

Enhancing MIMO-OFDM system By Increasing Data Rate

Dr. Haitham Alradwan*
Mohamad Harmoush**

(Received 9 / 5 / 2017. Accepted 24 / 7 / 2017)

□ ABSTRACT □

The advanced developing of the wireless communications and its use in daily life raised the demands for more data rates equal to the wire networks. The third generations of the mobile network came to enhance the data rate but the continues growth of the media made the users grave for more.

MIMO-OFDM system considered the core of the modern Telecommunication systems like 4G mobile networks and Wimax networks.

In this article, we will study OFDM system with multiple sets of input- output antennas, and then enhance the system with bell lab vertical space-time algorithm V-BLAST combined with signal cancelling technics like Zero Forcing ZF and Minimum Mean Square Error MMSE.

Key words: (OFDM) Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Multiple Input Multiple Output (MIMO), V-BLAST Vertical Bell Lab Space Time, Zero Forcing (ZF), Minimum Mean Square Error (MMSE).

* Assistant Professor, Telecommunications and Electronics department - Mechanical & Electrical Engineering Faculty - Tishreen University – Lattakia - Syria.

** Postgraduate student - Computer and Control department - Mechanical & Electrical Engineering Faculty - Tishreen University.

تحسين نظام MIMO-OFDM بزيادة معدل نقل البيانات

الدكتور هيثم الرضوان *

محمد هرموش **

(تاريخ الإيداع 9 / 5 / 2017. قُبل للنشر في 24 / 7 / 2017)

□ ملخص □

إن تطور الاتصالات اللاسلكية السريع ودخولها إلى معظم جوانب الحياة دفع إلى الطلب المتزايد على سرعة نقل بيانات عالية تضاهي الاتصالات السلكية. وقد ظهر الجيل الثالث ليعزز معدل البيانات لكن التطور المستمر في تطبيقات الوسائط المتعددة جعل معدل البيانات المستخدم غير كاف.

يعتبر نظام MIMO-OFDM اللبنة الأساسية في أنظمة الاتصالات الحديثة مثل شبكات الخليوي الجيل الرابع 4G وشبكات Wimax ، يتم التطرق في هذا البحث إلى دراسة نظام OFDM مطبق على عدد من هوائيات الدخل والخرج ومن ثم تحسينه بخوارزمية مخبر Bell الزمانية المكانية العمودية V-BLAST. مع احدى تقنيات الغاء الاشارات وهي التصفير القسري Zero Forcing ZF والقيمة الصغرى لمتوسط مربع الخطأ MMSE.

الكلمات المفتاحية: التجميع بالتقسيم الترددي المتعامد، دخل متعدد خرج متعدد، معدل نقل بيانات، ترميز مخبر بل الزماني المكاني ، التصفير القسري ، القيمة الصغرى لمتوسط مربع الخطأ.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة والاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** طالب ماجستير - قسم الحاسبات والتحكم الالي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة :

المفتاح الأساسي في زيادة معدل البيانات هو الاستخدام الفعال لعرض الحزمة المتوفر وبدون الحاجة إلى زيادة في استطاعة الإرسال والتي تكون محدودة وخاصة في الأجهزة المحمولة.

وبالتالي فإن استخدام هوائيات متعددة في الإرسال والاستقبال Multiple Input –Multiple Output (MIMO) لفت نظر مجتمع الاتصالات اللاسلكية لإمكانية زيادة سعة وإداء قناة الاتصال بشكل كبير مع تخفيض معدل الخطأ BER (Bit Error Rate) وذلك تبعاً لعدد الهوائيات في الإرسال والاستقبال.

ولكن للحصول على هذه السرعات العالية يتطلب دور رموز صغير جداً وهذا يؤدي إلى تداخل الرموز Inter Symbol Interference (ISI) بسبب تعدد المسارات الناتجة عن الانعكاسات ضمن البيئة المحيطة وتأخر الانتشار وأيضاً معدلات الإرسال العالية تؤدي إلى حدوث تداخل الحوامل ICI وللتغلب على هذه المشكلات استخدمنا التقسيم بالتجميع الترددي المتعامد OFDM وهي تقنية متعددة الحوامل الذي يعمل على إزالة تداخل الرموز وزيادة فعالية نظام الإرسال عن طريق زيادة الفعالية الطيفية Spectral Efficiency والذي يقسم معدل الإرسال العالي إلى مسارات بسرعة أخفض وهذا يؤدي إلى تحسين معدل نقل الإرسال الكلي [2].

بالإضافة إلى ذلك تشكل خوارزمية مخبر بل للترميز الزمني المكاني العامودي V-BLAST كشفاً غير خطي وبالاعتماد على إحدى تقنيات التسوية. في بحثنا سنستخدم تقنية التصفير القسري (ZF) وتقنية القيمة الصغرى لمتوسط مربع الخطأ MMSE وذلك للمقارنة بينهما في أداء نظام الاتصال. إن قناة الخفوت هي من نوع Rayleigh والتعديل المستخدم هو BPSK و سنعتمد على دراسة نسبة الإشارة إلى ضجيج SNR وسعة القناة Capacity باستخدام برنامج الماتلاب [1] MATLAB.

أهمية البحث وأهدافه:

تطوير نظام MIMO-OFDM باستخدام خوارزمية ترميز V-BLAST مع إحدى تقنيات التسوية MMSE القيمة الصغرى لمتوسط مربع الخطأ. وتقنية التصفير القسري (ZF) حيث تم العمل في البحث على زيادة معدل إرسال البيانات الكلي بزيادة معدل البيانات الفرعية تبعاً لعدد محدد لهوائيات الإرسال والاستقبال.

طرائق البحث وموارده**نموذج القناة:**

لقد تم في البحث استخدام نموذج قناة الضجيج غوص المضاف الأبيض Additive white Gaussian Noise (AWGN) مع حدود للاستطاعة وذلك من أجل دراسة السعة في نظام MIMO-OFDM.

يعتبر ضجيج غوص المضاف الأبيض النموذج الرئيسي المستخدم في نظرية الإشارة لمحاكاة تأثير العوامل العشوائية للطبيعة على قناة الاتصال ولها عدة خصائص [7]:

❖ مضافة: لأنها تضيف ضجيجاً إلى أي جزء من نظام الاتصال.

❖ أبيض: تشير إلى أن الاستطاعة لهذا الضجيج على كامل المجال الترددي وهي محاكاة للضوء الأبيض الذي يعتبر مكوناً من كل انبعاثات الضوء المرئي.

❖ غوصي: لأنها تتوزع في المجال الزمني بمتوسط مساوي إلى الصفر
يتكون الضجيج عريض الحزمة من مصادر طبيعية مثل التذبذب الحراري للذرات ضمن النواقل الداخلية أو من مصادر خارجية كالشمس.

يستخدم ضجيج غوص المضاف الأبيض كنموذج للقناة كإضافة خطية للضجيج عريض الحزمة وبكثافة طيفية ثابتة ويعبر عنه ب W/HZ ، يتميز هذا النموذج بسهولته وبساطته وهو مفيد في إعطاء نظرة على النظام المدروس [3].

بارامترات قناة غوص المضاف الأبيض:

الاستطاعة P واحدها الواط W

الكثافة الطيفية للضجيج الأبيض وتعطى ب $N0/2$

تمثل نموذج قناة غوص المضاف الأبيض كالتالي وفقا للعلاقة (1):

وتكون الاستطاعة:

$$\sum_{n=1}^N [x[n]]^2 \leq NP \quad \text{العلاقة (1) [7]}$$

وبالتالي يكون قانون السعة لنموذج القناة غوص المضاف الأبيض هو:

$$C_{AWGN}(P, W) = w \log \left(1 + \frac{PH}{N_0 w} \right) \text{ bit/s} \quad \text{العلاقة (2)}$$

$$= \log(1 + SNR) \text{ bit/s}$$

$$SNR = \frac{P}{N_0 w}$$

حيث H هي الاستجابة الترددية للقناة AWGN

هذه المعادلة للسعة تعطينا مجالا واسعا لدراسة أداء النظام وذلك تبعا للبارامترات الرئيسية المتاحة وهي غالبا

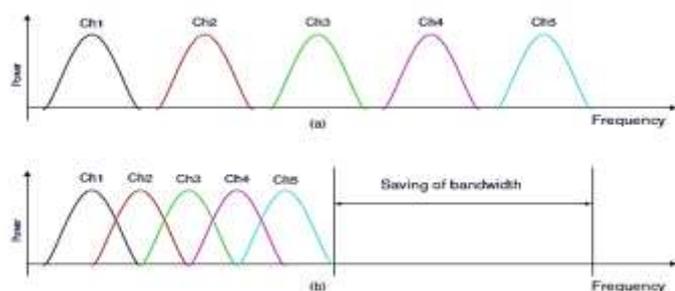
الاستطاعة P وعرض الحزمة W .

تخامد رايلي و رايشيان Rayleigh و Rician:

يحصل خفوت الإشارة بسبب الاستقبال متعدد المسار للإشارة، في الخفوت نوع Rayleigh لا يوجد مركبة مسيطرة ناشئة عن LOS (Line Of Sight) للإشارة المستقبلية إذ لا يوجد خط نظر مباشر بين المرسل والمستقبل، لكن في الخفوت نوع Rician يوجد مركبة قوية مسيطرة ناتجة عن LOS إذ هناك خط نظر مباشر بين المرسل والمستقبل [7]، و يوجد بارامتر مهم في هذا النوع من الخفوت اسمه K و يعرف بأنه نسبة استطاعة مسار LOS إلى الاستطاعة في المسارات الأخرى [10]. وتم في البحث اعتبار أن $K=3 \text{ dB}$.

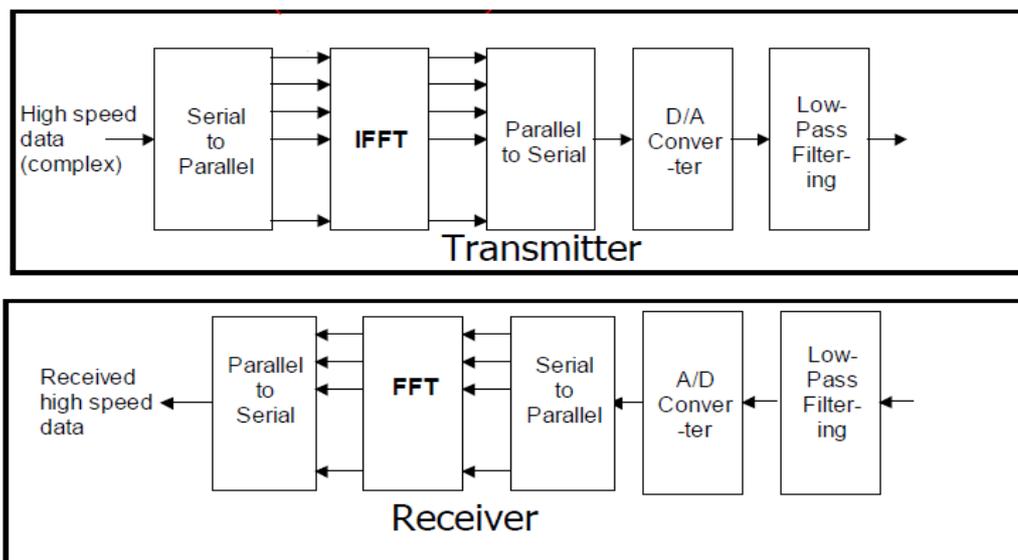
التجميع بالتقسيم الترددي المتعامد OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):

إن نظام OFDM هو أحد الأنظمة متعددة الحوامل حيث كما يشير الشكل (1) فهو لا يستخدم مرشحات حزمة مستقلة عن بعضها البعض وأيضا هزازات للحوامل وتتراكب أطيف الحوامل الفرعية وذلك لزيادة فاعلية الحزمة، يمكن الكشف عن الحوامل الفرعية في طرف الاستقبال بتطبيق معيار نايكوست [2].



الشكل (1) نظام OFDM متعدد الحوامل [2]

تستخدم الإشارة المرسل في الأنظمة ذات الحامل الترددي الوحيد كل الطيف الترددي المتوفر، أما في الأنظمة المتعددة الحوامل الترددية يقسم الطيف الترددي المتوفر إلى عدد من المجالات الضيقة. إن مبدأ الإرسال متعدد الحوامل يقوم على أساس تحويل تدفق البيانات التسلسلي ذات المعدل العالي إلى سلاسل جزئية تفرعيه N ذات معدل منخفض و يطلق على هذه العملية التحويل من تسلسلي إلى تفرعي ، ومن ثم تحول هذه السلاسل التفرعية إلى صيغة التعديل الرقمية BPSK ، و يعدل كل مجال جزئي بحامل ترددي جزئي باستخدام Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) ، و من ثم تضاف البادئة الدورية (Cyclic Prefix (CP بأخذ نسخة من الجزء الأخير من رمز OFDM و وضعها في مقدمة الرمز على أن يكون زمن البادئة الدورية أكبر من التأخير الأعظمي الذي تسببه القناة لمنع تداخل الرموز مع بعضها (ISI) و لمنع تداخل الحوامل الترددية مع بعضها [4] Inter Carrier Interference (ICI). أما في طرف الاستقبال فتحدث عملية معاكسة لما حدث عند المرسل إذ تحذف البادئة الدورية أولاً، ثم تتم عملية FFT، ثم التسوية و فك التعديل و أخيراً عملية التحويل من تفرعي إلى تسلسلي، كما يبين الشكل (2) مخططاً صندوقياً لنظام OFDM.



الشكل (2) مخطط نظام OFDM

متوسط مربع الخطأ الأصغر MMSE : Minimum Mean Square Error

في علم الإحصاء وعلم معالجة الإشارة تعتبر MMSE إحدى الطرق لتخفيض متوسط مربع الخطأ MSE في طرف الاستقبال عند كشف الإشارة المستقبلية وذلك من أجل تحسين جودة الكشف بتحسين موقع الإشارة [13]. يتم في هذه التقنية الاعتماد على القيم اللاحقة والتي يتم توقعها حسابيا وذلك بالاعتماد على بعض المعاليم ضمن هذا التابع.

إذا فرضنا أن شعاع الارسال x مكون من $n \times 1$ (عدد الهوائيات المرسله) وشعاع الاستقبال Y المكون من $1 \times m$ عنصر وليس بالضرورة أن يكون $m=n$ فبالتالي يكون شعاع الخطأ العلاقة (3) :

$$e = \hat{x} - x \quad (3) \text{ العلاقة}$$

حيث \hat{x} هي الإشارة المستقبلية المتوقعة ، فبالتالي مربع هذا الخطأ يعطى بالعلاقة (4) :

$$MSE = E(\hat{x} - x)^2 \quad (4) \text{ العلاقة}$$

$$= \sum_{i=1}^n E(e_i^2)$$

وإذا فرضنا أن شعاع التوقع سيكون $\hat{x}(y)$ بفرضيتنا هذه تم استخدام كل من شعاع الارسال والاستقبال المتوقع في حساب الخطأ ولتخفيض نسبة الخطأ بين الإشارة المتوقعة والإشارة المرسله يكون لدينا العلاقة (5) :

$$\hat{x}_{MMSE}(y) = \arg \min_n (MSE) = \arg \min \sum_{i=1}^n E(e_i^2) \quad (5) \text{ العلاقة}$$

خوارزمية التصفير القسري ZE Zero Forcing

وهي إحدى خوارزميات التسوية Equalizing المستخدمة في أنظمة الاتصالات وفيها يطبق مقلوب الاستجابة الترددية للقناة وقد تم عرضه أول مرة من قبل روبرت لوكي .

مبدأ عملها بسيط يتلخص في تطبيق مقلوب أو عكس الاستجابة الترددية لقناة الاتصال على الإشارة المستقبلية وذلك بهدف استعادة الإشارة المرسله بعد مرورها في قناة الاتصال. [10]

يوجد تطبيقات مفيدة فعلى سبيل المثال مستخدمة بشكل أساسي في المعيار n802.11 (متعدد هوائيات الارسال والاستقبال MIMO) حيث بمعرفة حالة قناة الاتصال يمكن استعادة سلسلتين أو أكثر من البيانات المرسله والتي تكون متراكبة فوق بعضها البعض في الإشارة المستقبلية عند كل هوائي استقبال وميزاتها أنها تقوم بتخفيض تداخل الرموز ISI إلى الصفر في حال انعدام الضجيج وهو سبب تسميتها بهذا الاسم [9].

إذا كانت الاستجابة الترددية لقناة الارسال هي $F(f)$ فإن التصفير القسري $C(f)$ يكون مساويا إلى العلاقة (6):

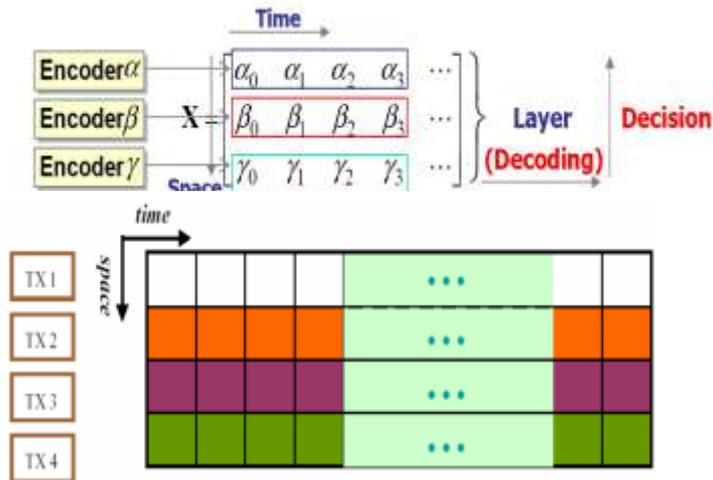
$$C(f) = \frac{1}{F(f)} \quad (6) \text{ العلاقة}$$

وبهذا يكون جداء الاستجابة الترددية للقناة مع $C(f)$ مساويا الواحد

في الواقع إن خوارزمية التصفير القسري لا تستخدم في كل التطبيقات لعدة أسباب أهمها أنه عند بعض الترددات تكون الإشارة المستقبلية ضعيفة وبمقارنة مطال الإشارة عند مرشح التصفير القسري سيكون كبيرا فنتيجة لذلك فإن أي ضجيج مضاف إلى الإشارة بعد التضخيم يتم ضربه بمعامل كبير مما يخفض بشكل كبير من نسبة الإشارة إلى الضجيج الكلي [14] SNR .

MIMO-VBLAST

هي تقنية وضعت من قبل مختبرات بل اختصارا Vertical-Bell Lab Layered Space Time وهي تتميز بفعالية طيفية عالية عند تطبيقها في تطبيقات التجميع المكاني (Spatial Multiplexing) عبر قنوات التخامد . هذه التقنية مرتبطة بجهة الاستقبال وهي تستخدم في تخفيض التشوه في الإشارة المستقبلية الناتج عن التداخل والتخامد متعدد المسارات [8][1](multipath fading). كما يبين الشكل (3) ارسال الإشارات وتجميعها بشكل عمودي لتسهيل كشفها في طرف الاستقبال.



الشكل (3) نظام MIMO يستخدم أكثر من هوائي واحد عند كل من المرسل والمستقبل. [14]

3-6 خطوات كشف الإشارة في طرف الاستقبال



الشكل (4) مراحل كشف الإشارة تقنية V-BLAST

يبين الشكل (4) خطوات كشف الإشارات بعد استقبالها كما يلي:

- 1- الكشف والترتيب (Detect): حيث يتم كشف الإشارات المستقبلية وترتيبها حسب قوة الإشارة أو نسبة الإشارة إلى ضجيج SNR الشكل (4-a).
- 2- التصفير (Nulling): بعد كشف الإشارة الأقوى يتم تصفير كل الإشارات الأضعف واستخراج الإشارة الشكل (4-b).

- 3-القطع (CUT) : يتم فصل الإشارة المرغوبة ((الأقوى)) من تشكيلة الإشارات المجاورة لها وفك تشفيرها واستخراج بياناتها الشكل (4-c).
- 4-الحذف (Delete) : بما أن الإشارة الأقوى تم استخراجها يتم حذفها من الإشارة المستقبلية ككل وذلك من أجل تخفيض التداخل فيها وتخفيض التعقيد الشكل (4-d).
- 5-العودة الى الخطوة الأولى الشكل (4-e).

مبدأ عمل نظام MIMO-OFDM

تم دراسة العديد من المقاربات على نظام MIMO لزيادة سعته وذلك من ناحية الترميز أو معالجة الإشارة. إن البيئة التي يتم فيها الانتشار مهمة جدا في دراسة نظام MIMO، حيث وكما نعلم فإن البيئة غنية التشتت تزيد بشكل ملحوظ من معدل نقل البيانات، تصل إلى المستقبل مجموعة من الإشارات منها الرئيسية عند خط النظر (LOS) والتي ينتج عنها انعكاسات عن الحواجز المحيطة وقد تتبعثر هذه الموجة الرئيسية وتشتت عند وصولها إلى محيط المستقبل لعدة عوامل أهمها: الأثاث والجدران [16]، وبالتالي فقد تصل نسخ هذه الإشارة الرئيسية إلى المستقبل بأزمة تأخير مختلفة ولكن بسيطة، هذه النسخ تكون مختلفة بالطور وبالمطال أيضا، كل هذه العوامل التي تؤثر على الإشارة تكون حسب طبيعة البيئة أو المبنى المدروس، ومن آثار تعدد المسار أيضا حصول تداخل الرموز ISI في الاتصالات اللاسلكية. لمعالجة هذه المشكلة لدينا نظام OFDM يعمل بشكل فعال في القناة اللاسلكية ويشكل عددا من الترددات المتوازية مما يجنبنا من مشكلة تداخل الرموز وأيضا يسهل من عمل المسوي (Equalizer) والممرّ (Decoder). [13][17] إذا لدينا هوائيات متعددة تزيد من فعالية نظام OFDM وتؤمن تنوع في الإرسال والاستقبال للتغلب على التخماد ونظام OFDM ببادئة حماية للتغلب على تداخل الرموز ISI. أيضا المسوي يجب أن يتخلص من تشوهات التخماد حتى لو كانت أصغر من طول البادئة الدورية ويزيد OFDM مع فعالية المعالجة باستخدامه لتحويل فورير السريع في التعديل وفك التعديل يجب الانتباه إلى الفصل الجيد بين الهوائيات لأن التوزيع السيئ يؤدي إلى تخفيض أداء النظام، وأيضا وجود التعامد بين الحوامل الترددية الفرعية في نظام OFDM يمنع فك التعديل من رؤية ترددات أخرى لا تنتمي إلى هذه الإشارة و بالتالي فعالية كبيرة في الطيف الترددي وأيضا مقاومة لتداخلات الأمواج الراديوية.

سعة نظام MIMO-OFDM :

بما أن سعة القناة تعبر عن أعلى حد لكمية المعلومات التي يمكن إرسالها بموثوقية عبر قناة الاتصال فإنها أيضا تعبر عن حد معدل نقل البيانات بقناة محددة مع احتمال خطأ صغير نسبيا وهي تقيس توفر القناة وجودتها وكما زاد زادت معها كمية المعلومات المتبادلة بشكل موثوق. [19]

تعطى علاقة السعة لنظام MIMO-OFDM كما في العلاقة (7):

$$C = \frac{1}{n_f} \sum_{k=1}^{n_f} \sum_{j=1}^{n_t} \log_2 \left(1 + \frac{\sigma h_{jk}(f_k)}{n_t} \right) \quad (7)$$

حيث C هي السعة وواحدتها bit/Sec/Hz

Nf عدد الحوامل الفرعية في نظام OFDM

Nt عدد الهوائيات المرسل (Tx)

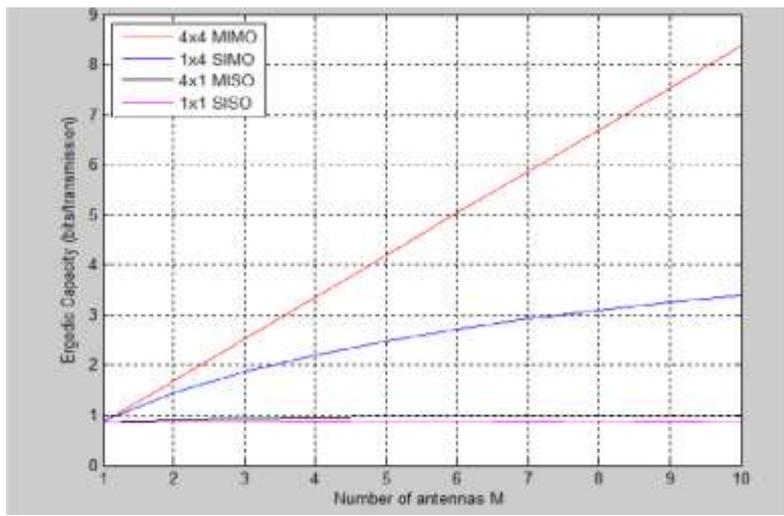
σ : هي متوسط نسبة الإشارة إلى ضجيج SNR.

$h_{j,k}$: هي معامل مصفوفة القناة H من أجل هوائي الإرسال n_t و تردد الحامل الفرعي n_f حيث f_k هي القيمة العددية لتردد الحامل الفرعي.

النتائج والمناقشة:

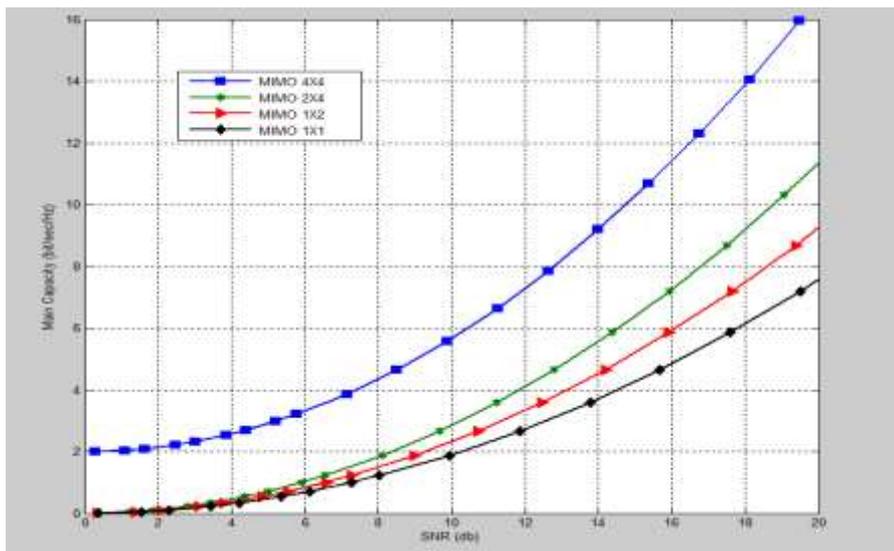
دراسة معدل نقل البيانات في نظام MIMO-OFDM

الدراسة بدأت بالمقارنة بين أنظمة الهوائيات المتعددة المختلفة و ذلك بدراسة معدل نقل البيانات في عدة حالات من الهوائيات بالمقارنة مع نسبة الإشارة إلى ضجيج الوسطية كما يبين الشكل (5) :



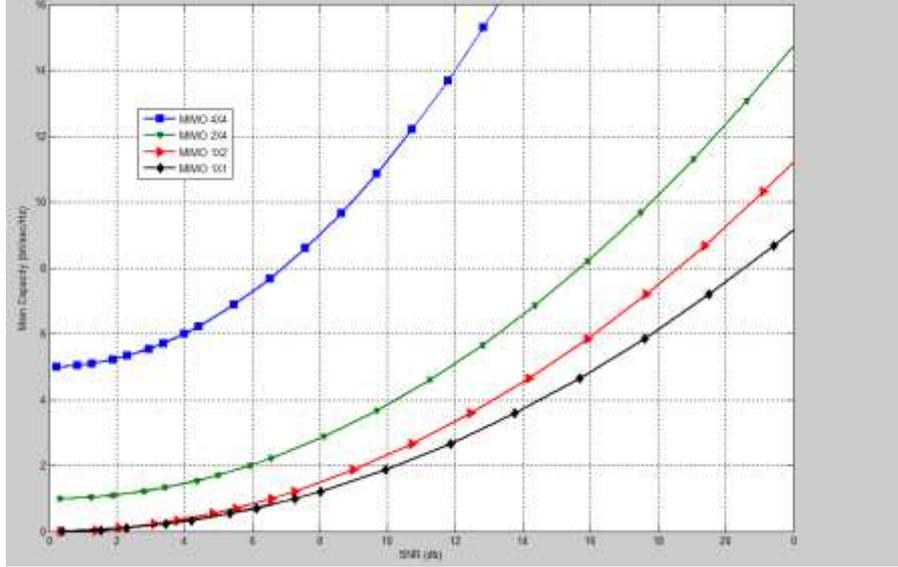
الشكل (5) معدل نقل البيانات مع نسبة الإشارة إلى ضجيج SNR

الشكل (6) يظهر مقارنة في سعة النظام ومعدل نقل البيانات عند عدد من الهوائيات في أنظمة MIMO مع استخدام تقنية التصفير القسري ZF ونلاحظ زيادة ملحوظة في سعة القناة عند زيادة عدد الهوائيات حيث تصل إلى 16(b/s/Hz) عند نسبة إشارة إلى ضجيج 20dB مقارنة مع الإشارات الباقية .



الشكل (6) سعة النظام في حالة نظام MIMO مع تقنية التصفير القسري ZF

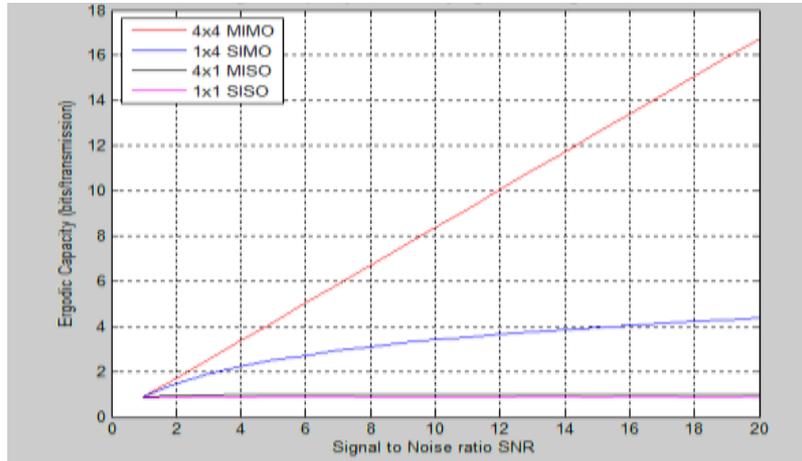
أما الشكل (7) يبين سعة النظام ومعدل نقل البيانات عند عدد من الهوائيات في نظام MIMO مع خوارزمية متوسط مربع الخطأ الأصغري في طرف المستقبل MMSE والملاحظ أن سعة القناة تزيد بشكل أكبر عند زيادة عدد الهوائيات حيث تصل إلى أكبر من 16(b/s/Hz) عند نسبة إشارة إلى ضجيج 20dB مقارنة مع الإشارات الباقية .



الشكل (7) سعة النظام في حالة نظام MIMO-OFDM

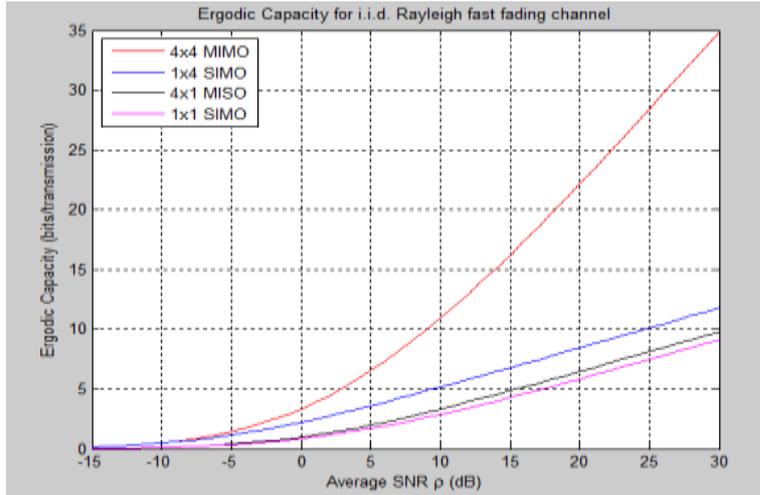
دراسة معدل نقل البيانات في نظام MIMO-OFDM-VBLAST

يبين الشكل (8) سعة نظام MIMO-OFDM وذلك عند استخدام خوارزمية مختبرات بل V-BLAST والتي تمكننا من كشف الإشارات في المستقبل بطريقة أفضل وبالتالي تحسن كبير في معدل نقل البيانات قد يصل إلى 30 b/s/Hz عند نسبة إشارة إلى ضجيج 20dB .

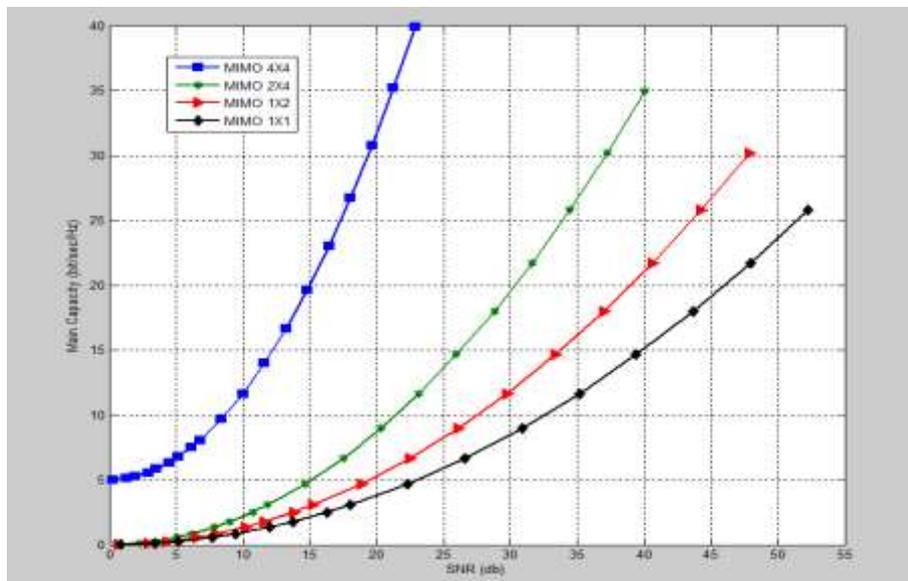


الشكل (8) معدل نقل البيانات في نظام MIMO-OFDM-VBLAST

أما الشكل (9) فيبين معدل نقل البيانات مع خوارزمية التصفير القسري ZF ونلاحظ التحسين الكبير في معدل نقل البيانات الذي قد يصل إلى 36 B/S/Hz وهذا يؤكد على أهمية كشف الإشارة في تحسين معدل نقل البيانات.



الشكل (9) معدل نقل البيانات في نظام MIMO-OFDM-VBLAST مع خوارزمية التصفير القسري ZF



الشكل (10) سعة النظام في حالة نظام MIMO-OFDM-VBLAST

الشكل (10) يظهر مقارنة في سعة النظام ومعدل نقل البيانات عند عدد من الهوائيات حيث تم تعديل المستقبل VBLAST مع خوارزمية متوسط مربع الخطأ MMSE وإنه عند هوائيات 4x4 يصل معدل نقل البيانات إلى حوالي 40(b/s/Hz) وهو مرتفع مقارنة مع النتائج الأخرى.

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- في هذه الدراسة تم عرض المفاهيم الرئيسية في سعة القناة وطرق تحسين معدل نقل البيانات من خلال تحسين كشف الإشارة في طرف الإرسال مع المحافظة على عرض حزمة ترددية ثابت من دون الزيادة في استطاعة الإرسال وأيضاً من خلال زيادة عدد الهوائيات في طرفي الإرسال والاستقبال
- 2- كذلك تم تحليل نظام MIMO-OFDM ودراسة معدل نقل البيانات مع دراسة نموذج القناة.

3-بينت الدراسة والنتائج التي تم الحصول عليها مدى التحسين الذي يمكن الحصول عليه باستخدام خوارزمية

V-BLAST

4- تحسن من معدل نقل البيانات حتى 20 B/S/Hz وذلك عند عدد محدد من الهوائيات في الدخل والخرج

4X4 وأيضا درسنا خوارزميتي التصفير القسري ZF ومتوسط مربع الخطأ MMSE و المقارنة بينهما وأن معدل الارسال يكون أفضل في حالة متوسط مربع الخطأ.

المراجع:

- [1] NIRMALENDU, B.S; R. BERA, M. MITRA. *CAPACITY AND V-BLAST TECHNIQUES FOR MIMO WIRELESS CHANNEL*, 2010 JATIT.
- [2] MADHAE, H. B; Pradeep, B. M. *Performance Evaluation of Space Time Block Coded Spatial Modulation, Vertical-BLAST and Diagonal-BLAST Space Time Block Code*, (IJCNWC), ISSN: 2250-3501 Vol.2, No4, August 2012.
- [3] JIANXUAN, D; Geoffrey, L. *Channel Estimation for D-BLAST OFDM Systems*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0250 ,2011.
- [4] NARAYAN, P; MAHESH, K. V, *BLAST Lattice Codes for MIMO Block Rayleigh Fading Channels*, University of Colorado, Boulder, CO 80309 ,2006.
- [5] HEMANGI, D; HARSH, G. *Capacity Analysis of MIMO OFDM System using Water filling Algorithm*, Institute of Engineering and Science (IPS Academy) Indore (M.P.), India, 2012.
- [6] YING, Z. *Downlink Adaptive Resource Allocation for a Multi-user MIMO OFDM System with and without Fixed Relays*, Technology University Darmstadt,GERMANY, 2010.
- [7] GORDON L. S; JOHN R. B. *Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications*, PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO.2, FEBRUARY 2004.
- [8] GOLDEN, G.D; FOSCHINI, C.J; VALENZUELA, R.A. *Detection algorithm and initial laboratory results using space-time communication architecture*, ELECTRONICS LETTERS, Vol. 35 No. 1, 2001.
- [9] DAVID, T; PRAMOD, V. *Fundamentals of Wireless Communications*, University of California, Berkeley, 2006.
- [10] SAMARENDRA, N. S; DEBJYOTI, G. *Channel Capacity and BER Performance Analysis of MIMO System with Linear Receiver in Nakagami Channel*, Sikkim Manipal University, Sikkim, India, 2013.
- [11] ANDREA G; SYED A. J; JINDAL N; VISHWANATH S. *Capacity Limits of MIMO Systems*, 2009.
- [12] Yu, W. *Spatial multiplex in downlink multiuser multiple-antenna wireless environments*, in Proceedings of IEEE Globecom, 2003.
- [13] Weingarten, H; Steinberg, Y; Shamai, S. "Capacity region of the degraded MIMO broadcast channel," in Proceedings of Int. Symp. Inform. Theory, July 2004.
- [14] B. Wang, J. Zhang, and A. Host-Madsen, "On the capacity of MIMO relay channels," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 51, no. 1, pp. 29–43, Jan. 2005.
- [15] Theja, N. & Kumar, P. *Architecture and Implementation of OFDM Transmitter and Receiver*, IJSETR, Volume 3, Issue 9. 2504-2707, 2014.
- [16] Swamy, M; Du, K. *Wireless Communication Systems From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies.*, Cambridge University Press, United States of America (2010).

[17] Kritika, S; Nishu, R; Ankita S. Study and Capacity Evaluation of SISO, MISO and MIMO RF Wireless Communication Systems, IJETT, Volume 9 Number 9, 2014.

[18] Waseem Abbas, Nasim Abbas, *EFFICIENT STBC FOR THE DATA RATE OF MIMO-OFDMA*, Sci.Int.(Lahore),28,247-255,2016

[19] J. Zyren. “*Overview of the 3GPP long term evolution physical layer*” freescale.com, July, 2007.

[20] P. Vidyullatha; R. Chandrasekhar; K. Rushendra Babu; B. Ajay Kumar, *Performance Analysis of PAPR in STBC MIMO-OFDM System under Different Modulation Schemes*, Gudlavalleru Engineering College, IJAREEIE, 2016.

[21] Majeed, H; Umar, R; Basit, A. *SMART ANTENNAS – MIMO, OFDM & SINGLE CARRIER FDMA FOR LTE*. Department of Electronic Engineering, Master, Linnaeus University, Sweden, 2011.

[22] Qazi, Y; Muhammad, S; Malik, J. *Performance Evaluation of Error Correcting Techniques for OFDM Systems*. Department of Electronic Engineering, Master, Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2014.