

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم هندسة الاتصالات

دراسة أعدت لنيل شهادة الماجستير بعنوان:

التغذية الراجعة المحدودة في نظم الهوائيات المتعددة العريضة

الحزمة

# Limited Feedback in Broadband MIMO Systems

إعداد

م. حسن عثمان

إشراف

د. وسيم الجنيدي

أ.د. خالد يزبك

2019/2018

## شكر وتقدير

أول الشكر وآخره أتقدم به إلى المنعم الباري عزَّ وجل (الله) سبحانه وتعالى، الذي يسر لي كل عسير، وألهمني الصبر والقوة في شق طريقي.

وأتوجه بخالص شكري وتقديري وعظيم امتناني إلى

**الأستاذ الدكتور خالد يزبك**

**الدكتور وسيم جنيدي**

لما أبدا من حسن رعاية ورحابة صدر وروح علمية مُخلصة، وما قدما لي من توجيهات ونصائح سديدة وملاحظات قيِّمة ومستمرة...  
فدعائي لهما بالخير والعافية.

كما أقدم أسمى آيات الشكر والامتنان والتقدير والحبّة إلى الذين حملوا أقدم رسالة في الحياة إلى الذين مهدوا لنا طريق العلم  
والمعرفة إلى جميع أساتذتنا الأفاضل في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.

إلى مَنْ تعجز كلماتي وتنحني هامتي لعظيم عطائها، شمس حياتي التي لا تغيب، وسبيلي إلى الجنة، إليك (يا أُمِّي)  
أطال الله في عمرك في صحة وخير حال.

إلى من كلت أنامله ليقدم لنا لحظة سعادة، إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم إلى القلب  
الكبير (والدي العزيز).

إلى كل من شدوا أزري وشاطروني أمري لأكمل الخطوات لولاهم بعد الله سبحانه وتعالى لاعتذر القلم عن رسم  
الكلمات (إخوتي) أطال الله أعماركم بالصحة والسعادة وسدد طريق الخير لخطاكم.

وأخيراً لا بد من كلمة شكر ومحبة وامتنان إلى كل من شدّ من أزري، وكل من ساندني في عملي وأعطاني القدرة  
والإصرار في تحقيق هدي حتى لو كان بكلمة تشجيع واحدة، ومن فاتني ذكر أسمائهم، جزاهم الله خير الجزاء.

## الملخص

مع التطور المتسارع لنظم الاتصالات النقالة في السنوات الأخيرة، والاعتماد على نظم الهوائيات المتعددة MIMO، ووضع الأسس للانتقال إلى الهوائيات الكثيفة Massive MIMO، أصبح توفر معلومات حالة القناة CSI عند طرف الإرسال من محاور البحث الهامة في الفترة الأخيرة. حيث يجري حساب هذه المعلومات في المستقبل وإعادةتها إلى المرسل لدعم نظم الهوائيات المتعددة في معالجة مشاكل القناة، والمساهمة بالتالي في تحسين أداء النظام. يتطلب ذلك تكمية معلومات حالة القناة CSI قبل إعادةتها إلى المرسل، بإضافة مبدلات تماثلية رقمية ADC، في كل سلسلة استقبال راديوية RF Chain من نظام الهوائيات المتعددة. ومع التوجه لزيادة عدد الهوائيات المستخدمة في طرف الاستقبال، ستزداد الطاقة المستهلكة في المستقبل. وكون استهلاك الطاقة في هذه المبدلات يتناسب طردياً مع دقتها، وبالتالي خفض الاستهلاك العام للطاقة في كامل قسم الاستقبال سيكون على حساب إنقاص دقة هذه المبدلات يتناسب طردياً مع دقتها، وبالتالي خفض مقدار الربح أو التحسين في الأداء الذي يمكن تحصيله نتيجة توفر معلومات حالة القناة عند المرسل. يؤدي ذلك بالنتيجة إلى إجراء مقايضة بين الربح في خفض استهلاك الطاقة والخسارة في تحسين الأداء المطلوب عند استخدام معلومات مكممة (Quantized) لحالة القناة عند طرف الإرسال.

جرى في هذا البحث الاعتماد على بيئة ماتلاب MATLAB في دراسة تأثير تكمية معلومات حالة القناة في المستقبل على خانة رقمية واحدة فقط، وتحديد قيمتها بالاعتماد على متوسط استطاعة القناة الجزئية ( $\sigma^2$ ) لمجموعة من أطر المعلومات المرسل، وإعادةتها إلى المرسل للاستفادة منها في تحديد عدد هوائيات الإرسال بما يتناسب مع حالة القناة، واستنتاج الربح في الأداء. كما جرى تنفيذ الدراسة ضمن بيئة ماتلاب واختيار قنوات خفوت رايلي (Rayleigh) عريضة الحزمة لهذا الغرض، ثم تحديد مقدار الخسارة في معدل الخطأ BER الناتج عن كون القناة عريضة الحزمة. تبين بنتيجة هذا البحث أن عدد بتات التكمية يتناسب لوغاريماً مع عدد حالات الترميز المسبق المتاحة في المرسل.

# المحتويات

7.....	قائمة الأشكال
8.....	قائمة الجداول
9.....	الاختصارات

## الفصل الأول: مقدمة

10.....	1.1- مقدمة
11.....	1.2- أهمية البحث
12.....	1.3- هدف البحث
12.....	1.4- دراسات سابقة
12.....	1.5- تنظيم الأطروحة

## الفصل الثاني: الإطار النظري / مفاهيم أساسية

14.....	2.1- مقدمة
15.....	2.2- الخفوت قصير المدى
19.....	2.3- نظم الهوائيات المتعددة MIMO
22.....	2.4- تقدير القناة
25.....	2.5- التغذية الراجعة

## الفصل الثالث: التنفيذ العملي

29.....	1.3- مقدمة
30.....	2.3- تصميم نظام هوائيات متعددة في بيئة ماتلاب MATLAB
35.....	3.3- تصميم نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة ضيقة الحزمة
37.....	4.3- تصميم نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة عريضة الحزمة
38.....	5.3- النموذج الرياضي

## الفصل الرابع: النتائج

42.....	1.4- مقدمة
43.....	2.4- نتائج محاكاة نظام الهوائيات المتعددة MIMO

- 46..... 3.4- نتائج محاكاة نظام الهوائيات المتعددة MIMO مع قناة ضيقة الحزمة
- 49..... 4.3- نتائج محاكاة نظام الهوائيات المتعددة MIMO مع قناة عريضة الحزمة

الخاتمة

المراجع

## قائمة الأشكال

- الشكل 1- الخفوت قصير المدى..... 16
- الشكل 2- أنواع الخفوت قصير المدى..... 18
- الشكل 3- الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً OSTBC..... 21
- الشكل 4- طرق تقدير القناة ..... 22
- الشكل 5- منهجية البحث ..... 30
- الشكل 6- المخطط الصندوقي لنظام الهوائيات المتعددة MIMO ..... 31
- الشكل 7- قناة اتصال الهوائيات المتعددة MIMO ..... 33
- الشكل 8- المخطط الصندوقي لنظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM في القناة ضيقة الحزمة. .... 35
- الشكل 9- معاملات التجميع باقتسام الترددات المتعامدة OFDM ..... 36
- الشكل 10- المسارات المتعددة وتداخل الرموز ..... 38
- الشكل 11- المخطط التدفقي لنظام الهوائيات المتعددة MIMO..... 44
- الشكل 12- معدل الخطأ مع تغيير رتبة التعديل ..... 45
- الشكل 13- نتائج معدل الخطأ عند تقدير القناة من أجل ثمانية رموز تدريب. .... 46
- الشكل 14- المخطط التدفقي لنظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة ضيقة الحزمة ..... 48
- الشكل 15- معدل الخطأ لنظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة ضيقة الحزمة ..... 49
- الشكل 16- المخطط التدفقي لنظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة عريضة الحزمة ..... 50
- الشكل 17- أثر ربح المسارات المتعددة على معدل الخطأ..... 52
- الشكل 18- قيم متوسط استطاعة القنوات الجزئية ضمن القناة عريضة الحزمة. .... 54
- الشكل 19- التغذية الراجعة في القناة عريضة الحزمة والقناة ضيقة الحزمة ..... 54

## قائمة الجداول

- الجدول 1- خوارزميات معدل الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً ..... 33
- الجدول 2- خوارزميات مجمع الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً ..... 35
- الجدول 3- وزن هامينغ لكلمات الترميز QPSK ..... 40
- الجدول 4- معاملات تقييم أداء نظام الهوائيات المتعددة MIMO ..... 44
- الجدول 5- معاملات تقدير القناة ..... 47
- الجدول 6- معاملات نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة ضيقة الحزمة ..... 48
- الجدول 7- معاملات محاكاة أثر المسارات المتعددة على معدل الخطأ ..... 52
- الجدول 8- معاملات نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة عريضة الحزمة ..... 54



## الاختصارات

MIMO: Multi Input Multi Output.  
SISO: Single Input Single Output.  
MISO: Multi Input Single Output.  
SNR: Signal-to-Noise Ratio.  
TDD: Time Division Duplex.  
ADC: Analoge to Digital Converter.  
FDD: Frequency Division Duplex.  
TDD: Time Division Duplex.  
ISI: InterSymbol Interference.  
ADC: Analoge to digital converter.  
CSI: Channel State Information.  
ML: Maximum Likelihood.  
BER: Bit Error Rate.  
4G: Forth Generation.  
5G: Fifth Generation.  
Eb/No: Bit to Noise Energy.  
Es/No: symbol to Noise Energy.  
BPSK: Binary phase-shift keying.  
STTC: Space Time Trellis Code.  
QPSK: Quadrature phase shift keying.  
AWGN: Additive White Gaussian Noise.  
OFDM: Orthogonal frequency-division multiplexing.  
OSTBC: Orthogonal Space-Time Block Code.  
QOSTBC: Quasi-Orthogonal Space-Time Block Code.  
RQOSTBC: Rotated Quasi-Orthogonal Space-Time Block Code.

# الفصل الأول

## مقدمة

أهمية البحث، والهدف منه، والدراسات السابقة، وتنظيم الأطروحة، مفصلة في هذا الفصل.

### 1.1- مقدمة

يعد الطيف الترددي مورداً نادراً في الاتصالات اللاسلكية، حيث يفرض تكلفة عالية على معدلات نقل البيانات الآخذة في الازدياد. لحسن الحظ، فإن ظهور نظم الهوائيات متعددة الدخل والخرج (MIMO) قد فتح بعداً آخر لنقل المعلومات. تعتمد نظم الهوائيات متعددة الدخل والخرج MIMO على استخدام عدة هوائيات في كل من المرسل والمستقبل لتحسين أداء النظام، وتلعب حالياً دوراً مهماً في نظم الاتصالات اللاسلكية، لمساهمتها في استثمار أفضل للطيف الترددي المتاح لنظام الاتصالات. إن الإشارة بين المرسل والمستقبل يمكن أن تأخذ مسارات متعددة. في السابق، لا تعمل هذه المسارات المتعددة إلا على زيادة التداخل، ولكن باستخدام تقنية MIMO، قد تكون هذه المسارات الإضافية بمثابة ميزة، وبالتالي يمكن استخدامها لتوفير وثوقية إضافية للنظام.

أصبحت معرفة معلومات حالة القناة (CSI) في الوقت المناسب لدى المرسل تزداد أهمية في نظم الاتصالات اللاسلكية بشكل عام، وفي نظم الهوائيات متعددة الدخل والخرج MIMO بشكل خاص. يحتاج المرسل غالباً إلى معرفة حالة القناة، والاستفادة من هذه المعلومات من أجل التحكم الدقيق في الطاقة المرسله والجدولة والترميز المسبق (Precoding). أظهرت النتائج مؤخراً أن الكسب في معدل الإرسال وكفاءة استخدام الطاقة، وعدة فوائد أخرى، ستكون ممكنة عندما يكون لدى المرسل هوائيات متعددة وحالة قناة معروفة لنقل البيانات.

في نظم الإرسال المزدوج بتقسيم الزمن (Time Division Duplex)، يمكن للمرسل معرفة معلومات حالة القناة من الوصلة الصاعدة/العكسية، حيث يشترك كل من المرسل والمستقبل في نفس المجال الترددي لإرسال البيانات. وبالتالي، يمكن للمرسل أن يستغل العكسية (Reciprocity) للحصول على القناة الأمامية/الهابطة من خلال القناة العكسية/الصاعدة. لكن ذلك مختلف وأكثر صعوبة في نظم الإرسال المزدوج بتقسيم التردد (Frequency Division Duplex)، بسبب اختلاف ترددات كل من المرسل والمستقبل. لذلك لا يمكن استنتاج أية معلومة عن القناة الأمامية/الهابطة من القناة العكسية/الصاعدة. وبالتالي فإن التغذية الراجعة من المستقبل أمر لا بد منه لمعرفة معلومات حالة القناة لدى المرسل. لا تعمل هذه الطريقة بشكل صحيح إذا كان تغير القناة مع الزمن سريعاً، من أجل تحقيق معلومات CSI صحيحة في جهاز الإرسال، هناك حاجة إلى مزيد من الحلول. لذلك، تمثل التغذية الراجعة بشكل عام والتغذية الراجعة المحدودة بشكل خاص أحد الحلول الممكنة لمعالجة هذه المشكلة. إن النفقات العامة للقناة العكسية باهظة، لأنها تستهلك موارد النظام. وبالتالي، من المهم للغاية التفكير بعناية في كيفية تصميم آلية التغذية الراجعة واستخدامها لدعم تقنية الهوائيات المتعددة MIMO.

## 2.1- أهمية البحث

شهدت السنوات القليلة الماضية انتقال تقنية الهوائيات المتعددة MIMO من المفهوم النظري إلى تقنية عملية لتعزيز أداء نظم الاتصالات اللاسلكية. عند استخدام الهوائيات المتعددة في كل من المرسل والمستقبل، ومع استخدام ترميز مناسب في المرسل، ومعالجة إشارة فعالة في المستقبل، يمكن توفير معدلات نقل أعلى عبر قنوات الهوائيات المتعددة MIMO، ومقاومة خفوت المسارات المتعددة، ودعم الأعداد المتزايدة من المستخدمين [3]. في الآونة الأخيرة، أصبحت تقنية MIMO شائعة الاستخدام للغاية بسبب إمكاناتها العالية في تعزيز الأداء، وهي بالفعل جزء مهم من كل معايير الاتصالات اللاسلكية الحديثة مثل الجيل الرابع (4G) والجيل الخامس (5G) من نظم الاتصالات الخلوية والعديد من المعايير الأخرى.

تتأثر سعة قناة الهوائيات المتعددة MIMO بمعلومات حالة القناة (CSI) المتاحة لكل من المرسل والمستقبل. في معظم حالات الاتصال المتعدد، يمكن للمستقبل تتبع الحالة الآنية للقناة بدقة من إشارات تجريبية مدمجة في عمليات الإرسال في المرسل من ناحية، وهناك عدة سيناريوهات ممكنة لمعرفة حالة القناة في المرسل مثل استخدام مبدأ المعاملة بالمثل أو التغذية الراجعة من المستقبل، من ناحية أخرى. يكمن التحدي في توفير معلومات حالة القناة CSI عملياً للمرسل، حيث تتغير قنوات الخفوت بشكل عشوائي. إن توفر معلومات حالة القناة لدى المرسل عن طريق التغذية الراجعة يتطلب أن يقوم المرسل بتكمية هذه المعلومات بواسطة مبدلات تماثلية رقمية ADCs، وتمثل هذه المبدلات أحد أهم المكونات في استهلاك الطاقة في بنى الهوائيات متعددة الدخل والخرج (MIMO). وبالتالي، فإن استخدام مبدلات تماثلية رقمية ADC ذات دقة منخفضة، وخاصة باعتماد بت واحد، سيكون أحد الأساليب الممكنة للتغلب على هذه المشكلة [21]، [22]. تم دراسة وتحليل أداء نظم الهوائيات المتعددة MIMO عريضة الحزمة، وتأثير المبدلات التماثلية الرقمية ADC منخفضة الدقة، حيث أظهرت الأعمال السابقة [19] و [20] و [21]، أن المبدلات منخفضة الدقة مناسبة وعملية للاتصالات اللاسلكية، مع وجود نسبة ضئيلة من الخسارة في معدل الإرسال (أقل من 2 ديسيبل للتكمية على بت واحد)، عندما تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج منخفضة مقارنة بمبدلات تماثلية رقمية ذات دقة لانهائية/كبيرة. في الوقت الحاضر، لا تزال سعة قناة الهوائيات المتعددة MIMO عند توفر معلومات حالة القناة في جهاز الإرسال (CSIT) غير معروفة عموماً، باستثناء قناة الاتصال التي تستخدم هوائياً واحداً فقط في طرف الإرسال، وعدة هوائيات في طرف الاستقبال (MISO) البسيطة وبعض الحالات الخاصة، كما هو الحال عندما تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR مرتفعة أو منخفضة فقط. وإذا لم تكن معلومات حالة القناة المتوفرة عند المرسل CSIT دقيقة بما فيه الكفاية، لن يتم تصميم الترميز المسبق جيداً، كما أن التداخل بين المستخدمين يمثل تحدياً لفك الترميز للمستقبلات ذوات المبدلات ADC المنخفضة الدقة. على الرغم من المكاسب المحتملة من الترميز المسبق (precoding) في طرف الإرسال، فإن هناك المزيد من العمل على التغذية الراجعة المحدودة مع مبدلات تماثلية رقمية ADC منخفضة الدقة أو التي تستخدم بت واحد فقط للتكمية.

## 3.1- هدف الدراسة

يؤثر عدد بتات التكمية لمعلومات حالة القناة بشكل ملموس على أداء وصلة التغذية الراجعة من المستقبل إلى المرسل في أداء نظم الاتصالات التي تعتمد الهوائيات المتعددة بشكل عام، وقد تم تبيان ذلك في العديد من الأبحاث التي اعتمدت نموذج الإشارة ضيقة الحزمة. تهدف هذه الدراسة إلى إيجاد تأثير عدد بتات التكمية على الإشارات ذات الحزمة العريضة في مثل هذه النظم نسبة للظروف المحيطة كشدة الخفوت مثلاً. اعتمدت معظم الدراسات السابقة نموذج قناة Rayleigh، وهو النموذج ذاته الذي سيتم اختياره في هذه الدراسة كونه الأكثر مواءمة لنظم الاتصالات النقالة، وهي أكثر النظم استخداماً لهذه التقنية. تنفيذ الدراسة ضمن بيئة المحاكاة ماتلاب (MATLAB)، بحيث يتم تصميم نظام متكامل على الإشارات ذات الحزمة الضيقة، ومن ثم التحقق من نتائج نظام المحاكاة بالمقارنة مع النتائج النظرية المنشورة في الأبحاث السابقة، والانتقال بعد ذلك إلى حالة الإشارات العريضة الحزمة، مع إجراء التغييرات المطلوبة، ثم استخلاص النتائج المطلوبة، بمقارنة هذه النتائج مع ما سيتم الحصول عليه من نتائج من خلال الدراسة التحليلية.

## 4.1- دراسات سابقة

J. Mo and R. W. Heath Jr., "Limited Feedback in Single and Multi-User MIMO Systems with Finite-Bit ADCs" in IEEE Transactions on Wireless Communications (Volume: 17, Issue: 5, May 2018)

J. Mo and R. W. Heath Jr., "Limited feedback in multiple-antenna systems with one-bit quantization," in Proc. Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, Nov 2015.

J. Mo and R. W. Heath Jr. "Limited feedback in MISO systems with finite-bit ADCs," in Proc. Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, Nov 2016.

تم في هذه الدراسات توضيح أثر عدد بتات التكمية في نظم الهوائيات المتعددة (MIMO)، لكن هذه النظم تستخدم إشارات ضيقة المجال، كما بين الباحثون في هذه المقالات الدراسات الأخرى التي تمت بنفس الخصوص والتحديث الذي أضافوه، والمجدير بالذكر أن إحدى الآفاق المستقبلية للدراسة السابقة هو إجراء الدراسة والاستنتاجات على الإشارات عريضة الحزمة وهو الهدف من هذا البحث.

## 5.1- تنظيم الأطروحة:

يقدم الفصل الثاني مراجعة الأدبيات وتوصيف المفاهيم الأساسية لنظام الاتصالات اللاسلكية. حيث يناقش القسم الأول الخفوت وأنواعه وتأثيره على أداء النظام وطرق التخفيف منه، أما القسم الثاني فيناقش نظم الهوائيات المتعددة (MIMO) وبعض المفاهيم التابعة لها. يتطرق القسم الثالث إلى عمليات تقدير القناة واستعراض أهم أفكارها، ثم يتطرق إلى التغذية الراجعة وبيان أهم محاورها وفوائدها ومشاكلها.

يصف الفصل الثالث منهجية البحث المعتمدة لتحقيق الأهداف المرجوة منه. حيث يعرض بالتفصيل المحاكاة التي أجريت في MATLAB للحصول على النظام بشكل عام والخوض في تفاصيله، وتقديم أهم الخطوات التي تم تنفيذها مع تفاصيل المعاملات التي تم استخدامها.

يعرض الفصل الرابع المخططات التدفقية لكل خطوة تم تنفيذها ومحاكاتها في MATLAB، كما يوضح نتائج المحاكاة التي أجريت في MATLAB لتصميم النظام والتغذية الراجعة المحدودة للحصول على معلومات حالة القناة في طرف المرسل. كما يحلل هذا الفصل الرسوم البيانية لمعدل الأخطاء BER مقابل طاقة الرمز إلى طاقة الضجيج (Es / No (dB) التي تم الحصول عليها أثناء إجراء المحاكاة على مجال من نقاط Es / No.

## الفصل الثاني

# مفاهيم أساسية

مفاهيم وأسس نظم الاتصالات اللاسلكية ذوات الصلة بموضوع الأطروحة، مثل الخفوت ونظم الهوائيات المتعددة MIMO وتقدير القناة والتغذية الراجعة، مشروحة في هذا الفصل.

## 1.2- مقدمة:

إن الإشارة الراديوية في نظم الاتصالات اللاسلكية يمكن أن تنتقل عبر مسارات متعددة من جهاز الإرسال إلى جهاز الاستقبال، يمكن أن يسبب هذا الانتقال تغيرات في مطال الإشارة المستقبلية وطورها وزاوية وصولها، وتسمى التغيرات العشوائية لإشارة ما "الخفوت" (Fading) أو الخفوت الناتج عن انتشار المسارات المتعددة (Multipath Fading). يصنف الخفوت في نظم الاتصالات اللاسلكية النقالة إلى خفوت طويل المدى (Large Scale Fading) وخفوت قصير المدى (Small Scale Fading)، يُعرّف الخفوت طويل المدى بأنه تخامد متوسط استطاعة الإشارة أو فقد المسار بسبب حركة المستقبل على مناطق شاسعة. يتأثر هذا النوع بالتضاريس البارزة (المباني والتلال واللوحات الإعلانية وغيرها) بين المرسل والمستقبل، هذا وتساعد إحصائيات الخفوت طويل المدى في تقدير خسارة الإشارة في المسار كتابع للمسافة. من ناحية أخرى، يصف الخفوت قصير المدى التغيرات السريعة في مطال الإشارة وطورها، والتي تُنتج عن التغيرات الطفيفة في الوسط بين المستقبل والمرسل [1] و [2].

يمثل الانتشار الزمني للإشارة (أو تشتت الإشارة) (Time-Spreading) والسلوك الزمني المتغير (Time-Variant) للقناة آليتين تسبب الخفوت قصير المدى. بالنسبة لتطبيقات الاتصالات اللاسلكية المتنقلة، تكون القناة متغيرة زمنياً لأن الحركة بين المرسل والمستقبل تؤدي إلى تغير مسار الانتشار، يفسر هذا المعدل في التغير في ظروف الانتشار سرعة الخفوت. يسمى الخفوت قصير المدى أحياناً خفوت رايلي (Rayleigh)، لأنه إذا كانت المسارات المتعددة ذات عدد كبير ولم يكن هناك إشارة خط نظر مباشر (line of sight) من المرسل إلى المستقبل، يتم وصف غلاف الإشارة المستقبلية إحصائياً بواسطة دالة كثافة احتمال تتبع توزيع رايلي الإحصائي Rayleigh pdf. بينما عندما يكون هناك مركبة مسيطرة للإشارة غير الخفوت، مثل إشارة خط النظر، يتم وصف غلاف الإشارة المستقبلية إحصائياً بواسطة دالة كثافة احتمال تتبع توزيع رايسان الإحصائي Rician pdf. يجب أن يتعامل المستقبل المتنقل عبر مساحات شاسعة مع الإشارات التي تواجه كلا النوعين من الخفوت: الخفوت قصير المدى المتراكب مع الخفوت طويل المدى.

في الوقت الحالي ومع التقدم التكنولوجي، أصبحت بعض الحلول النظرية قابلة للتطبيق، أحد أشهر حلول الخفوت البطيء المسطح (slow flat fading) هو نظم الهوائيات المتعددة / نظم الهوائيات متعددة الدخل الخرج (Multiple Input Multiple Output Systems) (MIMO) [2] و [6]. في نظم الهوائيات المتعددة MIMO، يمكن استخدام التنوع (Diversity) لتقليل تأثير القناة على الإشارة التي تنتشر من خلالها. تقسم نظم الهوائيات متعددة MIMO إلى قسمين رئيسيتين وفقاً لهدف النظام، وهي تعدد الإرسال المكاني (Spatial Multiplexing) لزيادة سعة نظام الاتصال، والتنوع المكاني (Spatial Diversity) لتحسين وثوقية القناة [5] و [6].

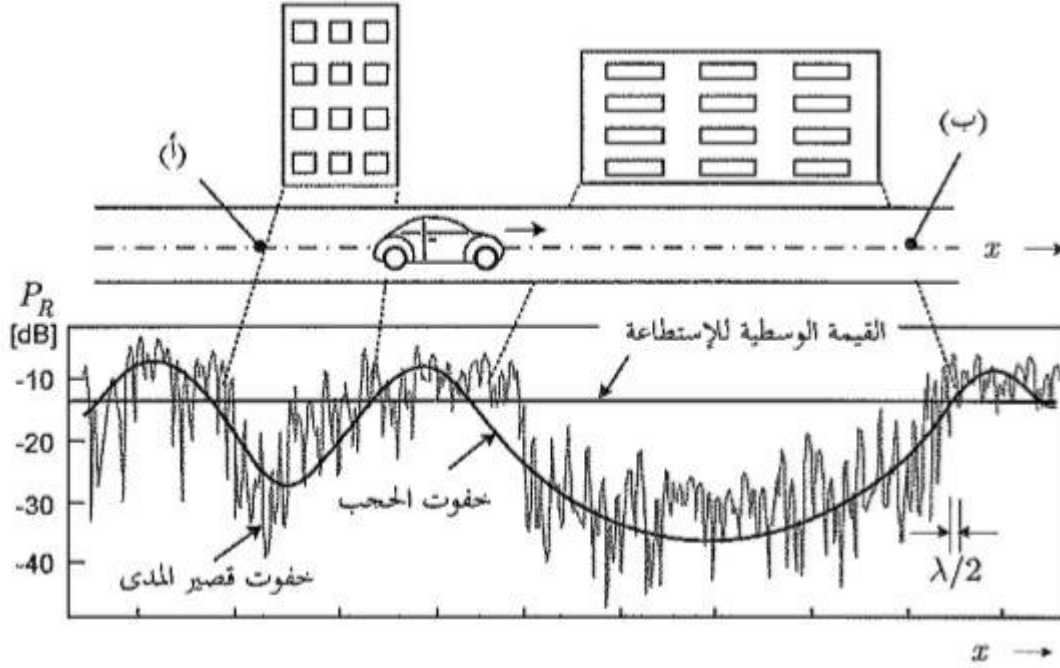
عند استخدام نظم الهوائيات المتعددة MIMO، فإن عملية تقدير القناة (Channel Estimation) هي عملية أساسية. تقسم عملية تقدير القناة إلى التقدير الأعمى (Blind Channel Estimation)، وتقدير الغير الأعمى (Non-Blind Channel Estimation)، حيث يتم استخدام إحصائيات الإشارة المستقبلية في التقدير الأعمى، ولكن بالنسبة للتقدير الغير الأعمى، تتوفر معلومات تقدير القناة السابقة أو أن جزء من الإشارة المرسله يكون معرف مسبقاً في المستقبل ليساعده في التقدير [8] و [9] و [10]. نتيجة لعملية تقدير القناة، ستكون بعض معلومات القناة متاحة في طرف الاستقبال، وتعرف هذه المعلومات بمعلومات حالة القناة (Channel State Information)، حيث يستخدمها المستقبل في فك الترميز (Decoding).

بالنسبة لبعض أنواع القنوات، حتى مع تقدير القناة، يحتاج المستقبل إلى مساعدة من جانب المرسل لتقليل تأثير القناة أو فك ترميز المعلومات، مما يعني أنه ينبغي معرفة معلومات حالة القناة (CSI) في طرف الإرسال. وبالتالي فإن معلومات حالة القناة تُضمن في معلومات التغذية الراجعة (Feedback)، التي ترسل للمرسل عبر القناة العكسية/ الصاعدة (Reverse Link) من المستقبل إلى المرسل [11]. بعد تحديد حجم معلومات حالة القناة CSI، يتم إرسالها من المستقبل إلى المرسل، ولكن أخطاء إرسال واستقبال هذه المعلومات ستؤثر على سعة القناة أو فك ترميز المعلومات، وهناك مشكلة أخرى متعلقة بهذا التقدير هي تحديد عدد بتات خرج المبدل التماثلي الرقمي (Analog to Digital Converter ADC) المعبرة عن هذه المعلومات. حيث يرتبط عدد البتات الناتجة عن المبدلات التماثلية الرقمية بدقة (Resolution) هذه المبدلات ADC وعدد البتات المحجوزة في الوصلة العكسية التي تستخدم لنقل هذه المعلومات (1 بت أو أكثر). حيث أن تقليل عدد البتات المعبرة عن هذه المعلومات يؤثر على مقدار المعلومات التي يمكن أن يحصل عليها المرسل حول القناة. تم نشر العديد من الأعمال [17] و [19] و [20] و [21] فيما يتعلق بتأثير عدد بتات التغذية الراجعة المحدودة على أداء نظم الهوائيات المتعددة MIMO، مما يوضح أهمية هذه المسألة ومقدار التحسين الذي يمكن أن يتحقق من خلال التغذية الراجعة المحدودة (Limited Feedback).

## 2.2- الخفوت قصير المدى

إن الخفوت قصير المدى هو نتيجة لآليتين مختلفتين عند حركة المستقبل أو تغير الوسط المحيط به، هما: النشر الزمني والتغير الزمني. إن التأثير لهاتين الآليتين هما: تأخير زمني (Time Delay) (في المجال الزمني) وإزاحة دوبلر (في مجال التردد) (Doppler shift). كما هو مبين في الشكل (1).

في المجال الزمني (Time Domain)، يُعبر عن آلية النثر الزمني بأنها التأخير (Delay) الناتج عن المسارات المتعددة، وعن آلية التغير الزمني بالزمن المتماسك (Coherence Time) للقناة. بينما في المجال الترددي، يعبر عن آلية النثر الزمني بعرض المجال المتماسك (Coherence Bandwidth) للقناة، وعن آلية التغير الزمني بمعدل الخفوت (Fading Rate) للقناة أو أثر دوبلر (Doppler Effect). وفقاً لهاتين الآليتين، يتم تقسيم الخفوت إلى عدة أنواع من خفوت القناة تتوافق مع تدهور في أداء النظام يختلف باختلاف نوع الخفوت ويحتاج إلى طرق مختلفة لتخفيفه أو تقليل أثره والتي سوف نتناولها في القسم التالي.



الشكل (1) الخفوت قصير المدى

## 1.2.2 – آلية النثر الزمني (Time spreading mechanism)

في آلية النثر الزمني تحدد العلاقة بين الحد الأقصى للتأخير الزمني (Maximum Excess Delay Time) وزمن الرمز (symbol time) في قنوات الخفوت فيما إذا كان هذا الخفوت انتقائي (Frequency Selective Fading) أو غير انتقائي للتردد (خفوت مسطح) (Frequency Nonselective Flat Fading). كما هو مبين الشكل (2).

### أ- الخفوت الانتقائي ترددياً

في المجال الزمني، تُعرّف القناة بأنها انتقائية للتردد عندما يكون الحد الأقصى للتأخير الزمني للقناة أكبر من زمن الرمز، لأن بعض المسارات تتأخر بنسبة تتوافق مع طول المسار المقطوع، وسوف يتم استقبالها في رمز مجاور، وبالتالي فإن أحد أهم مساوئ القنوات انتقائية التردد هو تداخل الرموز (Intersymbol Interference).



في المجال الترددي (Frequency Domain)، تعاني القناة من الخفوت الانتقائي للتردد عندما لا تتأثر جميع المكونات الطيفية (Signal's Spectral Components) للإشارة المرسله بالقناة بنفس المقدار. يحدث هذا الخفوت كلما كان النطاق الترددي التماسك للقناة أصغر من عرض المجال الترددي للإشارة، لذلك سوف تظهر مشكلة تداخل الرموز وتشويه النبضة في المجال الأساسي / القاعدي (Baseband). لتخفيف هذا التدهور، ينبغي للمستقبل أن يعيد جمع طاقة الرمز المشتتة في زمن الرمز الأصلي، ويتحقق ذلك عن طريق المعدل أو المسوي (Equalizer). كما يمكن استخدام تقنيات الطيف المنتور (Spread Spectrum) للتخفيف من التشوه الناتج عن تداخل الرموز. أحد الحلول الأخرى يتمثل بإطالة زمن الرمز عن طريق استخدام التجميع باقتسام الترددات المتعامدة (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) بدلاً من استخدام المعدل أو المسوي.

### أ- الخفوت المسطح أو الخفوت غير الانتقائي

في المجال الزمني، تُعرّف القناة بأنها مسطحة أو غير إنتقائية عندما يكون الحد الأقصى للتأخير الزمني للقناة أصغر من زمن الرمز، مما يعني أن جميع الاشارات المستقبلية من المسارات المتعددة تصل خلال ضمن زمن الرمز نفسه، في هذه الحال فإن القناة لا تعاني من تداخل الرموز، ولكن لا يزال هناك بعض التدهور في الأداء لأن القناة في بعض الأحيان ستجعل الحد الأقصى للتأخير الزمني أكبر من زمن الرمز بالقوة / قسرياً.

في المجال التردد، يكون الخفوت مسطح كلما كان عرض المجال الترددي التماسك القناة أكبر من عرض المجال الترددي للإشارة، حيث أن جميع المكونات الطيفية للإشارة ستتأثر بالقناة بشكل متساوية تقريباً. رغم ذلك فإنه لا يزال من الممكن حدوث تدهور في الأداء بسبب الخسارة في نسبة الاشارة إلى الضجيج (Signal to Noise Ratio) نتيجةاً لخفوت الإشارة.

للتخفيف أو الحد من التدهور الناتج عن هذا الخفوت، يمكن استخدام أحد أشكال تنوع (Diversity) الإشارة، كما يُعتبر استخدام إحدى طرق تصحيح الأخطاء (Error-Correction Coding) أحد أكثر الحلول فعالية لتحقيق ذلك.

## 2.2.2- آلية التغير الزمني (Time variant mechanism)

يمكن في هذه الآلية وصف القناة بأنها إما قناة بخفوت سريع (Fast Fading)، أو قناة بخفوت بطيء (Slow Fading).

### ب- الخفوت السريع

في المجال الزمني، عندما يكون الزمن التماسك لقناة الإرسال أقل من زمن الرمز المرسل، توصف القناة بأنها ذات خفوت سريع، حيث أنه من المتوقع أن يتغير الخفوت في القناة عدة مرات أثناء إرسال الرمز وانتشاره، وبالتالي يمكن أن يتسبب الخفوت السريع في تشويه نبضة المجال الأساسي / القاعدي، مما يؤدي إلى بعض الخسارة في نسبة الاشارة إلى الضجيج SNR الذي يؤدي غالباً إلى معدل خطأ (Bit Error Rate) غير قابل للتحسين. كما تسبب هذه النبضات المشوهة مشاكل في التزامن (Synchronization).

في المجال الترددي، توصف القناة بأنه ذات خفوت سريع عندما يكون معدل إرسال الرموز أقل من معدل تغير القناة.

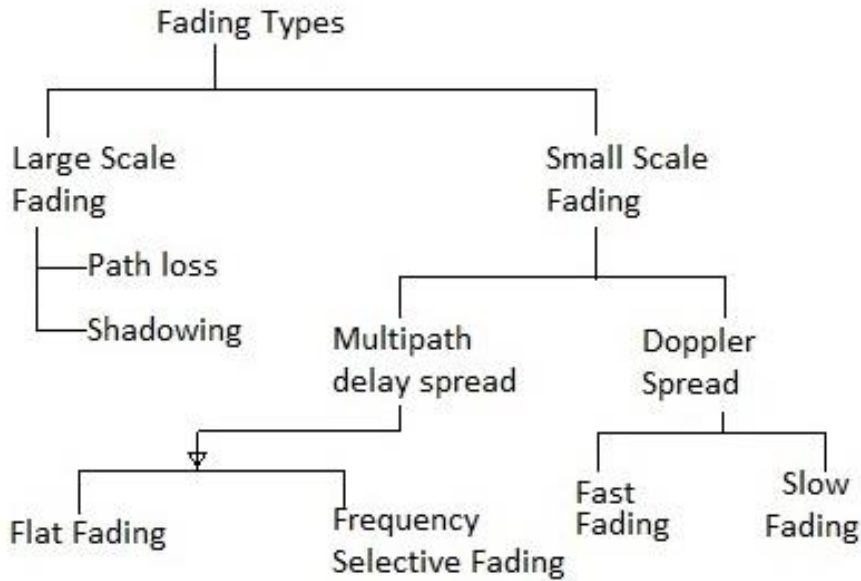
للتخفيف من تشوه الخفوت السريع، يمكن استخدام تعديل لا يتطلب ملاحقة للطور أو زيادة معدل الرمز، ليكون أكبر من معدل الخفوت، كما أن إضافة إشارة فائضة (Signal Redundancy)، تستخدم للمساعدة في كشف الأخطاء وتصحيحها، يمكن أن يكون مفيداً. كما أن استخدام ترميز (Coding) مناسب لتصحيح الأخطاء والتوريق /التشبيك (Interleaving) أحد الحلول الممكنة لهذا الخفوت، كما يمكن لتخفيف هذا الخفوت استخدام التجميع باقتسام الترددات المتعامدة ( Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)، ومع ذلك قد يحدث بعض التدهور لأن انتشار دوبلر يفسد التعامدية مع الموجات الحاملة الفرعية ( Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

## ت - الخفوت البطيء

في المجال الزمني، عندما يكون الزمن المتناسك لقناة الإرسال أكبر من زمن الرمز المرسل، يشار إلى القناة عموماً بأنها ذات خفوت بطيء. ومن المحتمل ألا تعاني الرموز المرسلة من تشويه النبضة. إن التدهور الأولي في قنوات الخفوت البطيء كما هو الحال في قنوات الخفوت المسطح هو الخسارة في نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR.

في المجال الترددي، إذا كان معدل الخفوت صغيراً مقارنة بمعدل الإشارة المرسلة، فإن القناة تُعرف بالقناة بطيئة الخفوت. وبالتالي، من أجل تجنب تشويه الإشارة الناجم عن الخفوت السريع، يجب أن يتجاوز معدل الإشارة معدل الخفوت القناة.

يعد التنوع حلاً للتخفيف من هذا الخفوت، حيث أن الأساليب المختلفة المتاحة للتنوع تُزويد المستقبل بنسخ غير مترابطة من الإشارة، تساعد هذه النسخ الإضافية المستقبل في فك الترميز إذا كانت جميعها ضعيفة. يقسم التنوع إلى عدة أنواع هي: التنوع الزمني ( Time Diversity)، التنوع الترددي (Frequency Diversity)، التنوع المكاني (Spatial Diversity) وتنوع الاستقطاب (Polarization Diversity).



الشكل (2) أنواع الخفوت قصير المدى

في الوقت الحالي، تشكل نظم الهوائيات المتعددة MIMO أحد الطرق الأكثر شعبية لتحقيق التنوع. في الجزء التالي يتم طرح المزيد من التفاصيل حول نظم الهوائيات المتعددة MIMO.

## 3.2- نظم الهوائيات المتعددة (Multiple Input Multiple Output)

في الوقت الحاضر أصبحت نظم الهوائيات المتعددة (MIMO) أحد أكثر النظم المستخدمة للتغلب على الخفوت من خلال تحسين وثوقية الوصلة (Link Reliability) بين المرسل والمستقبل أو زيادة سعة النظام (System Capacity)، وذلك باستخدام هوائيات متعددة في طرفي الإرسال والاستقبال. تتغلب هذه التقنية على العديد من عيوب نظم الاتصالات اللاسلكية، مثل الخفوت والتداخل بين الرموز (ISI) والتداخل بين الموجات الحاملة (Inter Carrier Interference) والتداخل (Interference) وما إلى ذلك [1] و [2] ، وكما توفر نظم الهوائيات المتعددة MIMO عدد من الخصائص مثل الربح في تعدد الإرسال أو ربح التجميع (Multiplexing Gain) وذلك في النظم التي تحتاج لمعدلات إرسال عالية، و ربح التنوع (Diversity Gain) وكسب الترميز (Coding Gain) في النظم التي تحتاج لمعدلات خطأ منخفضة، و ربح الهوائيات (Antenna Gain) وتقليل التداخل مما يعطي معدلات إرسال أعلى.

تعتمد نظم الهوائيات المتعددة MIMO على أن الإشارات الموجودة على هوائيات الإرسال، وعلى هوائيات الاستقبال في الطرف الآخر، يتم دمجها بحيث يتم تحسين جودة الاتصال أو للحصول على معدل نقل أعلى للبيانات، عن طريق إضافة عناصر لتحسين عمل النظام لكن على حساب زيادة تعقيده، حيث يتحول تأثير المسارات المتعددة من سيئة إلى حسنة، كل هذا التحسين في أداء نظم الاتصالات اللاسلكية دون أي تكلفة إضافية من الطيف الترددي. حيث أن نظم الهوائيات المتعددة MIMO تستغل الخفوت العشوائي بفعالية عالية عند توفر المسارات المتعددة لمضاعفات معدلات الإرسال [3] و [4].

إن استخدام هوائيات متعددة في كلا جانبي الإرسال والاستقبال لنظام الاتصال هو أمر ضروري للحصول على ربح الإرسال المتعدد. باستخدام هذه الهوائيات المتعددة في بيئة تشتت / نثر غنية (Rich Scattering Environment)، يمكن للنظام استخدام العديد من قنوات الاتصال في نفس نطاق التردد. مع تقليل عدد هوائيات الإرسال والاستقبال إلى الحد الأدنى، يمكن زيادة سعة النظام من خلال استخدام تعدد الإرسال المكاني، يعد هذا التحسن في الكفاءة الطيفية والكفاءة في الطاقة جذاباً بشكل خاص نظراً لعدم وجود حاجة إلى طيف إضافي أو لزيادة قدرة الإرسال.

إن استخدام هوائيات متعددة في كلا الجانبين يمنح النظام تحسين في نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) في جهاز الاستقبال مقارنة بالنظم التقليدية ذات هوائي إرسال واستقبال واحد، وهذه التحسينات هي ربح ناتج عن استخدام مصفوفة الهوائيات. ولكن بدون المعالجة الصحيحة للإشارات في الإرسال والاستقبال، لا يمكن تحقيق التحسين المذكور. بالإضافة إلى مصفوفة الهوائيات اللازمة للحصول على الربح المطلوب، يجب أن تكون معلومات حالة القناة (CSI) متوفرة في جانب الإرسال لتحقيق أفضل ربح ممكن عند المستقبل [4] و [6].

كما ذكرنا في القسم السابق حول الحفوت فإن التنوع في الاتصالات اللاسلكية، يتم استخدامه كحل لحفوت الإشارة. حيث توجد تقنيات مختلفة للتنوع تستند إلى نفس المبدأ، عُرفت واستخدمت على نطاق واسع منها: التنوع الزمني والتنوع الترددي والتنوع المكاني [3] و [4] و [6].

حيث تنقل الإشارة عبر مسارات مستقلة لكل منها حفوت خاص. ومع قنوات الحفوت المستقلة هذه يزداد احتمال عدم تعرض واحدة منها على الأقل بحفوت عميق. كما أنه من خلال مسارات الحفوت المستقلة هذه من الممكن تقليل التداخل بين القنوات، لأن كل إشارة مستقلة لها أثر خاص بالمسار المكاني الذي مرت من خلاله.

يمكن تقسيم نظم الهوائيات المتعددة MIMO إلى فئتين: تعدد الإرسال المكاني (Spatial Multiplexing) والتنوع المكاني (Spatial Diversity). مع هاتين الفئتين (تعدد الإرسال المكاني أو التنوع المكاني) تتوفر عدد من الميزات التي يمكن استخدامها لتحسين أداء النظام وهي: ربح الإرسال المتعدد، ربح التنوع، ربح مصفوفة الهوائيات، وتقليل التداخل.

### 1.3.2 – تعدد الإرسال المكاني (Spatial Multiplexing)

في تعدد الإرسال المكاني، تصل إلى المستقبل تدفقات (Streams) إرسال متعددة، هذه التدفقات ناتجة عن خرج خوارزميات مخصصة لهذه الغرض في المرسل، يتم أسناد كل تدفق هوائي إرسال مختلف في نفس المجال الترددي، عندما تصل هذه الإشارات المستقلة بما فيه الكفاية إلى مصفوفات الهوائيات في المستقبل ومع معلومات كافية عن حالة القناة، يمكنه فصل هذه التدفقات إلى قنوات مستقلة تقريباً. يعد تعدد الإرسال المكاني منهجاً / أسلوباً قوياً للغاية لزيادة سعة القناة عند قيمة عالية لنسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) [6]. إن الحد الأقصى لعدد التدفقات المكانية محدود بأقل عدد من الهوائيات في كلا جانبي النظام (المرسل أو المستقبل). يمكن استخدام تعدد الإرسال المكاني بدون معرفة معلومات حالة القناة CSI في جهاز الإرسال، ولكن إذا كانت معلومات حالة القناة CSI متاحة في المرسل ومع الترميز المسبق (Precoding) قد يكون ذلك أكثر فائدة.

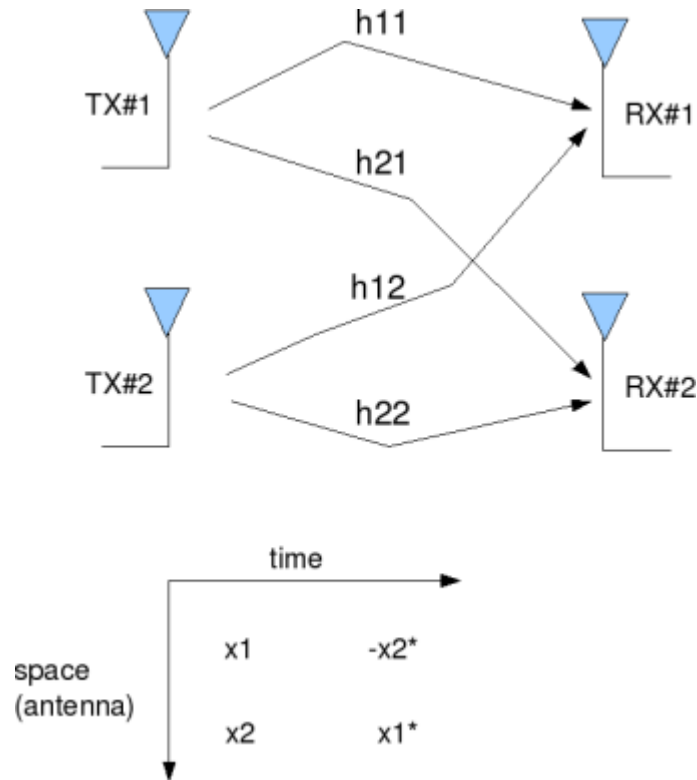
### 2.3.2 – التنوع المكاني (Spatial Diversity)

تُستخدم تقنيات التنوع المكاني عندما تكون معلومات حالة القناة في المرسل غير متاحة، حيث يتم إرسال دفق واحد (على عكس التدفقات المتعددة في الإرسال المتعدد المكاني) مع ترميز مسبق (Precoding) في جانب المرسل، حيث يستغل التنوع المكاني الحفوت المستقل في كل مسار من المسارات المتعددة لتعزيز تنوع الإشارة. في التنوع المكاني لا يوجد أي تكوين حزمة (Beamforming) أو ربح في مصفوفة الهوائيات (Antenna Array Gain) لأنه لا توجد معرفة بحالة القناة، ولكن عندما تتوفر بعض المعرفة بالقناة في جهاز الإرسال، يمكن أن يستخدم التنوع المكاني جنباً إلى جنب مع تعدد الإرسال المكاني [3] و [4].

أحد أهم أنواع الترميز المسبق للتنوع المكاني في نظم MIMO هو الترميز زمنياً ومكانياً (Space-Time Coding)، وهو منهجية عملية في نظم الهوائيات المتعددة المداخل والمخارج MIMO لزيادة وثوقية القناة، حيث يتم إرسال الإشارات من هوائيات مختلفة (مكانياً) وفي فترات زمنية مختلفة (زمنياً)، وبالتالي يتم تقليل أخطاء الإرسال في المستقبل دون التضحية بالمجال الترددي أو إنقاص الكفاءة الطيفية.

أحد منهجيات الترميز الموجودة هو الترميز الكتلي زمنياً ومكانياً (STBC) الذي يستخدم للحصول على ربح التنوع، وهناك منهجية ترميز أخرى تسمى الترميز المتشعب زمنياً ومكانياً (space time trellis code STTC) والتي تستخدم للحصول على كسب الترميز. يتم تقسيم معدل البيانات المشفرة إلى تدفقات فرعية وهذه التدفقات الفرعية تساوي إجمالي عدد هوائيات الإرسال. في النهاية، تصل هذه التدفقات الفرعية إلى المستقبل متراكبة فوق بعضها البعض. توفر هذه الترميزات (Codes) من خلال العلاقة الزمنية والمكانية للإشارات المرسل من هوائيات مرسل مختلفة، نوعين من الربح الأول هو ربح الترميز (Code Gain) والثاني هو ربح التنوع (Diversity Gain) عند المستقبل، والتي تساعد في الحد من التعقيد في الترميز وفك الترميز. ويتحقق ذلك بتقسيم الهوائيات عند المرسل إلى مجموعات صغيرة واستخدام ترميزات زمنية ومكانية لكل مجموعة، أي تستخدم كل مجموعة من الهوائيات لنقل البيانات، عند المستقبل يتم فك الترميز الزمنية والمكانية الفردية بواسطة تقنيات معالجة مناسبة، من خلال اعتبار باقي الإشارات المرسل بواسطة مجموعات أخرى من الهوائيات كضجيج. بسبب محدودية ربح التنوع ومعدل الإرسال تم تصميم ترميزات زمنية ومكانية لإعطاء ربح تنوع كامل (Full Diversity Gain) ومعدل إرسال كامل (Full Transmission Rate).

تم تقديم الترميز الذي يستخدم هوائيين على جانب المرسل بواسطة Alamouti، كما هو مبين في الشكل (3) [7]، حيث يوفر هذا الترميز ربح التنوع بالإضافة إلى الحفاظ على معدل إرسال كامل/ تام [6] و [7]. يمكن تعديل ترميز Alamouti إلى أكثر من هوائي إرسال ولكن ذلك لا يوفر تنوعاً كاملاً ومعدل نقل كامل [6] وقد ثبت من خلال الحسابات والأمثلة أن معدل الترميز في مثل هذه الحالات هو  $3/4$ . لتخفيف عيوب ترميز Alamouti، تم تقديم تقنيتين معممتين لتوفير ربح تنوع كامل مع فك تشفير بسيط باستخدام خوارزمية الأرجحية العظمى (Maximum Likelihood ML).

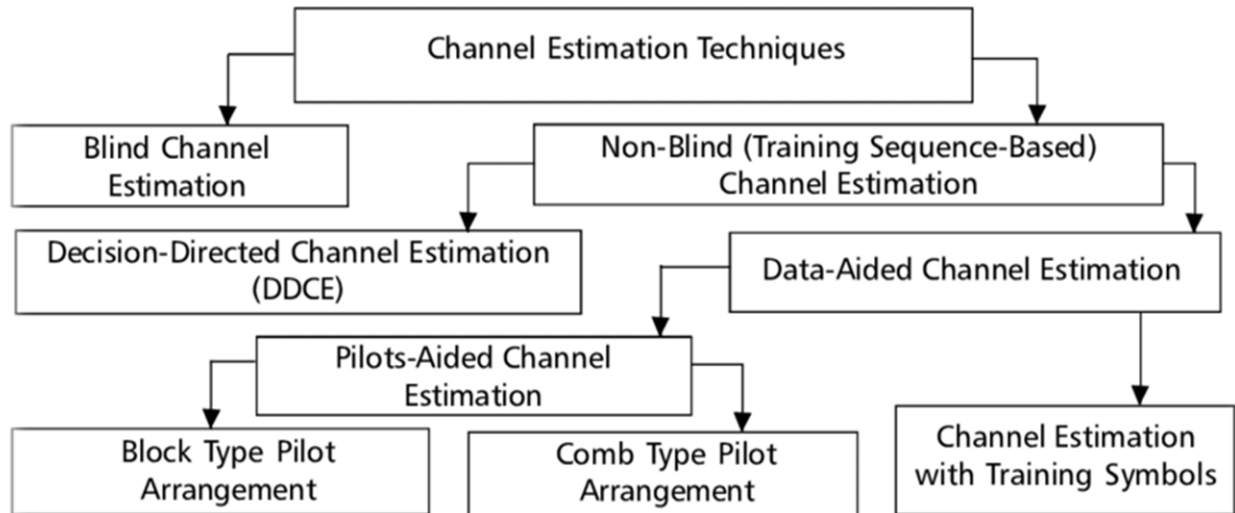


الشكل (3) الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً OSTBC

الأول هو الترميز الزمني المكاني شبه المتعامد (Quasi-Orthogonal Space-Time Block Code QOSTBC) الذي يستخدم أربعة هوائيات على جانب المرسل [5]، حيث تشير شبه المتعامدية إلى أعمدة مصفوفة الإرسال التي ليست متعامدة مع بعضها البعض. التقنية الثانية هي الترميز الزمني المكاني -المدور شبه المتعامد (Rotated Quasi-Orthogonal Space-Time Block Code (RQOSTBC)، والتي تستخدم الدوران البسيط للطور مع التعقيد المعتدل ، يمكن لـ RQOSTBC تحقيق معدل إرسال كامل وتنوع كامل، ويمكن فصل الرموز إلى أزواج، لكن النظام سيعاني من خسارة صغيرة في الأداء بسبب استخدام الترميز الزمني المكاني -المدور شبه المتعامد (RQOSTBC). تحقق هاتان الطريقتان أقصى قدر من التنوع ومعدل إرسال كامل، حيث يكون معدل الإرسال الكامل أكثر أهمية عند نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) العالية، لكن عند انخفاض نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) وارتفاع معدل الخطأ في البتات (BER)، يصبح الحد الأقصى لربح التنوع أكثر أهمية، لكن هذا الربح في معدل الإرسال والتنوع يزيد من تعقيد فك الترميز، وهو أكبر من ترميز Alamouti [5] و [7].

## 4.2- تقدير القناة (Channel Estimation)

إن تقدير القناة هو العملية التي يحاول فيها المستقبل تقدير / توقع تأثير القناة على إشارة الدخل. والذي يمكن اعتباره جيداً عند الوصول إلى مقدار محدد في معدل خطأ البتات، حيث يعطي تقدير القناة للمستقبل فكرة عن تأثير القناة الراديوية على إشارة الدخل، والذي يستخدمه بدوره في التقليل من هذا الخطأ باستخدام تقنيات مناسبة. إن أساليب تقدير القناة إلى فئتين رئيسيتين: التقدير الأعمى والتقدير الغير الأعمى. كما هو موضح في الشكل (4).



الشكل (4) طرق تقدير القناة

## 1.4.2 – تقدير القناة الأعمى (Blind Channel Estimation)

تستخدم طرق تقدير القناة العمياء الخواص الإحصائية للإشارات المستقبلية حيث تتطلب كمية كبيرة من البيانات لهذه الغاية، حيث تعتمد أساليب تقدير القناة العمياء على إحصاءات من الدرجة الثانية أو أعلى. إن القبول الأساسية للتقدير الأعمى المستند إلى إحصاءات من الدرجة الثانية هي أن تلك التي تعتمد على إحصاءات الترتيب الثاني (second order) لا يمكنها إلا استعادة المطال [8] و [10]. بينما لاستعادة كلاً من المطال والطور لتابع النقل للقناة يجب استخدام خواص إحصائية من درجات أعلى [9]. بالنسبة لنظم التجميع باقتسام الترددات المتعامدة (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)، تستخدم طرق تقدير القناة العمياء من البادئة الدورية (cyclic prefix) الذي يعطيها بعض الأفضلية. لكن لسوء الحظ، فإن تقدير القناة الأعمى الذي يعتمد على الأساليب الإحصائية غير مناسب لقنوات الراديوية المتنقلة، حيث يكون معدل التقارب (Convergence) فيها بطيئاً. وبالتالي يُفضل استخدامها مع الإرسال المستمر حيث أنها غير مناسبة للنظم التي تستخدم إرسال متقطع / نظم الرشقات (Burst) [8].

طريقة أخرى تسمى الطريقة الحتمية (Deterministic Approach) تم استخدامها في نظم التجميع باقتسام الترددات المتعامدة (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)، والتي تقوم على مبدأ الأرجحية العظمى (Maximum Likelihood). حيث يمكن تقدير القناة من رمز OFDM مستقبل واحد مما يعطي هذه الطريقة ميزة. حيث أن النظم التي تستخدم هذه الطريقة تعمل بشكل جيد سواءً كانت من نظم الإرسال المستمر أو المتقطع / نظم الرشقات (Burst)، لكن هذا التحسين جاء على حساب زيادة التعقيد الحسابي اللازم لتنفيذ خوارزمية الأرجحية العظمى (Maximum Likelihood ML)، كما أن الغموض في الطور الذي ما زال موجوداً يعطي هذه الطريقة بعض العيوب [9].

## 2.4.2 – تقدير القناة الغير الأعمى (The non-blind channel estimation)

في طرق تقدير القناة الغير العمياء، يستخدم المستقبل معلومات القناة السابقة أو جزءاً من الإشارة المرسل لتقدير القناة [8]. يمكن أن يكون تقدير القناة الغير الأعمى مدعوماً بالبيانات (Data Aided) أو تقدير القناة بالقرار المباشر (Decision Directed Channel Estimation DDCE). حيث أنه في تقدير القناة المدعوم بالبيانات، يمكن استخدام رموز OFDM معروفة بشكل مسبق كلياً أو جزئياً (Pilots) في المستقبل لتقدير القناة الراديوية، ومع زيادة كثافة هذه الرموز، يمكن تحسين دقة التقدير (Estimation Accuracy) ولكن هذا الزيادة تقلل من الكفاءة الطيفية [8]. عادةً ما يتم استخدام هذا النوع من التقدير في القنوات ذات التغير البطيء، والتي يمكن اعتبارها ثابتة لمدة محددة تعادل زمن الرشقة أو فترة الإرسال، حيث تُدرج رموز التدريب / الإشارات المرجعية (Pilots) في بداية الرشقات لغرض تقدير القناة والحصول على التمثيل الترددي للقناة Channel Frequency Representation [8].

في تقدير القناة بالقرار المباشر (DDCE) لتحسين أداء المستقبل عندما تتغير القناة بين رموز OFDM المتتالية، يجب أن تدرج رموز التدريب / الإشارات المرجعية (Pilots) ضمن رموز بيانات OFDM بطريقة منتظمة، تتعلق بزمن تغير القناة. في أساليب تقدير القناة بالقرار المباشر DDCE، يتم استخدام تقديرات القناة لرموز OFDM السابق لفك تشفير رمز OFDM الحالي، وهذه القناة المقدر في الرموز الحالية يتم استخدامها في عملية فك الترميز لاحقاً، وبالتالي فإن التنوع الشديد الذي يمكن أن يحدث من رمز إلى رمز يجعل هذه

التقدير أقل وثوقية. في بعض الحالات، يتم استخدام ترميز القناة (Channel Coding) لتحسين أداء تقنيات تقدير القناة بالقرار المباشر (DDCE) [8] و [9].

في تقدير قنوات الهوائيات المتعددة MIMO، ينبغي استعادة مصفوفة القناة من معرفة الإشارة المستقبلية والإشارة المرسلية عند تجاهل الضجيج، حيث يمكن استخدام رموز التدريب/الإشارات المرجعية لتقدير القناة، وعادة ما توفر أداءً جيداً. ومع ذلك، عند استخدام رموز التدريب/الإشارات المرجعية يتم تقليل كفاءة الإرسال بسبب حجز بعض الموارد لرموز التدريب التي يتم إرسالها بالإضافة إلى رموز البيانات. هذا وتستخدم تقنيات المربعات الصغرى (Least Square LS) والخطأ المتوسط على الأقل (Minimum-Mean Square-Error) (MMSE) على نطاق واسع لتقدير القنوات عندما تتوفر رموز التدريب/الإشارات المرجعية، حيث أنه يمكن استخدام تقدير (LS) إذا كانت توزيع القناة والضجيج غير معروفة، في حين يتم استخدام تقدير (MMSE) إذا كانت توزيع القناة والضجيج معروفة [6] و [8] و [10].

## 3.4.2 – معلومات حالة القناة (Channel state information)

تمثل معلومات حالة القناة خصائص القناة بين المرسل والمستقبل والتأثيرات الناتجة عن انتشار الإشارة بينهم، مثل التشتت (Scattering) والخفوت (Fading) والتخامد (Power Decay) مع المسافة. حيث تجعل معلومات حالة القناة التكيف (Adaption) بين الإرسال وظروف القناة الآنية أسهل، وهو أمر حاسم لتحقيق اتصال موثوق بمعدلات بيانات عالية في نظم الهوائيات المتعددة. كما أن معلومات حالة القناة CSI ضرورية في نظم الهوائيات المتعددة MIMO لزيادة معدل الإرسال وتحسين التغطية وتحسين الكفاءة.

يوجد نوعين من معلومات حالة القناة CSI، وهما معلومات حالة القناة قصيرة المدى (Short-Term CSI) ومعلومات حالة القناة طويلة المدى (Long-Term CSI). عندما تكون حالة القناة الآنية بطيئة التغيير، يتيح استخدام معلومات حالة القناة قصيرة المدى فرصة لتكييف الإشارة المرسلية مع للقناة، حيث أن المرسل يكون على علم بهذه التغييرات البطيئة بالتالي يستطيع ملاحظة هذه التغييرات، وبالتالي تحسين الإشارة المستقبلية لتعدد الإرسال المكاني أو تحقيق معدلات خطأ منخفضة.

من ناحية أخرى، تعني معلومات حالة القناة طويلة المدى أن النظام لديه معلومات حول التوصيف الإحصائي للقناة، يمكن استخدام هذه المعلومات لتحسين الإرسال، مثل نوع توزيع الخفوت، ومتوسط ربح القناة، ومركبة خط النظر الخ...

تعتمد المعلومات التي يمكن الحصول عليها من CSI بشكل أساسي على معدل تغير حالة القناة، عندما تتغير ظروف القناة بسرعة خلال إرسال رمز معلومات واحد، فإن معلومات حالة القناة CSI الإحصائية فقط هي المعقولة/المقبولة. ولكن في نظم الخفوت البطيء، يمكن تقدير حالة القناة الآنية بدقة معقولة واستخدامها لتكييف الإرسال لبعض الوقت قبل أن تصبح قديمة.

عادةً ما يتم تقدير معلومات حالة القناة CSI في طرف الاستقبال، ثم يتم تقدير حجم البيانات الواجب إعادة إرسالها إلى جانب الإرسال. حيث أن سعة القناة في نظم الاتصالات متعددة الهوائيات MIMO تتأثر بمعلومات حالة القناة المتاحة لكل من المرسل والمستقبل [6]. في معظم الحالات، يمكن للمستقبل تتبع الحالة الآنية للقناة بدقة من رموز التدريب/الإشارات المرجعية التي يتم تضمينها عادةً في الإشارة المرسلية [8]. لكن لتوفر هذه المعلومات في المرسل، هناك عدة طرق ممكنة. في النظم المزدوجة بتقسيم التردد (FDD)، يكون كل من



الوصلة الصاعدة/ العكسية والوصلة الهابطة/ الأمامية متباعدتين في التردد، وبالتالي فإن خفوت الوصلة ليس متبادلاً أي أن الخفوت الذي يحدث الوصلة الهابطة/ الأمامية للقناة ليس بالضرورة أن يحدث في الوصلة الصاعدة/ العكسية، وبالتالي يجب توصيل معلومات حالة القناة CSI من خلال التغذية الراجعة (Feedback) [11]. وبالتالي، فإن المرسل عادة لا يستطيع معرفة معلومات حالة القناة الأنية / الحالية الأ من هذه التغذية. في المقابل في النظم المزدوجة بتقسيم الزمن (TDD)، فإن خفوت الوصلة يمكن يكون متبادلاً، أي أن الخفوت الذي يحدث في الوصلة الهابطة/ الأمامية للقناة يمكن أن يحدث في الوصلة الصاعدة/ العكسية، طالما أن الزمن المتناسك لعملية الخفوت يتجاوز وقت الإرسال على الوصلتين الصاعدة والهابطة. وبالتالي، قد يكون لدى المرسل إمكانية الوصول إلى معلومات حالة القناة CSI الموثوقة بمستويات نقل منخفضة ومعتدلة [11].

## 4.2- التغذية الراجعة (Feedback)

تمثل التغذية الراجعة خطوة كبيرة للتغلب على التحدي المتمثل في جعل تكيف القناة الفوري عملياً. تستخدم النظم التي تحتوي على تغذية راجعة الوصلة العكسية/ الصاعدة مع تدفق البيانات ذي المعدل المنخفض، لتوفير معلومات عن الوصلة الأمامية/ الهابطة في المرسل، حيث توجد بعض شروط الوصلة الأمامية/ الهابطة التي تنقلها هذه المعلومات (مثل حالة القناة ومستوى التداخل، إلخ...)، يستخدم المرسل هذه المعلومات لتكييف نقل الوصلة الأمامية / الوصلة الهابطة. يحدد النظام قيمة المعلومات التي ترسل من خلال التغذية الراجعة، حيث تكون القيمة أكبر عندما تقدم القناة شكلاً من أشكال الاضطراب (مثل التداخل المكاني، والتداخل الناتج عن عدد المستخدمين، والتداخل بين الرموز، وما إلى ذلك) التي لا يمكن للمستقبل وحده معالجتها. يمكن أن تكون التغذية الراجعة نفسها رقمية (Digital) أو تمثيلية (Analog). في هذه البحث تمثل التغذية الراجعة المحدودة (Limited Feedback) في نظم الهوائيات المتعددة MIMO محور البحث، بافتراض أن تكون التغذية الراجعة رقمية ومثالية (خالية من التأخير والخطأ) [11].

## 1.5.2- مشاكل التغذية الراجعة وحلولها (Limited feedback bottlenecks and solutions)

تساعد التغذية الراجعة في نظم الاتصالات جهاز الإرسال على استغلال ظروف القناة حيث تساعد في تحديد مصفوفة الترميز المسبق في جهاز الإرسال، والتي تساهم في استغلال حالة القناة بأفضل شكل ممكن.

تعتبر طرق تقدير كمية المعلومات المطلوبة في المرسل والربح في الأداء الذي يمكن الحصول عليه من خلال التغذية الراجعة من المعاملات المهمة لتقييم التغذية الراجعة. حيث تتمثل الفكرة الأساسية في استخدام تقنيات تكميم للمتجه (Vector Quantization) لتكمية معلومات حالة القناة قبل إرسالها عبر التغذية الراجعة على قناة ذات معدل بيانات محدود، هذا وتمثل محدودية القناة العكسية التي تحمل معلومات التغذية الراجعة أيضاً معاملاً مهماً من معاملات التغذية الراجعة. يتم استخدام معلومات التغذية الراجعة لتقليل معدل أخطاء البتات إلى الحد الأدنى أو لزيادة السعة، حيث يمكن من خلال التغذية الراجعة تحقيق تقريب جيد لما يمكن عمله مع القناة. هناك طريقتان رئيسيتان للتغذية الراجعة: تتمثل الأولى تكمية خصائص القناة [11] و الثانية تكمية خصائص الإشارة المرسل [20] و [21] و [22].

إن تكمية معلومات حالة القناة CSI يحتاج إلى مبدلات تماثلية رقمية (Analog To Digital Convertors). يمثل استهلاك الطاقة في هذه المبدلات ADC مشكلة رئيسية، حيث أنه في تصميم المستقبل التقليدي لنظم الهوائيات المتعددة (MIMO)، تتمتع المبدلات التمثيلية الرقمية (ADCs) بدقة عالية. في القنوات العريضة (Broadband) الحزمة، يرتفع معدل أخذ العينات (Sampling Rate) للمبدلات التماثلية الرقمية ADC بارتفاع دقة (Resolution) هذه المبدلات. لسوء الحظ، فإن المبدلات التماثلية الرقمية ADC عالية السرعة وعالية الدقة مكلفة ولديها استهلاك كبير للطاقة، حيث يزداد استهلاك الطاقة بشكل كبير مع زيادة الدقة بسبب زيادة عدد المقارنات (Comparators) [23]. في الوقت الحاضر، تتوفر تجارياً مبدلات تماثلية رقمية عالية السرعة وعالية الدقة وذات استهلاك منخفض للطاقة علاوة على ذلك، لأن معظم نظم الاتصالات بدأت بتوظيف / استخدام الهوائيات المتعددة MIMO، يمكن افتراض الطاقة الإجمالية المصروفة / المستهلكة بسبب المبدلات التماثلية الرقمية ADC المتعددة كبيرة، حيث ستكون هناك حاجة لتحديد الإشارات المستقبلية من هوائيات متعددة إذا افترضنا معالجة المجال الأساسي / القاعدي لجميع مخارج الهوائيات تتم بشكل منفصل لكل هوائي. [23]. إن خفض معدل أخذ العينات و / أو دقة التكمية للمبدلات التماثلية الرقمية ADC هي الحلول المباشرة للتخفيف من استهلاك الطاقة. يمكن تقليل معدل أخذ العينات عن طريق استخدام (Time-Interleaved ADC TIADC). حيث يعمل عدد من المبدلات التمثيلية الرقمية ADC منخفضة السرعة وعالية الدقة على التفرع / في نفس الوقت. لكن عدم التوافق في الريح وإزاحة الجهد والزمن بين هذا المبدلات التمثيلية الرقمية هي العيوب الرئيسية لـ TIADC، والتي يمكن أن تتسبب في حدوث أخطاء في أداء المستقبل.

يمثل استخدام مبدلات تمثيلية رقمية ADC ذات دقة منخفضة (1-3 بت) حلاً بديلاً لاستخدام مبدلات تمثيلية رقمية ADC ذات دقة عالية، مما يقلل من استهلاك الطاقة والتكلفة. إن استخدام مبدلات تمثيلية رقمية ADC ذات دقة منخفضة وخاصة ADC بت واحد يغير بشكل جذري بين النتائج النظرية والعملية لنظم الاتصالات. تتمثل المزايا الرئيسية لهذه البنية في أنه يمكن تنفيذ مبدلات تماثلية رقمية ADC مع استهلاك منخفض للغاية للطاقة وتبسيط التعقيد الكلي للنظام، على سبيل المثال، قد لا تكون هناك حاجة إلى المتحكم التلقائي في الريح (Automatic Gain Control AGC). تم بحث العديد من آثار استخدام مبدلات تماثلية رقمية ADC ذات البت الواحد في دراسات سابقة، بما في ذلك سعة القناة [24] ، تقدير القناة [25] والتزامن [26].

تم تقديم حل آخر في [12] ، يتمثل في استخدام بنية هجينة (Hybrid Architecture) مع عدد عشوائي من بنات التكمية للمبدلات التماثلية الرقمية ADC لتقليل استهلاك الطاقة وتكلفتها. في هذا البنية ، توجد طريقتان ممكنتان لتحقيق ذلك. أولاً ، عدد سلاسل المستقبلات الراديوية (Radio Frequency Chains) يساوي عدد الهوائيات. ثانياً ، عدد سلاسل المستقبلات الراديوية (Radio Frequency Chains) أصغر من عدد الهوائيات.

تسمح البنية الهجينة بتقسيم المعالجة المسبقة بين القسمين التماثلي والرقمي، لكل من نظم الموجات الميلي مترية (mm waves) ونظم الهوائيات المتعددة MIMO منخفضة التردد، لذلك عندما يستخدم النظام بنية هجينة فإن الإرسال متعدد الدفق سيتم دعمه [12]. في [12] و [13] ، تم استخدام طرق إرسال تعتمد على إيجاد القناة العكسية / مقلوب القناة (Channel Inversion) و القيمة الذاتية (Singular Value Decomposition SVD) واستخدامهما في المعالجة المسبقة في طرف الإرسال وتم إيجاد معدلات الإرسال القابلة للتحقيق في هكذا بنية عند استخدام الطريقتين السابقتين. يمكن للبنية الهجينة المقترحة ومع الترميز المسبق المناسب أن تحقيق النظم التي

تستخدم المبدلات التماثلية الرقمية منخفضة الدقة معدل مماثل للقيم التي تعطيها المبدلات التماثلية الرقمية عالية الدقة، والمفاضلة بين المعدل الممكن تحقيقه واستهلاك الطاقة، وهو أمر مهم بشكل خاص في نظم الموجات الميلي مترية (mm waves) ونظم الهوائيات المتعددة MIMO منخفضة التردد. وتظهر النتائج في [12] الخسائر الناجمة عن العدد المحدود من سلاسل المستقبلات الراديوية (Radio Frequency Chains) واستخدام مبدلات تماثلية رقمية ADC منخفضة الدقة (Low Resolution).

في [12] و [13]، يمكن ملاحظة أن البنية الرقمية يمكن أن تدعم أكثر من 8 تدفقات في وقت واحد، وهي أفضل بكثير من البنية الهجينة مع سلسلة استقبال راديوية (Radio Frequency Chain) واحدة فقط والتي يمكنها فقط دعم إرسال أحادي التدفق [12]، بينما البنية الهجينة المقترحة مع مبدلات تماثلية رقمية ذات دقة منخفضة ADC، يمكن أن تحقق أداءً مماثلاً للأداء الذي تم الحصول عليه من خلال بنية رقمية بالكامل أو هجينة مع مبدلات تماثلية رقمية ذات دقة عالية عند نسبة إشارة إلى الضجيج SNR منخفضة إلى متوسطة. ويمكن أن تكون كفاءة استخدام الطاقة في البنية الهجينة المقترحة مع مبدلات تماثلية رقمية ذات دقة منخفضة ADC المقترحة أفضل قليلاً من تلك الخاصة بالبنية الرقمية بالكامل التي تستخدم مبدلات ADC عالية الدقة. والسبب هو أن المبدلات ADC ستهيمن على استهلاك الطاقة عندما تكون الدقة عالية، حيث توفر البنية الهجينة الطاقة عن طريق تقليل عدد المبدلات التماثلية الرقمية ADC عالية الدقة. وهذا يعني أن الجمع بين البنية الهجينة مع التكمية الخشنة (coarse quantization) يحقق مفاضلة أفضل في معدل الطاقة مقارنة بكل من الجمع بين البنية الهجينة مع مبدلات تماثلية رقمية ذات دقة عالية / كاملة الدقة.

## 2.5.2- أثر التكمية بت واحد على سعة القناة (Quantization effect on capacity)

إن التكمية بعدد قليل من البتات أو بت واحد يقلل من استهلاك الطاقة، ولكنه يضع قيوداً على سعة القناة. في [16] و [17] و [18]، تم دراسة سعة نظم الهوائيات المتعددة MIMO، في [18]، وجد أن هناك انخفاض في سعة قناة عند نسبة إشارة إلى الضجيج SNR منخفضة بسبب التكمية بت واحد. هذه النتائج لا تنطبق مع النتائج عند نسبة إشارة إلى الضجيج SNR عالية. في [20]، تمت دراسة سعة قناة نظم الهوائيات المتعددة MIMO مع تكمية بت واحد عند المستقبل فقط، حيث تبين أن سعة القناة عند نسبة إشارة إلى الضجيج مرتفعة (SNR) لنظم الهوائيات وحيدة الدخل ومتعددة الخرج (SIMO Single Input Multiple Output) تزداد خطياً مع اللوغاريتم الثنائي لعدد هوائيات الاستقبال أما لقناة نظم الهوائيات المتعددة MIMO، تبين أن سعة القناة عند نسبة إشارة إلى الضجيج مرتفعة (SNR) محدودة من الأدنى برتبة قناة الاتصال  $H$  (Rank Of The Channel). في [20] و [21]، تمت دراسة سعة قناة نظم الهوائيات المتعددة MIMO ل  $N$  هوائي استقبال و  $M$  هوائي إرسال مع تكمية بت واحد في المستقبل. مع فرض أن معلومات حالة القناة CSI تكون معروفة في كل من جانبي الإرسال والاستقبال. بالنسبة لقنوات لنظم الهوائيات وحيدة الدخل ومتعددة الخرج (Single Input Multiple Output SIMO) ونظم الهوائيات المتعددة MIMO، تم اشتقاق الحدود على السعة عند SNR اللانهائي والمحدود.

عندما يتعذر على جهاز الاستقبال معالجة تأثير القناة، يمكن إرسال بعض المعلومات إلى جهاز الإرسال عبر الوصلة العكسية/ الصاعدة (التغذية الراجعة)، وعندما يتلقى المرسل هذه المعلومات، يمكن أن يستخدمها لمساعدة النظام على تقليل تأثير القناة إلى الحد الأدنى، عن

طريق توليد ما يسمى كتاب الترميز (Codebooks). تحتوي كتب الترميز (Codebooks) هذه على رموز وفقاً للنظام والمعلومات المرسله من المستقبل المعتمدة على معلومات حالة القناة. في [19]، تم اقتراح بعض كتب الترميز (codebooks) لنظم الهوائيات متعددة الدخل ووحيدة الخرج (Multi Input Single Output) مع مبدلات تماثلية رقمية ADC بيت تكمية واحد. كتب الترميز (codebooks) تعتمد بشكل رئيسي على اتجاه القناة (Channel Direction) والطور المتبقي (Residual Phase). في [19]. تم اشتقاق حدود سعة القناة ومقدار الخسارة في الاستطاعة الناتجة عن التغذية الراجعة المحدودة، حيث تبين أن إرسال بت واحد يعبر عن الطور المتبقي في النظم التي تعتمد على هوائي واحد في كل من طرفي الإرسال والاستقبال (Single Input Single Output) هو كافي للحصول على أداء جيد، بينما في نظم الهوائيات متعددة الدخل ووحيدة الخرج (Multiple Output Single Input)، يتطلب الحصول على أداء جيد إعادة إتجاه القناة والطور المتبقي على حد سواء إلى المرسل. كما تبين انه عندما تكون سعة القناة المكتمة مشبعة (Saturated)، فإن العدد المطلوب من بتات التغذية الراجعة التي تضمن خسارة صغيرة في السعة يتناقص مع ازدياد نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR. هذه النتائج لا تنطبق على المبدلات التي تستخدم أكثر من بت لأن نظام التحكم الأمثل (Optimal Signaling) في هذه الحالة غير معروف. في [20]، يعتمد المرسل إشارة غاوسية كحل أمثلي جزئياً. نظراً لأن التشويش غاوسي، تبين أنه يكفي وجود رمز تشفير واحد (Single Codebook) يحدد اتجاه القناة. وبينت النتائج أن الخسارة في السعة الناتجة عن التغذية الراجعة المحدودة مقارنة بتلك ذات المعدل الكامل، لكل من نظام MISO متعدد المستخدمين ونظام MISO لمستخدم واحد. حيث أنه عند انخفاض معدل الإشارة إلى الضجيج (SNR)، يكون الأداء مشابهاً للأداء الذي يحتوي على بت واحد. بينما في ارتفاع نسبة الإشارة إلى الضجيج يهيمن ضجيج التكمية، وبالتالي فإن الأداء يختلف اختلافاً كبيراً عن الحالة مع لانهاية ADC قليلاً.

إن الحد الأعلى للمعدل القابل للتحقيق في نظام MISO لمستخدم واحد، تحدده نسبة الإشارة إلى التكمية للمبدل التماثلي الرقمي ADC. بينما في حالة المستخدمين المتعددين، يجب أن يزيد عدد البتات التي تُغذى عكسياً خطياً مع دقة المبدل التماثلي الرقمي ADC، للحد من فقدان المعدل عند نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) المرتفعة، حيث أن الخسارة بين حالة القناة المعروفة كلياً لدى المرسل حالة القناة المعروفة المحدودة ناتجة عن التداخل بين المستخدمين. النتائج السابقة في [19] و [20] كانت لقنوات SISO و MISO. بالنسبة لنظم MIMO لمستخدم واحد أو عدة مستخدمين، يمكن أن تطبق عليها النتائج السابقة، ولكن في قناة MIMO توجد عدة إشارات مستقبلية مترابطة مختلفة عن حالة هوائي استقبال واحد [21]. حيث أن هذه التكمية المنخفضة الدقة ستؤثر على هذا الترابط وبالتالي ستطرح تحديات جديدة في تحليلات المعدل / سعة القناة، وتم التحقيق في هذا التأثير في تصميم طريقة التغذية الراجعة المحدودة وتشكيل حزمة الإرسال. وأظهرت النتائج أنه عندما تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج منخفضة (أقل من 0 ديسيبل)، فإن الحد الأقصى الممكن تحقيقه في نظم الهوائيات المتعددة MIMO عندما تكون حالة القناة معروفة بشكل كامل مقارنة مع حالة القناة المعروفة جزئياً من خلال التغذية الراجعة المحدودة تقريباً متماثل، وعند نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) مرتفعة، يكون كلا الحدين الأعلى الأدنى ثابتين / مشبعين، حيث لا يوجد خسارة بسبب التغذية الراجعة المحدودة. كما تبين أن هناك حاجة إلى مزيد من بتات التغذية الراجعة وعندما تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) المتوسطة أكثر من عندما تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) منخفضة وعالية، والتي تختلف تماماً عن الحالة التي يستخدم بها مبدلات تماثلية رقمية ADC التقليدية كاملة /اللانهاية الدقة.

## الفصل الثالث

# التنفيذ العملي

تصميم النظام الهدف في الأطروحة، وتنفيذه عملياً في بيئة عمل MATLAB، مع شرح التوابع والأغراض البرمجية المستخدمة في بناء النظام، موضّح في هذا الفصل.

### 1.3 - مقدمة:

في هذا الفصل يتم التطرق إلى منهجية البحث وتصميم النظام في بيئة ماتلاب MATLAB، ووصف المنهجية التي تم استخدامها خلال البحث لتحقيق أهدافه. ومن ثم وصف إجراءات المحاكاة التي نفذت في بيئة ماتلاب MATLAB للحصول على النظام المستهدف في طري المرسل والمستقبل لنظام الهوائيات المتعددة MIMO. يجري في هذا الفصل استعراض المخططات والكتل والأغراض التي تم استخدامها للمحاكاة في بيئة ماتلاب MATLAB، وتوصيف كل مكون تم استخدامه في كل من المرسل والمستقبل.

تنقسم منهجية البحث إلى أربع مراحل مختلفة مبيّنة في الشكل (5)، وهي على النحو التالي:

#### المرحلة الأولى

تشمل المرحلة الأولى مراجعة الأدبيات السابقة في مجال البحث للحصول على خلفية حول البحث وتقليل الفجوة المعرفية.

#### المرحلة الثانية

في هذه المرحلة تم بناء نظام يعتمد على الهوائيات المتعددة MIMO مع استخدام معدل الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً OSTBC Encoder، بحيث يوفر هذا النظام ثلاث تشكيلات تختلف بعدد الهوائيات، حيث أن عدد الهوائيات في النظام هو اثنين أو ثلاثة أو أربعة هوائيات في طرف المرسل، وهوائيين في طرف الاستقبال، وبالتالي فإن التشكيلات المستخدمة هي  $2 \times 2$  و  $3 \times 2$  و  $4 \times 2$ . إن التشكيلتين  $3 \times 2$  و  $4 \times 2$  لهما معدل ترميز (Code Rate) 0.5 و 0.75 على الترتيب، لكن تم استخدام معدل ترميز يساوي إلى 0.5 نظراً لأن الفرق في الربح بين الحالتين ليس كبيراً.

- 1 الداراسات السابقة والمرجعية
- 2 بناء نظام هوائيات متعددة MIMO في بيئة ماتلاب MATLAB
- 3 إضافة تغذية راجعة للنظام مع قناة Rayleigh ضيقة الحزمة
- 4 تطبيق التغذية الراجعة على قنوات Rayleigh عريضة الحزمة

الشكل (5) مراحل منهجية البحث.

### المرحلة الثالثة

في هذه المرحلة الثالثة، تمت إضافة تقنية OFDM إلى النظام السابق متناسبة مع خرج معدل الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً، وتقدير القناة، وحساب متوسط استطاعة القناة المقدرة في طرف الاستقبال لكل مجموعة محددة من أطر البيانات. ثم إرسال قيمة تكافئ قيمة معلومات حالة القناة إلى المرسل للاستفادة منها في تحديد عدد الهوائيات المستخدمة للإرسال بما يناسب حالة القناة، وذلك ضمن قناة رايلي Rayleigh ضيقة الحزمة.

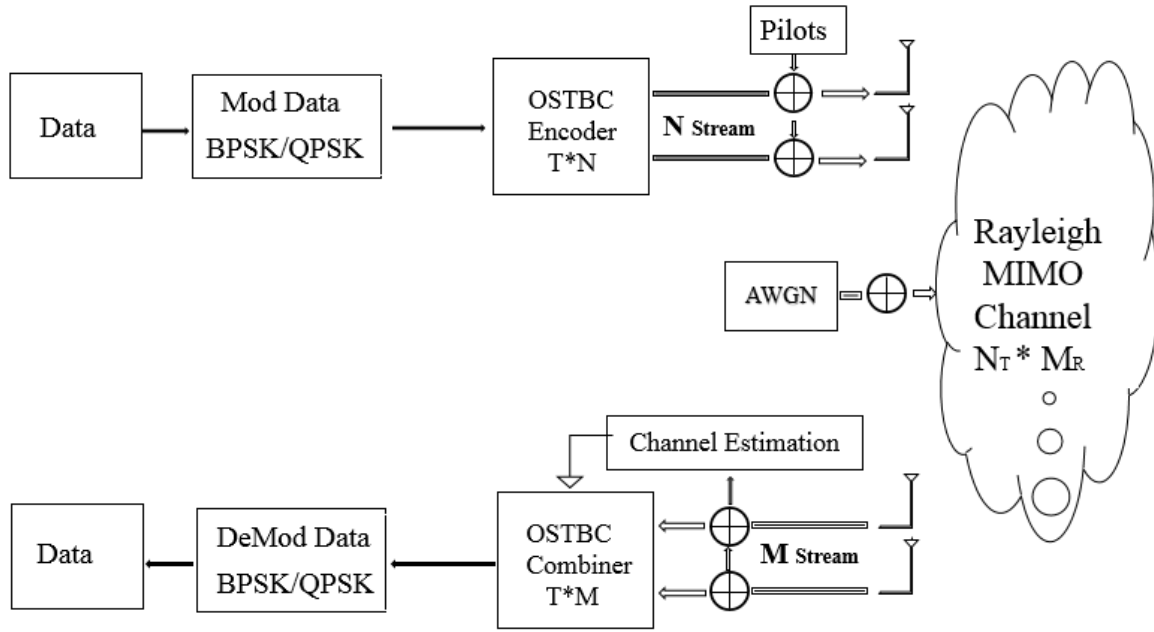
### المرحلة الرابعة

في المرحلة الأخيرة جرى الانتقال إلى قناة رايلي عريضة الحزمة والتي تمثل الهدف من هذا البحث. كما تمت المقارنة بين الخرج في قنوات عريضة الحزمة وأخرى ضيقة الحزمة من جهة، والمقارنة بين الربح الناتج عن التغذية الراجعة من جهة أخرى.

تناول الفصل الثاني الموضوعات المختلفة التي تمت دراستها في الأدبيات السابقة لهذا البحث، وبالتالي يتناول القسم التالي توصيف المحاكاة بمزيد من التفصيل.

## 2.3- تصميم نظام الهوائيات المتعددة MIMO

إن المخطط الصندوقي الموضح في الشكل (6) يوضح النظام الذي تم تصميمه، فهذا النظام هو نظام هوائيات متعددة MIMO قابل لإعادة التشكل وفق ثلاث تشكيلات هي  $2 \times 2$  و  $3 \times 2$  و  $4 \times 2$ . وذلك بهدف جعله مناسباً للتغيير بناءً على قيمة التغذية الراجعة المحدودة في المرحلة التالية.



الشكل (6) المخطط الصندوقي لنظام هوائيات متعددة MIMO.

يتضمن المخطط الصندوقي في الشكل (6) مجموعة من الاغراض Objects والتوابع Functions في بيئة ماتلاب MATLAB وهي:

### 1.2.3- المرسل

**1.1.2.3- البيانات:** تم توليد البيانات باستخدام تابع العشوائية Randi بحيث تتناسب مع التعديل المستخدم.

**2.1.2.3- تعديل البيانات QPSK:** يعدل المعدل QPSK Modulator الإشارة باستخدام طريقة الأقفال بإزاحة الطور

التربيعي. إن الخرج هو تمثيل المجال الأساسي للإشارة. ويقبل إشارة دخل على شكل عمود. يجب أن يكون الدخل إشارة ذات قيمة غير مستمرة/ مقطعة من 0 إلى 3.

**3.1.2.3- معدل الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً OSTBC Encoder:** يقوم معدل الرموز OSTBC Encoder

بترميز خرج معدل البيانات (BPSK أو QPSK) باستخدام إما ترميز Alamouti لهوائي إرسال أو رموز أخرى متعامدة عقدية لاثنين أو ثلاثة أو أربعة هوائيات إرسال. يتم إدخال عدد هوائيات الإرسال إلى هذه الكتلة كدخل. خرج هذه الغرض (Object) هو مصفوفة متغيرة الحجم ( $N_t \times T$ )، حيث يتوافق عدد الأعمدة ( $N_t$ ) مع عدد هوائيات الإرسال ويتوافق عدد الأسطر ( $T$ ) مع عدد عينات الرموز المتعامدة المرسل عبر كل هوائي إرسال في الإطار. يستخدم الغرض البرمجي comm.OSTBCEncoder لتطبيق خوارزمية الترميز لهوائيات الإرسال المحددة. يقبل هذا الغرض البرمجي المعاملات التالية .

$N$ : عدد هوائيات الإرسال، يمكن أن يكون اثنين أو ثلاثة أو أربعة هوائيات.

$R$ : معدل الترميز (Code Rate). يجب أن يكون معدل الترميز يساوي الواحد عندما  $N = 2$ ، بالنسبة إلى  $N = 3$  أو 4، يمكن أن

يكون معدل الترميز يساوي إلى 0.75 أو 0.5.

T: طول المجال الزمني، يجب أن يكون مضاعفاً لعدد الرموز في كل مصفوفة. على وجه التحديد ، بالنسبة إلى  $N = 2$  أو  $R = 1/2$  ، يجب أن تكون T مضاعف 2 وعندما يكون  $R = 3/4$  ، يجب أن تكون T مضاعفة 3.

يدعم المرمز OSTBC Encoder خمس خوارزميات ترميز OSTBC مختلفة، هذه الخوارزميات مبيّنة في الجدول (1). بناءً على اختيار قيم الدخل لكل من معدل الترميز وعدد هوائيات الإرسال.

Transmit Antenna	Rate	OSTBC Codeword Matrix
2	1	$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix}$
3	0,5	$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & 0 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 \\ 0 & 0 & s_1 \\ 0 & 0 & -s_2^* \end{pmatrix}$
3	0,75	$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 \\ s_3^* & 0 & -s_1^* \\ 0 & s_3^* & -s_2^* \end{pmatrix}$
4	0,5	$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & 0 & 0 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_1 & s_2 \\ 0 & 0 & -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix}$
4	0,75	$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & 0 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 & s_3 \\ s_3^* & 0 & -s_1^* & s_2 \\ 0 & s_3^* & -s_2^* & -s_1 \end{pmatrix}$

الجدول (1) خوارزميات معدل الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً.

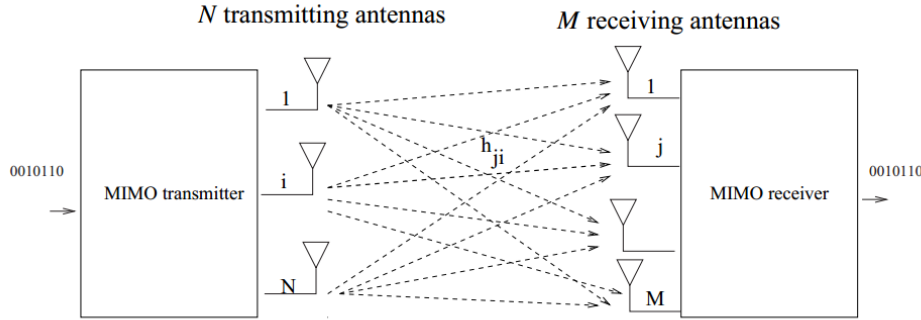
**4.1.2.3- رموز التدريب/ الإشارات المرجعية (Pilots):** لتسهيل تقدير خصائص القناة، يتم إدراج رموز التدريب/ الإشارات المرجعية ضمن كل إطار معلومات في جانب المرسل. تساعد هذه الرموز/ الإشارات المستقبل على تقدير القناة.

### 2.2.3- خواص قناة الاتصال

**1.2.2.3- قناة الاتصال:** إن قناة الاتصال التي تم الاعتماد عليها في المحاكاة هي قناة رايلي Rayleigh بمسار واحد تناسب مع عدد هوائيات الإرسال والاستقبال. الجدير بالذكر هنا أنه تم استخدام الغرض المتوفر في MATLAB المعبر عن قنوات الهوائيات المتعددة



MIMO مع بعض التعديل على خرجها. نظراً لأنه يولد قناة مقيسة وثابتة، ولا يمكن تغيير ربح كل قناة من القنوات الجزئية بين كل هوائيين في طرفي الإرسال والاستقبال  $H_{ji}$ ، كما يوضح الشكل (7). لكن المحاكاة تتطلب قنوات جزئية متغيرة الربح للحصول على قيم مختلفة للقناة وخواص احصائية مختلفة كذلك.



الشكل (7) قناة الاتصال للهوائيات المتعددة MIMO.

خصائص قناة الهوائيات المتعددة MIMO :

- أ- معدل الاعتيان (Sample Rate): هو معدل إشارة الدخل بالهرتز، القيمة الافتراضية لهذا المعامل هي 1 Hz.
- ب- تأخير المسارات (Path Delays): هو تأخيرات المسارات المنفصلة بالتواني كمتجه أو قيمة حقيقية أو عددية، القيمة الافتراضية لهذه الخاصية هي 0. عندما يتم أسناد قيم سلمية لهذا المعامل تكون القناة ذات خفوت مسطح/ غير انتقائي للتردد، بينما تكون القناة انتقائية للتردد عندما يسند لهذا المعامل متجه من القيم.
- ت- ربح المسارات الوسطي (Average Path Gains): يحدد هذا المعامل متوسط ربح المسارات المنفصلة بالديسيبل كمتجه أو عدد حقيقي. القيمة الافتراضية لهذا المتغير هي 0. يجب أن يكون (Gains Path Average) بنفس حجم (Path Delay).
- ث- عدد هوائيات الإرسال (NumTransmitAntennas): يحدد هذا المعامل عدد هوائيات الإرسال تتراوح قيمته بين 1 و 8. القيمة الافتراضية لهذا المتغير هي 2.
- ج- عدد هوائيات الاستقبال (NumReceiveAntennas): يحدد هذا المعامل عدد هوائيات الاستقبال تتراوح قيمته بين 1 و 8. القيمة الافتراضية لهذا المتغير هي 2.
- ح- توزيع الخفوت (Fading Disteribution): يحدد هذا المعامل توزيع خفوت القناة. القيمة الافتراضية له هي توزيع رايلي (Rayleigh).
- خ- مركبة خط النظر/ معامل K (KFactor): يحدد هذا المتغير خفوت ريسان Rician للقناة. تنطبق هذه الخاصية عند تعيين خاصية Fading Distribution إلى Rician. القيمة الافتراضية لهذه الخاصية هي 3.

**2.2.2.3- قناة الضجيج الأبيض الغاوسي AWGN:** تضيف قناة AWGN ضجيج غاوسي أبيض إلى إشارة الدخل الحقيقية أو العقدية. عندما تكون إشارة الدخل حقيقية، تضيف هذه القناة ضجيج غاوسي أبيض حقيقي وتنتج إشارة خرج حقيقية. عندما تكون إشارة الدخل عقدية، تضيف هذه القناة ضجيج غاوسي أبيض عقدي وتنتج إشارة خرج عقدية. تقبل هذه القناة إشارة دخل ذات قيمة سلمية أو شعاعية أو مصفوفة.

### 3.2.3- المستقبل

**1.3.2.3- تقدير القناة (Channel Estimation):** يتم تقدير القناة من خلال خوارزمية الأرجحية الأعظمية (Maximum Likelihood) عن طريق رموز التدريب/ الإشارات المرجعية (Pilots) التي تم إدراجها ضمن أطر البيانات في المرسل. حيث يجب أن تكون القناة المقدرة متوفرة لدى مفكك الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً.

**2.3.2.3- مجمع الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً (OSTBC Combiner):** يجمع هذا الغرض OSTBC Combiner بين إشارات الدخل من جميع هوائيات الاستقبال وإشارة تقدير القناة لاستخراج المعلومات المرمزة بواسطة OSTBC Encoder. لا يلزم أن يكون تقدير قناة الإدخال ثابتاً ويمكن أن يختلف في كل في كل استدعاء لهذا الغرض.

يدعم مجمع الرموز OSTBC Combiner خمس خوارزميات فك ترميز OSTBC مختلفة. بناءً على اختيار المعدل وعدد هوائيات الإرسال والاستقبال، وتنفذ إحدى الخوارزميات في الجدول (2) حسب قيم الدخل.

Transmit Antenna	Rate	OSTBC Codeword Matrix
2	1	$\begin{pmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\ H\ ^2} \sum_{j=1}^M \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j} r_{2,j}^* \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j} r_{2,j}^* \end{pmatrix}$
3	0,5	$\begin{pmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\ H\ ^2} \sum_{j=1}^M \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j} r_{2,j}^* + h_{3,j}^* r_{3,j} \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j} r_{2,j}^* - h_{3,j} r_{4,j}^* \end{pmatrix}$
3	0,75	$\begin{pmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \\ \hat{S}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\ H\ ^2} \sum_{j=1}^M \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j} r_{2,j}^* - h_{3,j} r_{3,j}^* \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j} r_{2,j}^* - h_{3,j} r_{4,j}^* \\ h_{3,j}^* r_{1,j} + h_{1,j} r_{3,j}^* + h_{2,j} r_{4,j}^* \end{pmatrix}$
4	0,5	$\begin{pmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\ H\ ^2} \sum_{j=1}^M \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j} r_{2,j}^* + h_{3,j}^* r_{3,j} + h_{4,j} r_{4,j}^* \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j} r_{2,j}^* + h_{4,j}^* r_{3,j} - h_{3,j} r_{4,j}^* \end{pmatrix}$
4	0,75	$\begin{pmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \\ \hat{S}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\ H\ ^2} \sum_{j=1}^M \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j} r_{2,j}^* - h_{3,j} r_{3,j}^* - h_{4,j} r_{4,j}^* \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j} r_{2,j}^* + h_{4,j}^* r_{3,j} - h_{3,j} r_{4,j}^* \\ h_{3,j}^* r_{1,j} + h_{4,j} r_{2,j}^* + h_{1,j} r_{3,j}^* + h_{2,j} r_{4,j}^* \end{pmatrix}$

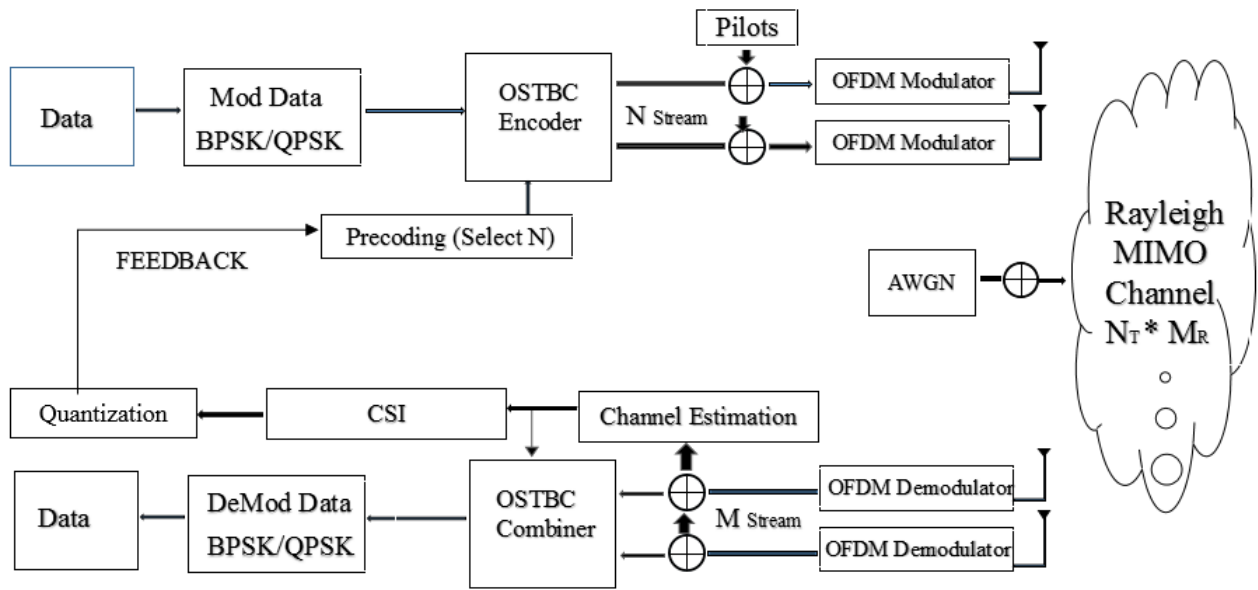
الجدول (2) مجمع الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً OSTBC.

**3.3.2.3- مفكك تعديل البيانات QPSK Demodulator:** يقوم مفكك التعديل QPSK Demodulator بفك الإشارة المعدلة بطريقة إزاحة الطور التريبيعي في المرسل QPSK. إشارة الخرج هي إشارة عقدية بالمجال القاعدي، لذلك يجب أن تكون إشارة الدخل إشارة عقدية.

**4.3.2.3- معدل الأخطاء في البيانات Bit Error Rate (BER):** معدل الخطأ في البتات BER، هي أداة أساسية تُستخدم في تقييم النظم التي تنقل البيانات الرقمية من المرسل إلى المستقبل. يتم تعريف معدل الخطأ في البتات (BER) على أنه المعدل الذي تحدث به الأخطاء في نظام الإرسال. إذا كان وسط الإرسال بين المرسل والمستقبل جيداً وكانت نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR عالية، سيكون معدل الخطأ في البتات صغيراً جداً، ربما يكون ضئيلاً ولا يكون له أي تأثير ملحوظ على النظام الكلي. رياضياً، يتم تعريف BER على أنها نسبة عدد الأخطاء التي تحدث في البتات المستقبلية إلى إجمالي عدد البتات المرسل.

### 3.3- تصميم نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة ضيقة الحزمة

في المرحلة الثالثة تم إضافة تعديل OFDM إلى المرحلة السابقة، ثم إضافة التغذية الراجعة واختبارها على النظام في حالة قناة رايلي (Rayleigh) ضيقة الحزمة (Narrow Band) لتصبح وفق المخطط في الشكل (8).



الشكل (8) المخطط الصندوقي لنظام MIMO-OFDM بقناة رايلي.

إضافة إلى الأغراض البرمجية المستخدمة في المرحلة الأولى أضيفت مجموعة أغراض برمجية أخرى هي:

### 1.3.3- المرسل .

**1.1.3.3- معدل التجميع باقتسام الترددات المتعامدة (OFDM Modulator):** يتم في هذا المعدل تمثيل الإشارات في المجال القاعدي باستخدام الاقتسام الترددي المتعامد وفق متغيرات دخل هي:

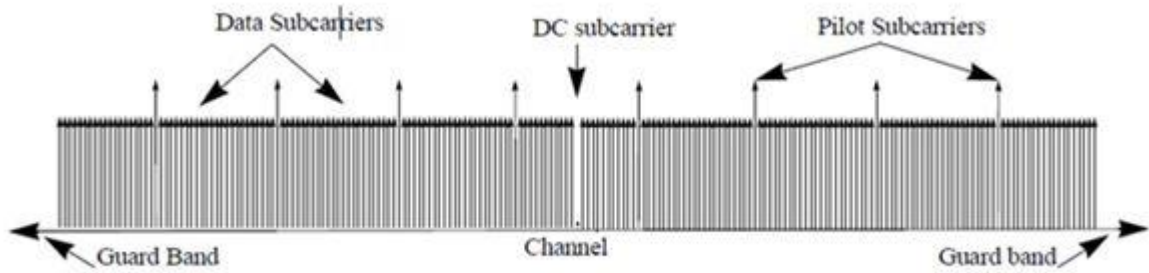
أ- عدد نقاط تحويل فورييه السريع (FFT Length): يمثل هذا المعامل عدد الحوامل الجزئية المستخدمة، وهو عدد صحيح من 8 إلى 2048. إن القيمة الافتراضية لهذا المتغير هي 64.

ب- عدد حوامل الحماية الجزئية (NumGuardBandCarriers): هو عدد الحوامل الجزئية الموزعة على طرفي المجال الترددي الأيسر والأيمن. يحدد عدد الحوامل الجزئية اليمنى واليسرى كأعداد صحيحة غير سالبة في  $[0, NFFT/2-1]$ . القيم الافتراضية هي [6 و 5].

ت- حامل المركبة المستمرة (InsertDCNull): هذا هو معامل منطقي يتحكم فيما إذا كان يتم إدخال المركبة المستمرة فارغة. القيمة الافتراضية هي خطأ. الحامل الفرعي DC هو مركز المجال الترددي وله دليل قيمته  $(NFFT/2 + 1)$ .

ث- عدد الإشارات المرجعية/ رموز التدريب ضمن الحوامل الجزئية (PilotCarrierIndices): يمكنك تحديد الحوامل الجزئية التي تحمل الإشارات المرجعية، بحيث تكون هذه الإشارات المرجعية ضمن المجال الممتد من مجال الحماية الأيمن والأيسر ولا تشمل المركبة والمستمرة.

يوضح الشكل (9) عدد من معاملات معدل التجميع باقتسام الترددات المتعامدة OFDM.



الشكل (9) معاملات التجميع باقتسام الترددات المتعامدة OFDM.

ج- طول البادئة الدوارة (CyclicPrefixLength): يحدد هذا المعامل طول البادئة طول البادئة الدوارة لرموز OFDM. إذا تم

أسناد عدد لهذا المتغير، فسيكون طول البادئة هو نفسه بالنسبة لجميع الرموز عبر جميع الهوائيات. القيمة الافتراضية هي 16.

ح- عدد الرموز (NumSymbols): يحدد هذا المعامل عدد الرموز. يجب أن يكون NumSymbols عدداً صحيحاً موجباً، القيمة الافتراضية هي 1.

خ- عدد هوائيات الإرسال (NumTransmitAntennnas): يحدد هذا المعامل عدد هوائيات الإرسال، المستخدمة لإرسال إشارة OFDM. القيمة الافتراضية هي 1.

### 2.3.3-المستقبل

#### 1.2.3.3- مفكك تعديل التجميع باقتسام الترددات المتعامدة (OFDM Demodulator): يتم في مفكك

التعديل إعادة تمثيل الاشارات المستقبلية من هوائيات الاستقبال إلى المجال الأساسي بعد فك التعديل من الترددات المتعامدة وفق متغيرات دخل هي:

أ- عدد نقاط تحويل فورييه السريع (FFT Length): يعبر هذا المعامل عن عدد الحوامل الجزئية المستخدمة، وهو عدد صحيح من 8 إلى 2048. إن القيمة الافتراضية لهذا المتغير هي 64.

ب- عدد حوامل الحماية الجزئية (NumGuardBandCarriers): هو عدد الحوامل الجزئية الموزعة على طرفي المجال الترددي الأيسر والأيمن. يحدد عدد الحوامل الجزئية اليمنى واليسرى كأعداد صحيحة غير سالبة في  $[0, NFFT/2-1]$ . القيم الافتراضية هي [5، 6].

ت- حامل المركبة المستمرة (InsertDCNull): يحدد هذا المعامل المنطقي فيما إذا كان يتم إدخال المركبة المستمرة فارغة. القيمة الافتراضية هي خطأ. الحامل الفرعي DC هو مركز نطاق التردد وله قيمة الفهرس  $(NFFT/2 + 1)$ .

ث- عدد الإشارات المرجعية التي يتم إدراجها ضمن الحوامل الجزئية (PilotCarrierIndices): يمكنك تحديد الحوامل الجزئية التي تحمل الإشارات المرجعية. بحيث تكون هذه الإشارات المرجعية ضمن المجال الممتد من مجال الحماية الأيمن والأيسر ولا تشمل المركبة والمستمرة.

ج- طول البادئة الدوارة (CyclicPrefixLength): يحدد هذا المعامل طول البادئة طول البادئة الدوارة لرموز OFDM. إذا تم أسناد عدد لهذا المعامل، فسيكون طول البادئة هو نفسه بالنسبة لجميع الرموز عبر جميع الهوائيات. القيمة الافتراضية هي 16.

ح- عدد الرموز (NumSymbols): يحدد هذا المعامل عدد الرموز. يجب أن يكون عدداً صحيحاً موجباً. القيمة الافتراضية هي 1.

خ- عدد هوائيات الاستقبال (NumReceiveAntennnas): يحدد هذا المعامل عدد هوائيات الاستقبال، المستخدمة لاستقبال إشارة OFDM. القيمة الافتراضية هي 1.

**2.2.3.3- التغذية الراجعة (Feedback):** إن التغذية الراجعة في طرف الاستقبال تمت من خلال إسناد خرج تقدير القناة إلى مصفوفة جديدة وحساب معلومات حالة القناة منها لمجموعة من الأطر. من خلال المقارنة بين معدل الأخطاء ومعلومات حالة القناة يتم تعديل عدد هوائيات الإرسال بعد القيام بتكمية هذه المعلومات بناءً على مقارنتها مع معدل الخطأ. يتم اختيار عدد هوائيات الإرسال بما يناسب معدل الأخطاء. وذلك ضمن قنوات رايلي ضيقة الحزمة.

## 4.3- تصميم نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة عريضة

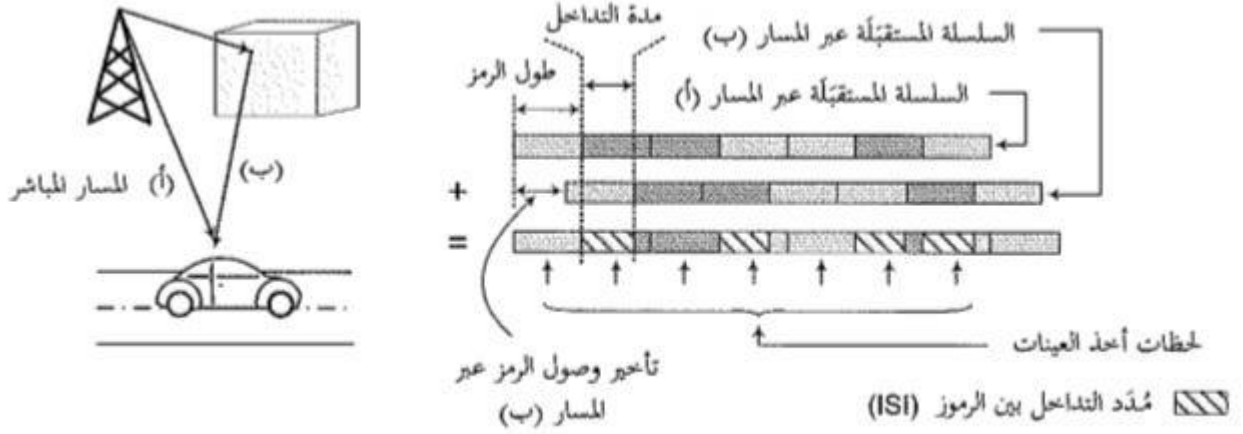
### الحزمة

في هذه المرحلة تم تعديل قناة الهوائيات المتعددة MIMO لتصبح عريضة الحزمة، بزيادة عدد المسارات بدلاً من مسار واحد، حيث يصبح تداخل الرموز مشكلة حقيقية، مما يساهم في زيادة معدل الأخطاء الذي ينعكس سلباً على أداء النظام، فكل مسار من المسارات المتعددة له تأخير زمني خاص به وربح خاص بالمسار الذي اتبعه.

### 1.4.3- القناة عريضة الحزمة (Wideband Channel):

إن قناة الاتصال تتميز بالمسارات المتعددة التي تنتج من البيئة المحيطة. إن أهم ما يميز هذه المسارات هو التأخير الزمني والربح لكل مسار. في القنوات ضيقة الحزمة تكون هذه المسارات، ذات

تأخير زمني صغير جداً مقارنة بزمن الرمز، وبالتالي يمكن اعتبارها مسار واحد وتصل للمستقبل مع تأثير قليل جداً يمكن معالجته أو أهمله. بينما عندما تكون هذه المسارات ذات تأخير زمني لا يمكن أهمله تشكل هذه المسارات تداخل إضافي يساهم في زيادة معدل الخطأ وهذا الخطأ ناتج عن تداخل الرموز مع بعضها البعض. يوضح الشكل (10) مشكلة تداخل الرموز الناتج عن المسارات المتعددة.



الشكل (10) المسارات المتعددة وتداخل الرموز.

### 5.3- النموذج الرياضي

إن مُجمّع الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً OSTBC Combiner يعتمد على إحدى الخوارزميات في المعادلة (1)، وذلك حسب عدد هوائيات الإرسال والاستقبال. إن المعادلة (1) تبين الخوارزميات المستخدمة عدد الهوائيات: هوائي واحد وثلاثة وأربعة هوائيات على التوالي، وذلك عند معدل الترميز 0.5. وفق قيم محددة لحالة القناة.

$$\begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \end{pmatrix} = \\ \frac{1}{\|H\|^2} \sum_{j=1}^M \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j} r_{2,j}^* \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j} r_{2,j}^* \end{pmatrix} & a > \sigma \\ \frac{1}{\|H\|^2} \sum_{j=1}^M \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j} r_{2,j}^* + h_{3,j}^* r_{3,j} \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j} r_{2,j}^* - h_{3,j} r_{4,j}^* \end{pmatrix} & a \leq \sigma \leq b \\ \frac{1}{\|H\|^2} \sum_{j=1}^M \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j} r_{2,j}^* + h_{3,j}^* r_{3,j} + h_{4,j} r_{4,j}^* \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j} r_{2,j}^* - h_{4,j}^* r_{3,j} - h_{3,j} r_{4,j}^* \end{pmatrix} & \sigma > b \end{pmatrix} \quad (1)$$

حيث :

$M$ : عدد هوائيات الاستقبال.

$N$ : عدد هوائيات الإرسال.

$\hat{S}_K$ : الرمز المقدر ذو الدليل  $k$ .

$r_{i,j}$ : الرمز ذو الدليل  $i$  عند هوائي الاستقبال ذو الدليل  $j$ ,  $1 \leq i \leq N$ ,  $1 \leq j \leq M$ .

$h_{i,j}$ : القناة المقطرة من هوائي الإرسال ذو الدليل  $i$  إلى هوائي الاستقبال ذو الدليل  $j$ .

$\|h\|^2$ : مجموع استطاعة القنوات الجزئية.

$a, b$ : ثابت يتحدد حسب حالة القناة.

إن نسبة الإشارة إلى الضجيج اللحظية تعطى بالعلاقة:

$$\gamma_s = \frac{Es}{NRNo} \|H\|^2 \quad (2)$$

ويعطى متوسط نسبة الإشارة إلى الضجيج لكل قناة فرعية بالعلاقة:

$$\bar{\gamma}_{channel} = \frac{Es}{NRNo} E[\|H\|^2] = \frac{Es}{NRNo} \beta_{ij} \quad , \quad \beta_{ij} = E[\|H\|^2] \quad (3)$$

وفي حال كانت جميع القنوات الفرعية متماثلة  $\beta_{ij} = \beta$ ، نجد أن متوسط نسبة الإشارة إلى الضجيج لكامل النظام يعطى على الشكل:

$$\bar{\gamma}_{OSTBC} = \frac{MES}{NRNo} \beta = \frac{N}{R} \bar{\gamma}_{SISO} \beta = \frac{N}{R} \bar{\gamma} \quad (4)$$

عند استخدام التعديل التريبيعي بإزحة الطور "QPSK"، وبما أن كلمة الرمز الواحدة ستحتوي على خانتين، يعطى وزن هامنج للرموز الأربعة "الذي يعرف بعدد الخانات التي تحتوي قيمة واحد منطقي" بالجدول التالي:

وزن هامينغ	كلمة الرمز	رقم كلمة الرمز
0	00	1
1	01	2
2	11	3
1	10	4

الجدول (3) وزن هامنج لكلمات الترميز QPSK.

وبالتالي يمكن أن تكتب علاقة الخطأ في نظام الهوائيات المتعددة MIMO ضمن قناة رايلي Rayleigh عند اعتماد تسلسل Gray لرموز QPSK إنطلاقاً من العلاقة (9-15) في [27] على الشكل:

$$P_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{3\pi}{4}} \prod_{i=1}^L M_{\gamma_i} \left( \frac{-1}{2(\sin(\theta))^2} \right) d\theta - \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \prod_{i=1}^L M_{\gamma_i} \left( \frac{-1}{2(\sin(\theta))^2} \right) d\theta \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \prod_{i=1}^L M_{\gamma_i} \left( \frac{-1}{2(\sin(\theta))^2} \right) d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{4}}^0 \prod_{i=1}^L M_{\gamma_i} \left( \frac{-1}{2(\sin(\theta))^2} \right) d\theta \quad (6)$$

$$M_{\gamma(s)} = \frac{1}{1-s\bar{\gamma}} \quad (7)$$

حيث:

$$L = M.N$$

$\gamma_i$ : قيمة نسبة استطاعة الرمز إلى كثافة الضجيج لقناة فرعية. ويعطي الوسطي  $\bar{\gamma}_i$  أنطلاقاً من العلاقة (2):

$$\bar{\gamma}_i = \frac{\beta_i Es}{NRNo} = \frac{\beta_i \gamma_{SISO}}{NR} \quad (8)$$

وفي حالة جميع القنوات الفرعية متماثلة ومستقلة يكون لدينا  $\beta_i = \beta$  من أجل كل قيمة ل*i*:

$$\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_c = \frac{\beta \gamma_{SISO}}{NR} \quad (9)$$

وبالتالي يكون لدينا:

$$P_b = \frac{1}{2} [2P_1 + P_2] \quad (10)$$

$$P_1 = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} \prod_{i=1}^L M_{\gamma_i} \left( \frac{-1}{2(\sin(\theta))^2} \right) d\theta \quad (11)$$

$$P_2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} \prod_{i=1}^L M_{\gamma_i} \left( \frac{-1}{2(\sin(\theta))^2} \right) d\theta \quad (12)$$

وبالتالي:

$$P_b = \frac{1}{4\pi} \left\{ \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} \prod_{i=1}^L M_{\gamma_i} \left( \frac{-1}{2(\sin(\theta))^2} \right) d\theta + (-\pi 4\pi 4i) \right\} d\theta \quad (13)$$

$$P_b = LM\gamma_i - 12 \sin^2 \theta d\theta \quad (14)$$

$$P_b = \frac{1}{4\pi} \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} f(\theta) d\theta + \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} f(\theta) d\theta \quad (15)$$



$$f(\theta) = \prod_{i=1}^L M_{\gamma_i} \left( \frac{-1}{2(\sin(\theta))^2} \right) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} f(\theta) &= \left( \frac{1}{1 + \frac{\bar{\gamma}_i}{2(\sin(\theta))^2}} \right)^L = \left( \frac{2(\sin(\theta))^2}{2(\sin(\theta))^2 + \bar{\gamma}_i} \right)^L \\ &= \left( \frac{2(\sin(\theta))^2}{2(\sin(\theta))^2 + \frac{\bar{\gamma}}{NR}} \right)^L = \left( \frac{2NR(\sin(\theta))^2}{2NR(\sin(\theta))^2 + \bar{\gamma}} \right)^L \end{aligned} \quad (17)$$

وبالاعتماد على المعادلة (17) والجدول (1) والتشكيلات المعتمدة في الدراسة وهي  $2 \times 2$  و  $3 \times 2$  و  $4 \times 2$  يكون احتمال الخطأ.

$$P_b = \left( \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi/4}^{3\pi/4} \left( \frac{4(\sin(\theta))^2}{4(\sin(\theta))^2 + \bar{\gamma}} \right)^4 d\theta + \int_{\pi/4}^{3\pi/4} \left( \frac{4(\sin(\theta))^2}{4(\sin(\theta))^2 + \bar{\gamma}} \right)^4 d\theta \quad ; a > \sigma \\ \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi/4}^{3\pi/4} \left( \frac{3(\sin(\theta))^2}{3(\sin(\theta))^2 + \bar{\gamma}} \right)^6 d\theta + \int_{\pi/4}^{3\pi/4} \left( \frac{3(\sin(\theta))^2}{3(\sin(\theta))^2 + \bar{\gamma}} \right)^6 d\theta \quad ; a \leq \sigma \leq b \\ \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi/4}^{3\pi/4} \left( \frac{4(\sin(\theta))^2}{4(\sin(\theta))^2 + \bar{\gamma}} \right)^8 d\theta + \int_{\pi/4}^{3\pi/4} \left( \frac{4(\sin(\theta))^2}{4(\sin(\theta))^2 + \bar{\gamma}} \right)^8 d\theta \quad ; b < \sigma \end{array} \right) \quad (18)$$

من المعادلة (19) يتبين أنه معدل الخطأ يتناسب عكساً مع ربح التنوع (Diversity Gain)، الذي يتناسب طردياً مع زيادة عدد الهوائيات

في التشكيلات المستخدمة ضمن الدراسة وهي  $2 \times 2$  و  $3 \times 2$  و  $4 \times 2$ .

## الفصل الرابع

# نتائج دراسة وتحليل النظام

نتائج دراسة النظام المصمّم وتحليله في بيئة عمل MATLAB ومناقشة أهم النتائج، وبيان تحقيق الهدف من البحث، مبنية في هذا الفصل.

## 1.4 - مقدمة

يتضمن هذا الفصل استعراض ومناقشة نتائج دراسة النظام المصمّم وتحليله في بيئة عمل MATLAB في جميع المراحل التي تم التطرق إليها في الفصل الثالث، بدلالة معدل الأخطاء (BER) ونسبة طاقة الرمز إلى طاقة الضجيج ( $E_s/N_0$ )، وذلك بناء نظام هوائيات متعددة MIMO ثم اختباره على النحو الآتي:

عند مجالات مختلفة من القيم،

وفق تعديلات مختلفة لتبين مدى صحة التنفيذ،

إضافة معدل رموز متعامدة زمنياً ومكانياً ومفكك ترميز الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً في طريقي الإرسال والاستقبال على التوالي.

في الخطوة اللاحقة تم اختبار النظام عند استخدام هوائيين وثلاثة وأربعة هوائيات. تُبين النتائج الريح والخسارة الناتجة في كل حالة، حيث أنه لكل حالة من الحالات معدل إرسال مختلف يتناسب مع معدل الخطأ المسموح. لكن عند زيادة معدل الخطأ يتم التوجه لإنقاص معدل الإرسال للحصول على نسخ أكثر من الإشارة لكن على حساب سرعة الإرسال.

يمثل تقدير القناة في طرف الاستقبال مرحلة أساسية لمفكك الرموز المتعامدة زمنياً ومكانياً وفق ما بينته معادلات Alamouti لكشف الرموز المستقبلية [7]. تسمح القناة المقدره باستخلاص معلومات حالة القناة الموافقة لمجموعة من أطر البيانات، ثم بعد ذلك إرسال هذه المعلومات إلى طرف الاستقبال للاستفادة منها في تغيير عدد هوائيات الإرسال بما يناسب معدل الأخطاء. كل ذلك ضمن قنوات رايلي Rayleigh ضيقة الحزمة. في المرحلة الأخيرة تم تعديل القناة لتناسب قناة رايلي Rayleigh عريضة الحزمة مع عرض ومناقشة النتائج. في تنمة الفصل سوف يتم عرض ومناقشة كل مرحلة من المراحل، وتبيان المخططات التدفقية لكل مرحلة مع المعاملات التي تم استخدامها في كل مرحلة.

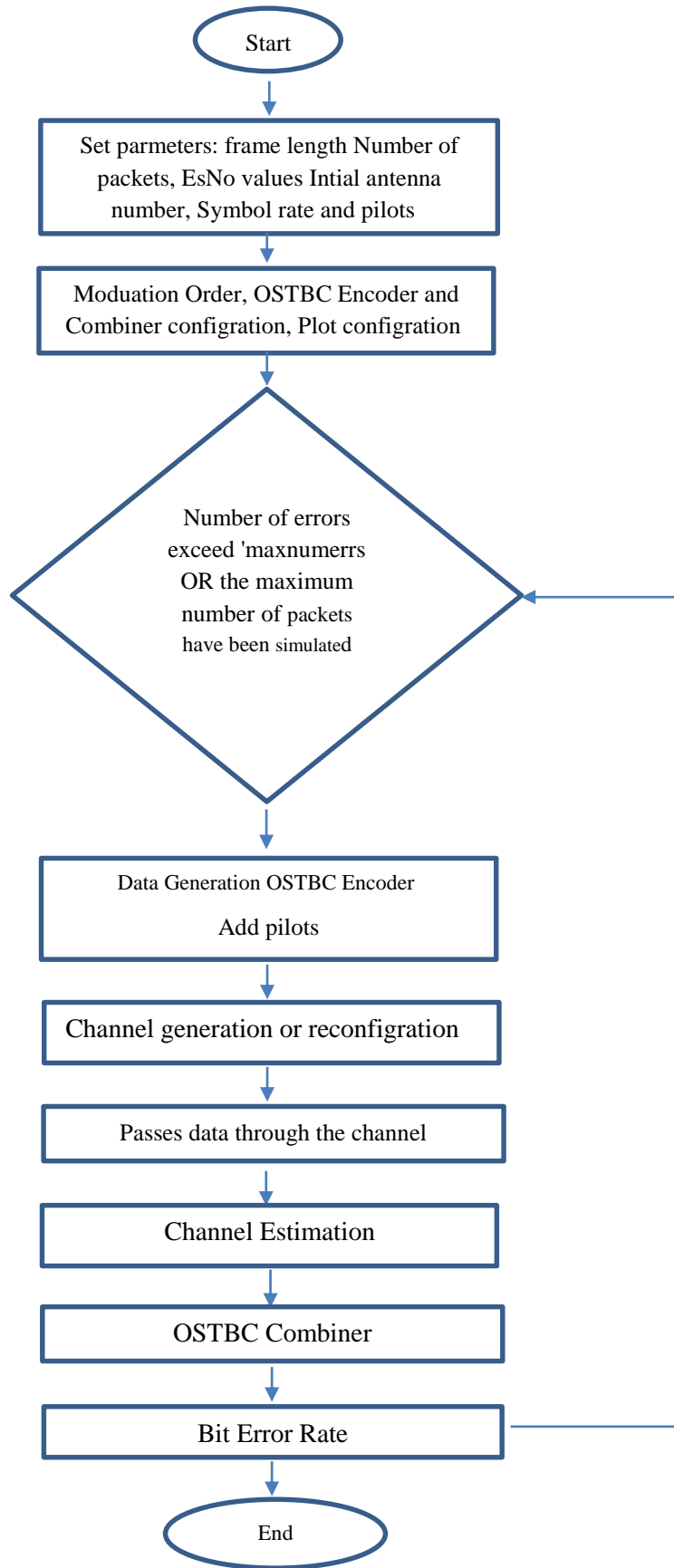
## 2.4- نتائج محاكاة نظام الهوائيات المتعددة MIMO

تم في هذه المرحلة بناء نظام هوائيات متعددة MIMO مع عدد متغير من الهوائيات، وفقاً لثلاث تشكيلات هي  $2 \times 2$  و  $3 \times 2$  و  $4 \times 2$ ، مع اعتماد قناة اتصال تتبع توزيع رايلي الإحصائي Rayleigh وذلك وفق المخطط التدفقي المبين في الشكل (11). بالنسبة لعملية المحاكاة، جرى تحديد معاملات مختلفة كما هو موضح في الجدول (4). وقد تم اختيار هذه المعاملات لأنها طريقة شائعة لتقييم أداء النظام المحدد من خلال العلاقة بين معدل الخطأ ونسبة طاقة الرمز إلى طاقة الضجيج (BER vs Es/ No). كما تم تعيين القيم الأكثر شيوعاً لهذه المعاملات لجعل عملية المحاكاة أسهل وأكثر بساطة بحيث يمكن تعيين متغيرات أكثر تعقيداً في وقت لاحق للتحقق من تقييم الأداء.

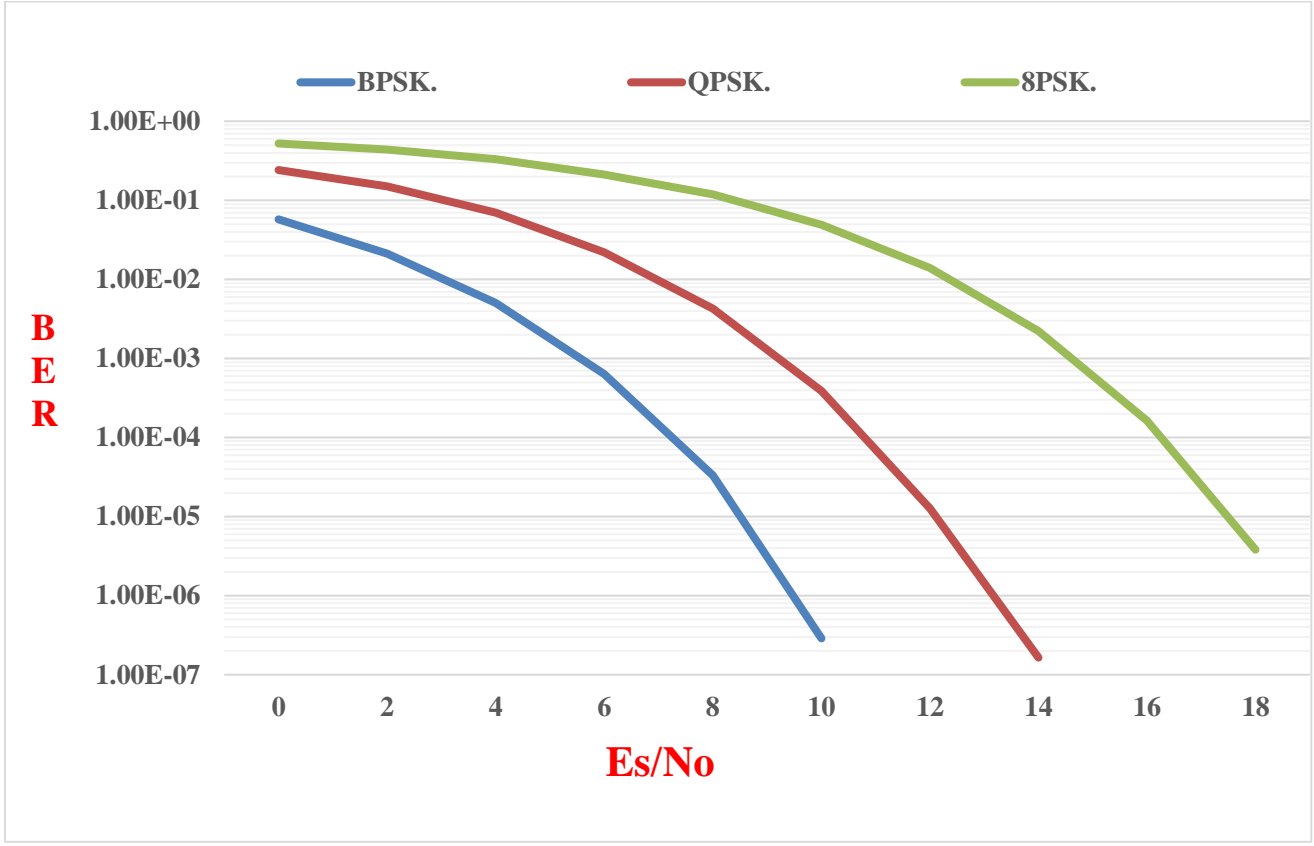
Parameter name	Value
frame Length	2028
Es/No	0:02:20
maxNumPackets	10000
maxNumErrs	30000
number of Tx antennas	2
number of Rx antennas	2
modulation order	BPSK,QPSK, 8PSK

في الجدول (4) معاملات تقييم أداء النظام.

تم في هذه المرحلة تغيير رتبة التعديل بين BPSK و QPSK و 8PSK عند استخدام هوائيين اثنين في طرفي الإرسال والاستقبال، وذلك بهدف اختبار النظام الذي تم تصميمه . وقد بينت النتائج في الشكل (12) أنه برفع رتبة التعديل يزداد معدل الأخطاء عند نفس القيمة لطاقة الرموز إلى طاقة الضجيج (Es/No)، وهذه الزيادة ناتجة عن انخفاض طاقة البت نتيجة لجمع عدة بتات في رمز واحد وبالتالي فإن الطاقة المخصصة للبت تم تقسيمها على عدد البتات التي تتناسب مع رتبة التعديل ضمن نفس الرمز.



الشكل (11) المخطط التدفقي لنظام الهوائيات المتعددة MIMO.

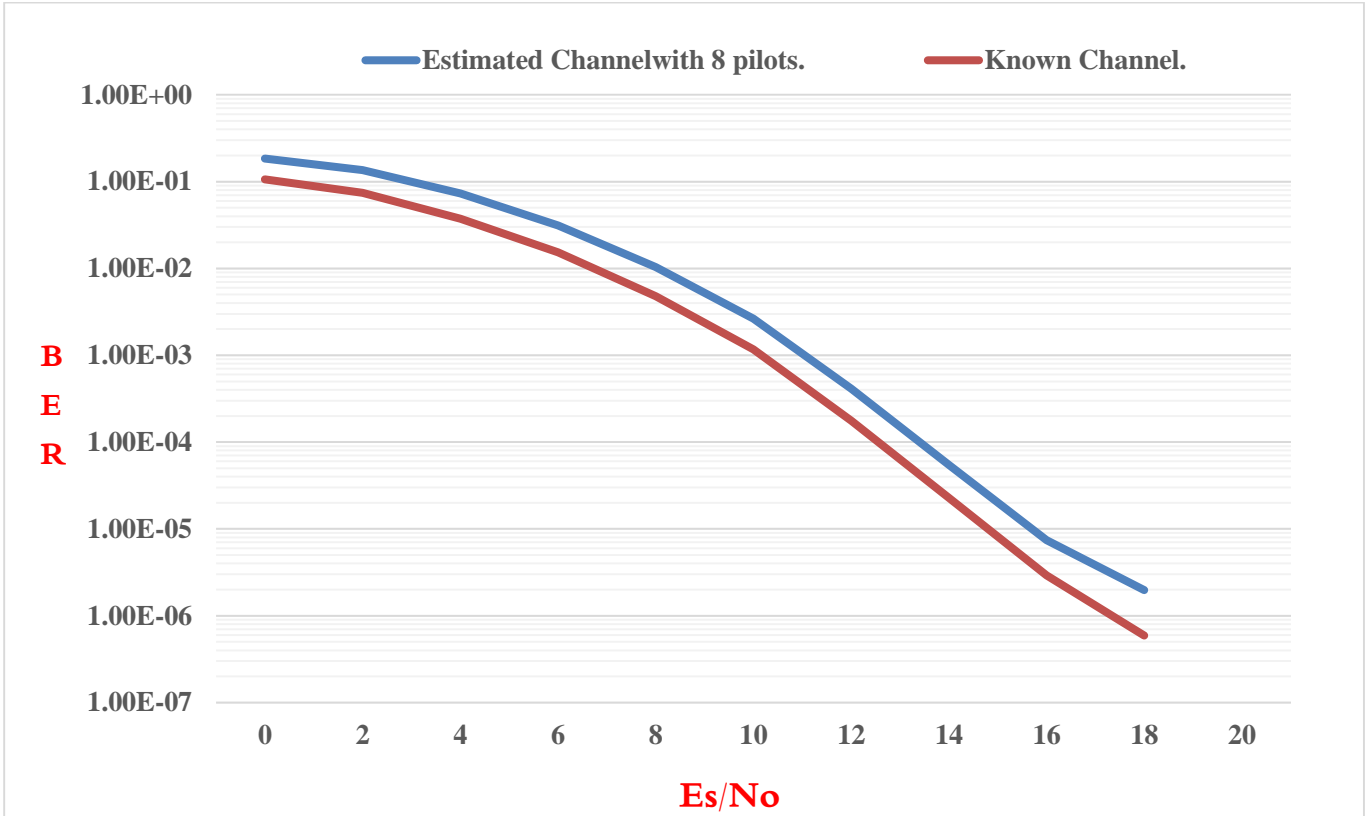


الشكل (12) معدل الخطأ مع تغيير رتبة التعديل بين BPSK و QPSK و 8PSK.

تم بعد ذلك التأكد من عملية تقدير القناة المعتمدة في المستقبل، والتي تعتمد على خوارزمية الأرجحية العظمى (ML)، التي تستخدم رموز التدريب / الإشارات المرجعية (Pilots)، التي تم أدرجها ضمن الإشارة المرسله. ويبين الشكل (13) النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة، حيث جرت المقارنة بين القناة المقدره في طرف الإرسال والقناة الحقيقية التي تم توليدها وتكرير البيانات ضمنها، حيث أن مقدار الخسارة يعتمد على عدد الإشارات المرجعية (Pilots) المدرجة ضمن الإشارة المرسله، وهذه الخسارة ناتجة بالأساس عن عملية التقدير. تم تحديد معاملات المحاكاة الخاصة بتقدير القناة كما هو موضح في الجدول (5). وقد تم اختيار هذه المعاملات لأنها تبين أداء النظام المحدد (BER vs Es / No) بشكل أفضل، أي تغيير في القيم عن المحاكاة السابقة، هو فقط لتبيين النتائج بوضوح أكثر. يمكن تعيين متغيرات أكثر تعقيداً في وقت لاحق للتحقق من تقييم الأداء. لكن الهدف كان فقط التحقق من عملية تقدير القناة تتم بشكل صحيح.

Parmeter name	Value
frame Length	2028
Es/No	0:02:20
maxNumPackets	10000
maxNumErrs	30000
number of Tx antennas	2
number of Rx antennas	2
modulation order	QPSK

الجدول (5) معاملات تقدير القناة.



الشكل (13) نتائج معدل الخطأ عند تقدير القناة من أجل ثمانية رموز تدريب.

## 2.4- تصميم نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة ضيقة الحزمة

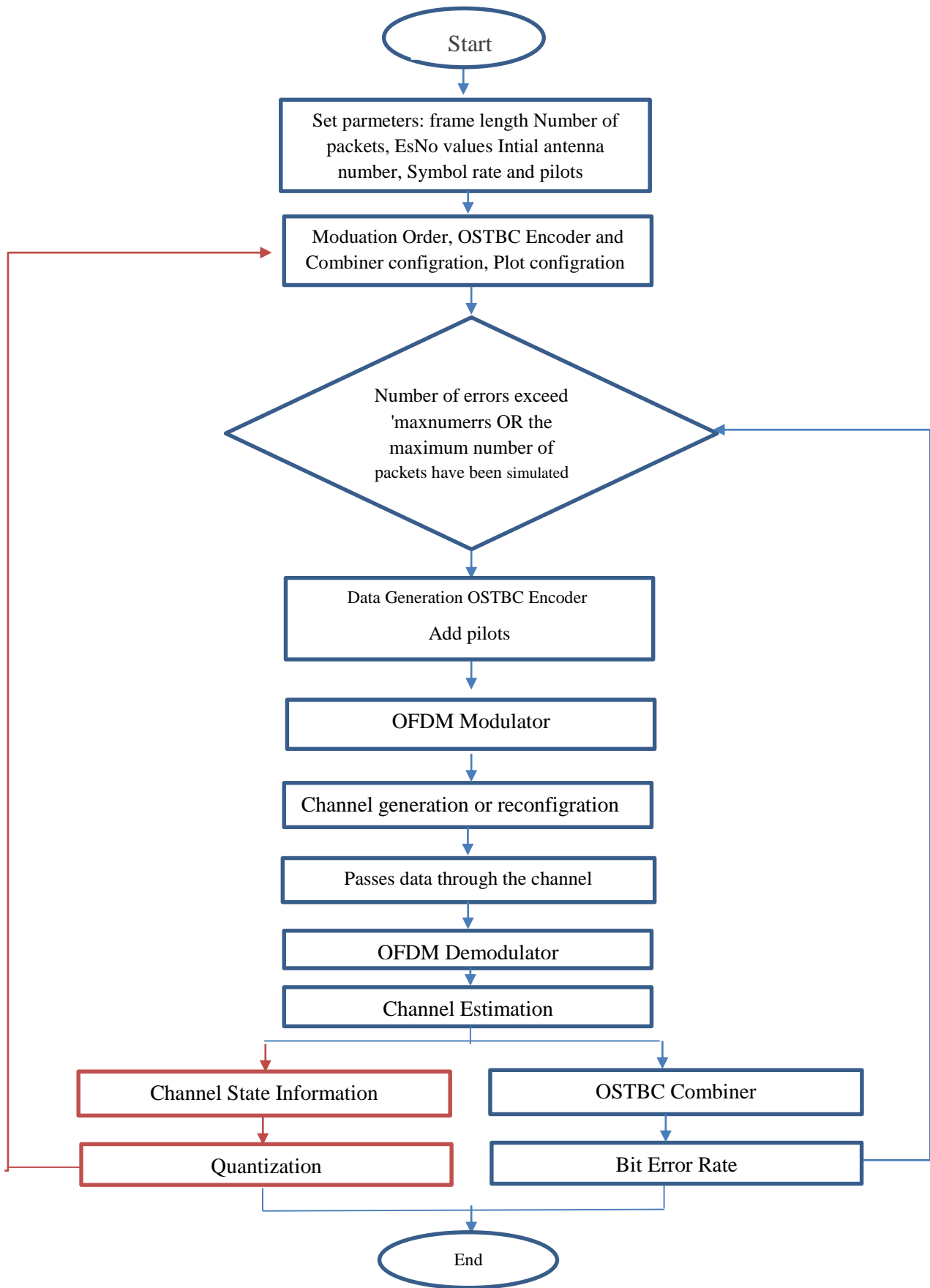
تم في المرحلة السابقة بناء نظام هوائيات متعددة MIMO والتأكد من أدائه. في هذه المرحلة سوف يتم تعديل النظام السابق، حيث تم إضافة معدل OFDM ومفكك تعديل في كل من طرفي الإرسال والاستقبال على التوالي. كما تم إضافة التغذية الراجعة وفق المخطط

التدفقي المبين في الشكل (14). تعتمد التغذية الراجعة على حساب معلومات حالة القناة التي تتمثل في هذه البحث في متوسط استطاعة القنوات الجزئية، حيث تم حسابها على عدد من الأطر، ثم بعد ذلك يتم تكمية هذه القيمة بيت واحد فقط يكافئ أما 0 للانتقال إلى حالة 4 هوائيات إرسال حيث أن القناة في هذه الحالة تعاني من الخفوت، حيث أن معدل الأخطاء لم يعد مقبولاً وبالتالي يجب إنقاص معدل الإرسال بهدف تحسين معدل الأخطاء. أو 1 للانتقال إلى حالة هوائي إرسال عندما تكون قناة الاتصال جيدة وتسمح بزيادة معدل الإرسال على حساب ارتفاع معدل الأخطاء. والتي تمثل كتاب ترميز coodbook. وذلك بناءً على دراسات سابقة قامت بتطبيق نفس الفكرة تقريباً حيث تم الاعتماد فيها على استخدام تعديل QPSK بإزاحة طور 45 درجة كحالة أساسية ثم إزاحتها بمقدار  $\pm 22.5$  بناءً على قيمة بت التغذية الراجعة. وذلك ضمن قنوات الخفوت ضيقة الحزمة [21].

إن عملية المحاكاة في بيئة ماتلاب تمت باستخدام المعاملات المبينة في الجدول (6).

Parameter name	Value
frame Length	2028
Es/No	0:02:20
maxNumPackets	10000
maxNumErrs	1, 500,000
number of Tx antennas	2,3,4
number of Rx antennas	2
Sample rate	1000 Hz
modulation order	QPSK
FFT Length	2048
NumGuardBandCarriers	[5,6]
InsertDCNull	TRUE
PilotCarrierIndices	TRUE
CyclicPrefixLength	16
NumSymbols	1

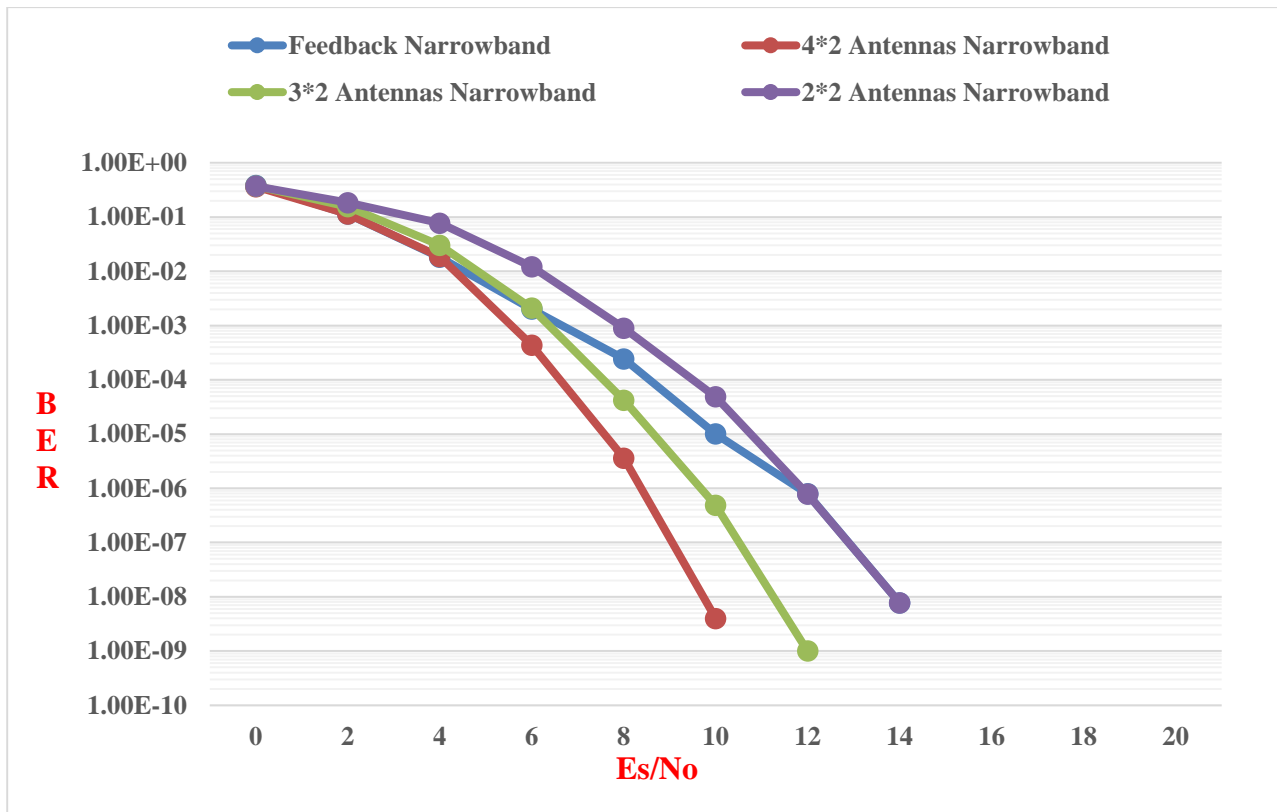
الجدول (6) معاملات نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة ضيقة الحزمة.



الشكل (14) المخطط التدفقي لمحاكاة نظام MIMO-OFDM مع قناة ضيقة الحزمة.



يبين الشكل (15) نتائج المحاكاة الموصَّفة أعلاه وذلك للحصول على التغذية الراجعة المحدودة. حيث تبين النتائج معدل الخطأ في حالة استخدام اثنين و ثلاثة وأربعة هوائيات ارسال، وهوائي استقبال، حيث أن معدل الترميز المعتمد في كل من حالي ثلاثة و أربعة هوائيات هو 0.5. نظراً لأن الربح الناتج عن تغيير معدل الترميز بين 0.5 و 0.75 بسيط جداً مقارنة بالربح الناتج عن تغيير عدد الهوائيات. كما توضح النتائج مقدار الربح الناتج عن التغذية الراجعة المحدودة. الجدير بالذكر أن القناة المعتمدة في هذه المحاكاة هي قناة رايلي Rayleigh ضيقة الحزمة تحتوي مسار واحد.

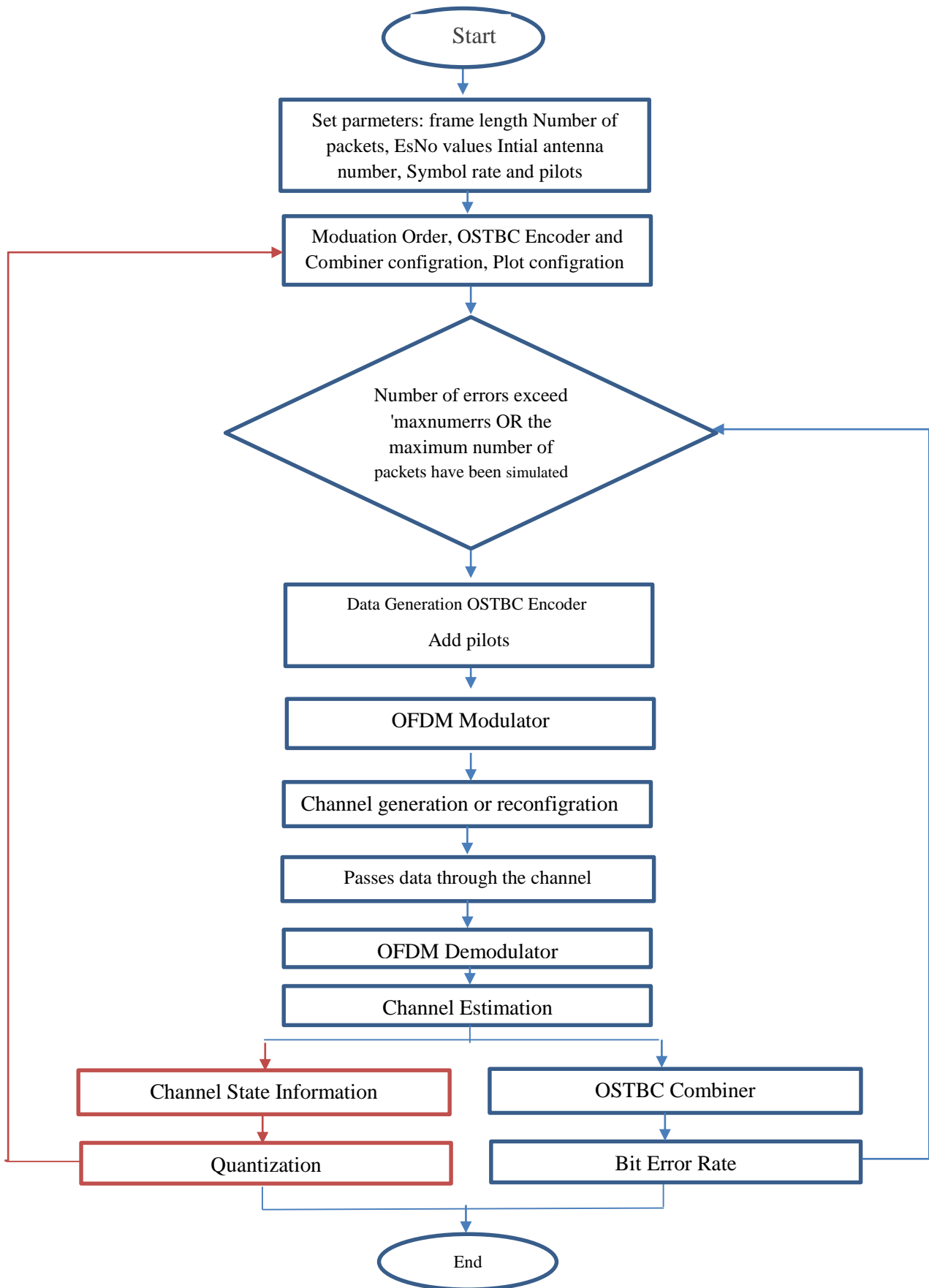


الشكل (15) نتائج معدل الخطأ في نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM ضمن قناة ضيقة الحزمة.

يتبين من المنحنيات في الشكل (15) أن أقل معدل للخطأ يكون عند استخدام أربعة هوائيات ومعدل ترميز 0.5، وهو أفضل من استخدام ثلاثة هوائيات بمعدل إرسال 0.5 ويعزى ذلك إلى ربح التنوع. عند استخدام هوائي إرسال يكون الخطأ في أعلى معدلاته وذلك نظراً لأن معدل الإرسال يساوي إلى واحد. حيث أن الزيادة في معدل الترميز تقابلها زيادة في معدل الخطأ.

### 3.4- بناء نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة عريضة الحزمة

جرى في هذه المرحلة تعديل القناة ضيقة الحزمة لتصبح قناة عريضة الحزمة من خلال إضافة مسار آخر يمثل المسارات المتعددة، التي تميز القناة عريضة الحزمة، وذلك وفق المخطط التدفقي المبين بالشكل (16). كما تم دراسة أثر تغير ربح المسارات المتعددة على معدل الخطأ. تم خلال عملية المحاكاة اعتماد المعاملات المبين في الجدول (7) وذلك عند تثبيت جميع المتغيرات والتركيز فقط على تغيير مقدار الربح للمسار الثاني.

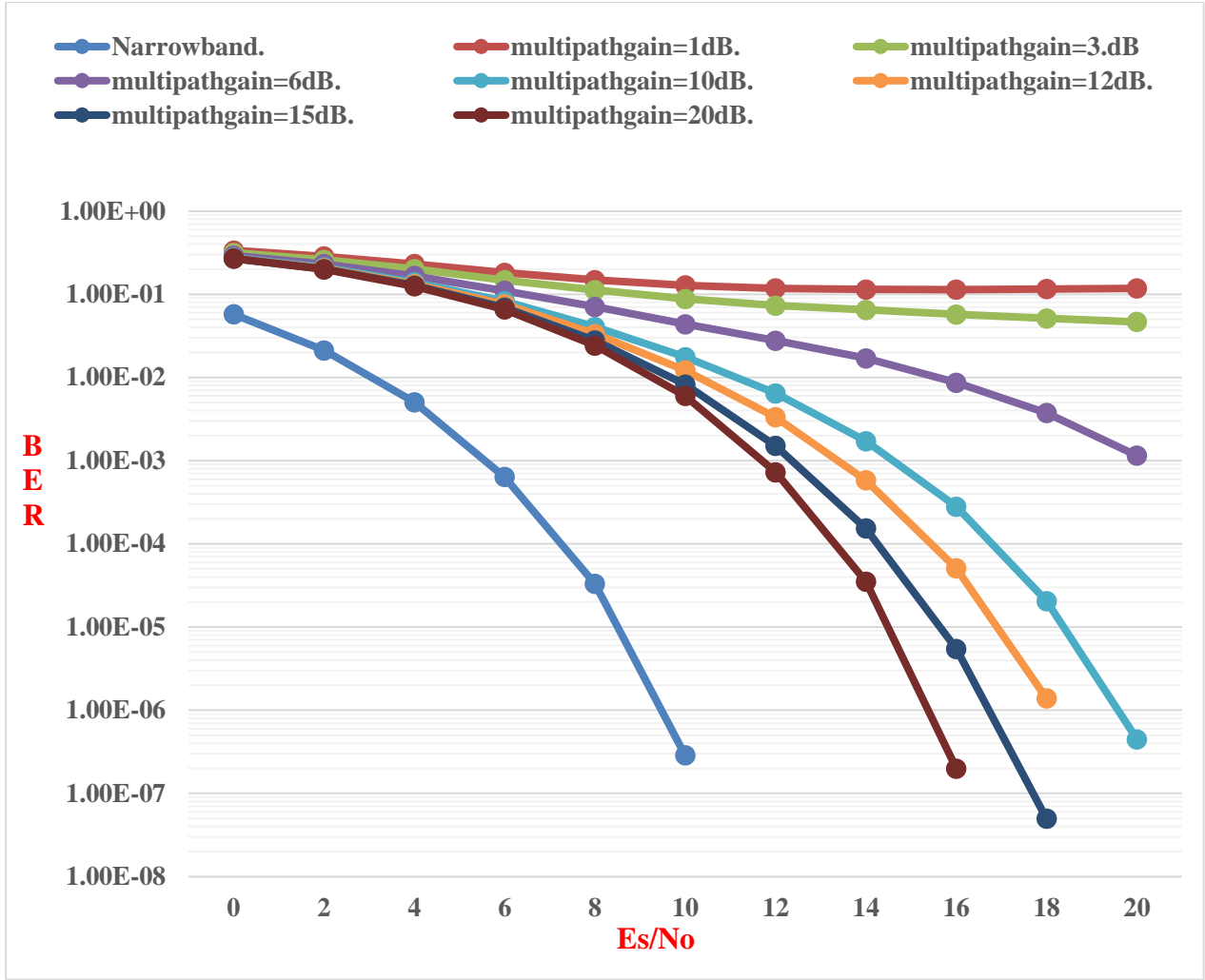


الشكل (16) المخطط التدفقي لتصميم نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة عريضة الحزمة.

<b>Parmeter name</b>	<b>Value</b>
frame Length	2028
Es/No	0:02:20
maxNumPackets	10000
maxNumErrs	500,000
number of Tx antennas	2
number of Rx antennas	2
modulation order	QPSK
FFT Length	2048
NumGuardBandCarriers	[5,6]
InsertDCNull	TRUE
PilotCarrierIndices	TRUE
CyclicPrefixLength	16
NumSymbols	1
Sample rate	1000 Hz
avarge second path gain	1,3,6,10,12,15,20dB
second Path Delays	0.00012 sec

الجدول (7) معاملات محاكاة أثر المسارات المتعددة على معدل الخطأ.

يبين الشكل (17) النتائج التي تم الحصول عليها. وذلك عند تغيير ربح المسار الثاني مقارنة بالمسار الأول بين عدة قيم هي (1,3,6,10,12,15,20 dB). ومقارنتها مع القناة ضيقة الحزمة التي تعتمد على هوائي إرسال واستقبال.



الشكل (17) أثر ربح المسارات المتعددة على معدل الخطأ.

يتبين من النتائج أنه عندما يتقارب ربح المسارين (الأول والثاني) يصبح كشف الرموز المرسله أكثر صعوبة، وبالتالي فإن معدل الخطأ يرتفع ارتفاعاً يجعل من القناة غير صالحة للإرسال، حيث أن خرج القناة يعطي معدلاً كبيراً وثابتاً بالرغم من زيادة طاقة البت إلى طاقة الضجيج (المنحنيين الأخضر والأحمر). عند زيادة الفرق بين ربح المسارين يتناقص معدل الخطأ ويبدأ بالاقتراب من معدل الخطأ من حالة القناة ضيقة الحزمة.

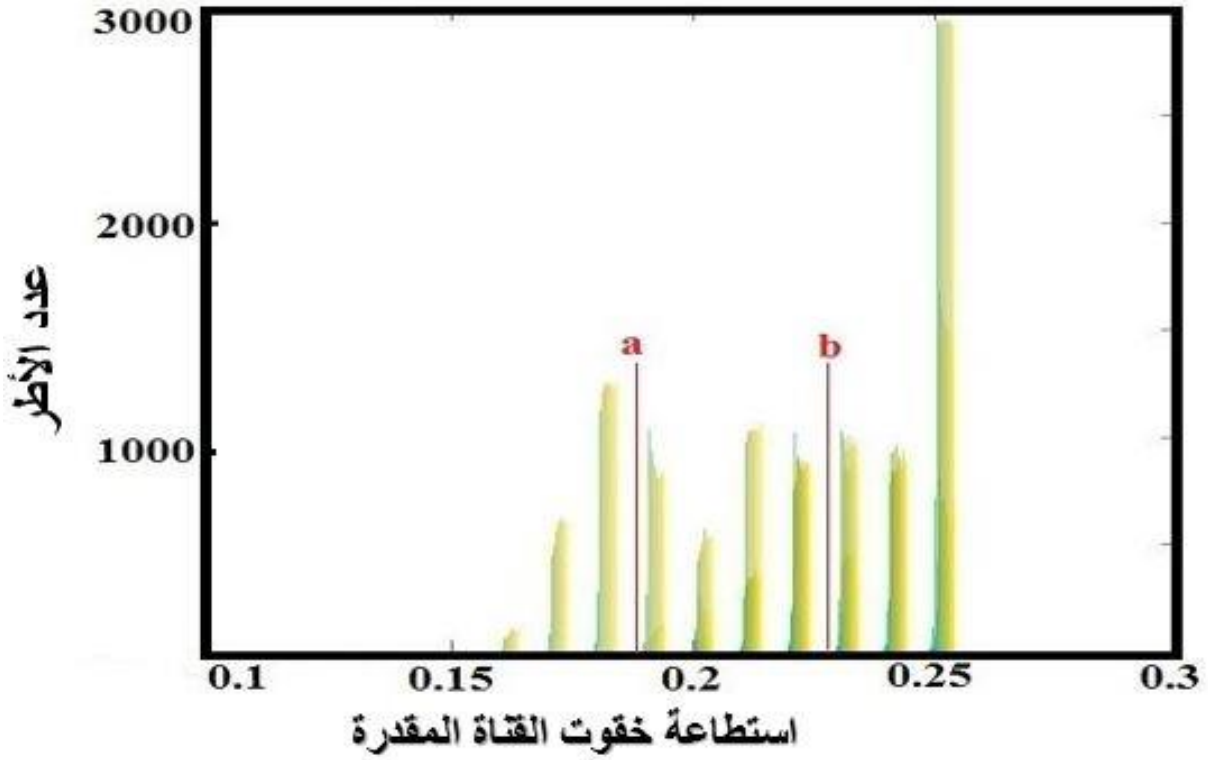
بعد دراسة أثر ربح المسارات المتعددة على القناة عريضة الحزمة ومقارنتها مع القناة ضيقة الحزمة، تم الانتقال إلى دراسة أثر القناة عريضة الحزمة على معدل الخطأ عند اختلاف عدد هوائيات الإرسال وكذلك أثرها على التغذية الراجعة. وذلك عند ثبات جميع معاملات باستثناء عدد الهوائيات الذي يتغير بتغيير حالة القناة كما هو الحال في القناة ضيقة الحزمة.

يبين الجدول (8) قيم المعاملات التي تم الاعتماد عليها في عملية المحاكاة حيث أن معدل الترميز في كل من حالي ثلاثة و أربعة هوائيات هو 0.5، بينما في حالة هوائي إرسال هو 1.

Parameter name	Value
frame Length	2028
Es/No	0:02:20
maxNumPackets	10000
maxNumErrs	1,500,000
number of Tx antennas	2,3,4
number of Rx antennas	2
modulation order	BPSK
FFT Length	2048
NumGuardBandCarriers	[5,6]
InsertDCNull	TRUE
PilotCarrierIndices	TRUE
CyclicPrefixLength	16
NumSymbols	1
Sample rate	1000 Hz
avarge second path gain	10 dB
second Path Delays	0.00012 sec

الجدول (8) معاملات نظام الهوائيات المتعددة MIMO-OFDM مع قناة عريضة الحزمة.

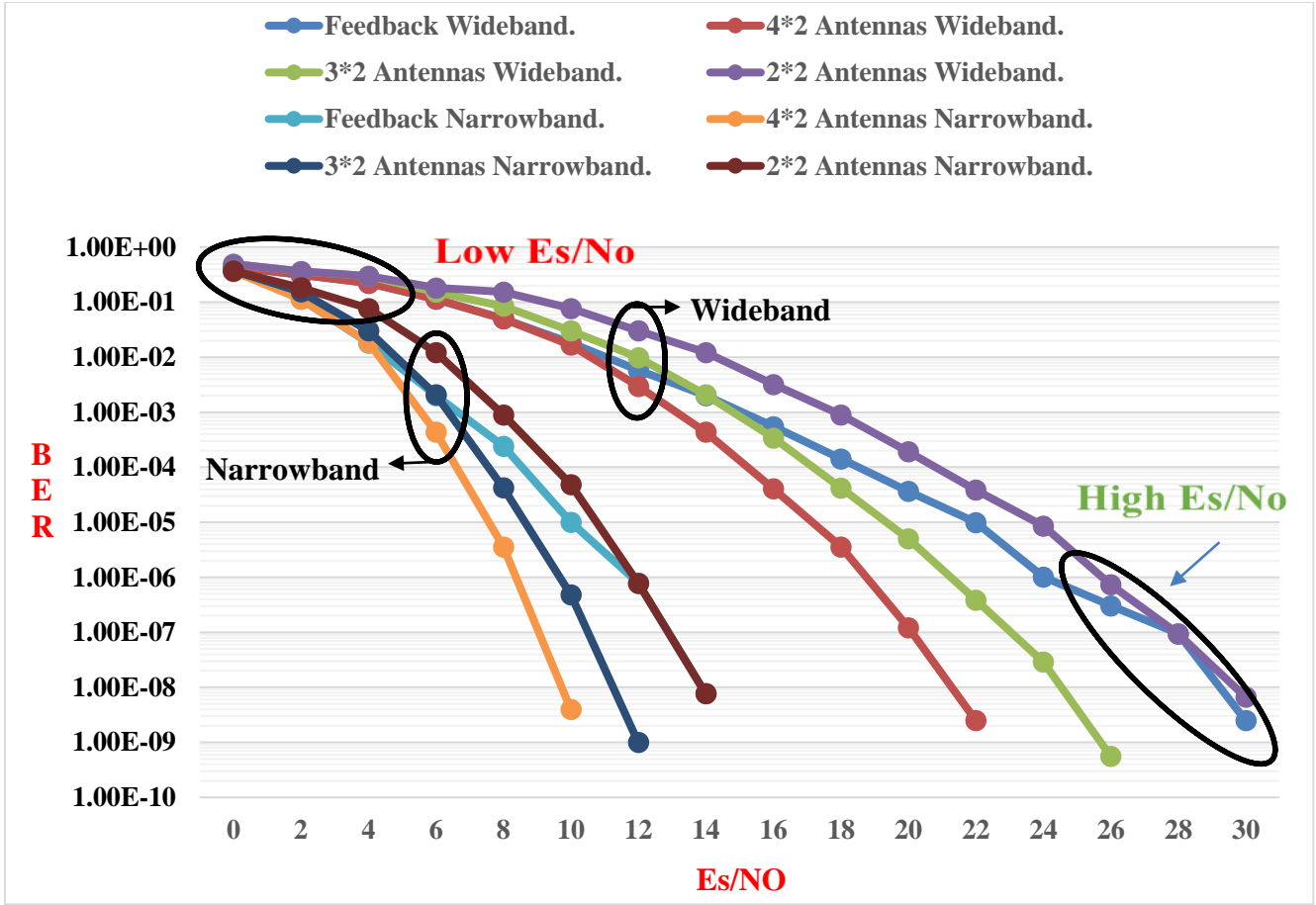
إنّ معدّل الترميز في كل من حالتَي ثلاث وأربع هوائيات هو 0.5، بينما في حالة هوائي إرسال هو 1. يمثّل الشكل (3) قيم متوسّط استطاعة الخفوت في القنوات الجزئية التي تم الحصول عليها ضمن القناة عريضة الحزمة، والذي يعتبر سيء كلما كان كبيراً. تمثل القيمتين  $a = 0.18$  و  $b = 0.22$  عتبتَي التكمية حيث تعبر القناة سيئة عندما تكون استطاعة خفوت القناة أكبر من 0.22، بينما تكون القناة جيدة جداً عندما تكون استطاعة الخفوت فيها أصغر من 0.18.



الشكل (18) قيم متوسط استطاعة الخفوت ضمن القنوات الجزئية للقناة عريضة الحزمة.

يبين الشكل (18) الهستوغرام بين عدد أطر المحاكاة واستطاعة الخفوت للقناة المقابلة لكل مجموعة من الأطر. إنّ قيم استطاعة الخفوت تتوزع من 0.16 حتى 0.25 وذلك بتوزع شبه منتظم، حيث أنّ القنوات الجزئية يتم توليدها بقيم عشوائية تتبع توزع رايلي Rayleigh، ويتم تغيير ربحها من خلال جدائها بقيم عشوائية، لإعطاء القنوات مزيد من العشوائية.

يبين الشكل (19) النتائج التي تم الحصول عليها عندما أصبحت القناة عريضة الحزمة، كما يبيّن نتائج المقارنة بين قناة عريضة الحزمة وقناة ضيقة الحزمة.



الشكل (19) التغذية الراجعة في القناة العريضة الحزمة والقناة ضيقة الحزمة.

تبين النتائج في الشكل (19) مقدار الربح الناتج عن التغذية الراجعة المحدودة في حالي قناة ضيقة الحزمة وقناة عريضة الحزمة من جهة، ومقدار الخسارة أو الربح في معدل الخطأ عن زيادة أو انقاص هوائيات الإرسال على التوالي، وذلك عند ثبات عدد هوائيات الاستقبال على هوائيين. أن التغذية الراجعة المحدودة تحقق ربحاً منخفضاً جداً، عندما تكون نسبة طاقة الرمز إلى طاقة الضجيج منخفضة أو مرتفعة، وذلك مقارنة مع الحالة التي يكون فيها نسبة طاقة الرمز إلى طاقة الضجيج متوسطة.

عندما تكون القناة عريضة الحزمة من الممكن أن تتعرض للخفوت الانتقائي في التردد وهو ما سينعكس سلباً على أداء النظام حيث لن يتم التمكن من تحقيق الاتصال، للتغلب على تلك المشكلة يتم استخدام تقنيات OFDM لتحويل القناة العريضة الحزمة إلى عدة قنوات ضيقة ولكن متعامدة بحيث يمكن التفريق بينها في الاستقبال. من جهة أخرى فإن الربح الناتج عن زيادة عدد هوائيات الإرسال يبقى موجوداً في كل من القناتين الضيقة والعريضة الحزمة، لكن تختلف قيمته تبعاً لعدد واستطاعة المسارات المتعددة وتأخيرها الزمني.

إن ربح التغذية الراجعة يتأثر بالمسارات المتعددة كون التغيرات في القناة تحدث سريعاً، ولا توفر التغذية الراجعة ملاحقة أنية لهذه التغيرات. التغيرات السريعة في القناة عريضة الحزمة تؤدي إلى تغيرات سريعة في نمط الإرسال والذي يحد من الربح الناتج عنها في حالة القناة عريضة الحزمة. لكن يبقى هناك ربح ناتج عن الملاحقة قدر المستطاع لهذه التغيرات.

إن عدد بتات التكمية للمبدلات يناسب طرداً مع لوغارتم عدد التشكيلات الممكنة اعتماداً من قبل المرسل وكذلك يناسب طرداً من عدد البتات المخصصة لها على الوصلة الصاعدة/العكسية للنظام. تتأثر التغذية الراجعة بالقناة العريضة الحزمة حيث يختلف مقدار الربح الناتج عنها في كل حالة نظراً لتعدد حالة القناة. ويتأثر مقدار الربح فيها بشكل مباشر بمعدل الخفوت الحاصل ضمن القناة.

العديد من الأبحاث تدرس حالياً مقدار تأثير عتبة التكمية على مقدار الربح التي تشكل بحثاً مستقلاً عن بحثنا. لكن نظراً لتنوع المعلومات التي تحتويها كل قناة. وتنوع قيم هذه المعلومات ومجالاتها وتأثيرها على عملية الترميز المسبق (precoding)، يصعب تحديد القيم الأمثلية للتكمية وخصوصاً أن أغلب الخوارزميات الخاصة بعملية الترميز المسبق تركز على معامل واحد من معاملات القناة وذلك عند الاعتماد على التكمية ببت واحد.

يمثل الربح الأمثلي الناتج عن التغذية الراجعة الأمثلية (Full CSI at trnsmitter) إحد أهم محاور الأبحاث المستقبلية الممكنة، نظراً لتعدد المعاملات التي تؤثر عليه بشكل مباشر مثل عتبة التكمية، وسرعة تغير القناة و مدى تغيير خرج المبدل التماثلي الرقمي عن التغيرات الحاصلة في القناة، وعدد البتات المحجوزة لخرج المبدل على الوصلة العكسية (أو ما يسمى عدد بتات التغذية الراجعة).

إن الآفاق المستقبلية في هذا المجال متعددة وخصوصاً مع وضع الأسس للانتقال إلى الهوائيات الكثيفة (Massive MIMO). من هذه الآفاق، دراسة تأثير الإشارات المترابطة على أداء التغذية الراجعة. إيجاد الربح الأعظمي في معدل الخطأ الناتج عن التغذية الراجعة في القنوات العريضة الحزمة.



## الخاتمة

جرى في هذا البحث دراسة تأثير التغذية الراجعة المحدودة على أداء نظم الهوائيات المتعددة MIMO عريضة الحزمة، وحساب الربح الناتج عنها، من أجل تشكيلات مختلفة من الهوائيات في طرف الإرسال بناءً على قيمة التغذية الراجعة. نُفذت النظم قيد البحث ضمن بيئة ماتلاب، واعتمد حساب معدل الخطأ لمقارنة النتائج.

إن التغذية الراجعة المحدودة المكتملة على بت واحد في هذه الدراسة اعتمدت على قيمة استطاعة القناة المقدرة لتحديد قيمة البت الواجب إرساله إلى المرسل ليستثمر ذلك في الترميز المسبق (Precoding). إن تغيير استطاعة القناة المقدرة بشكل سريع يتعلق بمعدل الخفوت ويمتد على مجال واسع من القيم في القنوات العريضة الحزمة، وبالتالي فإن عتبة التكمية تؤثر بشكل مباشر على الربح الناتج عن التغذية الراجعة، وذلك تبعاً لقيم الاستطاعة الممكنة. يمكن أن تتعرض القناة العريضة الحزمة للخفوت الانتقائي في التردد، وهو ما سينعكس سلباً على أداء النظام، وبالتالي لن يتم التمكن من تحقيق الاتصال. للتغلب على هذه المشكلة، يفضل استخدام تقنيات OFDM لتحويل القناة العريضة الحزمة إلى عدة قنوات ضيقة ولكن متعامدة بحيث يمكن التفريق بينها في الاستقبال.

من جهة أخرى، يبقى الربح الناتج عن زيادة عدد هوائيات الإرسال في كل من القنوات الضيقة والعريضة الحزمة موجوداً، لكن تختلف قيمته تبعاً لعدد وإستطاعة المسارات المتعددة وتأخيرها الزمني. يتأثر ربح التغذية الراجعة بالمسارات المتعددة كون التغيرات في القناة تحدث سريعاً، ولا توفر التغذية الراجعة ملاحقة آنية لهذه التغيرات.

تؤدي التغيرات السريعة في القناة العريضة الحزمة إلى تغيرات سريعة في نمط الإرسال والذي يحد من الربح الناتج عنها في حالة القناة عريضة الحزمة. لكن يبقى هناك ربح ناتج عن الملاحقة قدر المستطاع لهذه التغيرات. إن عدد بتات التكمية للمبدلات يتناسب طردياً مع لوغارتم عدد التشكيلات الممكن اعتمادها من قبل المرسل، ويتناسب طردياً مع عدد البتات المخصصة لها على الوصلة الصاعدة/العكسية للنظام. تتأثر التغذية الراجعة بالقناة العريضة الحزمة حيث يختلف مقدار الربح الناتج عنها في كل حالة نظراً لتعدد حالة القناة. ويتأثر مقدار الربح فيها بشكل مباشر بمعدل الخفوت الحاصل ضمن القناة.

تدرس العديد من الأبحاث حالياً مقدار تأثير عتبة التكمية على مقدار الربح التي تشكل بحثاً مستقلاً عن بحثنا. لكن نظراً لتنوع المعلومات التي تحتويها كل قناة، ونظراً لتنوع قيم هذه المعلومات ومجالاتها وتأثيرها على عملية الترميز المسبق (precoding)، يصعب تحديد القيم الأمثلية للتكمية وخصوصاً أن أغلب الخوارزميات الخاصة بعملية الترميز المسبق تركز على معامل واحد من معاملات القناة وذلك عند الاعتماد على التكمية ببت واحد.

يمثل الربح الأمثلي الناتج عن التغذية الراجعة الأمثلية (Full CSI at transmitter) أحد أهم محاور الأبحاث المستقبلية الممكنة نظراً لتعدد المعاملات التي تؤثر عليه بشكل مباشر مثل عتبة التكمية وسرعة تغير القناة و مدى تغيير خرج المبدل التماثلي الرقمي عن التغيرات الحاصلة في القناة وعدد البتات المحجوزة لخرج المبدل على الوصلة العكسية (أو ما يسمى بعدد بتات التغذية الراجعة).

إن الآفاق المستقبلية في هذا المجال متعددة وخصوصاً مع وضع الأسس للانتقال إلى الهوائيات الكثيفة (Massive MIMO). منها، دراسة تأثير الإشارات المترابطة على أداء التغذية الراجعة. كما إن إيجاد الريح الأعظمي في معدل الخطأ الناتج عن التغذية الراجعة في القنوات العريضة الحزمة وذلك لتحديد قيمة الريح الذي تم تحقيقه نظراً لعدم وجود قيمة مرجعية يتم تحديد الريح بالمقارنة معها، يمثل محوراً آخر للدراسات المستقبلية. كما تمثل خوارزميات تقدير القناة المتلائمة مع التغذية الراجعة المحدودة أفقاً جديداً خصوصاً مع البدء بالانتقال إلى الأمواج الميلليمترية (mm Waves) في الجيل الخامس من الاتصالات الخلوية النقالة.

نتيجة الاعتماد على ماتلاب مثلت قدرة المعالجة الحاسوبية أحد أهم صعوبات البحث نظراً لأن المحاكاة الواحدة قد تتطلب أسبوعاً كاملاً، كما أنه وبسبب حداثة موضوع التغذية الراجعة المحدودة (ليس التغذية الراجعة) التي تعتمد على المبدلات التماثلية الرقمية منخفضة الدقة، فإن شُح المراجع مثل تحدياً إضافياً.

## المصادر والمراجع

- [1] Bernard Sklar “Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I: Characterization” IEEE Communications Magazine, July 1997
- [2] Bernard Sklar “Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part II: Mitigation” IEEE Communications Magazine, July 1997
- [3] David Gesbert, Mansoor Shafi, Da-shan Shiu, Peter J. Smith and Ayman Naguib ” From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space–Time Coded Wireless Systems” IEEE journal on selected areas in communications, VOL. 21, NO. 3, APRIL 2003
- [4] Sreco Plevel Department of Communication Systems, Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Tornaz Javornik Gorazd Kandus and Jozef Stefan” MIMO: Wireless Communications” Encyclopedia of Wireless and Mobile Communications, 2003
- [5] Priyanka Mishra, C.K. Shukla and Anil Kumar1 “A Review Article On Orthogonal Space Time Block Coded MIMO Systems with Full Rate and Full Diversity Code” International Journal of Electronics, Electrical and Computational System ,12 December 2017
- [6] Mohinder Jankiraman “Space-Time Codes and MIMO System” Artech House, Boston London 2004
- [7] Alamouti, S. M. “A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications,” IEEE Journal Select. Areas Commun., Vol. 16, No. 8, October 1998, pp. 1451–1458.
- [8] Mehmet Kemal Ozdemir, And Huseyin Arslan “channel estimation for wireless ofdm systems” IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2007
- [9] Marc C. Necker and Gordon L. Stuber “Totally Blind Channel Estimation for OFDM on Fast Varying Mobile Radio Channels”, —
- [10] Said Elkassimi, Said Safi and Bouzid Manaut” Blind Radio Mobile Channel Estimation and Identification” IEEE, 2017
- [11] D. J. Love, R. W. Heath Jr., V. K. N. Lau, D. Gesbert, B. D. Rao, and M. Andrews, “An overview of limited feedback in wireless communication systems,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 26, no. 8, pp. 1341–1365, October 2008
- [12] J. Mo, A. Alkhateeb, S. Abu-Surra, and R. W. Heath Jr., “Achievable rates of hybrid architectures with few-bit ADC receivers,” in Proceedings of 20th International ITG Workshop on Smart Antennas, March 2016, pp. 1–8.
- [13] J. Mo, A. Alkhateeb, S. Abu-Surra, and R. W. Heath Jr, “Hybrid architectures with few-bit ADC receivers: Achievable rates and energy-rate tradeoffs,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, no. 4, pp. 2274–2287, April 2017.
- [14] J. Mo, P. Schniter, N. G. Prelcic, and R. W. Heath Jr., “Channel estimation in millimeter wave MIMO systems with one-bit quantization,” in Proc. Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, Nov 2014, pp. 957–961.

- [15] J. Mo, P. Schniter, and R. W. Heath Jr, "Channel estimation in broadband millimeter wave MIMO systems with few-bit ADCs," IEEE, 2016.
- [16] J. Mo and R. W. Heath Jr., "Capacity analysis of one-bit quantized MIMO systems with transmitter channel state information," IEEE Trans. Signal Process., vol. 63, no. 20, pp. 5498–5512, Oct 2015
- [17] J. Mo and R. Heath, "High SNR capacity of millimeter wave MIMO systems with one-bit quantization," in Proc. of Information Theory and Applications (ITA) Workshop, 2014.
- [18] C. K. Au-Yeung and D. Love, "On the performance of random vector quantization limited feedback beamforming in a MISO system," IEEE Trans. Wireless Communication, Feb 2007.
- [19] J. Mo and R. W. Heath Jr., "Limited feedback in multiple-antenna systems with one-bit quantization," in Proc. Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, Nov 2015.
- [20] J. Mo and R. W. Heath Jr. "Limited feedback in MISO systems with finite-bit ADCs," in Proc. Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, Nov 2016,
- [21] J. Mo and R. W. Heath Jr., "Limited Feedback in Single and Multi-user MIMO Systems with Finite-Bit ADCs" in Proc. Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, Apr 2017,
- [22] D. J. Love, R. W. Heath, Jr., W. Santipach, and M. L. Honig, "What is the value of limited feedback for MIMO channels?" IEEE Comm., Oct 2004
- [23] <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/810>.
- [24] O. Dabeer, J. Singh, and U. Madhow, "On the limits of communication performance with one-bit analog-to-digital conversion," in IEEE 7th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2006, pp. 1–5.
- [25] O. Dabeer and U. Madhow, "Channel estimation with low-precision analog-to-digital conversion," in 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2010, pp. 1–6.
- [26] A. Wadhwa and U. Madhow, "Blind phase/frequency synchronization with low-precision ADC: A Bayesian approach," in Proc. of 51st Allerton Conference on Communication Control and Computing, 2013.
- [27] Simon, M. K., and Alouini, "Digital Communication over Fading Channels – A Unified Approach to Performance Analysis", 1st Ed., Wiley, 2000.
- [28] Lee, P. J., "Computation of the bit error rate of coherent M-ary PSK with Gray code bit mapping", IEEE Trans. Commun., Vol. COM-34, Number 5, pp. 488-491, 1986.
- [29] Jiayi Zhang, Linglong Dai, Xu Li, Ying Liu, and Lajos Hanzo "On Low-Resolution ADCs in Practical 5G Millimeter-Wave Massive MIMO Systems", IEEE Communications Magazine, Volume: 56, Issue: 7, July 2018.
- [30] هشام عرودكي "نظم الاتصالات الخليوية: أسس ومبادئ" دمشق 2013.