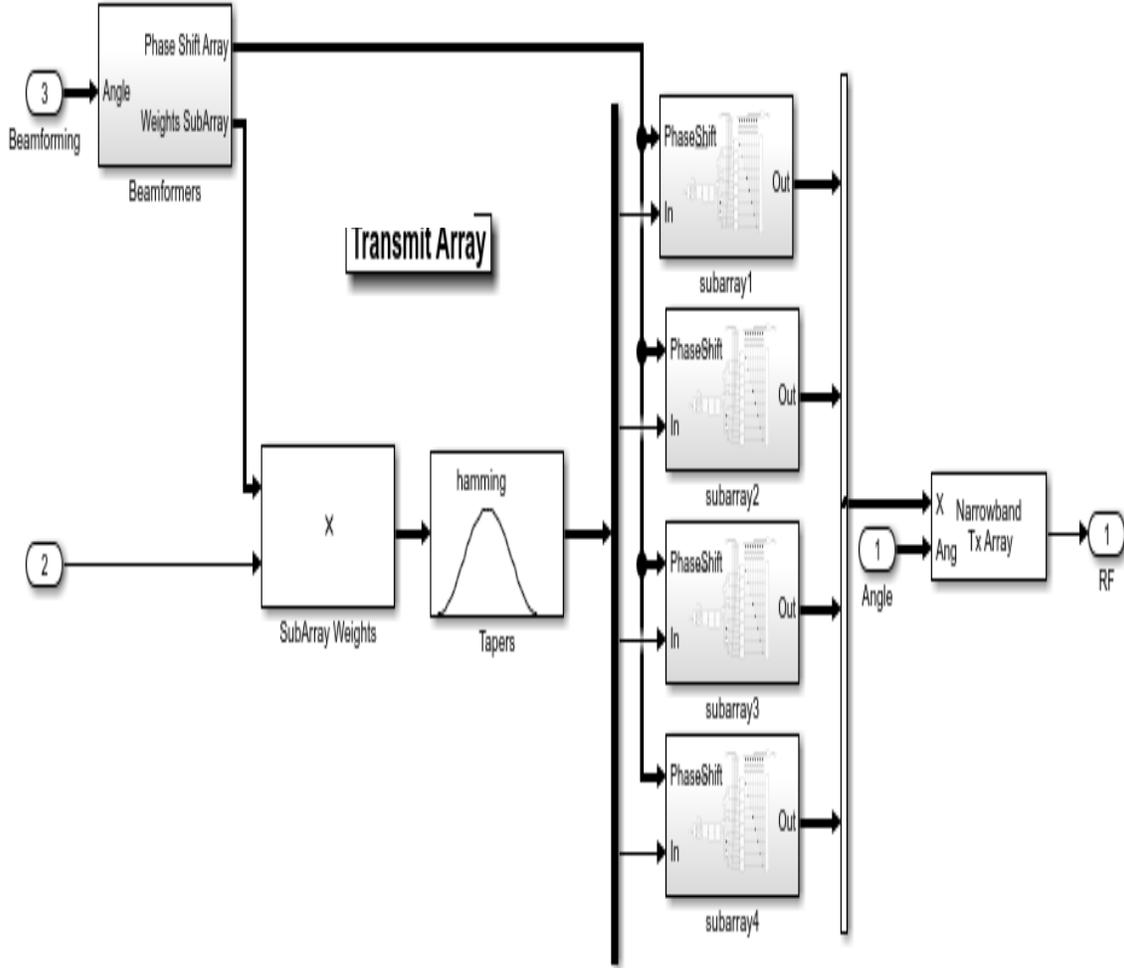


الشكل رقم (٣-٦): النظام المرسل الفرعي بتعديل FBMC

### ٣-٨- المرسل الراديوي RF Transmitter:

ينقسم المرسل الراديوي - وهو الجزء الأهم الذي نعمل عليه في بحثنا هنا - إلى ثلاثة أقسام: المُشكِّل الشعاعي للمصفوفة Array Beamformer يقوم بقيادة الحزم الشعاعية وتوزيعها على عناصر الهوائيات و المصفوفات الجزئية بحسب الزاوية AOA للمستقبل وبحسب طور الإشارة المرسلة في تلك اللحظة، وبالتالي يتم توجيه الإشارة إلى عنصر الهوائي أو مجموعة عناصر الهوائيات التي تحقق أفضل توجيه للإشارة إلى المستقبل، ويحتوي النظام الفرعي أيضاً على هوائي يعمل بالتشكيل الشعاعي الهجين Hybrid Beamforming Antenna مكوّن من أربع مصفوفات جزئية، وكل مصفوفة جزئية تتكون من ثمانية عناصر هوائيات متصلة إلى القسم التماثلي من الهيكلية الهجينة المكونة من مزيجات طورية ومضخمات للطاقة من أجل قيادة الحزم الشعاعية عند كل طور وتحويلها، وبلوك مصفوفة إرسال ضيقة الحزمة Narrowband Transmit Array تحدثنا عنه في فقرة سابقة، ويبين الشكل الآتي النظام الفرعي المرسل مع المصفوفة الجزئية الأربعة ضمنه، ويحتوي بالإضافة إلى البلوكات التي قمنا

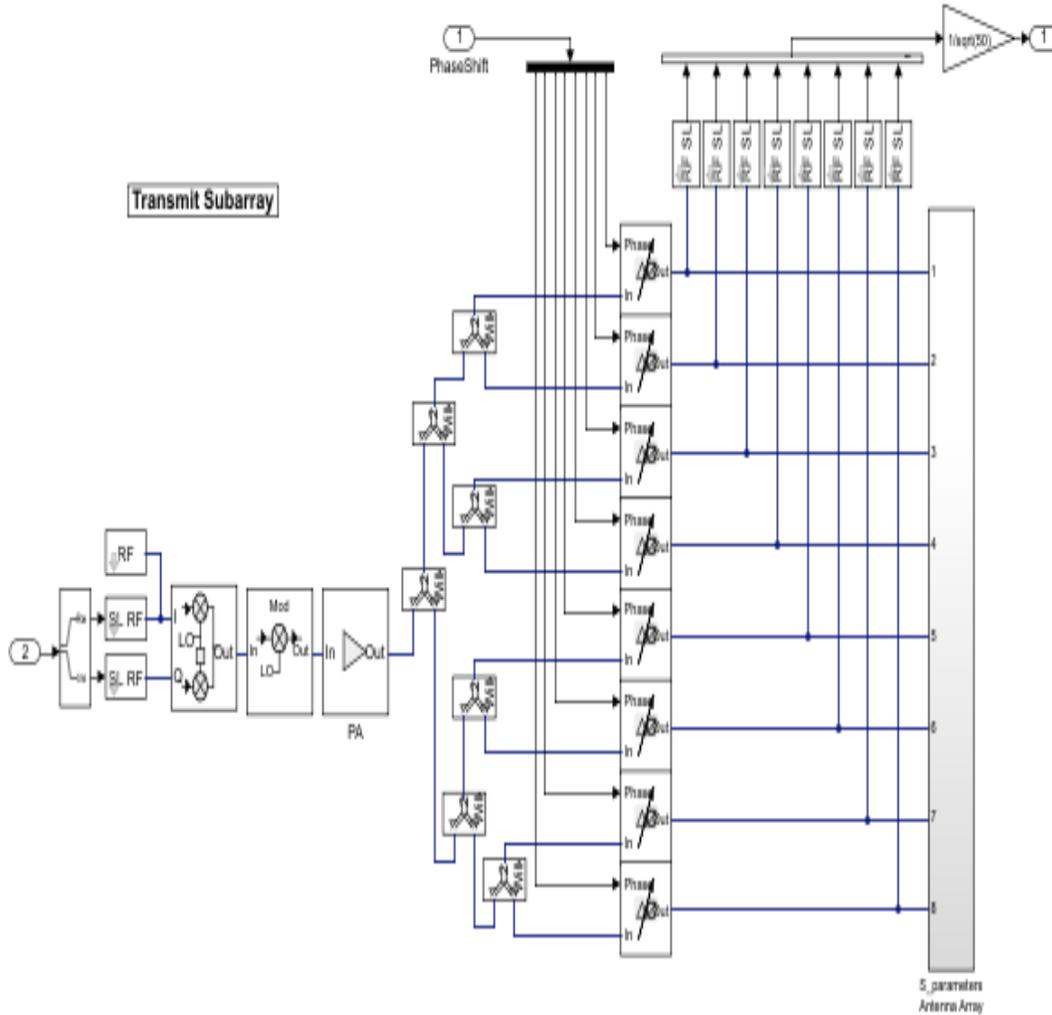
بشرحها على بلوك لضرب الإشارة المراد إرسالها مع الأوزان المناسبة التي يجري الحصول عليها والتحكم بها من المشكّل الشعاعي.



الشكل رقم (٣-٧): مصفوفة الإرسال

يتألف الهوائي الهجين من ٣٢ عنصر هوائي، وتتنوع هذه العناصر على أربع مصفوفات جزئية أي أن كل مصفوفة جزئية تحتوي على ثمانية عناصر هوائيات، قمنا باختيار هذا العدد من عناصر الهوائيات كمثال عن مصفوفة هوائي كثيف Massive MIMO لتخفيف تعقيد منظومة الهوائي قدر الإمكان مع المحافظة على خواص الهوائي الكثيف عند هذا العدد من العناصر، مع الأخذ بعين الاعتبار أنه كلما زاد عدد عناصر الهوائي الكثيف، كلما زادت فعاليته وزاد ربح المصفوفة، وتتألف كل

مصفوفة جزئية من ثمانية مرسلات راديوية RF Transmitters تعمل بتردد 66GHz، ويبين الشكل الآتي أحد هذه المصفوفات الجزئية.



الشكل رقم (٣-٨): مصفوفة إرسال جزئية

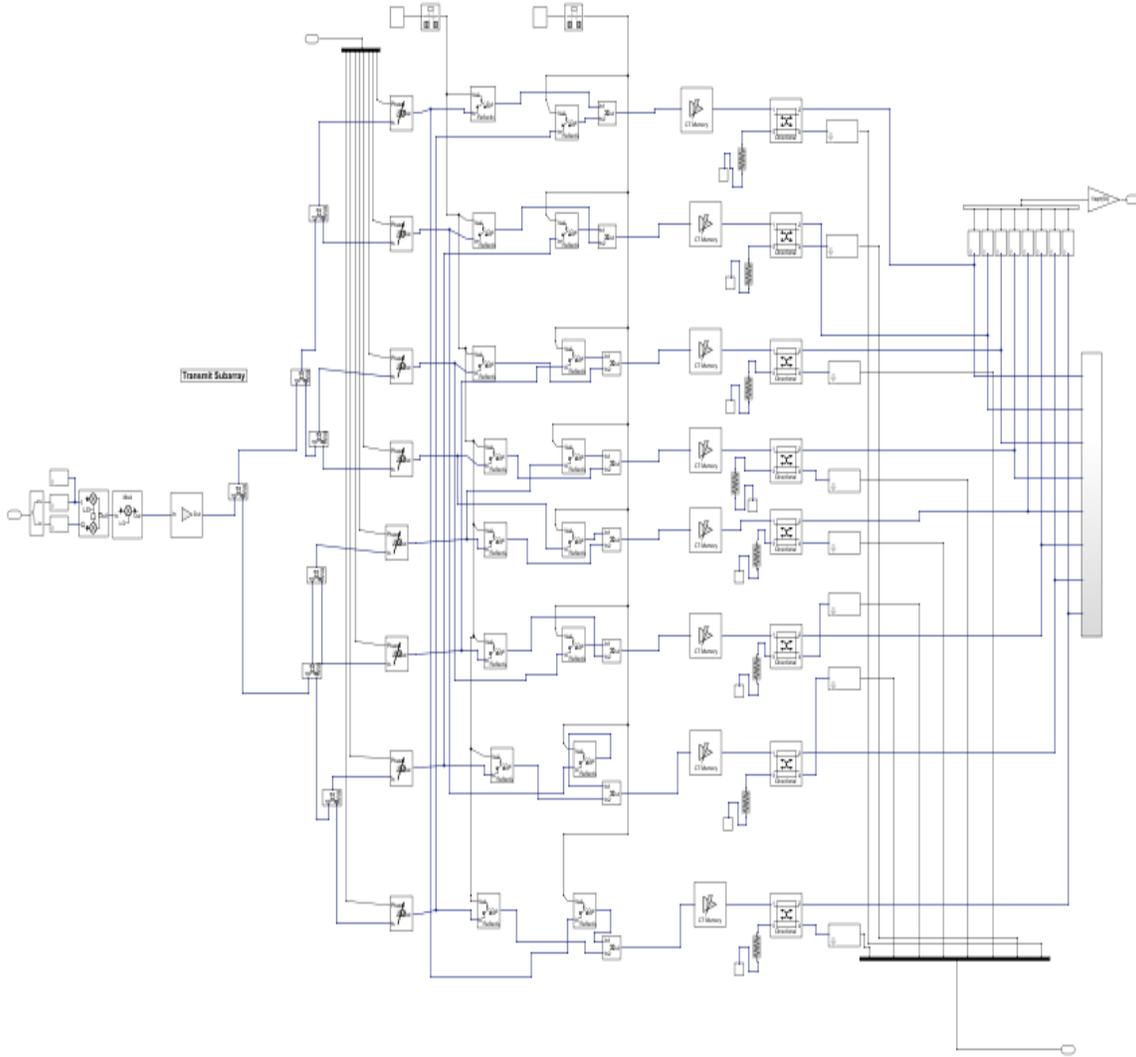
تعد الهوائيات المستخدمة من نوع الهوائيات المطبوعة الميكروية Microstrip Patches، وقمنا بتصميم عناصر الهوائيات وفق كود برمجي يحدد خواص هذه العناصر كالتردد الذي تعمل عنده وأبعاد كل عنصر، قمنا باستخدام أربع سلاسل راديوية RF Chains فقط وهنا تكمن أهمية التشكيل الشعاعي

الهجين واستخدام المزيح الطوري حيث أنه تم اختصار عدد السلاسل الراديوية من ٣٢ إلى ٤ بفضل هذه التقنية.

قمنا بتطبيق فكرتنا المقترحة هنا وضمن كل مصفوفة إرسال جزئية من المصفوفات الأربعة، حيث أنه ومن المعروف أن كل تحسين تقوم به على بارامتر معين سيقابله فقد في بارامتر آخر، والهدف النهائي هو الحصول على توازن معقول ومُرضي بين الكفاءة وفعالية استخدام الطاقة و التكلفة المادية، ومن المعروف أن المزيحات الطورية هي الأكثر كفاءة لكنها الكاثر تكلفة والأكثر استهلاكاً للطاقة الكهربائية إذا ما قُورنت بعناصر أخرى قد تعمل عملها، ونحن نتحدث هنا عن المبدلات Switches التي تتميز بكفاءة جيدة يمكن زيادتها بشكل كبير عبر ربطها ضمن شبكة اتصال كليّة أو جزئية فيما بينها، كما تتميز بأنها أقل تكلفة من المزيحات الطورية وأقل استهلاكاً للطاقة الكهربائية، وبالتالي بتخفيض عدد المزيحات الطورية نخفف من استهلاك الطاقة ونزيد من فعالية مصفوفة الإرسال، ونخفف من تكلفة بناء منظومة الإرسال، ويوجد هيكليات مختلفة لربط شبكات مبدلات فيما بينها، ومن بينها شبكة الربط الجزئية Sub-connected Switch، وشبكة الربط الكلية Fully-connected Switch، و تعتبر هيكلية المزيحات الطورية التي قمنا باستخدامها في بحثنا هنا هيكلية مزيحات متصلة بشكل جزئي Sub-connected phase shifters، لأن كل سلسلة راديوية تغذية مجموعة من المزيحات الطورية بشكل منفصل عن المجموعات الأخرى، حيث أنه كما لاحظنا سابقاً أن كل مصفوفة جزئية يتم تغذيتها من سلسلة راديوية مستقلة كما يبين الشكل (٢-٣-أ) في الفصل السابق المخطط الصندوقي المختصر للنظام الذي قمنا ببنائه وفق بنية الاتصال الجزئية للمزيحات الطورية.

وقد قمنا باستبعاد فكرة الاتصال الكلي للمزيحات الطورية، أي أن كل سلسلة راديوية تتصل إلى جميع المزيحات الطورية الموجودة بسبب استهلاكها العالي للطاقة مقارنة مع بنية الاتصال الجزئية [٢٢،٥٩]، وبالمقارنة بين المزيحات الطورية والمبدلات، وجدنا أن المبدلات أرخص وأقل استهلاكاً للطاقة الكهربائية، فعلى سبيل المثال، بمقارنة أداء مزيح طوري ومبدل يعملان وفق التردد ٢,٤ GHz تبين أن المزيح الطوري يستهلك ما بين ٢٨,٨-١٥٢ ميلي واط بينما استهلك المبدل عند نفس التردد ما بين ٠-١٥ ميلي واط [٢٢،٥٩،٦٠،٦١،٦٢]، لذلك قمنا باختيار المبدلات كخيار أفضل في تحسين تصميم الهوائي المصفوفة الهجين.

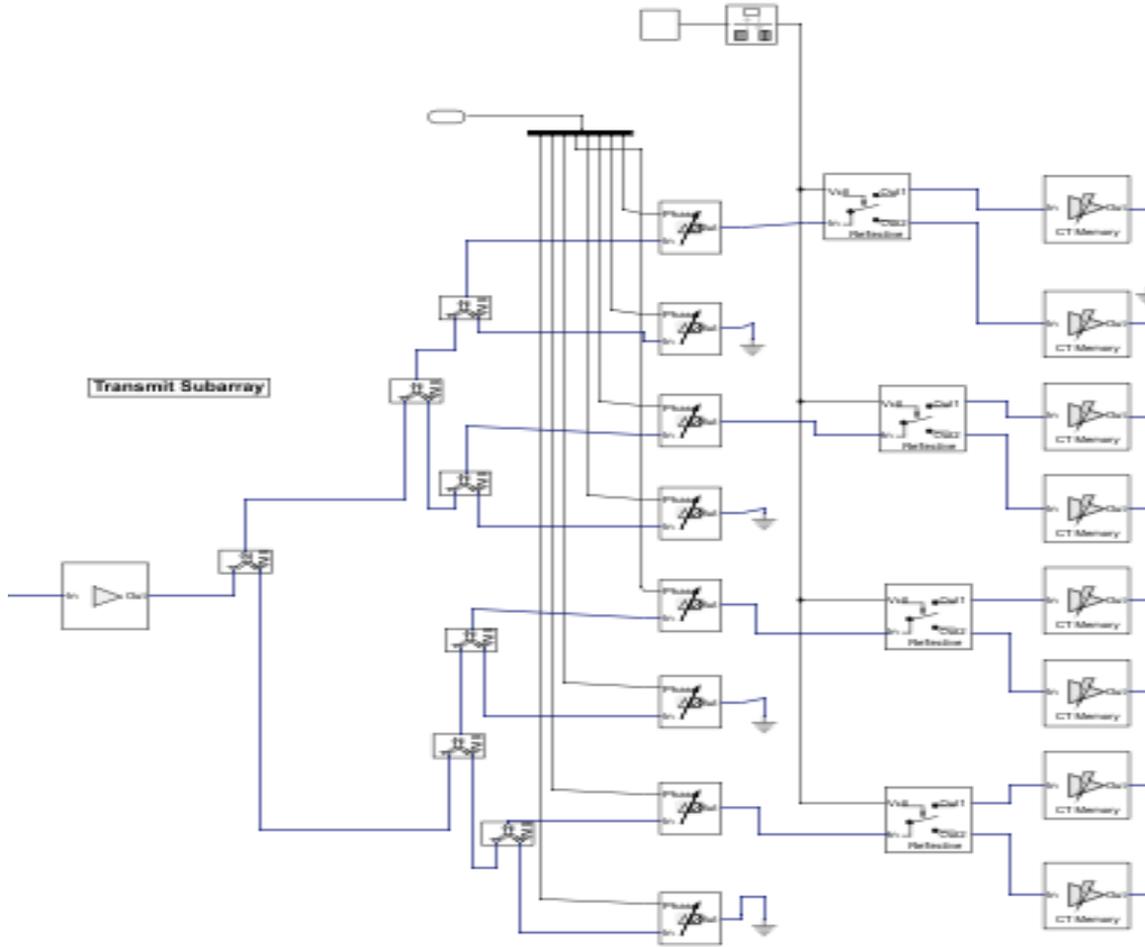
وبشكل مشابه لهيكلية ربط المزيجات الطورية، فإنه يمكن ربط المبدلات وفق هيكلية ربط جزئية Sub-connected، أو كليا Fully-connected، ومن المتوقع الحصول على تحسن ملحوظ في أداء وفعالية المنظومة، ويبين الشكل الآتي الآلية التي قمنا من خلالها بربط المبدلات وفق الربط الكلي، ونلاحظ أنه في هذه الطريقة فإن نصف المزيجات الطورية ستكون في حالة توصيل للهوائيات خلال واحدة الزمن والنصف الآخر سيكون في حالة إيقاف تشغيل خلال واحدة الزمن نفسها.



الشكل رقم (٣-٩): ربط المبدلات وفق طريقة الربط الكلي

في حال التوصيل بالطريقة الجزئية فإن مجموعة من المبدلات ستقوم بتوزيع الإشارة فيما بين مجموعة من عناصر الهوائيات المتصلة بها كما في الشكل الآتي، مما يخفّض من عدد المزيجات

الطورية اللازمة لأداء هذه المهمة، وتكون طريقة الربط مختلفة بعض الشيء عن الطريقة الكلية، وكما هو موضح في الشكل (١٠-٣) فقد قمنا بتأريض المزيحات الطورية الغير مستخدمة دلالة على أنها غير مستخدمة نتيجة لاستخدام المبدلات بدلاً منها، إلا أننا لم نقم بحذفها أو إلغائها من نموذج النظام فقط لتبسيط إجراءات الكود البرمجي وتجنب تعديله لتسهيل عملية النمذجة والمحاكاة الجارية، ولأن هذا الإجراء يحقق نفس النتيجة المطلوبة بدون المساس بمتغيرات النظام أو التأثير على مجريات عملية المحاكاة الواجب القيام بها.



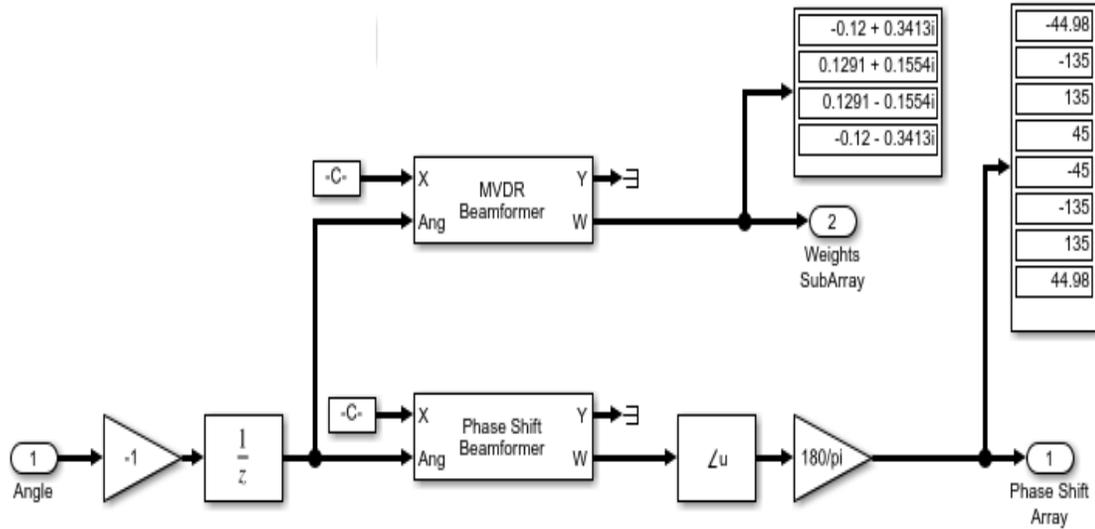
الشكل رقم (١٠-٣): ربط المبدلات بالطريقة الجزئية

### ٣-٩- المَشكَل الشعاي لمصفوفة الإرسال Transmit Array

#### :Beamformers

تتوجه الحزمة القلمية الصادرة عن مصفوفة الهوائي باتجاه الهدف (المُسْتَقْبِل) ويتم تقدير الاتجاه من خلال المُسْتَقْبِل، وفيه قمنا باستخدام خوارزميتين مختلفتين لحساب الأوزان weights التي تُطَبَّق على المصفوفات الجزئية الأربعة، ومنها على العناصر الموجودة ضمن كل مصفوفة جزئية، كما في الشكل الآتي، يتم ضرب الإشارة المراد إرسالها عقدياً بالأوزان التي يتم حسابها في المشكَل الشعاي

من النوع MVDR Beamformer



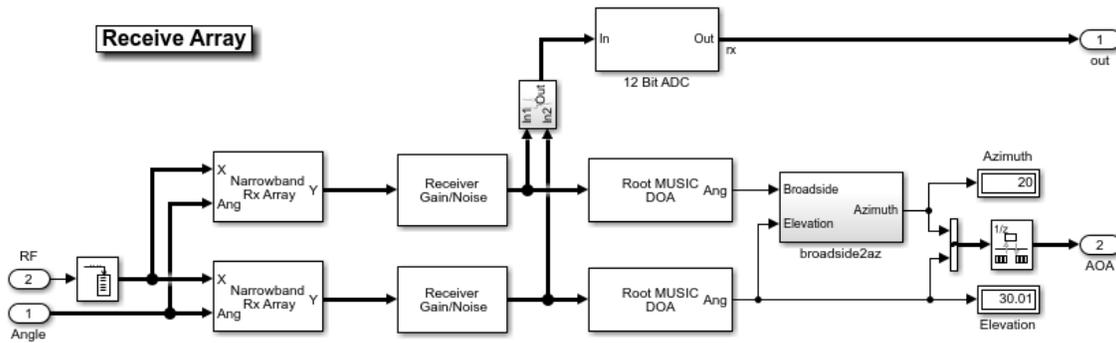
الشكل رقم (٣-١١): المشكَل الشعاي لمصفوفة الإرسال.

أما الإزاحات الطورية المطبقة على كل العناصر الموجودة في المصفوفات الجزئية، فيتم حسابها عن طريق خوارزمية الإزاحة الطورية، والتي طبقناها هنا عبر بلوك الإزاحة الطورية Phase Shift Beamformer المبين في الشكل السابق.

وكما نلاحظ أن بحثنا يتركز على تحسين الحزمة القلمية المرسلّة، لكن لا بد من اكتمال النظام كمرسل ومستقبل، لذلك نتابع في تصميم مصفوفة الاستقبال.

### ٣-١٠- مصفوفة الاستقبال Receive Array:

من اجل التخفيف من الضجيج قدر الإمكان، قمنا بنمذجة مصفوفة الاستقبال وفق أعلى مستوى من امتصاص الإشعاع، ويستخدم المستقبل مصفوفتين خطيتين متعامدتين، كل مصفوفة مؤلفة من أربعة عناصر هوائيات أيزوتروبية مثالية، ولا نستخدم أية خوارزمية للتشكيل الشعاعي هنا في جهة الاستقبال، ونستخدم خوارزمية للكشف عن الإشارة الأساسية الواصلة إلى المستقبل من بين مجموعة من النغمات (التوافقيات) للإشارة نفسها والناجمة عن انتشار الأغشارة نفسها وفق عدة مسارات، حيث تعمل كل خوارزمية وفق بعد من الأبعاد، وبالتالي نسطيع تقدير موقع المرسل من حيث السمات والارتفاع، ويبين الشكل الآتي نموذج النظام الجزئي المكُون لمصفوفة الاستقبال.



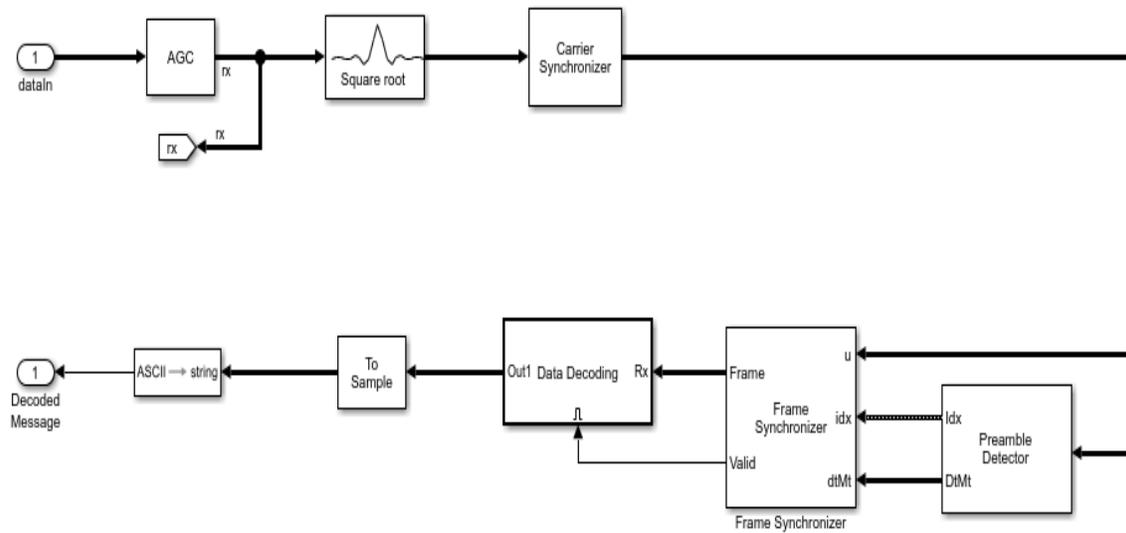
الشكل رقم (٣-١٢): مصفوفة الاستقبال

### ٣-١١- مستقبل التحويل QPSK Receiver:

يتكون هذا النظام الفرعي المبين في الشكل (٣-١٣) من البلوكات الآتية:

- بلوك AGC والذي يساهم في التحكم واستقرار مطال الإشارة المستقبلية والذي يؤثر على مزامنة حوامل الرموز الترددية.
- بلوك مرشح جبهة التحيب الصاعدة يساهم في تحقيق التقابل مع المرشح الموجود في جهة الإرسال، وبالتالي تحقيق المزيد من التزامن.
- بلوك مزامنة الحوامل، ويعمل على تحقيق التزامن بين المرسل والمستقبل بالنسبة لحوامل الإشارة.

- بلوك كاشف الترويسة Preamble Detector ويستخدم للكشف عن ترويسة الإطارات Frames المستقبلية.
- بلوك مزامنة الإطارات يستخدم المعلومات المتعلقة بمواقع الترويسات للإطارات والتي حصنا عليه كاشف الترويسة من أجل تحديد موقع كل إطار بدقة وبالتالي القدرة على تحديد ترتيب وتسلسل الإطارات الواردة وبالتالي مزامنتها مع جهة الإرسال.
- بلوك فك ترميز الإشارة المستقبلية يقوم بفك التعديل المطبق على الإشارة والحصول على الرسالة الرقمية المرسله من المرسل.



الشكل رقم (٣-١٣): مستقبل التعديل QPSK

### ٣-١٣- خلاصة:

أصبح الآن لدينا نظام متكامل من مرسل ومستقبل وقناة اتصال، ويمكننا الآن إجراء المحاكاة اللازمة وفق عدة سيناريوهات، ويتمثل الهدف الرئيسي للنظام الذي قمنا ببنائه ضمن بيئة برنامج Matlab Simulink في محاكاة عدة سيناريوهات يجري في كل منها تطبيق الطرق المقترحة لتحسين تقنية BO-DPD وبالتالي اختيار الطريقة الأمثل والأكثر ملاءمةً للتطبيق العملي.

الفصل الرابع

النتائج العملية

**Practical Results**

## الفصل الرابع

### ٤- النتائج العملية

#### ٤-١- مقدمة:

تتلخص كل الإجراءات المقترحة والتي نريد تطبيقها في محاولة تحسين اتجاهية الوريقة الشعاعية الرئيسية لمصفوفة الهوائي الكثيف الذي قمنا بتصميمه في بيئة Matlab Simulink وفق الهيكلية الهجينة، وبالتالي فإن العمل سيتم في جهة المرسل، وستتم مراقبة البارامترات الخاصة بالمصفوفة في جهة الإرسال، ولذلك فإن معظم قياساتنا ستتركز على بارامترات جهة الإرسال دون إغفال دور المستقبل وتأثيره على هذه البارامترات بشكل غير مباشر من خلال عملية تقدير زاوية التوجيه للهوائي المرسل عبر حلقة تغذية عكسية راجعة.

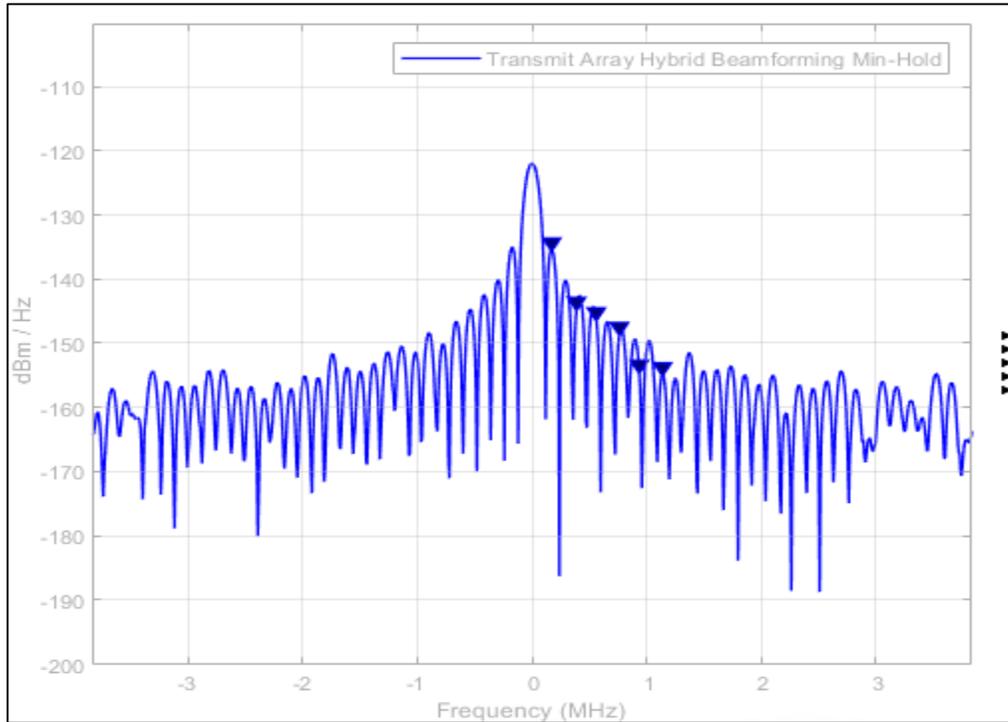
#### ٤-٢- سيناريوهات العمل:

تتألف سيناريوهات العمل المقترحة للعمل في محاولة للحصول على أفضل أداء للنظام المقترح مع مقارنة بين مجموعة من هيكليات توصيل المبدلات للتعويض عن مزيحات الطور ضمن بنية BO-DPD مع اختبار أداء هذه الهيكليات المقترحة مع التعديل بالمرشحات الحزمية والتعديل الترددي المتعامد، وقمنا بالتركيز على قياس بارامترات محددة تفيد في تحديد مدى اتجاهية الوريقة الرئيسية وطاققتها بالمقارنة مع طاقة الإشارات غير المرغوبة والوريقات الجانبية، وتم إجراء المحاكاة ورسم المخططات الناتجة في المجال الترددي للحصول على طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسلة، وقمنا بتسمية الحزمة القلمية Pencil Beam (الإشارة الرئيسية) بالقناة Channel لكونها الإشارة الرئيسية الصادرة عن الهوائي والتي تحمل البيانات إلى المستقبل، وبالتالي ركزنا على قياس طاقة الإشارة الرئيسية المرسلة من خلال قياس الطاقة التي تحتلها ضمن طيف كثافة الطاقة للهوائي (Channel power) ككل، والحيز الذي تشغله هذه الإشارة ضمن المجال الترددي (Occupied BW)، وبالتالي يمكننا من خلال هذه البارامترات مراقبة اتجاهية الإشارة المرسلة بشكل دقيق، و الحصول على مقارنة

واضحة لاختيار السيناريو الأمثل الذي يحقق أفضل اتجاهية، و قمنا بإجراء هذه السيناريوهات وجمع النتائج وفق الترتيب والتسلسل التالي:

## ٤-٢-١- السيناريو الأول بدون تطبيق أية تعديلات:

في هذا السيناريو نقوم بإجراء المحاكاة بدون تطبيق التعديلات المقترحة على الهيكلية الهجينة للهوائي، حيث تكون المحاكاة عبارة عن هوائي كثيف بالتشكيل الهجين وبدون تطبيق تقنية BO-DPD أو أي من التعديلات المقترحة، ويكون شكل طيف كثافة الطاقة بالنسبة للتردد مبيناً كما في الشكل الآتي.



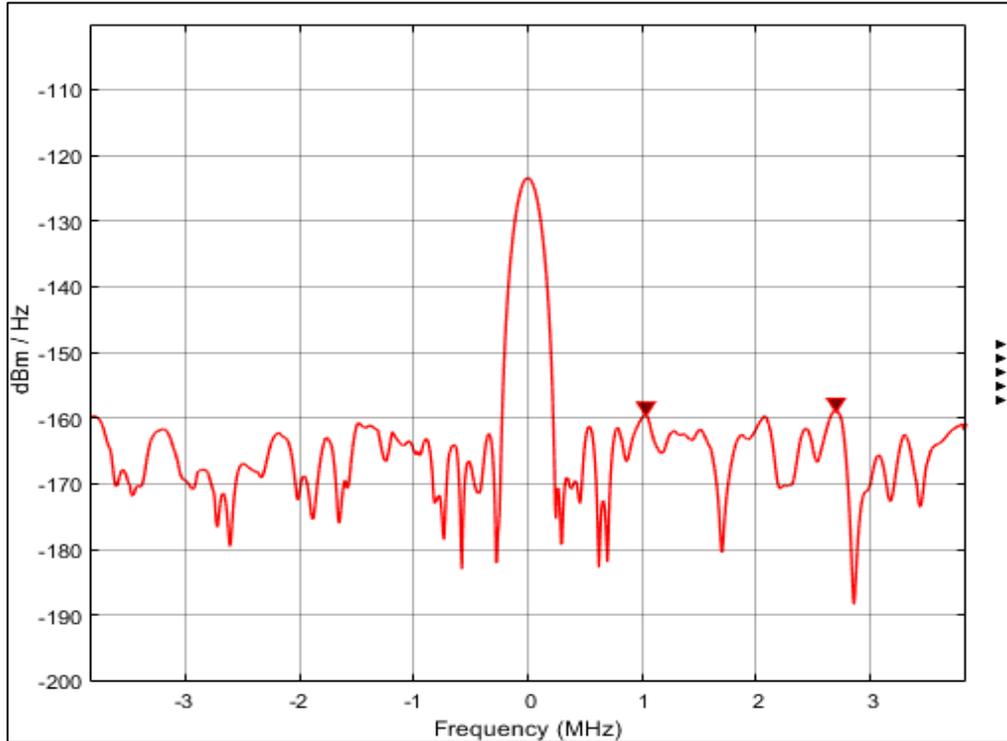
الشكل رقم (٤-١): طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسلّة بدون إجراء تعديلات

تبلغ طاقة القناة dBm  $-82,314$ ، وعرض الحزمة الترددية التي تشغلها الحزمة القلمية الرئيسية  $320,987$  KHz، والنسبة SFDR ونلاحظ العدد الكبير للوريقات الجانبية -والتي تعتبر وريقات غير مفيدة في عملية الإرسال- بجانب الحزمة القلمية الأساسية والطاقة العالية التي تستهلكها، والتي تعتبر طاقة مبددة دون أية جدوى.

## ٤-٢-٢- السيناريو الثاني بتطبيق تقنية Bo-DPD وتعديل

### :OFDM

عند تطبيق تقنية BO-DPD التي تتضمن تغذية عكسية، والتي تم تصميمها للحد من اللاخطية في مضخمات الطاقة والنااتجة عن استخدام ترددات عالية، حيث ستختلف بنية الهيكلية الهجينة بعض الشيء من خلال إدخال حلقة التغذية العكسية إلى القسم التماثلي من الهيكلية الهجينة، مع ما يرافق ذلك من زيادة في الزمن اللازم للحصول على نتائج للمحاكاة كما سنرى لاحقاً في هذا البحث، و نلاحظ أن طيف كثافة الطاقة للإشارة الصادرة عن مصفوفة الهوائي الكثيف يصبح كما هو مبين في الشكل الآتي.

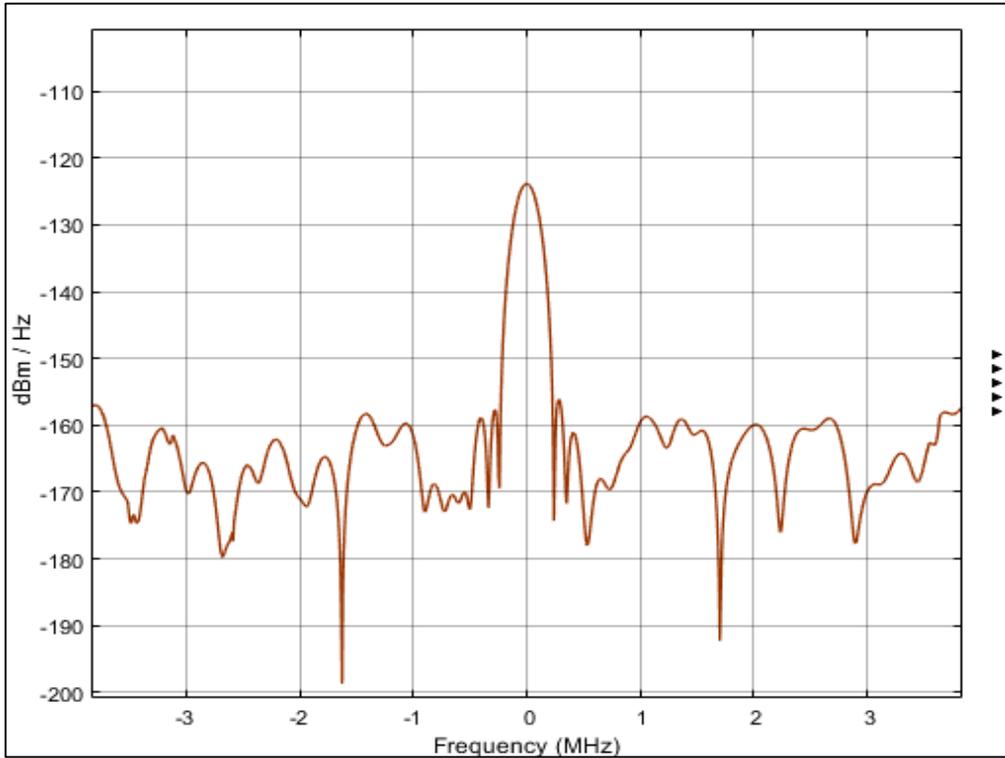


الشكل رقم (٤-٢): طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتطبيق تقنية BO-DPD

وبإجراء المحاكاة المطلوبة نجد أن طاقة القناة  $-71,319\text{dBm}$ ، وعرض الحزمة الترددية  $312,827\text{KHz}$ ، والنسبة SFDR وهنا نلاحظ أن تطبيق هذه التقنية زاد من الاتجاهية للوريقة الأساسية بالنسبة للسيناريو السابق وخفض من عدد الوريقات الجانبية وطاقاتها الإجمالية.

### ٤-٣-٣- السيناريو الثالث بتطبيق تقنية BO-DPD مع التعديل FBMC:

يتضمن نفس مراحل السيناريو السابق، حيث نطبق تقنية BO-DPD ضمن هيكلية الهوائي الهجينة وذلك على القسم التماثلي كون مضخمات الطاقة تقع في ذلك القسم، ولكن مع استخدام التعديل بالمرشحات الحزمية في القسم الرقمي من الهيكلية، بدلاً من استخدام التعديل الترددي المتعامد، وقد شرحنا في الفصل السابق الاختلاف بين التعديلين من الناحية العملية بناء وتصميم النظام في جهة الإرسال، ومن الناحية النظرية من جهة الاختلاف في آلية تعديل الإشارات المرسلة وفق التعديلين المذكورين، ويكون شكل طيف كثافة الطاقة كما هو مبين في الشكل الآتي.

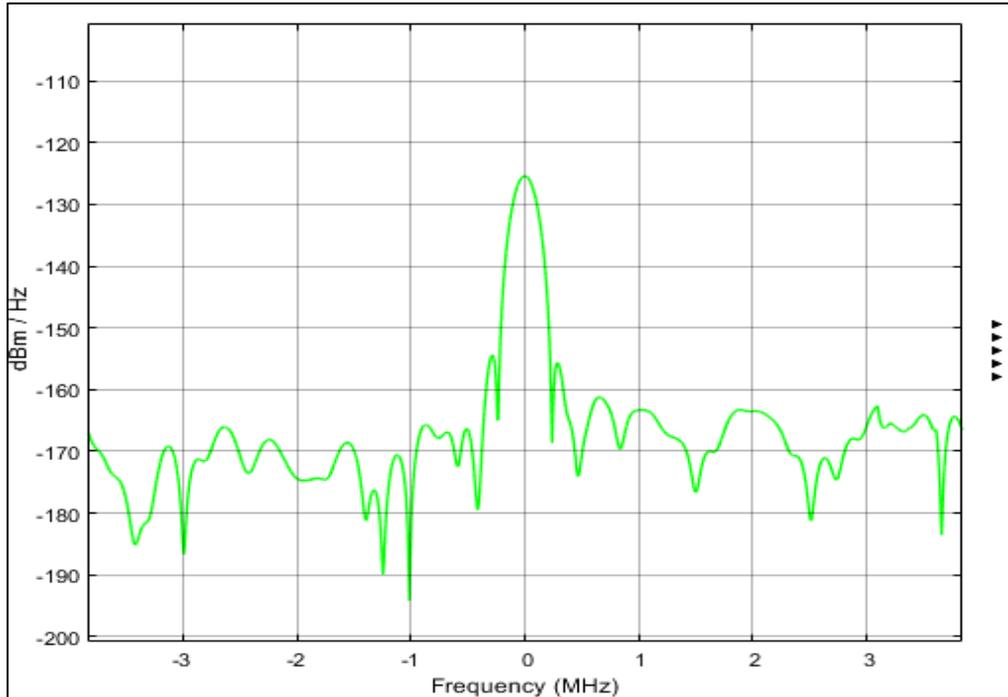


الشكل رقم (٣-٤): طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسلة بتعديل FBMC وبدون مبدلات

وبعد إجراء عملية المحاكاة نجد أنّ طاقة القناة  $71,304 \text{ dBm}$ ، وعرض الحزمة الترددية  $336,9236 \text{ KHz}$ ، والنسبة SFDR نلاحظ وجود الوريقات الثانوية بكثافة أكبر على جانبي الوريقة الرئيسية مما يزيد من نسبة الطاقة المبددة في الوريقات الجانبية على حساب الوريقة الرئيسية ويخفّض من اتجاهيتها.

## ٤-٣-٤- السيناريو الرابع بتطبيق مبدلات مثالية مع تعديل الإشارة بالمرشحات الحزمية:

قمنا في هذا السيناريو بمحاكاة تطبيق مبدلات عديمة الضياع والتسريب موصولة بطريقة الربط الجزئي ضمن البنية الهجينة، وبالتالي ينخفض عدد مزيجات الطور ومضخمات الطاقة التي تكون في وضعية التشغيل خلال واحد الزمن بمقدار النصف، وبتطبيق تعديل المرشحات الحزمية على الإشارة المرسلة تكون الوريقة الشعاعية الصادرة عن مصفوفة الهوائي الكثيف بالشكل الآتي، وبإجراء عملية المحاكاة نجد أن وبإجراء المحاكاة المطلوبة نجد أنّ طاقة القناة  $-72,855$  dBm، وعرض الحزمة الترددية  $340,8021$  KHz، والنسبة SFDR

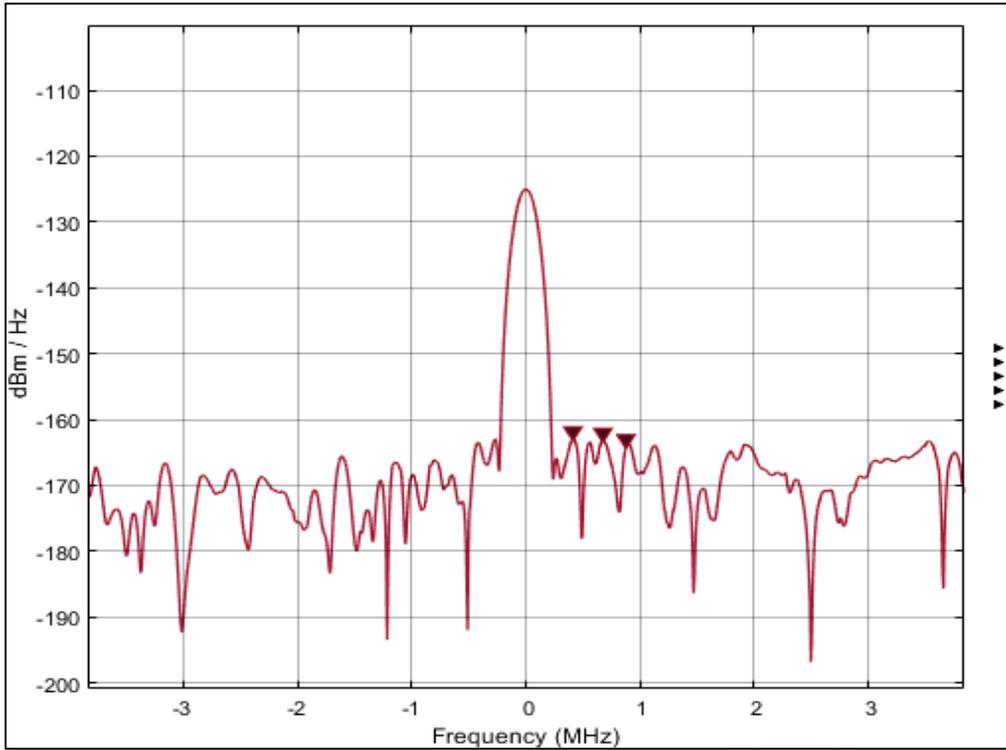


الشكل رقم (٤-٤): طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسلة بتطبيق مبدلات مثالية وتعديل FBMC

نلاحظ هنا ظهور وريقات جانبية ملاصقة للوريقة الرئيسية مما يخفض من اتجاهيتها، إضافة إلى استهلاكها طاقة إضافية على حساب الوريقة الرئيسية، وهذا منطقي جداً، لأن استخدام مبدلات مثالية قد خفّض عدد الهوائيات الفعالة بمقدار النصف خلال واحدة الزمن، مما يخفض بشكل كبير من ربح المصفوفة وهذا ما يسبب انخفاض في اتجاهية وطاقة الوريقة الرئيسية.

## ٤-٢-٥- السيناريو الخامس تطبيق مبدلات مثالية مع تعديل OFDM:

يتضمن نفس خطوات السيناريو السابق ولكن مع تعديل الإشارة المرسله بالتعديل الترددي المتعامد OFDM مع ملاحظة التغير في بنية وتركيب النظام والأنظمة الفرعية المرافقة له في جهة الإرسال والاستقبال عند التبديل بين التعديل بالمرشحات الحزمية والتعديل الترددي المتعامد، وباستخدام مبدلات مثالية عديمة الضياع والتسريب، ويبين الشكل الآتي شكل الوريقة الأساسية الناتجة بعد عملية المحاكاة، و نجد أنَّ طاقة القناة تبلغ  $-72,898$  dBm، وعرض الحزمة الترددية للوريقة الأساسية يساوي إلى  $312,687$  KHz، والنسبة SFDR

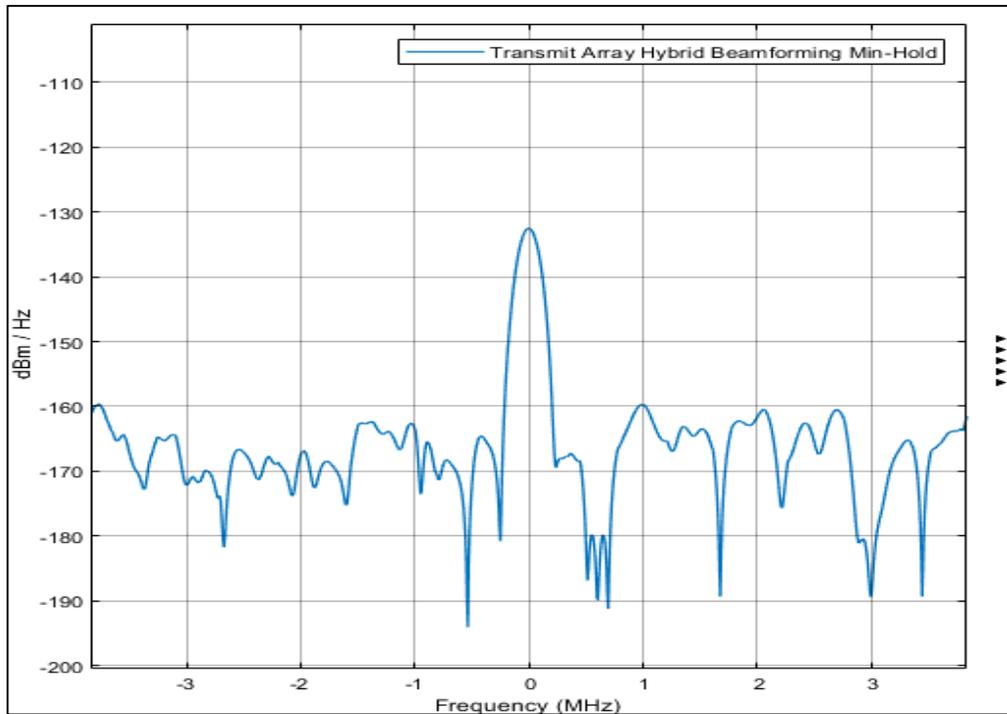


الشكل رقم (٤-٥): طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتطبيق مبدلات مثالية وتعديل OFDM

بالمقارنة مع السيناريو السابق الذي يتضمن تعديل الإشارة بالمرشحات الحزمية، ومن المخطط الناتج لطيف كثافة الطاقة يمكن ملاحظة أن التعديل الترددي المتعامد قد خفف من الوريقات الجانبية، وهذا يعود إلى الخاصية التعامدية للحوامل الفرعية التي تخفف بشكل كبير من الضياعات والضجيج وبالتالي تخفض من تشتت الحزمة الشعاعية المرسله.

## ٤-٣-٦- السيناريو السادس تطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي مع تعديل الإشارة بتعديل OFDM:

قمنا في هذا السيناريو بتطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي فيما بينها مع تعديل الإشارة المرسله بالتعديل الترددي المتعامد، ويكون مخطط كثافة الطاقة الناتج عن المحاكاة كما هو مبين في الشكل الآتي، وبعد إجراء المحاكاة وتسجيل النتائج والقراءات لطيف كثافة الطاقة الناتجة عن هوائي الإرسال نجد أنّ طاقة القناة  $-80,346 \text{ dBm}$ ، وعرض الحزمة الترددية  $1,014 \text{ KHz}$ ، والنسبة SFDR



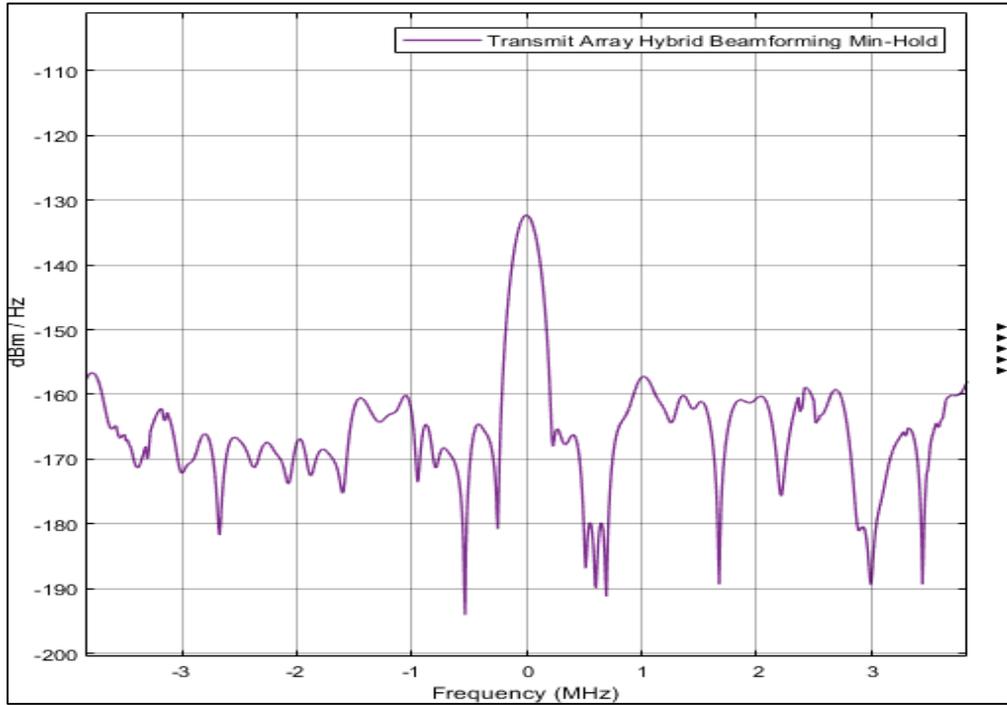
الشكل رقم (٤-٦): طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي وتعديل OFDM

ومن المخطط الناتج عن عملية المحاكاة في هذا السيناريو يمكننا ملاحظة التحسن النسبي في اتجاهية الوريقة الرئيسية مع انخفاض في مستوى كثافة الطاقة ضمن الوريقات الجانبية وتفاوت كثافة طاقتها ضمن المجال الترددي المُسجّل، وتعتبر هذه النتيجة مهمة بالمقارنة مع السيناريوهات السابقة لكوننا نستخدم مبدلات حقيقية غير مثالية وبالتالي فإن النتائج التي نحصل عليها هنا هي

أكثر مقارنةً للواقع من النتائج التي حصلنا عليها سابقاً باستخدام المبدلات المثالية مع الأخذ بعين الاعتبار أهمية النتائج السابقة في عملية المقارنة وتحديد السيناريو الأفضل.

### ٤-٣-٧- السيناريو السابع تطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي مع تعديل الإشارة بتعديل FBMC:

تُعيد تطبيق المبدلات الموصولة بطريقة الربط الجزئي كما هو في السيناريو السابق مع تعديل الإشارة المرسله بطريقة المرشحات الحزمية FBMC بدلاً من التعديل الترددي المتعامد OFDM، ويكون مخطط كثافة الطاقة للإشارة المرسله مع الوريقات الجانبية الناتجة ضمن المجال الترددي المُسجَّل كما هو مبين في الشكل الآتي، وبعد قراءة النتائج المرافقة لمخطط كثافة الطاقة نجد أنَّ طاقة القناة  $-80,346 \text{ dBm}$ ، وعرض الحزمة الترددية  $320,1014 \text{ KHz}$ ، والنسبة SFDR

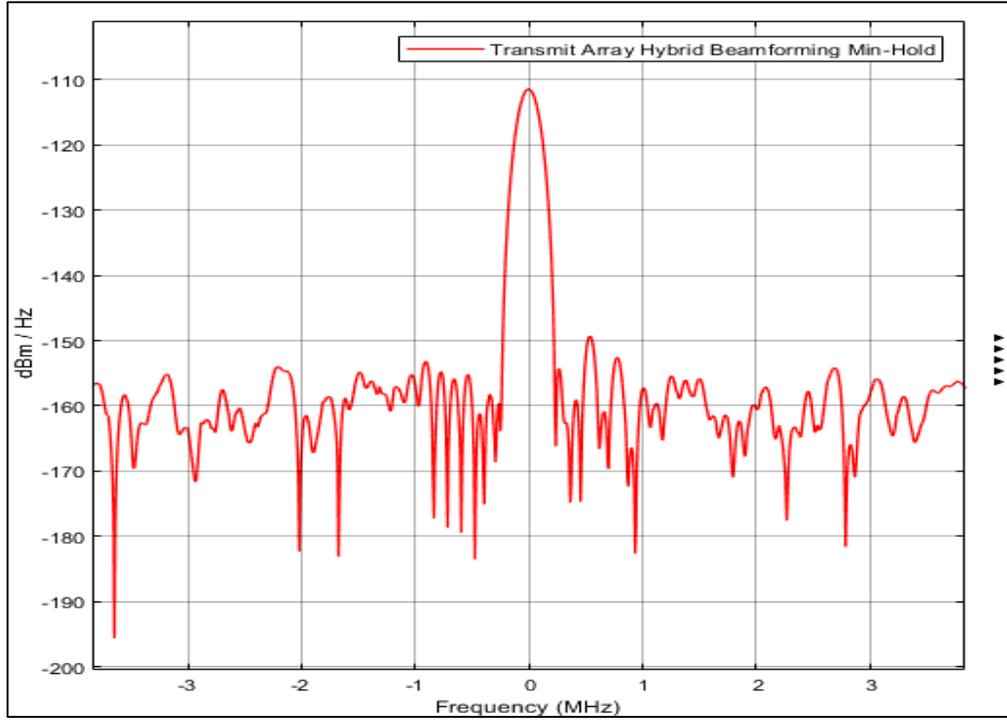


الشكل رقم (٧-٤): طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بتطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الجزئي وتعديل FBMC

نلاحظ تذبذب كثافة الطاقة وانخفاضها نسبياً بالنسبة للوريقات الجانبية التي تتفاوت كثافة طاقتها بشكل متغير، لكن بالمقابل نلاحظ أيضاً انخفاض في اتجاهية الوريقة الرئيسية مع زيادة بنسبة بسيطة في عرضحزمة الوريقة الرئيسية.

## ٤-٣-٨- السيناريو الثامن تطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الكلي مع تعديل الإشارة بتعديل OFDM:

نقوم في هذا السيناريو بربط المبدلات بطريقة الربط الكلي، حيث يتصل كل مبدل إلى كافة المضخمات الموجودة ضمن المصفوفة الجزئية، وبالتالي فإن كل عنصر هوائي يحصل على إشارته من مبدلات مختلفة بشكل دوري كما بينا ذلك في فصل سابق، ويبين المخطط الآتي طيف كثافة القدرة الناتج عن عملية المحاكاة، وتسجل طاقة القناة  $-59,306\text{dBm}$ ، وعرض الحزمة الترددية  $312,243\text{KHz}$  والنسبة SFDR

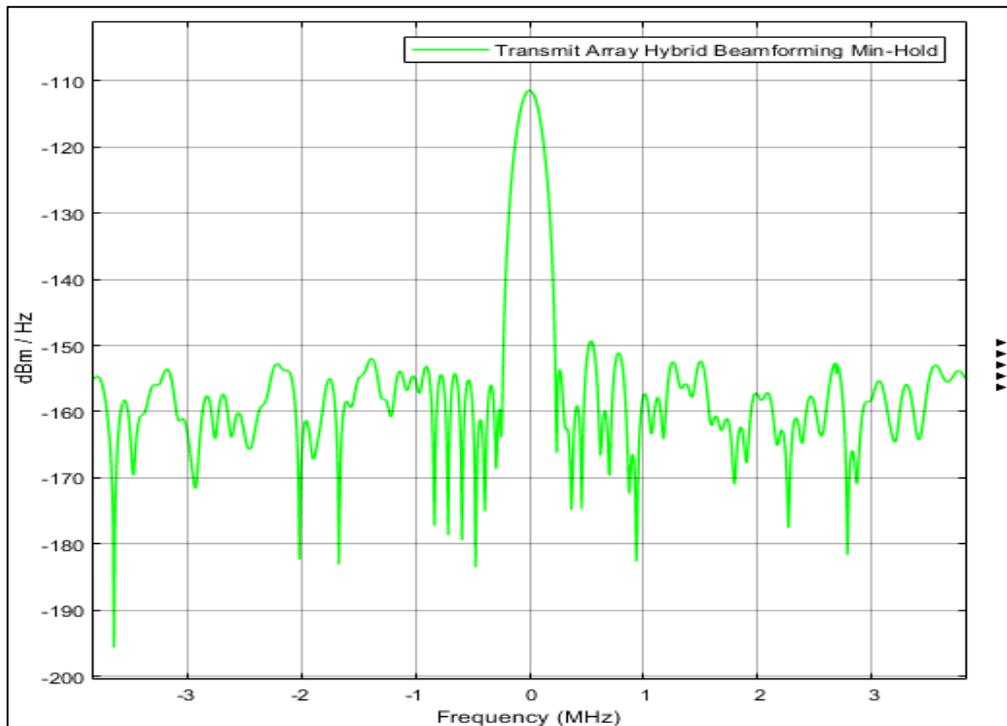


الشكل رقم (٤-٨): طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بمبدلات موصولة بطريقة الربط الكلي وتعديل OFDM

نلاحظ تذبذب وانخفاض في كثافة طاقة الوريقات الجانبية وارتفاعها في مناطق أخرى من عرض الحزمة الترددية، كما نلاحظ انخفاض واضح في كثافة الطاقة للوريقات الجانبية القريبة من الحزمة الشعاعية الرئيسية التي تمثل الإشارة المرسله، وبالتالي ازدياد في اتجاهية الوريقة الرئيسية وكثافة طاقتها بشكل كبير مقارنة بالسيناريوهات السابقة.

## ٤-٣-٩- السيناريو التاسع تطبيق مبدلات موصولة بطريقة الربط الكلي مع تعديل الإشارة بتعديل FBMC:

نتبع هنا خطوات السيناريو السابق نفسها لكن مع استخدام تعديل المرشحات الحزمية بدلاً من التعديل الترددي المتعامد OFDM، ومن المهم هنا ملاحظة الفارق بشكل دقيق في النتائج التي نحصل عليها ومقارنتها مع السيناريو السابق يمكننا بالتالي الجزم في الاختيار فيما بين التعديل الترددي المتعامد والتعديل بالمرشحات الحزمية، حيث نلاحظ ازدياد في تذبذب طاقة الوريقات الجانبية مع تحسن في اتجاهية الوريقة الرئيسية، ويسجل مقياس كثافة الطاقة قناة تساوي  $-80,117\text{dBm}$ ، وعرض الحزمة الترددية  $320,839\text{KHz}$ ، والنسبة SFDR وبين الشكل الآتي طيف كثافة الطاقة الناتج عن محاكاة السيناريو.



الشكل رقم (٤-٩): طيف كثافة الطاقة للإشارة المرسله بمبدلات موصولة بطريقة الربط الكلي وتعديل FBMC

## ٤-٣- النتائج:

بعد إجراء عملية المحاكاة للسيناريوهات التي قمنا بتطبيقها، نلاحظ أن كل سيناريو يختلف عن الآخر من حيث طاقة القناة أي طاقة الوريقة الرئيسية التي تحمل الإشارة المرسله باتجاه المستقبل،

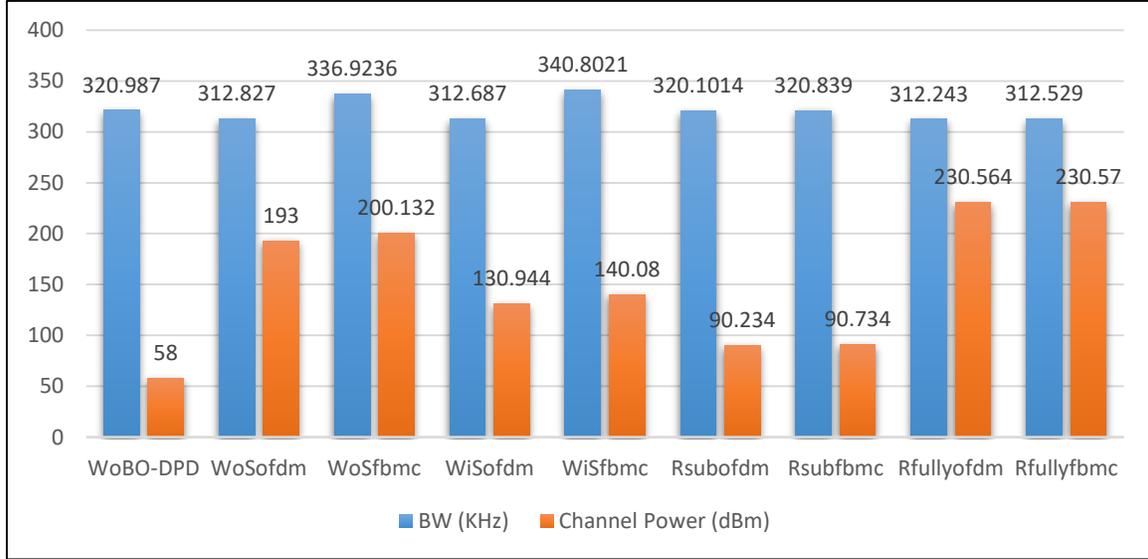
وعرض حزمة هذه الوريقة، وكلما حصلنا على عرض حزمة أقل، أو بمعنى آخر أضيّق، كلما حصلنا على اتجاهية أفضل للوريقة الرئيسية، وكلما كانت طاقة الوريقة الرئيسية أكبر، كلما كانت هذه الوريقة أقوى وأفضل من ناحية قدرتها على نقل الإشارة لمسافة أبعد وبضجيج وتخامد أقل، ويبين الجدول الآتي القيم التي حصلنا عليها من خلال إجراء عملية المحاكاة للسيناريوهات المُقترحة السابقة، مع تفصيل طاقة القناة بواحدتين هما dbm والواط، كما يبين الشكل المدّة الزمنية التي استهلكتها محاكاة كل سيناريو من السيناريوهات المطبّقة، وتعطي هذه القيم الزمنية إشارة إلى السيناريو الأكثر تعقيداً من ناحية سرعة معالجة الإشارات وإرسالها.

الجدول (١) ملخص نتائج المحاكاة من أجل اختبار أداء تقنية BO-DPD بأنماط توصيل مبدلات مختلفة وبنمطي

#### تعديل مختلفين OFDM و FBMC

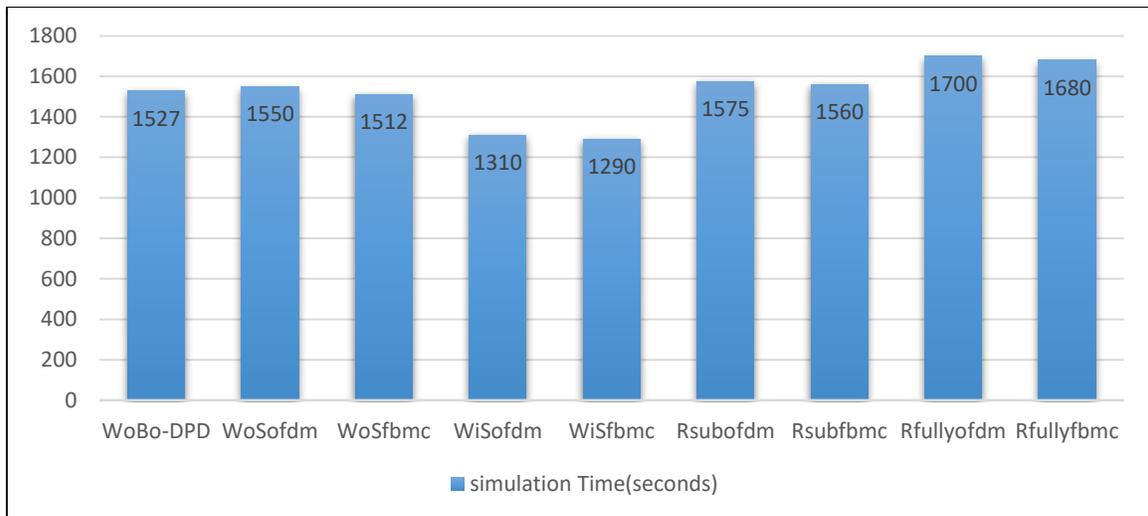
	Channel power (dBm)	Channel power (Watt)	Occupied BW (KHz)
<b>Without BO-DPD</b>	-82,314	$5,869 * e^{-12}$	320,987
<b>Without Switch OFDM Modulation</b>	-71,319	$19,300 * e^{-12}$	312,827
<b>Without Switch FBMC Modulation</b>	-71,304	$20,132 * e^{-12}$	336,9236
<b>With ideal Switch OFDM Modulation</b>	-72,898	$13,944 * e^{-12}$	312,687
<b>With ideal Switch FBMC Modulation</b>	-72,855	$14,080 * e^{-12}$	340,8021
<b>Real sub-connected Switch OFDM Modulation</b>	-80,346	$9,234 * e^{-12}$	320,1014
<b>Real sub-connected Switch FBMC Modulation</b>	-80,117	$9,734 * e^{-12}$	320,839
<b>Real fully-connected Switch OFDM Modulation</b>	-59,306	$23,564 * e^{-12}$	312,243
<b>Real fully-connected Switch FBMC Modulation</b>	-59,305	$23,570 * e^{-12}$	312,529

يمكن اختصار وتوضيح النتائج التي حصلنا عليها وقمنا بتجميعها في الجدول السابق من خلال الشكل الآتي.



الشكل (١٠-٤) نتائج المحاكاة من أجل اختبار أداء تقنية BO-DPD بأنماط توصيل مبدلات مختلفة وبنمطي تعديل مختلفين OFDM و FBMC

من خلال النتائج المبينة في الجدول السابق، نلاحظ أن استخدام التعديل الترددي المتعامد OFDM مع توصيل المبدلات بطريقة الربط الكلي fully-connected يعطي النتيجة الأفضل من حيث الاتجاهية ومن حيث توجيه معظم الطاقة ضمن الوريقة الرئيسية.



الشكل (١١-٤) المدة الزمنية للسيناريوهات أثناء عملية المحاكاة

## ٤-٤-٤-٤ الخلاصة:

من أجل إجراء تحسين على اتجاهية الحزمة الشعاعية الصادرة من مصفوفة هوائي كثيف Massive MIMO قمنا بإجراء تحسين على تقنية BO-DPD بإدخال المبدلات إلى هيكلية التشكيل الشعاعي الهجين Hybrid Beamforming والتي نُقِّدَت 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 المرسلَة بالتعديل الترددي المتعامد OFDM مرّة، وبالتعديل بالمرشحات الحزميّة FBMC مرّةً أُخرى.

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

## الفصل الخامس

الخاتمة والمقترحات والتوصيات

## **Conclusion and future works**

## الفصل الخامس

### ٥- الخاتمة والمقترحات والتوصيات

#### ١-٥- مقدمة:

تعتبر تقنية الهوائي الكثيف وفق تشكيل الإشارة الرقمية Digital Beamforming تقنية واعدة لتقديم معدل نقل بيانات أكبر، وعلى الرغم من ذلك فإن هذه التقنية مكلفة جداً وذات استهلاك طاقة مرتفع للغاية بسبب احتوائها على عدد كبير من السلاسل الراديوية التي تربط عناصر الهوائيات بالمعدّل الرقمي للإشارة، وبما أن مميزات الطور تعتبر أرخص وأقل استهلاكاً للطاقة مقارنة بالعدد الكبير للسلاسل الراديوية، لذلك برزت تقنية التشكيل الشعاعي الهجين Hybrid Beamforming التي عُقدت الآمال عليها لتعطي نفس إمكانيات التشكيل الشعاعي الرقمي، وبالرغم من كل تلك الآمال فإن تصميم هيكلية التشكيل الهجين تواجه العديد من التحديات التي تعيق وصولها إلى تقديم بديل حقيقي عن التشكيل الرقمي.

ركّزنا في هذا البحث على بعض التحديات التي تعترض سبيل تطبيق هيكلية التشكيل الشعاعي الهجين وتحسين تقنية BO-DPD للتعامل مع لاختطية مضخمات الطاقة عند الترددات الملي مترية، في هوائيات الجيل الخامس الكثيفة، وفيما يأتي سنقدم ملخص وخاتمة لبحثنا، ثم نعرض مقترحات يمكن الأخذ بها.

#### ٥-٢- الملخص والخاتمة:

قمنا في هذه الأطروحة في البداية بعرض شامل لفكرة البحث والمشكلة التي تعترضنا وأهمية حلها، والدراسات والأفكار التي سبقت على طريق حل هذه المشكلة، وعلى أفضل ما نعرفه أنه لم يتم التطرق إلى خوارزمية الحل المقترحة في بحثنا لهذا المشكلة من قبل، معظم الحلول السابقة كانت تقدم حلاً جزئياً والبعض الآخر يقدم حلاً منقوصاً مع الكثير من السلبيات المرافقة، ثم قمنا بعرض موجز لتقنية التشكيل الشعاعي الهجين، وانتقلنا بعدها إلى عرض مختصر يعكس مقارنة بسيطة بين التعديل الترددي

المتعامد والتعديل بالمرشحات الحزمية، وقمنا بالبرهان رياضياً على أن التعديل بالمرشحات الحزمية يقدم فعالية عرض حزمة أفضل لكونه لا يحتاج إلى حزم حماية كما هو الحال في التعديل الترددي المتعامد، لكن لم نتعمق في هذه الفكرة لكون بحثنا يركز على التحسين في اتجاهية الحزمة الشعاعية المرسله وليس فعالية عرض الحزمة من عدمها، ثم قمنا في الفصل الثالث بعرض المبدأ العلمي لبحثنا من حيث ماهية النظام المقترح وشكله و أجزائه، والأنظمة الفرعية التي تدخل في تركيبه، مع شرح للآلية التي يعمل وفقها النظام المكون من مرسل ومستقبل وقناة اتصال، وكيفية التبديل بين التعديل الترددي المتعامد والتعديل بالمرشحات الحزمية ضمن هذا النظام، وفي البحث الرابع عرضنا السيناريوهات المقترحة للحل، وأجرينا المحاكاة وفق كل سيناريو للوصول إلى نظرة شاملة تفيد في تحديد السيناريو الأفضل من ناحية المتغيرات التي ركزنا على مراقبتها ودراستها في بحثنا، بالإضافة إلى أخذ عامل الزمن اللازم عند كل محاكاة لكل سيناريو بعين الاعتبار، وحصلنا على نتائج نهائية تبين بدقّة الفارق في الأداء بين كل سيناريو، بما يمكننا من الوصول إلى النتيجة الأفضل ودراستها، ونطمح في المستقبل إلى الوصول إلى نتائج أفضل من خلال التعديل على الخوارزمية التي اقترحناها، والأخذ بعين الاعتبار تأثير أكبر لقناة الاتصال على الإشارة المرسله وإشارة التغذية العكسية للخوارزمية.

### 5-3- المقترحات والتوصيات:

اقتصرنا في توصياتنا هنا على الأفكار التي من الممكن أن تؤثر في اتجاهية الحزمة الشعاعية انطلاقاً من استخدام الهيكلية الهجينة، حيث من الممكن استخدام تقنيات تعديل متعددة الحوامل أخرى غير تلك التي قمنا باستخدامها هنا، ويعد التعديل UFMC من أهمها، كما يمكن التعديل في متغيرات قناة الاتصال المستخدمة للحصول على أقرب محاكاة للواقع فيما يخص قناة الاتصال المستخدمة في النظام المقترح، وعلى الرغم من التركيز في بحثنا على هوائي الإرسال، إلا أنه لا بد من دراسة آلية استقبال الإشارة وتأثير تغيير نوع التعديل المستخدم على جهة الاستقبال.

- [1] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5g" *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74\_80, February 2014.
- [2] Q. Li ; L. Liu ; Ch. Tao ; Y. Lu ; T. Zhou ; Z. Wei, "Performance Analysis of a Massive MIMO System in Indoor Scenario" ٢٠١٨ ١٢th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), 2018
- [3] E. Larsson, Linköping University, O. Edfors and F. Tufvesson," Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems", *IEEE Communications Magazine*, February 2014.
- [٤] S. Han, C. I. I, Z. Xu, and C. Rowell, "Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 1, pp. 186-1٩٤, Jan. ٢٠١٥.
- [5] A. T. Nassar ; A. Sulyman ; Alsanie, "Achievable RF coverage and system capacity using millimeter wave cellular technologies in 5G networks", ٢٠١٤ IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Year: 2014, Conference, Publisher: IEEE
- [6] L. Ding, G. T. Zhou, D. R. Morgan," A Robust Digital Baseband Predistorter Constructed Using Memory Polynomials", *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, VOL. 52, NO. 1, JANUARY ٢٠٠٤
- [7] Sh. Amin, P. Landin, P. Händel, and D. Rönnow , "*Behavioral Modeling and Linearization of Crosstalk and Memory Effects in RF MIMO Transmitters*", *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, VOL. 62, NO. 4, APRIL 2014
- [8] S. Bassam, M. Helaoui, and F. Ghannouchi," *Crossover Digital Predistorter for the compensation of crosstalk and nonlinearity in MIMO transmitter*", *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, VOL. 57, NO. 5, MAY 2009.
- [9] P. Suryasarman, and A. Springer, "A Comparative Analysis of Adaptive Digital Predistortion Algorithms for Multiple Antenna Transmitters", *IEEE*

TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—I: REGULAR PAPERS, VOL. 62, NO. 5, MAY 2015

- [10] S. Lee, M. Kim, Y. Sirl, E. Jeong, S. Hong, " *Digital Predistortion for Power Amplifiers in Hybrid MIMO Systems with Antenna Subarrays* ", iee 2015.
- [11] H. Yan and D. Cabric, " *DIGITAL PREDISTORTION FOR HYBRID PRECODING ARCHITECTURE IN MILLIMETER-WAVE MASSIVE MIMO SYSTEMS* ", iee 2017.
- [12] L. LIU, W. CHEN, L. MA, He SUN, " *Single-PA-Feedback Digital Predistortion for Beamforming MIMO Transmitter* ", IEEE, 2016
- [13] X. Liu, Q. Zhang, W. Chen, " *Beam-Oriented Digital Predistortion for 5G Massive MIMO Hybrid Beamforming Transmitter* ", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, 2018
- [14] A. Farhang, N. Marchetti, L. Doyle and B. Farhang-Boroujeny, " *Filter Bank Multicarrier for Massive MIMO* ", IEEE, 2014
- [15] R.W. Health, A. Lozano, T.L. Marzetta, P. Popovski, " *Five disruptive technology directions for 5G* ", IEEE Commun. Mag. 52 (2) (2014) 74–80.
- [16] A.L. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydasri, F. Capolino, " *Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution?* " IEEE Commun. Mag. 52 (9) (2014) 56–62.
- [17] L. Wei, R.Q. Hu, Y. Qian, G. Wu, " *Key elements to enable millimetre wave communications for 5G wireless systems* ", IEEE Wirel. Commun. 21 (6) (2014) 136–143.
- [18] S. Hur, T. Kim, D. Love, J. Krogmeier, T. Thomas, A. Ghosh, " *millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks* ", IEEE Trans. Commun. 61 (10) (2013) 4391–4403.
- [19] T.L. Marzetta, " *Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas* ", IEEE Trans. Wirel. Commun. 9 (11) (2010) 3590–3600.
- [20] F. Rusek, D. Persson, B.K. Lau, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, O. Edfors, F. Tufvesson, " *Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays* ", IEEE Signal Process. Mag. 30 (1) (2013) 40–60.
- [21] T.E. Bogale, L.B. Le, " *Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: potential benefits and challenges* ", IEEE Veh. Technol. Mag. 11 (1) (2016) 64–75.

- [22] X. Gao, L. Dai, S. Han, C.-L. I, R.W. Heath Jr., “*Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays*”, IEEE J. Sel. Areas Commun. 34 (4) (2016) 998–1009.
- [23] R. W. Heath, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. M. Sayeed, ‘*An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems*’, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 10, no. 3, pp. 436–453, April 2016.
- [24] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. Larsson, T. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, ‘*Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays*’, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, January 2013.
- [25] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, ‘*Spatially sparse precoding in millimeter wave mimo systems*’, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, March 2014.
- [26] X. Zhang, A. Molisch, and S.-Y. Kung, ‘*Variable-phase-shift-based RF-baseband codesign for MIMO antenna selection*’, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 53, no. 11, pp. 4091–4103, November 2005.
- [27] I. Ahmed, H. Khammari, and A. Shahid, “*Resource allocation for transmit hybrid beamforming in decoupled millimeter wave multiuser-MIMO downlink*,” IEEE Access, vol. 5, no. 1, pp. 170–182, 2017.
- [28] S. Han, C.-L. I, Z. Xu, and C. Rowell, “*Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G*”, IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 1, pp. 186–194, January 2015.
- [29] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. Soong, and J. C. Zhang, “*What will 5g be?*” IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.
- [30] B. Bangerter, S. Talwar, R. Arefi, and K. Stewart, “*Networks and devices for the 5g era*,” IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 90–97, 2014.
- [31] A. Natarajan, S.K. Reynolds, M. Tsai, et al., “*A fully-integrated 16-element phased-array receiver in SiGe BiCMOS for 60-GHz communications*”, IEEE J. Solid State Circuits 46 (5) (2011) 1059–1070.
- [32] S. Drago, M.C.A. van Schie, A.J.M. de Graauw, et al., “*A 60 GHz wideband low noise eight-element phased array RX front-end for beam steering communication applications in 45 nm CMOS*”, in: IEEE RFIC Symposium, 2012.
- [33] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta, “*Massive MIMO for next generation wireless systems*”, IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp.186–195, February 2014.

- [34] J. Vieira, S. Malkowsky, K. Nieman, Z. Miers, N. Kundargi, L. Liu, I. Wong, V. Åwall, O. Edfors, and F. Tufvesson, "A Flexible 100-antenna testbed for massive mimo", 2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), pp. 287\_293, Dec 2014.
- [35] K. Pretz, "Overcoming spectrum scarcity." <http://theinstitute.ieee.org/technology-focus/technology-topic/overcoming-spectrum-scarcity>, 2012.
- [36] 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. 38–40, Feb. 2011.
- [37] 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. 108–110, 2011.
- [38] B. Farhang-Boroujeny, "Ofdm versus filter bank multicarrier," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 28, pp. 92–112, May 2011.
- [39] R. Mendez-Rial, C. Rusu, N. Gonzalez-Prelcic, A. Alkhateeb, and R. W. Heath, "Hybrid mimo architectures for millimeter wave communications: Phase shifters or switches?" IEEE Access, vol. 4, pp. 247\_267, 2016.
- [40] M. R. Akdeniz, Y. Liu, M. K. Samimi, S. Sun, S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1164\_1179, June 2014.
- [41] J. G. Andrews, T. Bai, M. N. Kulkarni, A. Alkhateeb, A. K. Gupta, and R. W. Heath, "Modeling and analyzing millimeter wave cellular systems" IEEE Transactions on Communications, vol. 65, no. 1, pp. 403\_430, Jan 2017.
- [42] C. H. Doan, S. Emami, D. A. Sobel, A. M. Niknejad, and R. W. Brodersen, "Design considerations for 60 ghz cmos radios", IEEE Communications Magazine, vol. 42, no. 12, pp. 132\_140, Dec 2004.
- [43] W. Roh, J. Y. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, J. Cho, K. Cheun, and F. Aryanfar, "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5g cellular communications: theoretical feasibility and prototype results", IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 106\_113, February 2014.
- [44] G. R. MacCartney, M. K. Samimi, and T. S. Rappaport, "Exploiting directionality for millimeter-wave wireless system improvement", 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 2416\_2422, June 2015.
- [45] Fadhel M. Ghannouchi and Oualid Hammi, "Behavioral Modeling and Predistortion", IEEE Microwave magazine, 1027-3342/09/\$26,00 ©2009 IEEE

- [46] D. Wisell, M. Isaksson, and N. Keskitalo, "A general evaluation criteria for behavioral power amplifier modeling," in 69th ARFTG Conf. Dig., June 2007, pp. 201–200.
- [47] O. Hammi, S. Carichner, B. Vassilakis, and F. Ghannouchi, "Synergetic crest factor reduction and baseband digital predistortion for adaptive 3G Doherty power amplifier linearizer design", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 56, no. 11, pp. 2602–2608, Nov. 2008.
- [48] C. Eun and E. J. Powers, "A new Volterra predistorter based on the indirect learning architecture," IEEE Trans. Signal Process., vol. 45, no. 1, pp. 223–227, Jan. 1997.
- [49] Seyed A. Bassam, Mohamed Helaoui, and Fadhel M. Ghannouchi, "Crossover Digital Predistorter for the Compensation of Crosstalk and Nonlinearity in MIMO Transmitters", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 57, NO. 5, MAY 2009
- [50] R. Raich, H. Qian, and G. T. Zhou, "Orthogonal polynomials for power amplifier modeling and predistorter design," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 53, no. 5, pp. 1478–1489, Sep. 2004.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] R.V. Nee and R. Prasad, "OFDM for Wireless Multimedia Communications", Artech House Publishers, Norwood, MA, USA, 2000.
- [54] 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. 108–110, 2007.
- [55] M. G. Bellanger, "Specification and design of a prototype filter for filter bank based multicarrier transmission", IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 4, pp. 2417–2420, 2000.
- [55] 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.

- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] WHITE PAPER Hybrid Beamforming for Massive MIMO Phased Array Systems
- [59] A. Alkhateeb, Y. H. Nam, J. Zhang, and R. W. Heath, "Massive MIMO combining with switches", IEEE Wireless Communications Letters, vol. 5, no. 3, pp. 232\_235, June 2016.
- [60] R. Mendez-Rial, C. Rusu, A. Alkhateeb, N. Gonzalez-Prelcic, and R. W. Heath, "Channel estimation and hybrid combining for mmwave: Phase shifters or switches?" Information Theory and Applications Workshop (ITA), 2010, pp. 90\_97, February 2010.
- [61] Y. Zheng and C. E. Saavedra, "An ultra-compact CMOS variable phase shifter for 2.4-GHz ISM applications", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 56, no. 6, pp. 1349\_1354, June 2008.
- [62] N. A. Talwalkar, C. P. Yue, H. Gan, and S. S. Wong, "Integrated CMOS transmitreceive switch using LC-tuned substrate bias for 2.4-GHz and 5.2-GHz applications", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 39, no. 6, pp. 863\_870, June 2004.

## ملحق بأهم الأكواد المستخدمة:

```
%Filters for Filter Bank Multi carrier Modulation

%Filter1
function y = fcn(u)
t = 1:1:100;
freqs = [0 0.1 0.11 1] ; %Frequency s e l e c t i o
n o f the lowpas s prototype
amps = [ 1 1 0 0 ] ;
b = firls(99 , freqs , amps); %Lowpass FIR
prototype f i l t e r
b2 = 4*b.*exp(2j*pi*(1/4 ).*t) ; %Exponent ial
modulation o f the prototype
%b2 = 0 ; %This l i n e can be used to swi t ch o f
f t h i s f i l t e r
y = filter( b2 , 1 , u );
%y = 0 ; %Al t e r n a t e way o f swi t ching o f f
the f i l t e r
y = u;

%Filter2
function y = fcn(u)
t = 1:1:100;
freqs = [0 0.1 0.11 1] ; %Frequency s e l e c t i o
n o f the lowpas s prototype
amps = [ 1 1 0 0 ] ;
b = firls(99 , freqs , amps); %Lowpass FIR
prototype f i l t e r
b2 = 4*b.*exp(2j*pi*(2/4 ).*t) ; %Exponent ial
modulation o f the prototype
%b2 = 0 ; %This l i n e can be used to swi t ch o f
f t h i s f i l t e r
y = filter( b2 , 1 , u );
%y = 0 ; %Al t e r n a t e way o f swi t ching o f f
the f i l t e r
y = u;
```

```

%Filter3
function y = fcn(u)
t = 1:1:100;
freqs = [0 0.1 0.11 1] ; %Frequency s e l e c t i o
n o f the lowpas s prototype
amps = [ 1 1 0 0 ] ;
b = firls(99 , freqs , amps); %Lowpass FIR
prototype f i l t e r
b2 = 4*b.*exp(2j*pi*(3/4 ).*t) ; %Exponent ial
modulation o f the prototype
%b2 = 0 ; %This l i n e can be used to swi t ch o f
f t h i s f i l t e r
y = filter( b2 , 1 , u );
%y = 0 ; %Al t e r n a t e way o f swi t ching o f f
the f i l t e r
y = u;

```

```

%Filter4
function y = fcn(u)
t = 1:1:100;
freqs = [0 0.1 0.11 1] ; %Frequency s e l e c t i o
n o f the lowpas s prototype
amps = [ 1 1 0 0 ] ;
b = firls(99 , freqs , amps); %Lowpass FIR
prototype f i l t e r
b2 = 4*b.*exp(2j*pi*(4/4 ).*t) ; %Exponent ial
modulation o f the prototype
%b2 = 0 ; %This l i n e can be used to swi t ch o f
f t h i s f i l t e r
y = filter( b2 , 1 , u );
%y = 0 ; %Al t e r n a t e way o f swi t ching o f f
the f i l t e r
y = u;

```

## Abstract

MIMO Massive is a promising technology in Cellular connections, and hopes are raised about raising the data transfer rate to a higher level that meets user's need, and this is evident in the fifth generation networks.

Regular MIMO antenna systems use completely digital techniques in beamforming the antenna's beam, but with Massive MIMO antennas where the number of antenna elements reach hundreds of elements, so digital technology here becomes difficult to implement, due to the cost, so it is necessary to apply an appropriate technology that balances reliability efficiency on one hand, and between economic feasibility on the other hand, and here the role of Hybrid Beamforming arises, which integrates digital Beamforming and Analog Beamforming together in an effort to obtain the positives of both techniques together, and to bypass the negatives as much as possible.

The use of millimeter waves in MIMO Massive antennas affects negatively on linearity properties power amplifiers, which make their performance less linear, and this leads to system degradation Especially with regard to the orientation of the main beam of the antenna and the number of unwanted side lobes, which increases the loss of energy, so this negative effects must be mitigated.

This research includes a suggestion to enhance the hybrid beamforming architecture the way it leads to more main beam directivity and to focus more of spectrum power in the main beam, The research also includes a comparison of system performance between OFDM technique and FBMC technique then choosing the best technique identification and most appropriate in several aspects, the most important of which is the spectrum efficiency and the reduction in energy consumption.

**Key words:** Massive MIMO, Hybrid Beamforming, Digital predistorer, phase shifter, FBMC modulation, Mm waves.

Syrian Arab Republic  
Tartous University  
Faculty of ICT  
Department Communications Eng.

---



# Enhancing 5G MIMO antenna systems by using Hybrid Beamforming techniques

A Thesis Submitted for the degree of Master in Communications  
Technology Engineering

Prepared by:

**Odai Khalil Kassem**

Supervised by:

**Dr. Eng. Fadi Ghosna**

Assistant Professor at Department of Communications  
Technology Engineering, Faculty of ICTE, Tartous University.

٢٠٢٠/٢٠٢١