

## استخدام التشكيل متعدد المداخل - متعدد المخارج الأمثل لزيادة المدى في أنظمة اتصالات المركبات الجوية المسيّرة

د. حكمت عبد القادر راجح

استاذ في قسم الهندسة الإلكترونية والاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية

والكهربائية - جامعة البعث - سوريا.

Email: [dr.hekmat1rajeh@gmail.com](mailto:dr.hekmat1rajeh@gmail.com)

م. محمد عبد الرزاق بكار

طالب دكتوراه - قسم الهندسة الإلكترونية والاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية

والكهربائية - جامعة البعث - سوريا.

Email: [bakkarmb968@gmail.com](mailto:bakkarmb968@gmail.com)

### الخلاصة:

تعرض هذه المقالة نظام اتصالات لاسلكي يستخدم التعديل الرقمي بإزاحة الطور التربيعي (QPSK) Quadrature Phase Shift Keying و يعتمد على استخدام الأنظمة متعددة المداخل - متعددة المخارج (MIMO) Multiple Input Multiple Output في المركبات الجوية المسيّرة (UAV) Unmanned Aerial Vehicle. تم استخدام الترميز الكتلّي الزمني المكاني المتعامد (OSTBC) Orthogonal Space Time Block Code في تقنية التنوع الفضائي spatial diversity وذلك من أجل زيادة وثوقية/كفاءة وصلة الاتصالات اللاسلكية وبالتالي تحسين معدل الخطأ للنظام. قمنا بدراسة إمكانية توظيف التشكيل الأمثل لتحسين معدل الخطأ للنظام في زيادة مدى الاتصال للمركبة الطائرة المسيّرة أثناء حركتها. وقد تمت المقارنة بين حالة استخدام التشكيل الأمثل لـ MIMO-OSTBC وحالة استخدام التشكيل وحيد الدخل - وحيد الخرج Single Input Single Output (SISO) عند كل من المرسل والمستقبل. بينت النتائج أن التشكيل (2×4) لـ MIMO-OSTBC هو التشكيل الأفضل والذي قدم تحسناً في زيادة مدى الاتصال بمتوسط مقداره 3.95 مرة عن التشكيل SISO عند استطاعة إرسال  $P_T=40\text{dBm}$ . بنفس الوقت أصبح نظام SISO غير قادر على تحقيق الاتصال عند مسافة تصل إلى حدود 116km عند  $10^{-3}$  لقيمة معدل خطأ البت (BER) Bit Error Rate و مسافة 12.2km عند  $BER=10^{-7}$  بين المرسل والمستقبل.

الكلمات المفتاحية: النظام متعدد المداخل - متعدد المخارج - النظام وحيد الدخل - وحيد الخرج - الترميز الكتلّي الزمني المكاني المتعامد - التعديل الرقمي بإزاحة الطور التربيعي - المركبات الجوية المسيّرة.

## 1- مقدمة:

يمكن تعريف الأنظمة المسيرة بأنها الأنظمة التي تعتمد على استخدام التحكم عن بعد بجسم متحرك، أو أن يحتوي على مسار مبرمج يقوم الجسم باتباعه، بهدف نقل معلومات من مناطق لا يرغب المستثمر بالتواجد بها إلى المنطقة التي يتواجد فيها المستثمر. تتألف هذه الأنظمة من جزئين رئيسيين وهما: المركبة الجوية المسيرة (UAV) والمحطة الأرضية. وبسبب القيود المفروضة على الأنظمة المسيرة من حجم ووزن وزمن تنفيذ والاستطاعة الكبيرة المطلوبة لنظام الاتصالات التقليدي SISO المستخدم في الأنظمة المسيرة فإن الوصول لمسافات كبيرة بين UAV والمحطة الأرضية يحتاج إلى استطاعة كبيرة لا نستطيع تأمينها بسبب طبيعة مصدر الطاقة في الأنظمة المسيرة (البطاريات) أو لاستخدام هوائيات موجهة للمسافات البعيدة وأخرى غير موجهة للمسافات القريبة وهذا أيضاً غير مناسب في الأنظمة المسيرة أو لاستخدام تقنية تشفير القناة Channel Coding من أجل تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج Signal to Noise Ratio (SNR) حيث تحتاج هذه التقنية إلى إجراء عمليات المعالجة والتصحيح في طرف الاستقبال وهذا يجعل الإشارة المستقبلية ليست بالزمن الحقيقي علماً أن الأنظمة المسيرة تحرص على رؤية الصورة المستقبلية بالزمن الحقيقي. لذلك من أجل إيجاد الحل المناسب بعيداً عن قيود الأنظمة المسيرة وضمان وصول الإشارة بمستوى أعلى من حساسية المستقبل دون الحاجة إلى زيادة لكل من استطاعة المرسل أو عرض المجال Bandwidth الترددي كان لا بد من استبدال نظام الاتصالات التقليدي SISO بنظام MIMO-OSTBC ومن ثم لا بد من تحديد نوع الخفوت (fading) الذي يعاني منه هذا النوع من الاتصالات، وهذا يتطلب تحديد الشروط التي يجب أن تحققها معاملات النظام لتبقى قناة الاتصال بطيئة وذات خفوت مسطح flat fading. تم استخدام البارامترات الآتية لنظام الاتصال المدروس:

- التعديل الرقمي المستخدم في الدراسة هو QPSK، وذلك لأن العمل في اتصالات الأنظمة المسيرة يحتاج إلى أقل عرض مجال ترددي ممكن لعدم التأثير على باقي أنظمة الاتصال الأخرى (بسبب مسافة الاتصال الكبيرة) وأقل نسبة إشارة إلى الضجيج SNR ممكنة (بسبب مصدر التغذية هو البطاريات)، ويتطلب تحقيق معدل خطأ بت Bit Error Rate (BER) جيد لهذه الأنظمة لذلك

تم استخدام نظام MIMO-OSTBC الذي يحسن وثوقية وصلة الاتصال.

- تم اعتماد مجال معدل خطأ البت المقبول هو  $10^{-7}$  [10<sup>-7</sup>]، وهو المجال المعتمد لنقل الصورة [1]، ويتم تصنيف جودة الصورة تبعاً لقيمة معدل خطأ البت.

- التردد المستخدم هو  $F=2.4\text{GHz}$  ضمن مجال Ultra high-frequency (UHF) [2,3]، سرعة UAV هي  $180\text{km/h}$  [3] من أجل أخذ أثر دوبلر.

- سرعة المعطيات هي  $R_b=8.4\text{Mbps}$  وهي السرعة التي يتم استخدامها عند نقل الصورة المضغوطة باستخدام المعيار MPEG4.

- تم إجراء المحاكاة على تشكيلات نظام MIMO-OSTBC بدءاً من  $2 \times 1$  وحتى  $4 \times 4$  كحد أقصى وذلك لصعوبة استخدام أكثر من أربعة هوائيات في طرف الإرسال ذلك أن UAV ذو أبعاد محددة من أجل تأمين تباعد كافي ما بين الهوائيات بحيث نضمن عدم وجود ترابط ما بين الإشارات المرسل من هذه الهوائيات، علماً أن البيئة التي يتم ضمنها الاتصال في حالة الأنظمة المسيرة تحتوي على

عدد قليل من الانعكاسات فيمكن البرهان على أن البعد ما بين الهوائيات يجب أن يكون أكبر من عشرة أضعاف طول الموجة على الأقل للحصول على ترابط منخفض [4].

- تم إجراء المحاكاة على برنامج MATLAB R2013a على حاسب محمول بمواصفات:

Core I3, CPU 1.8GHz, RAM 6 GB, 64-bit Operating System.

## 2- نموذج القناة في الأنظمة المسيرة:

يمكن كتابة تابع نقل القناة على شكل مجموع حدين، الحد الأول يعبر عن الخفوت واسع النطاق Large-scale fading وهو ينتج عن النمذجة الفيزيائية للقناة. أما الحد الثاني فيعبر عن الخفوت ضيق النطاق Small-scale fading وهو ناتج عن النمذجة الإحصائية للقناة [5,6].

### 2-1- نمذجة الخفوت واسع النطاق:

ثمة هناك العديد من النماذج الفيزيائية المستخدمة في الاتصالات اللاسلكية، أحدها نموذج الأرض المستوية (ويطلق عليه أيضاً نموذج الشعاعين) الذي يستخدم في

الارتفاع الأعظمي المسموح للعائق بين نقطة التلاقي والمحطة الأرضية بحيث لا يتجاوز القيمة المعطاة بالعلاقة (2) [7].

$$H_R = \frac{\lambda d}{8(h_r + h_t)} \quad (2)$$

حيث  $\lambda$ : طول الموجة. من أجل ارتفاع هوائي استقبال 5m، وارتفاع UAV عن سطح البحر 5000m [8]، والمسافة بين المرسل والمستقبل 300Km [8]، وتردد الحامل  $f=2.4\text{GHz}$ ، عندئذ يكون أقصى بعد لنقطة التلاقي لن يزيد عن  $D_2 = 300\text{m}$ ، وهي مسافة صغيرة جداً بالنسبة للبعد بين UAV والمحطة الأرضية، ويكون الارتفاع الأعظمي للعوائق بحدود  $H_R = 1\text{m}$ ، لذلك يتطلب تفريغ منطقة المحطة الأرضية (المطار) لمسافة 300m وأن تكون خالية من العوائق بارتفاع أعظمي لا يتجاوز 1m. يعتمد نموذج الشعاعين على وصول نسختين من الإشارة المرسلة إلى المستقبل، أحدها هي المسار المباشر والأخرى ناتجة عن الانعكاس عن سطح الأرض.

المناطق الخالية تقريباً من العوائق وعندما تكون المسافة بين المرسل والمستقبل كبيرة، وهو مناسب لنمذجة الخفوت واسع النطاق في الأنظمة المسيرة [5,6]، حيث تكون نقطة الانعكاس عن سطح الأرض قريبة جداً من محطة

الاستقبال بسبب فرق الارتفاع الكبير بين UAV والمحطة

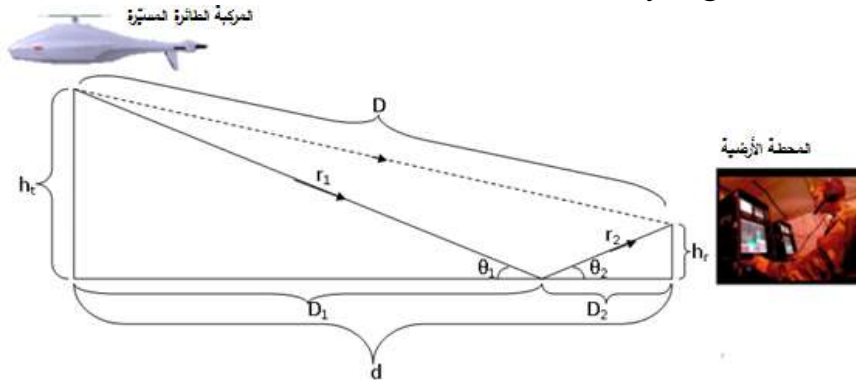
الأرضية، وهذا ما يبينه الشكل (1). يعطى بعد نقطة تلاقي الشعاع المنعكس عن الأرض إلى المحطة الأرضية بالعلاقة (1) [7].

$$D_2 = \frac{dh_r}{h_r + h_t} \quad (1)$$

حيث  $d$ : المسافة الفاصلة بين UAV والمحطة الأرضية على سطح الأرض عند منطقة المحطة الأرضية،  $h_r$ :

ارتفاع هوائي الاستقبال عن سطح الأرض،  $h_t$ : ارتفاع المركبة الطائرة المسيرة عن سطح الأرض عند منطقة المحطة الأرضية.

وكذلك حتى يكون اعتبار سطح الأرض سطحاً عاكساً وليس نائراً scatter اعتباراً صحيحاً يجب أن يكون معامل ريليه Rayleigh criterion ( $H_R$ ) وهو



الشكل (1) خفوت نموذج الشعاعين [2,3].

تحتاج الإشارة المنعكسة إلى وقت أطول للوصول إلى المستقبل، ذلك أن المسافة التي تعبرها هذه الإشارة أطول من المسافة التي تعبرها الإشارة المباشرة، وتأتي أهمية التأخير الزمني بين هاتان الإشارتان من كونه يحدد تشتت التأخير Delay spread والذي يدخل في تحديد طبيعة القناة بالنسبة للخفوت (خفوت مسطح أم حساس للتردد)، من أجل حساب هذا التأخير كان لا بد من حساب المسافة التي يقطعها المسار المنعكس وفق العلاقة

$$r = r_1 + r_2 = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} \quad (3)$$

تتسبب الإشارة المنعكسة عن الأرض بإضافة حد إلى الخفوت واسع النطاق يجب أن يتم أخذه بعين الاعتبار عند القيام بحسابات ميزانية الوصلة Link budget الراديوية، ويعطى هذا الحد بالعلاقة (4) ويطلق عليه اسم خفوت نموذج الشعاعين [9].

تحتاج الإشارة المنعكسة إلى وقت أطول للوصول إلى المستقبل، ذلك أن المسافة التي تعبرها هذه الإشارة أطول من المسافة التي تعبرها الإشارة المباشرة، وتأتي أهمية التأخير الزمني بين هاتان الإشارتان من كونه يحدد تشتت التأخير Delay spread والذي يدخل في تحديد طبيعة القناة بالنسبة للخفوت (خفوت مسطح أم حساس للتردد)، من أجل حساب هذا التأخير كان لا بد من حساب المسافة التي يقطعها المسار المنعكس وفق العلاقة [7] (3).

المتراحة المعطاة بالعلاقة (8) وذلك عند تثبيت كل من المسافة وارتفاع هوائي الاستقبال.

$$h_t > \frac{3}{4} \left( \frac{d}{3570} - \sqrt{\frac{4}{3} (h_r + h_g)} \right)^2 - (8)$$

$h_g$  القيد الثاني هو حدود الارتفاع الذي تفرضه التقنية المستخدمة في تصميم وبناء UAV، حيث لا يمكن للمركبة الطائرة المسيرة أن تتجاوز هذا الارتفاع لاعتبارات تصميمية يتم عادة تزويدها من قبل الجهة المنتجة كشرط من شروط الاستثمار، وقد افترضنا هنا أن هذا الحد هو:  $h_{tech} = h_t + h_g = 5000m$ ، وهي قيمة عملية لمثل هذه الأنظمة [8].

القيد الثالث هو الحد الذي إذا ما ازداد ارتفاع UAV عنه فإن القناة ستعاني من خفوت حساس للتردد Frequency Selective fading. تم حساب هذا الحد اعتماداً على تشتت التأخير وهو الفرق بين زمن انتشار أطول مسار ( $\tau_i$ ) وزمن انتشار أقصر مسار ( $\tau_j$ ) يصلان إلى المستقبل ويرمز له بالرمز ( $T_d$ ) ويعطى بالعلاقة (9) [11].

$$T_d = \max_{i,j} |\tau_i - \tau_j| (9)$$

اعتماداً على العلاقة (3) نكتب علاقة تشتت التأخير في حالة نموذج الشعاعين وفق العلاقة (10) [12].

$$T_d = \frac{\sqrt{(h_t+h_r)^2+d^2} - D}{3 \times 10^8} (10)$$

حيث  $D$ : المسافة الفاصلة بين النقطة التي يتوضع فيها هوائي الإرسال والنقطة التي يتوضع فيها هوائي الاستقبال ويمكن أن تحسب وفق العلاقة (11).

$$D = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} (11)$$

يمكن إعادة كتابة العلاقة (10) وفق العلاقة (12).

$$T_d = \frac{\sqrt{(h_t+h_r)^2+d^2} - \sqrt{(h_t-h_r)^2+d^2}}{3 \times 10^8} (12)$$

العلاقة (12) تعطي تشتت التأخير في حالة نموذج الشعاعين بدلالة معاملات نظام الاتصالات. يمكن مناقشة نوع الخفوت إما بالاعتماد على تشتت التأخير  $T_d$  وزمن الرمز  $T_s$  المرسل ضمن قناة الاتصال أو من خلال عرض مجال التماسك  $W_c$  (Coherent bandwidth) وعرض مجال الإشارة  $W$  (Signal bandwidth)

(4)

$$|F|^2 =$$

$$6 + 20 \log_{10} \left| \sin \left( \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right| \text{ [dB]}$$

يتسبب هذا الحد بوضع قيود على ارتفاع المركبة الطائرة المسيرة حيث نجد في [9] علاقة الارتفاعات الأمثلية التي من أجلها يكون خفوت نموذج الشعاعين يساوي 6dB، أي يضيف ربح إلى استطاعة الإشارة المستقبلية، وبنفس الطريقة يمكن إيجاد علاقة الارتفاعات الحرجة أو العمياء وهي الارتفاعات التي تؤدي إلى جعل الحد  $|F|^2$  سالباً وذو قيمة كبيرة بالقيمة المطلقة، مما يسبب انهيار استطاعة المستقبل بحيث تصبح قيمتها أقل من حساسية المستقبل بكثير. تبين العلاقة (5) الارتفاعات الأمثلية وفيها  $n$  عدد صحيح فردي موجب، و تبين العلاقة (6) الارتفاعات العمياء وفيها  $n$  عدد صحيح موجب [9].

$$h_{t,opt} = n \frac{\lambda d}{4h_r} (5)$$

$$h_{t,blind} = n \frac{\lambda d}{2h_r} (6)$$

قمنا في الشكل (2) بتحديد قيم هذه الارتفاعات عند المسافة الفاصلة بين UAV والمحطة الأرضية ( $d=0$ ) 300km)، تردد العمل  $f=2.4\text{Ghz}$  وارتفاع هوائي الاستقبال  $h_r=5m$  وذلك باعتبار أن منطقة المحطة الأرضية موازية لسطح البحر، أي أن ارتفاع منطقة المحطة الأرضية عن سطح البحر هو  $h_g=0$ .

نلاحظ في الشكل (2) أن هناك ثلاثة قيود على ارتفاع المركبة الطائرة المسيرة UAV: الأول قيد خط النظر وهو الذي يحدد القيم الدنيا لارتفاع UAV ويمكن حسابه من العلاقة (7) التي تحدد المسافة العظمى لتحقيق الأفق الراديوي بدلالة نصف قطر الأرض الفعال Effective Earth Radius (EER) [10].

$$d_{max} = 3570 \left( \sqrt{\frac{4}{3} (h_t + h_g)} + (7) \right)$$

حيث:  $h_g$  ارتفاع الأرض التي تتوضع عليها المحطة الأرضية عن سطح البحر. حتى تتحقق العلاقة (7) يجب أن يحقق ارتفاع هوائي الإرسال

وباستخدام العلاقة (12) نستطيع أن نكتب العلاقة (14) على الشكل المبين بالعلاقة (15).

$$\frac{\sqrt{(h_t+h_r)^2+d^2}-\sqrt{(h_t-h_r)^2+d^2}}{3 \times 10^8} < 0.01 * \frac{n}{R_b} \quad (15)$$

بإصلاح العلاقة (15) نحصل على شرط بقاء القناة بحالة خفوت مسطح والمعطى بالعلاقة (16).

$$h_{t,max} = \frac{15 \times 10^5 n}{R_b} \sqrt{\frac{R_b h_r^2 + R_b^2 d^2 - 225 \times 10^{10} n^2}{R_b^2 h_r^2 - 225 \times 10^{10} n^2}} \quad (16)$$

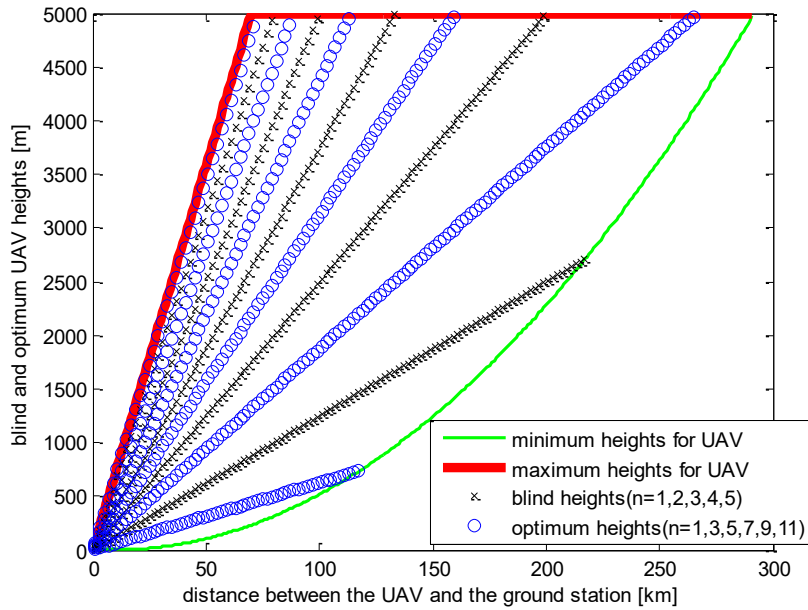
(bandwidth) ، تكون القناة في حالة خفوت مسطح عند  $T_d \ll T_s$  أو  $w_c \gg w$  ، وتكون القناة في حالة خفوت حساس للتردد عند  $T_d \gg T_s$  أو  $w_c \ll w$  . [11]

بالرجوع إلى نموذج الشعاعين، وبفرض استخدام التعديل M-PSK حيث  $M=2^n$  و  $n$  هو عدد الخانات في الرمز  $T_s$ ، يمكن أن تعطى فترة الرمز بالعلاقة (13).

$$T_s = \frac{n}{R_b} \quad (13)$$

$R_b$ : هي سرعة المعطيات. حتى تكون القناة ذات خفوت مسطح flat fading يجب أن تتحقق المتراجحة المعطاة بالعلاقة (14) [7,11,12].

$$T_d \ll T_s \leftrightarrow T_d < 0.01 * \frac{n}{R_b} \quad (14)$$



الشكل (2): قيم الارتفاعات الأمثلية والعمياء والارتفاعات الدنيا والعظمى لـ UAV بدلالة المسافة وذلك عند البارامترات الآتية:

$$.QPSK, F=2.4GHz, R_b=8.4Mbps, h_g=0m, h_r=5m$$

$$h_l[m] = \sqrt{\frac{k}{k+1}} \sigma_1^2 e^{j\theta} + \sqrt{\frac{1}{k+1}} \mathcal{CN}(0, \sigma_1^2) \quad (17)$$

حيث:  $k$  معامل رايس، وهو يعبر عن علاقة الطاقة ما بين حزمة خط النظر وما بين الأشعة المنعكسة (كلما ازدادت  $k$  كان خط النظر أقوى)،  $\theta$  هي متحول عشوائي

## 2-2- نمذجة الخفوت ضيق النطاق:

عندما يكون مسار خط النظر Line Of Sight (LOS) هو الغالب يمكن استخدام نموذج رايس Rice، ويمكن كتابة تابع تحويل قناة رايس Rice وفق العلاقة (17) [12,13].



تخفف من تعقيد المستقبل من جهة أخرى ذلك أن الأنظمة المسيرة بحاجة إلى سرعة عالية في الكشف وبالتالي إلى تعقيد أقل في جهة الاستقبال. هناك مصفوفات أخرى تحقق مبدأ التعامد [18-20]، إلا أنها تحتاج إلى تقسيم زمني أكبر وهذا يزيد في تعقيد المستقبل وبالتالي لا يناسب التطبيق. في جميع المصفوفات يتم التعبير عن الفترات الزمنية من خلال الأسطر وعن الهوائيات من خلال الأعمدة.

عند استخدام هوائيين في الإرسال فإن مصفوفة الترميز هي مصفوفة الأموتي وفي هذه الحالة يكون معدل الترميز code rate مساوياً إلى الواحد full data rate وبالتالي فإن معدل المعطيات بالقناة لن يتأثر.

تعطى مصفوفة الأموتي بالعلاقة (18) [17].

$$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ -S_2^* & S_1^* \end{bmatrix} \quad (18)$$

أما في حال استخدام ثلاثة هوائيات في طرف الإرسال ففي هذه الحالة يوجد معدلين مختلفين:

#### معدل الترميز 1/2:

في هذه الحالة تعطى مصفوفة الترميز بالعلاقة (19) [21-24].

$$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 & 0 \\ -S_2^* & S_1^* & 0 \\ 0 & 0 & S_1 \\ 0 & 0 & -S_2^* \end{bmatrix} \quad (19)$$

من المصفوفة نجد أن رمزين فقط يتم إرسالهما ضمن أربع فترات زمنية ولذلك فإن معدل المعطيات سينخفض إلى النصف وهذا ما سبب كون معدل الترميز هو 1/2.

#### معدل الترميز 3/4:

في هذه الحالة تعطى مصفوفة الترميز بالعلاقة (20) [21,22].

$$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ -S_2^* & S_1^* & 0 \\ S_3^* & 0 & -S_1^* \\ 0 & S_3^* & -S_2^* \end{bmatrix} \quad (20)$$

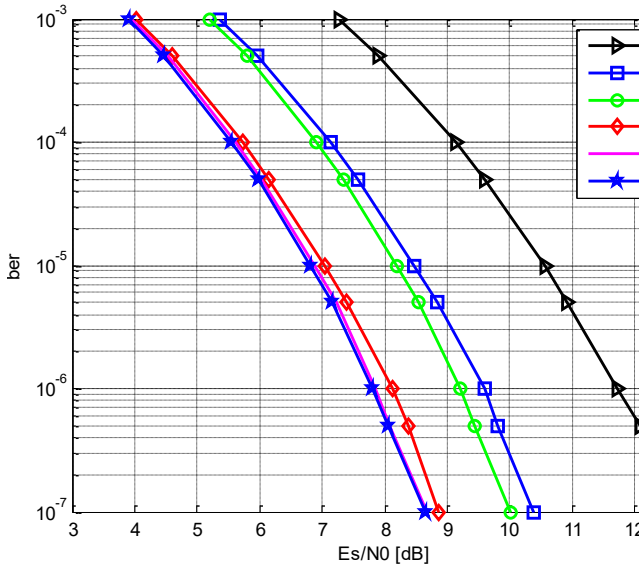
من المصفوفة نجد أن ثلاثة رموز يتم إرسالهما ضمن أربع فترات زمنية ولذلك فإن معدل المعطيات سينخفض إلى ثلاثة أرباع وهذا ما سبب كون معدل الترميز 3/4. في حال استخدام أربع هوائيات في طرف الإرسال في هذه الحالة يوجد أيضاً معدلين ترميز مختلفين:

بتوزيع منتظم ضمن المجال  $[0, 2\pi]$ ،  $\mathcal{CN}(0, \sigma_1^2)$  هو متحول عشوائي دائري متناظر بتوزيع غاوسي، الحد الأول في العلاقة (17) يمثل الجزء المرئي specular component، أما الحد الثاني فيمثل المسارات المنتثرة والمنعكسة diffuse component، عندما نضع  $k=0$  نحصل على توزيع ريليه Rayleigh [14]. في الأنظمة المسيرة نعمل على تأمين خط نظر دائم بين UAV والمحطة الأرضية، لذلك فإن خفوت القناة هو من نوع رايس، وبسبب قلة العوائق الموجودة حول المحطة الأرضية فإن قيمة معامل رايس تكون عالية، غالباً ما يتم اعتماد  $k=10$  في هذه الأنظمة [6,15,16].

### 3- الترميز الكتلي الزمني المكاني المتعامد (OSTBC):

في هذا الترميز يتم بناء مصفوفة الترميز حسب عدد هوائيات الإرسال، في حال كان عدد هوائيات الإرسال إثنان فإن مصفوفة الترميز هي مصفوفة الأموتي Alamouti OSTBC المتعامدة المشهورة، أما في حالة أكثر من هوائيين في الإرسال يختلف بناء مصفوفة الترميز المتعامدة إما على حساب تعقيد المصفوفة أو على حساب معدل المعطيات. الهدف منه زيادة ربح التنوع diversity Gain والذي من شأنه زيادة وثوقية القناة ذات الخفوت fading وهذا ما نسعى إليه في الأنظمة المسيرة. تمتاز المصفوفات المتعامدة بسهولة التنفيذ وسهولة الاستقبال الذي يمكن أن يتم بواسطة المعالجة الخطية في المستقبل [17]. تختلف مصفوفات الترميز باختلاف مخطط الكوكبة Constellation diagram لنظام التعديل فيما إذا كانت الإشارات حقيقية أم عقدية، في هذا البحث اعتمدنا التعديل QPSK وسوف نهتم فقط بالمصفوفات المستخدمة في الحالة العقدية. اعتماداً على نظرية التصميم المتعامد فقد برهن على أنه لا يمكن بناء مصفوفات متعامدة بمعدل معطيات كامل full data rate إلا في حالة وجود هوائيان في الإرسال [18]، أما في حالة ثلاثة هوائيات أو أكثر فإن المصفوفات المتعامدة التي نحصل عليها ستخفف معدل المعطيات في القناة بنسبة 3/4 أو بـ 1/2. هذا التعامد هو السبب الرئيسي في محدودية كمية المصفوفات المتعامدة التي يمكن استخدامها. في هذا البحث قمنا باستخدام المصفوفات الأكثر شيوعاً من جهة والتي

- التشكيل (2 × 4) أفضل من التشكيل (4 × 2) من حيث معدل خطأ البت والحجم والوزن على UAV.  
- التشكيل (3 × 4) أفضل من التشكيل (4 × 3) من حيث معدل خطأ البت والحجم والوزن على UAV.  
قمنا برسم منحنيات معدل الخطأ للتشكيلات الستة المتبقية للمقارنة وهي: (3 × 3), (2 × 3), (2 × 2), (4 × 4), (3 × 4), (2 × 4) كما هو مبين بالشكل (3).



الشكل (3) التشكيلات الستة المتبقية للمقارنة

نلاحظ من الشكل (3) أن زيادة هوائي في الاستقبال (الانتقال من (2 × 3) إلى (2 × 4) أفضل من زيادة هوائي في الإرسال (الانتقال من (2 × 3) إلى (3 × 3)) لذلك يمكن استبعاد التشكيل (3 × 3).  
يبين الشكل (3) أن التشكيلات الثلاثة (2 × 2), (2 × 3), (2 × 4) تشكل نفس الحجم والوزن على المركبة الطائرة المسيّرة، لذلك سيتم استبعاد التشكيلين (2 × 2), (2 × 3) كون التشكيل (2 × 4) يحقق وفر في نسبة الإشارة إلى الضجيج عن كلا التشكيلين بمقدار 1.52dB و 3.92dB على الترتيب عند معدل خطأ  $10^{-7}$ . لذلك تعتبر التشكيلات (2 × 4), (3 × 4), (4 × 4) هي أفضل ثلاث تشكيلات من ناحية معدل خطأ البت كما هو مبين بالشكل (4).

### معدل الترميز 1/2:

في هذه الحالة تعطى مصفوفة الترميز بالعلاقة (21) [21,22].

$$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 & 0 & 0 \\ -S_2^* & S_1^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_1 & S_2 \\ 0 & 0 & -S_2^* & S_1^* \end{bmatrix} \quad (21)$$

من المصفوفة نجد أن رمزين فقط يتم إرسالهما ضمن أربع فترات زمنية ولذلك فإن معدل المعطيات سينخفض للنصف وهذا ما سبب كون معدل الترميز 1/2.

### معدل الترميز 3/4:

في هذه الحالة تعطى مصفوفة الترميز بالعلاقة (22) [21,22].

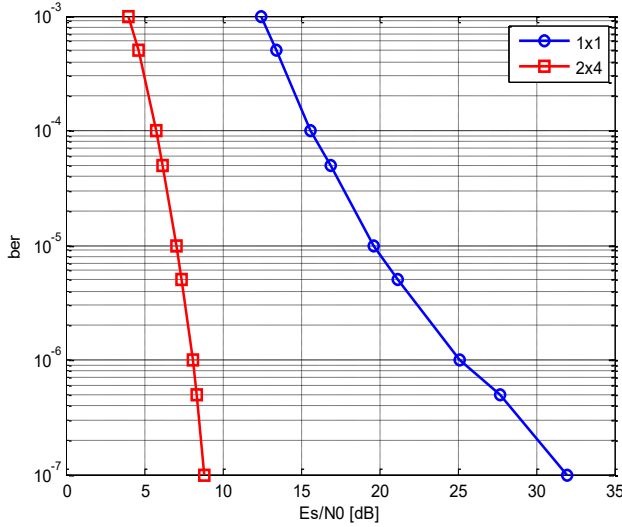
$$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & 0 \\ -S_2^* & S_1^* & 0 & S_3 \\ S_3^* & 0 & -S_1^* & S_2 \\ 0 & S_3^* & -S_2^* & -S_1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

من المصفوفة نجد أن ثلاث رموز يتم إرسالهما ضمن أربع فترات زمنية ولذلك فإن معدل المعطيات سينخفض إلى ثلاثة أرباع وهذا ما سبب كون معدل الترميز 3/4.

## 4-التصميم والمحاكاة Design and Simulation

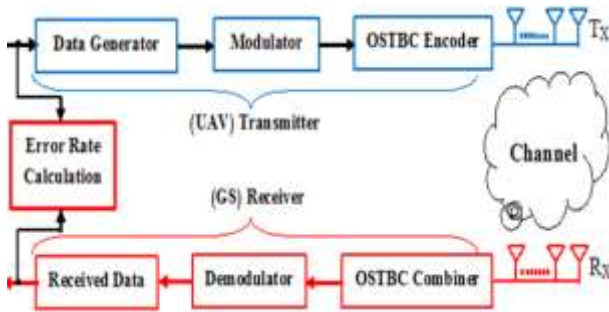
تم استخدام برنامج MATLAB- R2013a من أجل التصميم والمحاكاة، تم بناء نماذج المحاكاة للتشكيلات الأتية: (2 × 1), (2 × 2), (2 × 3), (2 × 4), (3 × 1), (3 × 2), (3 × 3), (3 × 4), (4 × 1), (4 × 2), (4 × 3), (4 × 4).  
بينت نتائج المحاكاة للتشكيلات الاثنتي عشرة السابقة بعد توحيد سرعة المعطيات المرسله ضمن قناة الاتصال (بسبب الحاجة إلى نفس عرض المجال الترددي لكافة التشكيلات المدروسة) ما يلي:

- التشكيل (2 × 2) أفضل من التشكيلات (2 × 1), (3 × 1), (4 × 1) من حيث معدل خطأ البت والحجم والوزن على المركبة الطائرة المسيّرة.  
- التشكيل (2 × 3) أفضل من التشكيل (3 × 2) من حيث معدل خطأ البت والحجم والوزن على UAV.



الشكل (5) نتائج المحاكاة للتشكيلين  $1 \times 1, 2 \times 4$

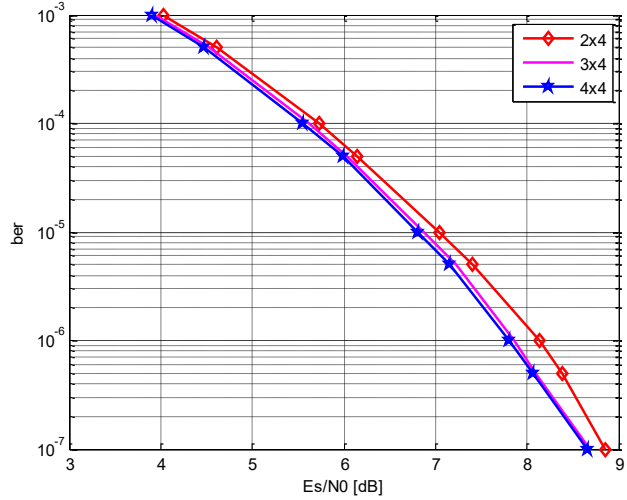
يبين الشكل (6) المخطط الصندوقي لنظام الاتصالات المراد تصميمه، والذي يتألف من قسم المرسل (UAV) والمكون من مولد معطيات ثنائية، المعدل، مرمز OSTBC، ثم ترسل الرموز عبر الهوائيات المتعددة إلى قناة الاتصال، أما قسم المستقبل (المحطة الأرضية) مكون من مفك ترميز، كاشف تعديل، المعطيات المستقبلية، بعدها حساب معدل الخطأ للنظام.



الشكل (6) المخطط الصندوقي لنظام MIMO-OSTBC

يبين الشكل (7) المخطط الصندوقي لقناة الاتصال للنظام MIMO-OSTBC المدروس.

يبين الشكل (4) أن أكبر قيمة تحسن يقدمها التشكيل  $(4 \times 4)$  عن التشكيل  $(2 \times 4)$  هي  $0.33 \text{ dB}$  على كامل مجال معدل خطأ البت المعتمد في الدراسة وهو  $[10^{-7} \ 10^{-3}]$ ، وهذه القيمة تعد قيمة صغيرة ومهملة لذلك سيتم اعتماد التشكيل  $(2 \times 4)$  كأفضل تشكيل MIMO-OSTBC من حيث المعالجة والحجم والوزن و يعد هو أفضل تشكيل مناسب للأنظمة المسيرة.

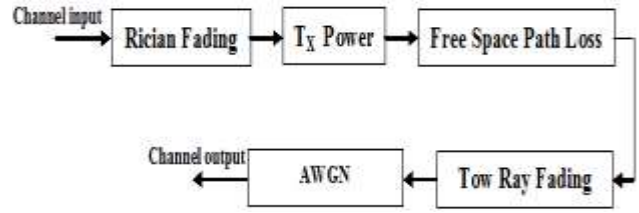


الشكل (4) نتائج المحاكاة للتشكيلات الثلاث

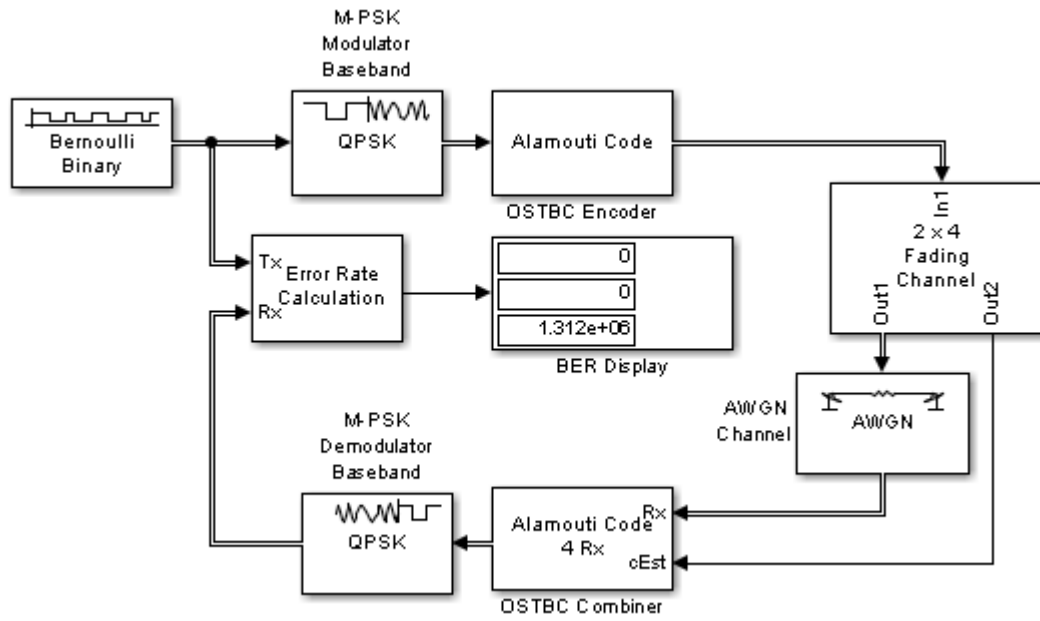
قمنا بإجراء محاكاة لنظام الاتصال التقليدي SISO من أجل المقارنة مع التشكيل  $2 \times 4$  لمعرفة مدى التحسن الذي قدمه التشكيل  $2 \times 4$  في معدل الخطأ والإستفادة من هذا التحسن في زيادة مدى الاتصال للمركبة الطائرة المسيرة كما سنرى لاحقاً. يبين الشكل (5) نتائج المحاكاة للتشكيلين  $(1 \times 1), (2 \times 4)$ .



تم بناء نماذج المحاكاة لكافة التشكيلات الاثنتي عشرة الأضفة الذكر من أجل الحصول على النتائج المبينة في الاشكال (3)،(4)،(5) ، وقد تم الاكتفاء بعرض نموذج المحاكاة للتشكيل  $2 \times 4$  المبين في الشكلين (8)،(9).  
يبين الشكل (8) نموذج المحاكاة للتشكيل  $2 \times 4$  :

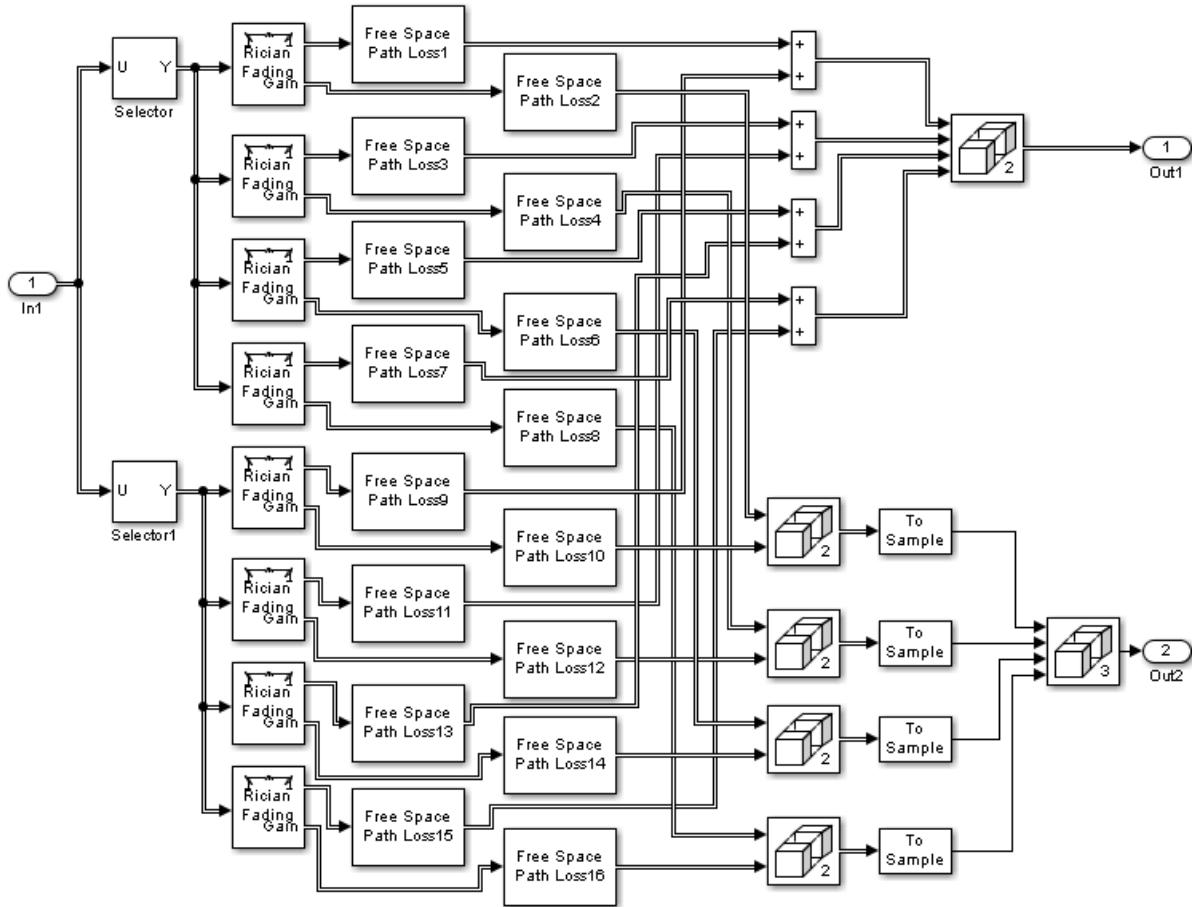


الشكل (7) المخطط الصندوقي لقناة الاتصال



الشكل (8) نموذج المحاكاة للتشكيل  $2 \times 4$

يبين الشكل (9) نموذج القناة التفصيلي والمسمى بـ  $2 \times 4$  Fading Channel في الشكل (8):



الشكل (9) نموذج القناة للتشكيل  $2 \times 4$

الارتفاع لاعتبارات تصميمية، وقد اعتمدنا هذا الارتفاع في الدراسة هو 5000m.

لكي نضمن عدم إنهيار الاستطاعة المستقبلية بسبب وجود الإشارة المنعكسة عن الأرض يجب أن تقع الارتفاعات المختارة لـ UAV أثناء تنفيذ المسار المطلوب ضمن أحد مجالات الارتفاعات الأمثلية والتي نضمن فيها بقاء فرق الصفحة بين الإشارة المباشرة والمنعكسة أقل من القيمة التي تؤدي إلى جعل نسبة الإشارة إلى الضجيج على دخل الكاشف غير كافية لتأمين احتمال الخطأ المقبول ضمن المجال  $[10^{-3} \ 10^{-7}]$ ، إذا عند كل مسافة فاصلة بين UAV والمحطة الأرضية يوجد حد أدنى وحد أعلى، بالإضافة إلى مجالات من الارتفاعات الأمثلية والارتفاعات العمياء للمركبة الطائرة المسيّرة. أحد أهم المشاكل التي تم معالجتها عند الانتقال من أنظمة SISO إلى أنظمة MIMO-OSTBC هي زيادة مدى الاتصال لـ

## 5- زيادة المدى الذي يحدثه التشكيل $2 \times 4$ عن التشكيل $1 \times 1$ :

نلاحظ من الشكل (2) أن المركبة الطائرة المسيّرة تعمل ضمن منطقة محددة بثلاثة قيود لارتفاعها وهي:

- 1- حسب العلاقة (16) يوجد حد أعلى يجب ألا تتجاوزه المركبة الطائرة المسيّرة وإلا أصبحت القناة حساسة للتردد (Frequency Selective)، ويتعلق هذا الارتفاع بالمسافة بين المرسل والمستقبل.
- 2- بسبب كروية الأرض فيجب أن تحقق UAV ارتفاع الحد الأدنى وفق علاقة الأفق الراديوي (8) حتى يتم تأمين اتصال صحيح.
- 3- الارتفاع الذي تفرضه تكنولوجيا الأنظمة المسيّرة، حيث لا يمكن لـ UAV أن تتجاوز هذا

$$P_R = \frac{P_T}{4} \times \left(\frac{\lambda}{\pi d}\right)^2 \quad (29)$$

حتى يكون الاتصال محققاً يجب أن يتحقق الشرط  $P_R = P_{req}$ ، وبالتالي يمكن أن نكتب من العلاقتين (23)، (29) الصيغة المبينة بالعلاقة (30).

$$\frac{P_T}{4} \times \left(\frac{\lambda}{\pi d}\right)^2 = \frac{\bar{Y}_T N_0 R_b}{2} \quad (30)$$

بإصلاح العلاقة (30) تكتب بالعلاقة (31).

$$d = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{P_T}{2\bar{Y}_T N_0 R_b}} \quad (31)$$

هذه العلاقة صحيحة فقط عندما يكون المدى أقل من المدى الأعظمي المحسوب من العلاقة (7) والذي يسمح به أفق الاتصال حيث يستقر المدى على المدى الأعظمي مهما زادت استطاعة الإرسال وفق العلاقة (31).

عندما تكون استطاعة الإرسال على UAV أقل من الاستطاعة المطلوبة لبلوغ المدى الأعظمي للتشكيل  $2 \times 4$ ، في هذه الحالة يعطى ربح المدى بالعلاقة (32):

$$\Delta d = d_{2 \times 4} - d_{1 \times 1} \quad (32)$$

من العلاقتين (31) و (32) نكتب ربح المدى بالعلاقة (33):

$$\Delta d = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{P_T}{2N_0 R_b}} \left( \frac{1}{\sqrt{\bar{Y}_{2 \times 4}}} - \frac{1}{\sqrt{\bar{Y}_{1 \times 1}}} \right) \quad (33)$$

اعتماداً على العلاقة (33) و الشكل (5) ومن أجل البارامترات التالية:

$$R_b = 8.4 \text{ Mbps}, f = 2.4 \text{ GHz}, P_T = 40 \text{ dBm}$$

يمكن حساب توفير المدى للتشكيل  $2 \times 4$  بالمقارنة مع التشكيل  $1 \times 1$  كما هو مبين بالشكل (10).

يبين الشكل (10) أن قيمة ربح المدى لا تقل عن 163Km وهذا ما يدل على قدرة الأنظمة ذات الهوائيات المتعددة على حل مشكلة المدى وبلوغ مسافات أكبر بكثير من تلك التي يمكن الوصول إليها باستخدام الأنظمة ذات الهوائي الوحيد فمثلاً من أجل احتمال خطأ يساوي إلى  $BER = 10^{-6}$  نجد أن التشكيل  $2 \times 4$  يستطيع أن يبلغ مسافة 191Km بينما يستطيع نظام SISO أن يبلغ مسافة 27Km فقط، وهذا ما يدل على حل مشكلة المدى بشكل ممتاز.

UAV، وذلك بسبب قدرة أنظمة الهوائيات المتعددة على استقبال إشارات ذات نسبة إشارة إلى الضجيج منخفضة جداً مقارنة مع أنظمة SISO. تعطى الاستطاعة المطلوبة على دخل المستقبل والتي تعكس نسبة إشارة إلى الضجيج قيمتها  $\bar{Y}_T$  والتي تحقق معدل خطأ بت مقبول لنظام QPSK بالعلاقة (23) [4,25].

$$P_{req} = \frac{\bar{Y}_T N_0 R_b}{2} \quad (23)$$

حيث:  $\bar{Y}_T = \frac{E_s}{N_0}$  هي نسبة الإشارة إلى الضجيج على دخل مستقبل نظام SISO أو عند كل هوائي استقبال في نظام MIMO،  $N_0$  الكثافة الطيفية لاستطاعة الضجيج noise power spectral density وتعطى بالعلاقة (24) [4,25].

$$N_0 (\text{dBm}) = -174 + NF (\text{dB}) \quad (24)$$

حيث: NF هو رقم الضجيج للمستقبل Noise Figure، إذا كان المستقبل مثالي عندئذ يكون  $NF = 0 \text{ dB}$ ، تصبح العلاقة (24) تكتب بالعلاقة (25).

$$N_0 (\text{dBm}) = -174 \quad (25)$$

ومن جهة أخرى يمكن أن نكتب علاقة الاستطاعة المستقبلية عندما يقدم المرسل استطاعة إرسال  $P_T$  بالعلاقة (26) [1,9].

$$P_R = P_T \times |F|^2 \times \frac{1}{FSPL} \quad (26)$$

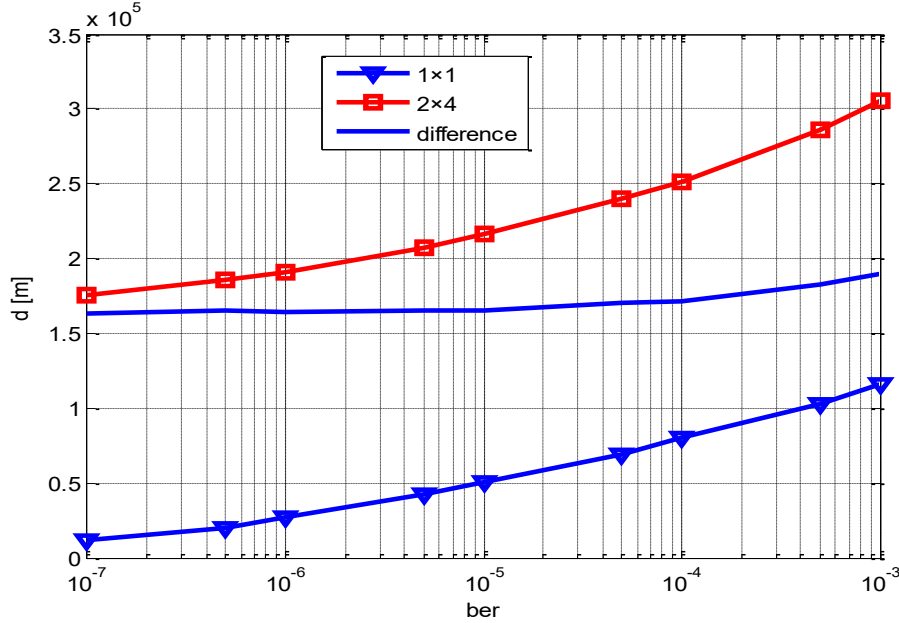
حيث:  $|F|^2$  هو ربح خفوت نموذج الشعاعين ويعطى بالعلاقة (27) [9].

$$|F|^2 = 4 \left( \sin \left( \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right)^2 \quad (27)$$

وعند اختيار ارتفاع الـ UAV في منتصف مجال الارتفاعات الأمثلية يكون عندئذ  $|F|^2 = 4$  [9]. و FSPL هو فقد المسار الحر ويعطى بالعلاقة (28) [9].

$$FSPL = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (28)$$

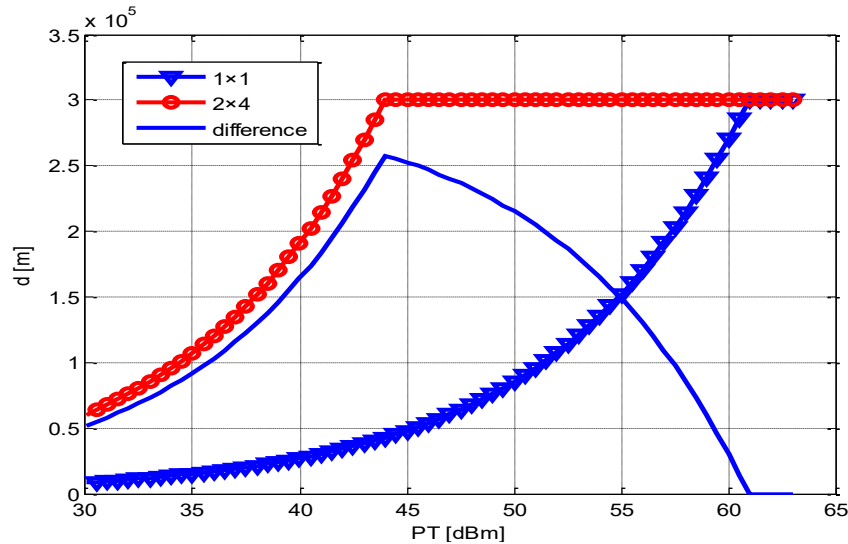
بتعويض القيم من العلاقة (28) و  $|F|^2 = 4$  في العلاقة (26) نكتب العلاقة (29).



الشكل (10) الوفر في المدى بين التشكيلين  $1 \times 1, 2 \times 4$  بدلالة معدل الخطأ

$R_b = 8.4 \text{ Mbps}$ ,  $f = 2.4 \text{ GHz}$ ,  
 $h_{\text{tech}} = 5 \text{ km}$ ,  $h_g = 0 \text{ m}$ ,  $h_r = 5 \text{ m}$ ,  
 حيث كان المدى الأعظمي للـ UAV هو  
 $d_{\text{max}} = 300.71 \text{ km}$  وذلك اعتماداً على العلاقة  
 (7).

أخيراً درسنا تغير ربح المدى بدلالة استطاعة المرسل،  
 اعتماداً على العلاقة (33) و الشكل (5) يبين الشكل  
 (11) تغيرات ربح المدى مع تغير استطاعة المرسل ضمن  
 المجال (30-63dBm) عند احتمال خطأ  
 $10^{-6}$ ، وكذلك عند استخدام البارامترات التالية:



الشكل (11) الوفر في المدى بين التشكيلين  $1 \times 1, 2 \times 4$  بدلالة استطاعة المرسل

RTO SCI Symposium on "Warfare Automation: Procedures and Techniques for Unmanned Vehicles", held in Ankara, Turkey, 26-28 April and published in RTO MP-44, pp. (B10-1)-(B10-13).

[2] Lucchi,M., Giorgetti,A., Win,M. Z., and Chiani,M. (2007) "using a UAV to collect data from low-power wireless". Aerotecnica Missilie Spazio, Vol. 86(3), pp. 141-150.

[3] Sathya,N.V. (2013) "Propagation channel model between UAVs for emergency communications". Master Thesis, Aalto University, pp. 63.

[4] Volker,K. (2006) "Wireless communications over MIMO channels". John Wiley & Sons, England, pp. 390.

[5] Yin,Z., Shi,Z., Liang,J., and Wu,Z. (2010) "Design of Unmanned Aerial Vehicle Space Communication Link based on DS-UWB". Information Technology Journal, Vol. 9(8), pp. 1713-1718.

[6] Dac,T.H. (2010) "Studies on Multiple Access for Aeronautical Wireless Network". Waseda University, Doctoral Dissertation, pp. 162.

[7] Seybold,J.S. (2005) "Introduction to RF Propagation". John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 349.

[8] Austin,R. (2010) "Unmanned Aircraft Systems". John Wiley & Sons, United Kingdom, pp. 365.

## 6- الاستنتاجات Conclusions:

استطعنا من خلال هذا البحث أن نستنتج ما يلي:

أ- أن أفضل تشكيل MIMO-OSTBC يستخدم في الأنظمة المسيرة والتي تعتمد استخدام تقنية الهوائيات المتعددة والترميز الكتلّي الزمني المكاني المتعامد هو التشكيل  $(2 \times 4)$  حيث بدأ هذا التشكيل أمثلياً.

ب- قدم التشكيل  $(2 \times 4)$  حلاً لمشكلة مدى الاتصال والتي تواجهها هذه الأنظمة حيث بينت النتائج أن هذا التشكيل حقق تحسناً في زيادة مدى الاتصال بمتوسط مقداره 3.95 مرة عن التشكيل SISO وبالتالي تم الحصول على زيادة مدى الاتصال بقيمة 163 [Km] عند معدل الخطأ  $BER=10^{-7}$  و زيادة مدى الاتصال بقيمة 190 [Km] عند معدل الخطأ  $BER=10^{-3}$ .

ت- قدم التشكيل  $(2 \times 4)$  وفراً في قيمة استطاعة الإرسال حيث خفض هذه القيمة بمقدار 17dB عن القيمة المطلوبة للتشكيل SISO عند المدى الأعظمي  $d_{max} = 300.71 \text{ Km}$  بين الـ UAV والمحطة الأرضية.

ث- بدأ التشكيل SISO عاجزاً على تأمين الاتصال بين الـ UAV والمحطة الأرضية عند مسافة تزيد عن 116km عند معدل الخطأ  $BER=10^{-3}$  وعند مسافة تزيد عن 12.2km عند معدل الخطأ  $BER=10^{-7}$ .

## 7- المراجع References:

[1] Baiotti,S., Scazzola,G.L., Battaini,G. and Crovari, E. (1999) "Advances in UAV Data Links: Analysis of Requirement evolution and implications on future equipment". Paper presented at the



- [17] Bizaki,H.K. (2011) "MIMO systems, Theory and applications". InTech, Croatia, pp.500.
- [18] Tarokh,V., Jafarkhani, H., and Calderbank,A.R. (1999) "Space-time block coding for wireless communications performance results". IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 17(3), pp. 451–460.
- [19] Tarokh,V., jafarkhani, H., and Calderbank,A.R. (1999) "Space-time block codes from orthogonal designs". IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45(5), pp. 1456–1467.
- [20] Sandhu,S., and Paulraj,A. (2000) "Space-time block codes: A capacity perspective", IEEE Communications Letters, vol. 4(12), pp. 384–386.
- [21] Ke-lin,D., and Swamy,M. N. S. (2010) "Wireless communication systems". Cambridge University Press, New York, pp. 1020.
- [22] Jerry,R.H. (2014) "Introduction to MIMO Communications". Cambridge University Press, New York, pp. 304.
- [23] Tim,B., Elisabeth,D.C., and Persefoni,K. (2012) "Practical guide to the MIMO radio channel with matlab examples". John Wiley & Sons, United Kingdom, pp. 275.
- [24] Papadopoulos,G.D., Karagiannidis,G.K., and Pavlidou,F.N. (2007) "Performance bounds of space time block coding in Rician and Log normal fading".
- [9] Glover,I., and Grant,P. (2000) "Digital Communications". Prentice Hall, England, pp. 764.
- [10] Rosu,I. (2008) "Basics of Radio Wave Propagation". pp. 10. , <http://www.qsl.net/va3iul/>
- [11] Sklar,B. (1997) "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems, PartI: Characterization". IEEE communications Magazine, pp. 90-100.
- [12] Tse,D., and Viswanath,P. (2005) "Fundamentals of Wireless Communication". Cambridge University Press, New York, pp. 587.
- [13] Zamanzadeh,A. (2009) "MIMO system for Skeldar UAV System". Linköpings University, Master Thesis, Sweden, pp. 88.
- [14] Perez Fontan,F., and Marino Espineira,P. (2008) "Modeling the wireless propagation channel". Wiley and Sons, United Kingdom, pp. 272.
- [15] Jiang,F., and Swindlehurst,A. L. (2012) "Optimization of UAV Heading for the Ground-to-Air Uplink". University of California, Irvine, pp. 31.
- [16] Yifeng,Z., Jun,L., Louise,L., and Camille,A.R. (2012) "A Markov-Based Packet Dropout Model for UAV Wireless Communications". Journal of Communications, Vol. 7(6) , pp. 418-426.

[25] Goldsmith, A. (2005) "Wireless channels". IET Commun., Vol. 1(1), Communications". Cambridge University Press, New York, pp. 86-91. pp. 571.

## **Optimum Multiple Input - Multiple Output configuration to increase the Range distance in Unmanned Aerial Vehicle communication systems**

**Dr. Hekmat Rajeh**

**Prof. in Electronic and communication Engineering Department - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Al Baath University - Syria.**

Email: [dr.hekmat1rajeh@gmail.com](mailto:dr.hekmat1rajeh@gmail.com)

**Eng. Mohammad Bakkar**

**PhD. Student in Electronic and communication Engineering Department - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Al Baath University - Syria.**

Email: [bakkarmb968@gmail.com](mailto:bakkarmb968@gmail.com)

### **Abstract**

This research presents a wireless communication system using Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) modulation depending on using of the Multiple Input Multiple Output (MIMO) systems in Unmanned Aerial Vehicle (UAV). In order to increase the reliability of the wireless link channel, we used the Orthogonal Space Time Block Code (OSTBC) in spatial diversity technique to improve the bit error rate (BER) performance. Also, we studied the effect of BER improvement to increase the link distance of UAV during the flying time. Finally, we compared between the link distance of the optimum MIMO-OSTBC system and Single Input Single Output (SISO) system of transmitter and receiver. Therefore, the results show that 2×4 MIMO-OSTBC configuration is optimum system and this transmit and receive coding system increased the mean link distance to an extent of 3.95 times than SISO system at transmit power  $P_T=40\text{dBm}$ . At the same time, The SISO system was became inefficient to make any communication signal at 116km at Bit Error Rate (BER) $10^{-3}$  and 12.2km at  $\text{BER}=10^{-7}$  distance between the transmitter and receiver.

Key words: MIMO – SISO – OSTBC – QPSK – UAV.