

## تطبيق المرمز المسبق X and Y Precoder في أنظمة الهوائيات المتعددة MIMO بإضافة قناة راجعة محدودة

د. غدير ماضي\*

رزان حبيب\*\*

(تاريخ الإيداع 18 / 8 / 2016. قُبِلَ للنشر في 1 / 11 / 2016)

### □ ملخص □

شهدت السنوات الأخيرة نمواً كبيراً في الاتصالات اللاسلكية نتيجة طلب المستخدمين معدلات عالية لنقل المعطيات. ومن هنا جاء الحافز لتطبيق أنظمة MIMO في العديد من التقنيات والمعايير الحديثة؛ لتأمين معدلات نقل المعطيات المطلوبة. لكن لسوء الحظ هذه الأنظمة حساسة تجاه ظروف الإرسال السيئة مثل الخوفت. تستطيع عملية الترميز المسبق Precoding تحسين أداء أنظمة MIMO لتتلاءم مع شروط القناة المتغيرة، من خلال معرفة معلومات حالة القناة CSI بشكل تام بالمرسل. لكن الحصول على هذه المعلومات بشكل تام في المرسل غير قابل للتطبيق العملي؛ بسبب حجمها الهائل، لذا لابد من تخفيض حجمها عبر عملية تعرف بالتكميم، وإرسالها عن طريق قناة راجعة محدودة.

إن تقنية X and Y Precoder هي إحدى تقنيات الترميز المسبقاتي تمت دراستها بافتراض معلومات حالة القناة كاملة لدى المرسل. سنقوم في بحثنا هذا بإضافة قناة راجعة محدودة لهذه التقنية لتصبح قابلة للتطبيق العملي، حيث أظهرت النتائج أن خسارة أداء X and Y Precoder بوجود قناة راجعة محدودة مقبولة نوعاً ما.

**الكلمات المفتاحية:** أنظمة الهوائيات المتعددة، الترميز المسبق، القناة اللاسلكية، القناة الراجعة المحدودة.

\* مدرس - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
\*\* طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## The application of X and Y Precoder in MIMO system with limited feedback channel

Dr. Ggadir Madi\*  
Razan Habeeb\*\*

(Received 18 / 8 / 2016. Accepted 1 / 11 / 2016)

### □ ABSTRACT □

Recent years have witnessed a significant growth in wireless communication as a result of user demand on high rates of data transmission. Therefore, there is a great motivation for the application of MIMO systems in many modern communication standards in order to provide the required data transmission rates. Unfortunately, these systems are sensitive to poor transmission conditions such as fading. Precoding can improve the performance of MIMO systems to adapt with channel conditions by knowing the full channel state information (CSI) at the transmitter. However, a full CSI is often unrealistic in practice because of the huge amount of this information to be sent back. Therefore, this information must be reduced and sent through a limited feedback channel.

X and Y Precoder are one of the precoding techniques that have been studied assuming a full CSI at the transmitter. In this research, we will add a limited feedback channel to this technique in order to become applicable in practice. The result has shown that the loss of performance by adding a limited feedback channel may be acceptable.

**Keywords:** Multiple antenna systems MIMO, Precoding, Wireless channel, Limited feedback channel.

---

\* Assistant Professor, Department of Communication and Electrical, Faculty of and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Postgraduate Student, Department of Communication and Electrical, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## مقدمة:

يزداد الطلب مؤخراً على شبكات الاتصالات اللاسلكية ذات معدلات نقل المعطيات العالية. ولقد أثبتت مجموعة من المهندسين بعد إجراء العديد من الدراسات في مختبرات بيل [1] أن استخدام هوائيات متعددة بجانب الإرسال والاستقبال تعرف بأنظمة الهوائيات المتعددة المداخل والمتعددة المخارج (MIMO) Multiple Input Multiple Output لها القدرة على تقديم زيادة معدل نقل المعطيات [2]، زيادة موثوقية النظام [3]، زيادة منطقة التغطية [3]، مقاومة نوعية للخفوت [3]، بالإضافة إلى دعم مستخدمين متعددين [4].

إن استراتيجية الحلقة المغلقة Closed Loop هي إحدى استراتيجيات هذه الأنظمة، وفيها تكون معلومات حالة القناة معروفة لدى كل من المستقبل والمرسل. تستغل عملية الترميز المسبق (Precoding) هذه الاستراتيجية لتحسين أداء نظام الاتصالات بإجراء مجموعة من العمليات على الإشارة قبل إرسالها، كما تقوم بتحسين (Optimizing) أداء كل من المرسل والمستقبل تبعاً لبارامتر محدد من بارامترات الاتصالات مثل تخفيض مربع معدل خطأ البت Minimizing Mean Square Error [5] (MSE)، وتعظيم نسبة الإشارة إلى الضجيج في المستقبل (SNR) Signal to Noise Ratio the received Maximizing [5]، حيث تختلف أنواع الرموز المسبقة Precoders حسب هذه البارامترات.

يقوم المستقبل في جميع أنظمة الاتصالات بتقدير حالة القناة عن طريق خوارزميات التقدير Algorithms Estimation، ثم يقوم باستغلال هذه المعلومات لاستخلاص الإشارة المرسل من الإشارة الواردة. تحتاج أنظمة MIMO إلى معلومات حالة القناة بالمستقبل كما في الأنظمة السابقة، لكن يتم الحصول على معلومات حالة القناة Channel State Information (CSI) في المرسل أيضاً بإضافة قناة راجعة من المستقبل. هنا تجدر الإشارة إلى أنه من الصعب الحصول على معلومات حالة القناة بشكل تام Full CSI في المرسل بسبب حجمها الكبير وخاصةً في القنوات ذات التغيرات السريعة، وهذا ما استدعى استخدام طرق القناة الراجعة المحدودة Limited Feedback Channel [6].

## أهمية البحث وأهدافه:

إن تقنية X and Y Precoder هي إحدى تقنيات الترميز المسبق [7] Precoding التي تعمل على تحسين ربح تنوع أنظمة MIMO ولقد تم دراسة أدائها بشكل نظري مع معلومات حالة قناة تامة Full CSI لدى المرسل، لكن الحصول على هذه المعلومات بشكل تام في المرسل مستحيل وغير قابل للتطبيق.

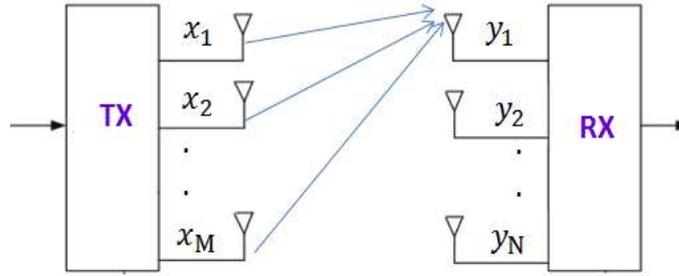
تهدف هذه الدراسة لجعل تطبيق تقنية X and Y Precoder واقعاً عملياً من خلال معرفة المعلومات العائدة للمرسل عبر القناة الراجعة، وتخفيض حجمها باستخدام عملية التكميم، وتحليل النتائج من خلال مقارنة خسارة الأداء مع الحالة المثالية، بالإضافة إلى مقارنة هذه التقنية مع رموز مسبقة Precoders أخرى تم العمل على تكميمها سابقاً، وذلك بالاعتماد على دراسة أداء معدل خطأ البت Bit Error Rate (BER) مقابل نسبة الإشارة إلى الضجيج Signal to Noise Ratio (SNR).

## طرائق البحث ومواده:

## 1-أنظمة الهوائيات المتعددة المدخل والمخرج Multiple Input Multiple Output

## :MIMO Antenna System

يحتوي كل من المرسل والمستقبل في أنظمة MIMO على عدة هوائيات مفصولة بمسافات محددة، وذلك من أجل تأمين التنوع المكاني Spatial Diversity لكل منهما [8,9] كما هو مبين بالشكل (1).



الشكل (1) نظام الاتصال اللاسلكي MIMO

يوصف النموذج الرياضي لنظام MIMO بفرض لدينا M هوائي بالإرسال و N هوائي بالاستقبال بالمعادلة الآتية:

$$Y = HX + n \quad (1)$$

حيث:

H مصفوفة القناة وتعبر عن  $M \times N$  مسار مختلف بين المرسل والمستقبل أبعادها  $[M \times N]$ .

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T \text{ شعاع الإشارة المستقبلة وأبعاده } [N \times 1].$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T \text{ شعاع الإشارة المرسل وأبعاده } [M \times 1].$$

$$n = [n_1, n_2, \dots, n_N]^T \text{ شعاع الضجيج الغوسي الأبيض الجمعي (AWGN) Additive White}$$

Gaussian Noise عند كل هوائي مستقبلي وأبعاده  $[N \times 1]$ .

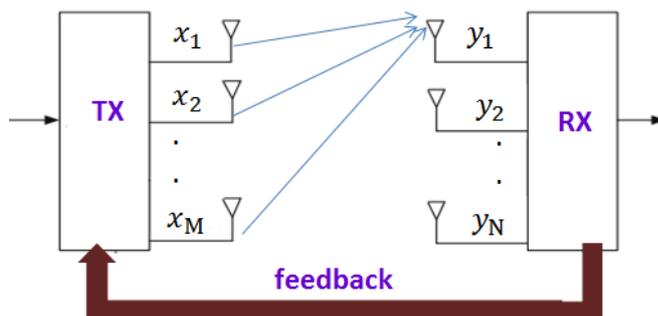
تستغل أنظمة MIMO ميزات كل من تنوع الإرسال والاستقبال بوقت واحد؛ لتحسين موثوقية الإرسال، كما تستغل المسارات المتعددة المستقلة بين المرسل والمستقبل؛ لزيادة عدد تدفقات المعطيات التي يمكن إرسالها بنفس اللحظة، مما يسبب زيادة معدل نقل المعطيات [10,11] ولقد أصبحت MIMO نتيجة هذه الميزات الجزء الأهم لأغلب معايير الاتصالات اللاسلكية مثل LTE Advanced, LTE IEEE 802.11AC, والتي تعد من أحدث تقنيات ال-Wi-Fi ... الخ [12,13].

كما تقدم هذه الأنظمة العديد من الميزات من أجل تحسين أداء الاتصال اللاسلكي [14,15,16] وأهمها ربح التنوع Diversity Gain الذي يُعرّف بأنه مقدار التخفيض بمعدل خطأ البت BER كتابع لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، حيث يمكن وجود الهوائيات المتباعدة مكانياً من استقبال عدة نسخ من الإشارة بظروف خفوت مختلفة، ويقوم المستقبل باعتماد تقنيات دمج خاصة باستغلال هذا الاختلاف (التنوع) للحصول على إشارة بظروف خفوت أفضل، والذي ينعكس بدوره على تخفيض معدل خطأ البت BER. وربح التنوع المكاني Spatial Multiplexing Gain الذي يُعرّف بأنه الزيادة الخطية لمعدل نقل المعطيات بزيادة الإرسال اللحظي المتعدد المستقل لتدفقات المعطيات.

تعمل أنظمة MIMO حسب إمكانية معرفة معلومات حالة القناة في المرسل بإحدى الاستراتيجيتين الرئيسيتين الآتيتين [4]:

الحلقة المفتوحة (Open Loop): في هذه الاستراتيجية تكون معلومات حالة القناة CSI معروفة لدى المستقبل من خلال تخمين القناة، وغير معروفة لدى المرسل.

الحلقة المغلقة (Closed Loop): بينما في هذه الاستراتيجية تكون معلومات حالة القناة CSI معروفة لدى المستقبل والمرسل عن طريق وجود قناة راجعة Feedback channel تنقل معلومات حالة القناة المخمّنة في المستقبل إلى المرسل، كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2) استراتيجية الحلقة المغلقة لنظام MIMO

## 2- عملية الترميز المسبق Precoding:

تختلف عملية الترميز المسبق عن الترميز التقليدي المتعارف عنه بأنها تقنية معالجة تعتمد على معرفة المرسل بمعلومات حالة القناة من أجل تحسين أداء نظام الاتصالات، عن طريق إيجاد حل رياضي متكيف مع الأنواع المختلفة لحالة القناة [17,18]. كما تعمل على تحسين كل من المرسل والمستقبل تبعاً لبارامتر محدد من بارامترات الاتصالات مثل تخفيض مربع معدل خطأ البت (MSE) [5] Minimizing Mean Square Error، وتعظيم نسبة الإشارة إلى الضجيج في المستقبل (SNR) [5] Maximizing the received Signal to Noise Ratio.

تقوم آلية تحسين هذه المعايير على فصل قناة MIMO إلى قنوات فرعية Subchannel مستقلة متوازية عن طريق التقسيم بالقيم المنفردة (SVD) Singular Value Decomposition، حيث أن SVD - بشكل مختصر - عملية رياضية تمكننا من تجزئة أية مصفوفة إلى جداء ثلاث مصفوفات [9]، ويتم استغلالها من قبل نظام MIMO للقيام بعملية الترميز المسبق Precoding من خلال تطبيقها على مصفوفة القناة H التي يتم الحصول عليها بعد تخمين المستقبل لحالة القناة، وذلك وفق لما يأتي:

$$\text{SVD}(H) = U \cdot \Sigma \cdot V^H \quad (2)$$

حيث:

$V^H$  المنقول الهرميتي للمصفوفة V (العامل الهرميتي  $H$  هو مرافق منقول المصفوفة).

U مصفوفة واحدة متعامدة مربعة قابلة للعكس لأبعادها  $[M \times M]$ .

V مصفوفة واحدة متعامدة مربعة قابلة للعكس لأبعادها  $[N \times N]$ .

$\Sigma$  مصفوفة قطرية تحوي القيم الشاذة  $\{\sigma_i\}$  لـ H بأبعادها  $[M \times N]$ ، تحقق عناصرها:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_{\min(M,N)} \geq 0$$

مع الانتباه إلى أن عدد القيم الشاذة  $\sigma_i$  غير الصفيرية يمثل رتبة المصفوفة  $R_H$ ؛ أي العدد الأعظمي للأسطر أو الأعمدة المستقلة خطياً فيما بينها.

وتعطى رتبة المصفوفة رياضياً بالعلاقة الآتية:

$$R_H \leq \min (M, N) \quad (3)$$

**نموذج تقنية الترميز المسبق Precoding:**

ليكن لدينا نظام MIMO بـ M هوائي إرسال و N هوائي استقبال، ونريد إرسال b تدفق معطيات مستقل Independent DataStream. فيُعبّر عن الإشارة المستقلة في نموذج تقنية الترميز المسبق الموضح بالشكل (3)، بفرض أن التخمين مثالي في المستقبل وأن معلومات حالة القناة كاملة Full CSI في المرسل بالعلاقة الآتية [19]:

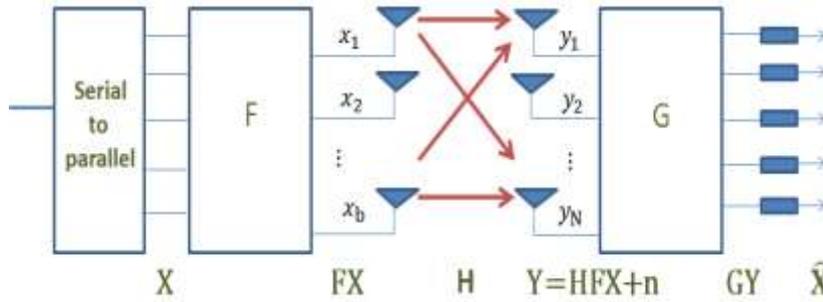
$$Y = GHFX + n \quad (4)$$

حيث:

F مصفوفة الترميز المسبق Precoding أبعادها  $[M \times b]$ .

G مصفوفة فك الترميز المسبق Decoding أبعادها  $[b \times N]$ .

b عدد تدفقات المعطيات المستقلة التي يمكن إرسالها بنفس اللحظة  $b = R_H \leq \min (M, N)$ .



الشكل (3) نموذج تقنية الترميز المسبق Precoding

وبالاعتماد على عملية SVD الموضحة سابقاً يمكن تحليل مصفوفة الترميز المسبق إلى  $F = F_v F_d$  ومصفوفة فك الترميز المسبق إلى  $G = G_d G_v$  عبر مجموعة من التحويلات الخطية الموضحة في [20].

إن  $F_v, G_v$  مصفوفتان واحدتان تنتجان من تطبيق SVD على مصفوفة القناة H حيث إن  $F = V G = U^H$ , بينما  $G_d, F_d$  تمثل المتغيرات الوحيدة التي يحتاجها المصمم لحسابها وفق عملية رياضية؛ من أجل تحسين معيار Criteria معين في نظام الاتصالات مثل:

Max-d<sub>min</sub> Precoder الذي يقوم بتعظيم المسافة الإقليدية الصغرى بين نقاط الإشارة في طرف الاستقبال

[5].

Max-SNR Precoder الذي يقوم بتعظيم نسبة الإشارة إلى الضجيج في المستقبل [5].

X and Y Precoder [7] وسيتم التعرف عليه لاحقاً.

ويمكننا إعادة التعبير عن الإشارة المستقلة بالشكل الآتي:

$$Y = H_v F_d X + \tilde{n} \quad (5)$$

حيث:

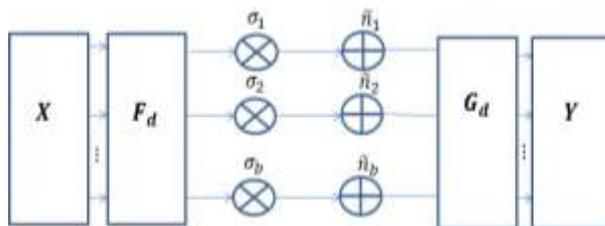
$\tilde{n} = G_v n$  شعاع الضجيج الافتراضي أبعاده  $[b \times 1]$ .

مصفوفة القناة الافتراضية

مصفوفة قطرية لأرباح القنوات الفرعية تدعى  $H_v = G_v H F_v$

أبعادها  $[b \times b]$ . ويمكن إعادة تمثيل المعادلة السابقة الموضحة في الشكل (4) كالآتي:

$$H_v = \text{diag} (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_b) \quad (6)$$



الشكل (4) التحليل المتوازي لقناة MIMO

ملاحظة: أي إنه بتطبيق SVD على مصفوفة قناة MIMO يمكننا تحليلها لـ  $R_H \leq \min (M, N)$  قناة افتراضية متوازية، ومن خلال عملية الترميز المسبق سيقوم المستقبل بحساب المصفوفة  $F_d$ ؛ لتحسين بارامتر محدد، وإرسالها كاملة عبر القناة الراجعة إلى المرسل.

### : X and Y Precoder.3

تعتمد تقنية X and Y Precoder على SVD لفصل قناة MIMO إلى قنوات فرعية متوازية ومستقلة، ولقد تم اقتراحها في [21] من أجل تحسين درجة التنوع Diversity Order المنخفضة لـ SVD Precoding.

يعبر عن الشعاع المستقبل من N هوائي استقبال في تقنية X and Y Precoder بالعلاقة الآتية [7]:

$$Y = H_v F_d X + n \quad (7)$$

$$H_v = G_v H F_v$$

وكما وجدنا سابقاً فإن المصفوفة  $F_d$  هي المسؤولة عن تحسين بارامتر معين يحدده المصمم. إذ قام الباحثون بتصميمها في X and Y Precoder؛ لتحسين متطلبات التنوع المنخفضة عن طريق مزوجة القنوات الفرعية ذات ربح التنوع المنخفض مع القنوات الفرعية ذات ربح التنوع العالي، كما أوجدوا الحل المناسب لها في [7] بالاعتماد على حالة القناة المتجددة.

تتألف المصفوفة  $F_d$  في X and Y Precoder من مصفوفات فرعية أبعادها  $2 \times 2$  تدعى  $A_k$  يتم فيها ترميز معلومات كل زوج من أزواج القنوات الفرعية المقترنة.

من أجل X-Precoder تكون المصفوفات  $A_k$  حقيقية متعامدة مميزة بزواوية وحيدة  $\theta$ ، وتأخذ الشكل الآتي:

$$A_k = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) & \sin(\theta_k) \\ -\sin(\theta_k) & \cos(\theta_k) \end{bmatrix}, \quad k = 1, \dots, N/2 \quad (8)$$

حيث:

K تمثل أزواج القنوات المقترنة.

N عدد هوائيات الاستقبال.

وتعطى القيمة الدقيقة لـ  $\theta_k$  من أجل تعديل 4-QAM بالشكل الآتي:

$$\theta_k = \begin{cases} \pi/4 & \beta_k \leq \sqrt{3} \\ \tan^{-1}[(\beta_k - 1) - \sqrt{(\beta_k^2 - 1)^2 - \beta_k^2}] & \beta_k > \sqrt{3} \end{cases} \quad (9)$$

حيث إن  $\beta_k \triangleq \frac{\sigma_{ik}}{\sigma_{jk}}$  رقم الشرط Condition Number من أجل زوج  $k$  زوج،  $\sigma_{ik}$  ربح القناة الفرعية  $i$ ،  $\sigma_{jk}$  ربح القناة الفرعية  $j$ .

بينما من أجل Y-Precoder تكون المصفوفات  $A_k$  حقيقية مثلثية يسرى غلياً، مميزة ببارامترين يتعلقان بالطاقة المخصصة للقناتين الفرعيتين المقترنتين ( $a_k, b_k$  أعداد حقيقية موجبة)، وتأخذ الشكل الآتي:

$$A_k = \begin{bmatrix} a_k & 2a_k \\ 2b_k & 0 \end{bmatrix}, k = 1, \dots, N/2 \quad (10)$$

ولقد أوجد الباحثون الحل الأفضل لـ Y-Precoder بالشكل الآتي:

$$(a_k, b_k) = \begin{cases} \left( \sqrt{\frac{12P_T}{N(M^2-1)}}, 0 \right) & \beta_k^2 \geq \frac{M^2-1}{3} \\ \left( \sqrt{\frac{4P_T}{3N(\beta_k^2+M')}} \beta_k, \sqrt{\frac{P_T}{N(\beta_k^2+M')}} \right) & \beta_k^2 < \frac{M^2-1}{3} \end{cases} \quad (11)$$

حيث إن  $M' = \frac{M^2-1}{9}$ .

نلاحظ مما سبق أن X and Y Precoder له تعقيد منخفض إذ إن مصفوفات الترميز المسبق من أجل كل زوج هي مصفوفات حقيقية، لذا يقوم كاشف Maximum-Likelihood Detection ML المستخدم بكثرة في أنظمة MIMO بالبحث عن الإشارة المرسلّة عبر فضاء حقيقي ثنائي البعد.

سنعيد بشكل مختصر آلية تشغيل هذه التقنية:

يقوم المستقبل باستقبال الإشارة المرسلّة وتخمين حالة القناة الحالية للحصول على مصفوفة القناة، ويتم إيجاد  $F_v$  بتطبيق SVD على مصفوفة القناة. بينما يتم إيجاد  $F_d$  بالاعتماد على الحل السابق، ثم يتم إرسال هذه المعلومات كاملة إلى المرسل عبر القناة الراجعة.

#### 4-تكميم القناة الراجعة:

تعتمد عملية الترميز المسبق كما ذكرنا سابقاً على معلومات حالة القناة CSI وذلك عن طريق تخمين القناة بالمستقبل وإرسال CSI إلى المرسل عبر قناة راجعة. لكن وبسبب التغيرات السريعة للقناة والكم الهائل من المعلومات العائدة للمرسل من المستقبل الحصول على CSI تامة لديه؛ لذلك نحن بحاجة لتخفيض حجم هذه المعلومات من خلال عملية التكميم [6,22] Quantization.

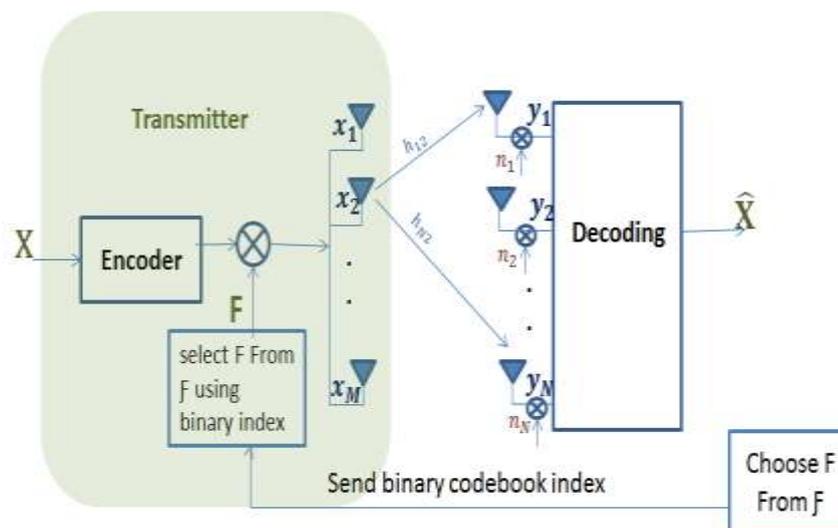
حيث تقوم فكرة التكميم الرئيسة هنا على اختيار المستقبل لمصفوفة الترميز المسبق الأفضل من مجموعة منتهية من مصفوفات الترميز المسبق تدعى Codebook ( $F$ ) معروفة لدى كل من المرسل والمستقبل كتابع لمعلومات حالة القناة الحالية، ومن ثم إرسال دليل هذه المصفوفة فقط بالترميز الثنائي إلى المرسل عبر القناة الراجعة المحدودة، كما هو مبين بالشكل (5).

ليكن لدينا على سبيل المثال Codebook مؤلف من أربع مصفوفات ترميز مسبق:

$$F = \{\tilde{F}_{v0}, \tilde{F}_{v1}, \tilde{F}_{v2}, \tilde{F}_{v3}\}$$

يتم ترميز كل مصفوفة من مصفوفات الترميز المسبق بعدد بتات 2bit وإرسال دليل المصفوفة الأقرب للمصفوفة الناتجة عن تطبيق SVD على مصفوفة القناة، بدلاً من إرسال المصفوفة كاملةً.

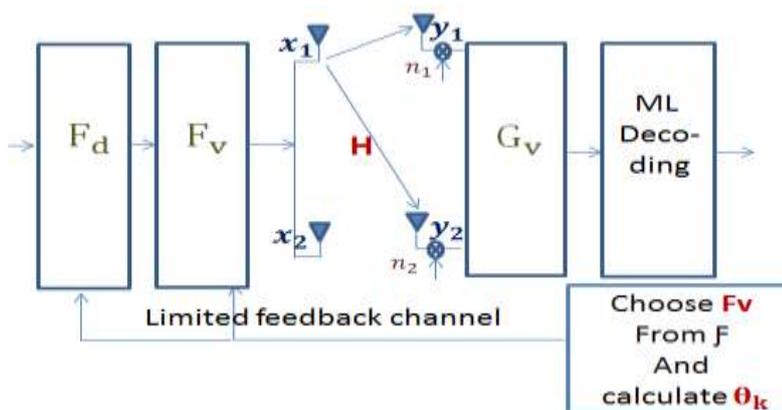
لكن ستصادفنا مشكلتان رئيسيتان: اختيار مصفوفة الترميز المسبق المثالية من الـ Codebook، وتصميم الـ Codebook.



الشكل (5) القناة الراجعة المحدودة

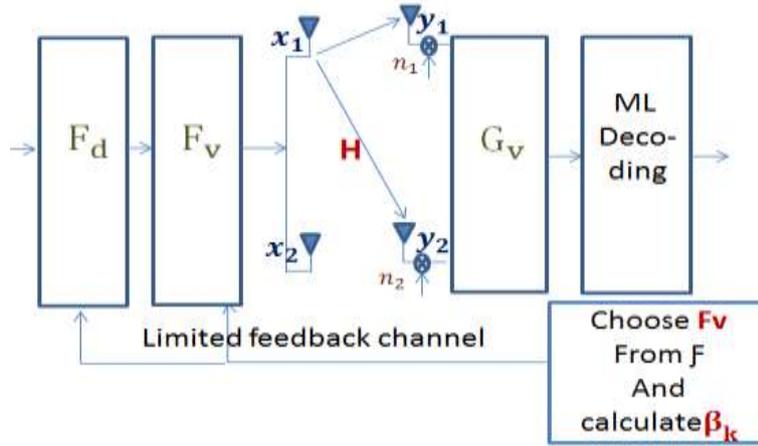
### النتائج والمناقشة:

لقد تعرفنا سابقاً على تقنية X and Y Precoder التي تمت دراستها بشكل نظري مع معلومات حالة قناة تامة لدى المرسل Full CSI، وقمنا في هذا البحث بتكميم المعلومات العائدة للمرسل في هذه التقنية وتطبيقها بشكل عملي، والتأكد من أنها تقدم النتائج المرجوة من خلال تقييم خسارة أدائها بالمقارنة مع الحالة المثالية. بالعودة إلى العلاقات الرياضية التي تصف نموذج تقنية X and Y Precoder في (7) نجد أن هذه المعلومات في X-Precoder هي المصفوفة  $F_v$  والزاوية  $\theta_k$ .



الشكل (6) تقنية X-Precoder محدودة القناة الراجعة

بينما في Y-Precoder هي المصفوفة  $F_v$  أيضاً ورقم الشرط  $\beta_k$  (حيث أنه من العلاقة (11) يكون رقم الشرط المعامل الوحيد الذي نحتاجه لحساب البارامترات  $a_k, b_k$  في المرسل)، كما هو موضح في الشكل (7).



الشكل (7) تقنية Y-Precoder محدودة القناة الراجعة

وبعد التعرف على المعلومات العائدة للمرسل قمنا بتكميمها كما يأتي:

### 1- تكميم المصفوفة $F_v$ :

يقوم المستقبل باختيار المصفوفة  $F_v$  المثالية من Codebook معروف لدى كل من المرسل والمستقبل يحوي مجموعة منتهية من مصفوفات  $F_v$ ، كما مرّ معنا في فقرة تكميم القناة الراجعة.

اعتمدنا في بناء هذا الـ Codebook على النماذج الكلاسيكية التي وضعها الباحث DAVID. J. LOVE والمستخدم في معايير اتصالات عالمية مثل LTE, Advanced LTE. علماً أن آلية بناء الـ Codebook المقترح موضحة في [6] بافتراض أن القناة هي قناة خفوت رايلي.

إن البحث عن مصفوفة الترميز المسبق الأفضل ضمن الـ Codebook هو موضوع شائك، ويتمّ باستخدام معايير بحث يختلف تعقيدها باختلاف حجم الـ Codebook. وبإجراء عدد من المقارنات بين معايير بحث مختلفة اعتمدنا في بحثنا على المعيار  $\text{Max} - d_{\min}(F_v)$  المقترح في [23] لأنه أعطى أفضل النتائج من حيث أداء معدل خطأ البت BER، ويعبر عن هذا المعيار بالعلاقة الآتية:

$$\tilde{F}_v = \arg \max_{F_v \in F} \left\{ \min_{x_1, x_2 \in S: x_1 \neq x_2} \|\tilde{H}_v F_d (x_1 - x_2)\| \right\} \quad (12)$$

حيث:

S تمثل جميع الحالات الممكنة للرموز المرسل  $X$ .

$\tilde{H}_v = G_v H \tilde{F}_v$  مصفوفة القناة الافتراضية من أجل كل مصفوفة  $\tilde{F}_v$  ضمن الـ Codebook.

إن المعيار  $\text{Max} - d_{\min}(F_v)$  معقد رياضياً ولا يمكن شرحه بالتفصيل؛ بسبب ضيق مساحة الكتابة

على أمل التوسع في آلية عمله ضمن أبحاث قادمة.

## 2-تكميم الزاوية $\theta_k$ و رقم الشرط $\beta_k$ :

بينما اعتمدنا في تكميم كل من الزاوية  $\theta_k$  ورقم الشرط  $\beta_k$  على قوانين التكميم التقليدي المتناظر Uniform Quantization؛ وذلك نتيجة وجود مجال محدود للقيمة المراد تكميمها.

يمكن استخدام التكميم غير المتناظر بدلاً من التكميم المتناظر ومقارنة النتائج، لكن بسبب ضيق مجال القيمة المراد تكميمها لن يكون لتغيير هذه النتائج أثر يذكر.

مما سبق نجد أن:

- عدد البتات الكلي المرسل عبر القناة الراجعة المحدودة في تقنية X-Precoder هو  $n1 + n2 = n$  حيث إن  $n1$  تمثل عدد البتات المستخدمة لترميز مصفوفات الـ Codebook و  $n2$  تمثل عدد البتات المستخدمة لتكميم الزاوية  $\theta_k$ .

- عدد البتات الكلي المرسل عبر القناة الراجعة المحدودة في تقنية Y-Precoder هو  $n1 + n3 = n$  حيث إن  $n1$  تمثل عدد البتات المستخدمة لترميز مصفوفات الـ Codebook و  $n3$  تمثل عدد البتات المستخدمة لتكميم رقم الشرط  $\beta_k$ .

## 3-إعدادات النموذج:

لقد قمنا بنمذجة نظام اتصالات لاسلكي متعدد الهوائيات يعتمد تقنية X and Y Precoder محدودة القناة الراجعة باستخدام برنامج الماتلاب Matlab، وفق الفرضيات الآتية:

نظام MIMO بعدد هوائيات إرسال  $M =$  عدد هوائيات الاستقبال  $N = 2$

عدد تدفقات المعطيات المستقلة  $b = 2$ .

نوع التعديل المستخدم 4-QAM.

القناة اللاسلكية هي قناة ذات خفوت مسطح Flat Fading منمذجة وفق نموذج رايلي Model Rayleigh تتعرض إلى ضجيج أبيض غوصي مضاف AWGN.

الكاشف المستخدم بالمستقبل هو كاشف ML.

عدد الرموز المرسلية المستخدمة في النموذج 10000 عينة.

ملاحظة: لقد اعتمدنا على الفرضيات السابقة من أجل التوافق مع الحالة المستخدمة في الدراسة النظرية في [21] كما أن أغلب الدراسات في هذا المجال قامت على استخدام هوائيين في كلا طرفي الإرسال، علماً أن تعديل هذه الفرضيات أمر بسيط جداً كتغيير عدد الهوائيات أو نوع التعديل المستخدم، لكن زيادة عدد الهوائيات تحتاج إلى زمن محاكاة Simulation أكبر بكثير مع التجهيزات المتوفرة لدينا، وهذا قد يستغرق يوماً أو أكثر من أجل كل حالة.

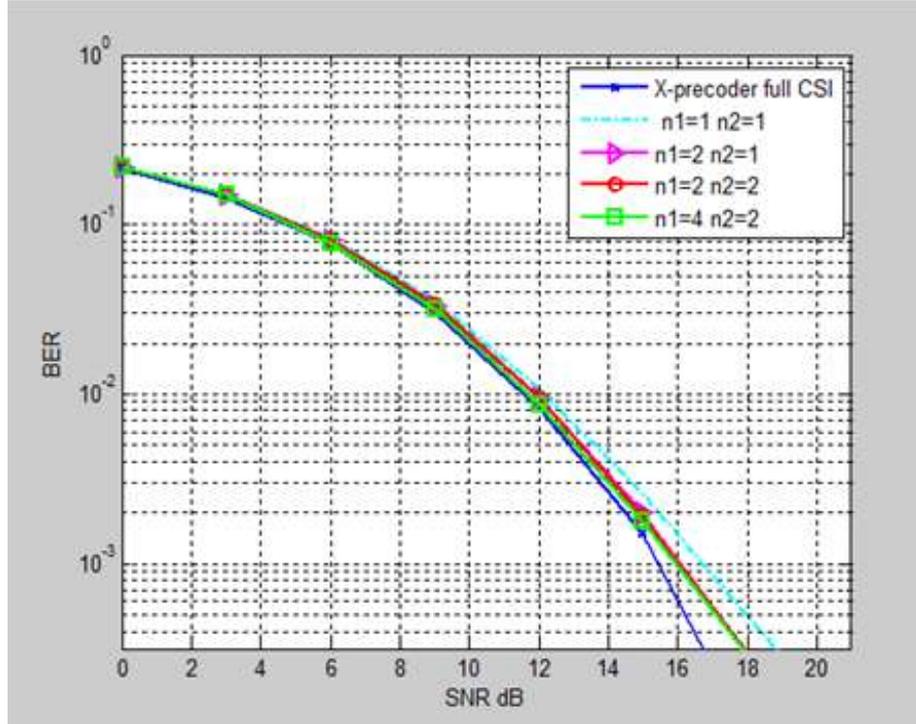
## 4-النتائج:

سنقوم فيما يأتي بتقييم أداء كل من تقنيتي X-Precoder و Y-Precoder بإضافة قناة راجعة محدودة

وتخفيض حجم معلومات حالة القناة CSI العائدة للمرسل من خلال تكميمها، وذلك من خلال مقارنتهما مع الحالة النظرية عندما CSI تامة لدى المرسل، بالإضافة إلى مقارنتهما مع تقنية Max-d<sub>min</sub> Precoder التي تم العمل على تطبيقها بشكل عملي في [24]. ولقد اعتمدنا في هذه المقارنات على استخدام معدل خطأ البت BER كتابع لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR.

## 4-1. تكميم X-Precoder:

يبين الشكل (8) معدل خطأ البت بعد أن قمنا بتطبيق قناة راجعة محدودة لتقنية X-Precoder باستخدام عدد بتات مختلف  $n = 2, 3, 4, 6$ ، ومقارنته مع الحالة المثالية عندما CSI تامة لدى المرسل.



الشكل (8) مقارنة أداء الـ BER لتقنية X-Precoder محدودة القناة الراجعة مع الحالة المثالية باستخدام عدد بتات مختلف

لقد وجدنا أنه باستخدام قناة راجعة محدودة بعدد بتات كلي  $n = 3$  bit وما فوق نحصل على أداء جيد وقريب من الحالة المثالية، وتكون الخسارة بنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR حوالي 0.3dB عند  $BER = 10^{-3}$  عند استخدام عدد بتات  $n = 6$  bit ( $n1 = 2, n2 = 4$ ). بينما نحصل على تدهور قليل بالأداء عند استخدام قناة راجعة محدودة بعدد بتات كلي  $n = 2$  bit ( $n1 = 1, n2 = 1$ )، بخسارة بنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR حوالي 1dB عند  $BER = 10^{-3}$ ، ويمكن استخدام هذه القناة الراجعة المحدودة في حال كانت المتطلبات صارمة على عرض الحزمة.

علماً أن  $n1$  و  $n2$  موزعة كما في الشكل السابق، حيث نلاحظ أن الزيادة بعدد البتات تعطي لصالح تكميم المصفوفة  $F_v$ ؛ لأنه نظراً لتجارب متعددة يكون الـ Codebook أكثر حساسية لعدد البتات، كما تزداد دقة التكميم بزيادة عدد مصفوفات الترميز المسبق ضمن الـ Codebook.

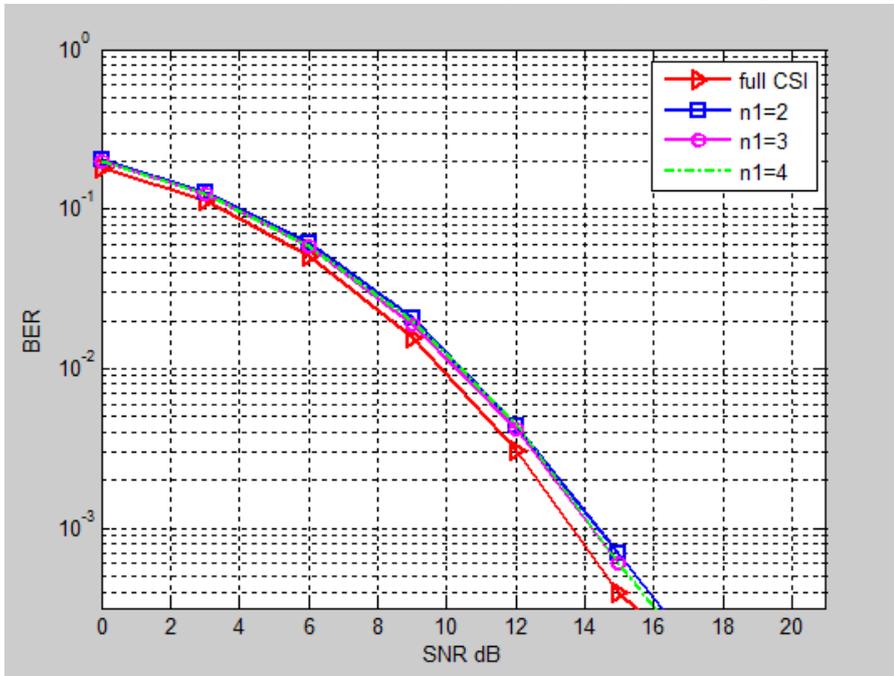
على الرغم من وجود خسارة في الأداء إلا أنها تبقى حالة عملية في النهاية، كما يجب الانتباه إلى أن استخدام عدد بتات 2 أو 3 بالقناة الراجعة هي حالات واقعية موجودة في أنظمة الاتصالات الحالية. حيث إن المعيار Wi-Max (802.16e) يعمل باستخدام 3bit (8 مداخل للـ Codebook) أو باستخدام 6bit بالقناة الراجعة المحدودة (64 مدخل للـ Codebook). [25].

## 4-2. تكميم Y-Precoder:

بالعودة إلى العلاقة (11) نجد أن حساب البارامترات  $a_k, b_k$  لا يعتمد على رقم الشرط، بل يعتمد على معلومات معروفة لدى المرسل (حجم التعديل Constellation Size وعدد هوائيات الاستقبال)، وذلك من أجل تعديل 4-QAM المستخدم في إعدادات نموذج هذه التقنية، فلا نحتاج لتكميم رقم الشرط من أجل الحصول على مصفوفة الترميز  $F_d$  بطرف الإرسال.

يستعرض الشكل (9) معدل خطأ البت بعد أن قمنا بتطبيق قناة راجعة محدودة لتقنية Y-Precoder ومقارنته مع الحالة المثالية عندما CSI تامة لدى المرسل، وذلك بفرض أن عدد البتات الكلي العائد للمرسل عبر القناة الراجعة  $n = n_1 = 2, 3, 4$ .

حيث نجد أن أداء BER متقارب جداً من أجل كل من عدد البتات المقترحة سابقاً، وأنه باستخدام قناة راجعة محدودة بعدد بتات كلي  $n = 2$  bit وما فوق نحصل على أداء جيد وقريب من الحالة المثالية، وتكون الخسارة بنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR تتراوح ما بين (0.3-0.6) dB عند  $BER = 10^{-3}$ .



الشكل (9) مقارنة أداء BER لتقنية Y-Precoder محدودة القناة الراجعة مع الحالة المثالية باستخدام عدد بتات مختلف

## 4-3. مقارنة أداء X and Y Precoder مع Max- $d_{min}$ Precoder بإضافة قناة راجعة

محدودة:

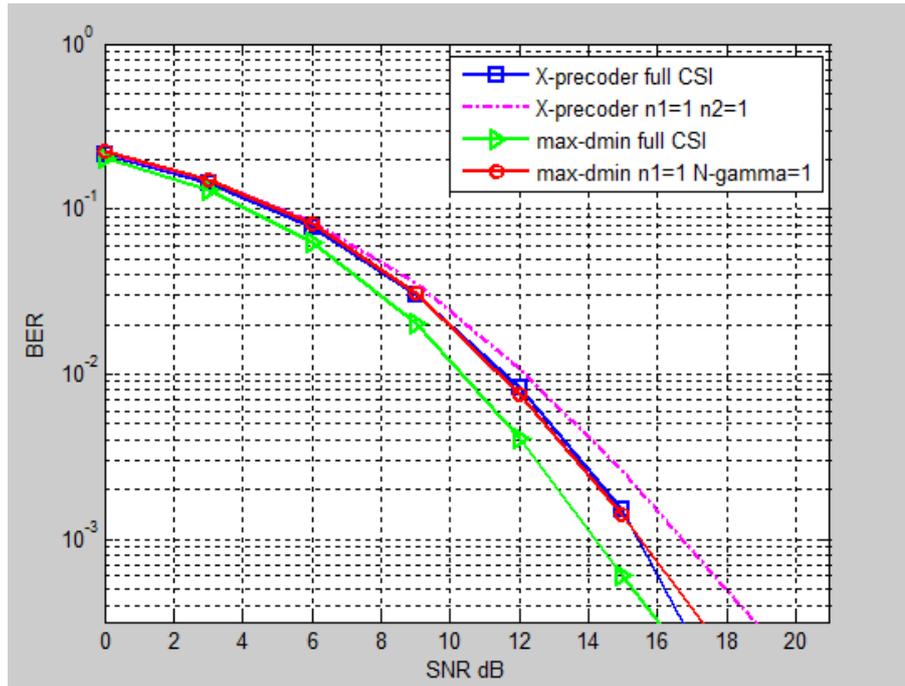
يعبر  $d_{min}$  عن المسافة الإقليدية الصغرى Minimum Euclidean Distance بين نقاط التعديل، كما يدخل في حساب أغلب علاقات احتمال الخطأ [2].

ونظراً لأهمية هذا البارامتر قام الباحثون باقتراح Max- $d_{min}$  Precoder لتعظيم هذه المسافة بين نقاط الإشارة في طرف الاستقبال، فينتج تحسين أداء الـ RER لأنظمة MIMO، ويعطى الحل الأمثل لـ Max- $d_{min}$  من أجل هوائيين في الإرسال في [20].

إن Max- $d_{min}$  Precoder أكثر تعقيداً من X and Y Precoder حيث أن مصفوفات الترميز ذات قيم عقدية [20]، لذا يقوم كاشف ML بالمستقبل بالبحث عبر فضاء حقيقي رباعي البعد بدلاً من فضاء ثنائي البعد. لقد تمّ العمل على Max- $d_{min}$  Precoder بوجود قناة راجعة محدودة بعد معرفة المعلومات العائدة للمرسل (الزاوية  $\gamma$  والمصفوفة  $F_v$  الناتجة من تطبيق SVD على مصفوفة القناة)، وتكميمها بالاعتماد على [24]، وسنقوم فيما يأتي بمقارنته من حيث أداء BER مع X and Y Precoder محدودة القناة الراجعة. نود التنويه إلى أن الباحثين قاموا في [7] بمقارنة X and Y Precoder مع Max- $d_{min}$  Precoder بالحالة المثالية Full CSI فقط، وأظهروا أن أداءهما متقارب جداً، كما بينوا أن درجة تعقيد Max- $d_{min}$  Precoder أكبر من درجة تعقيد X and Y Precoder؛ لذلك سنقوم هنا بمقارنة أدائهما بوجود قناة راجعة محدودة.

### 1. مقارنة أداء X-Precoder مع Max- $d_{min}$ Precoder:

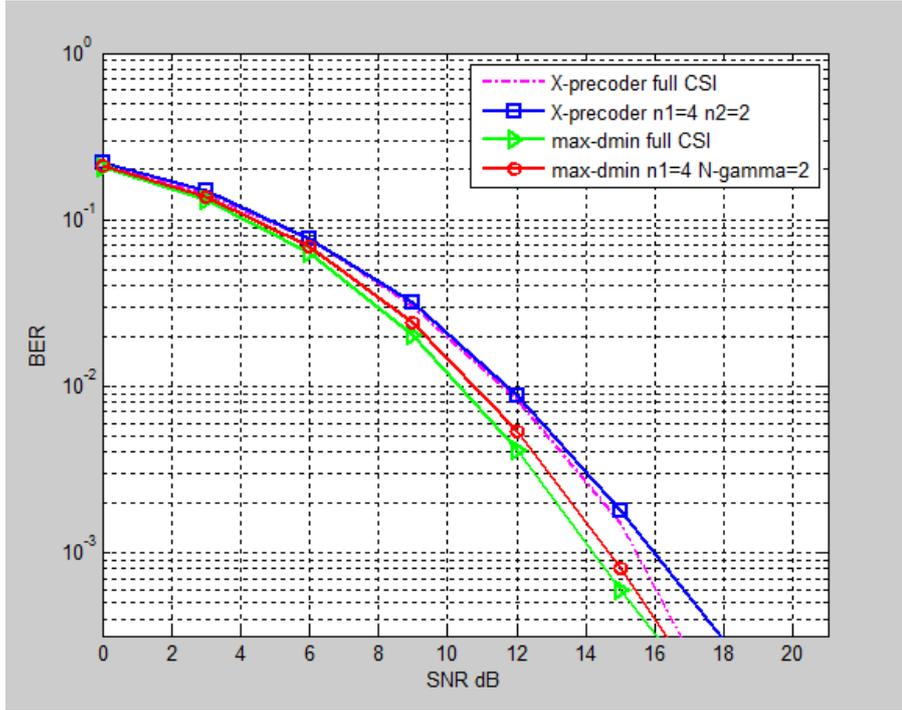
يوضح الشكل (10) مقارنة أداء تقنيتي X-Precoder و Max- $d_{min}$  Precoder عندما يكون عدد البتات العائد للمرسل عبر القناة الراجعة المحدودة  $n = 2$  bit حيث تشير  $N_{gamma}$  و  $n1_{d_{min}}$  إلى عدد بتات تكميم الزاوية  $\gamma$  والمصفوفة  $F_v$  في Max- $d_{min}$  Precoder على التوالي. ونلاحظ من الشكل تدهور قليل في أداء كل من X-Precoder و Max- $d_{min}$  Precoder مقارنة بالحالة المثالية Full CSI لكل منهما.



الشكل (10) مقارنة أداء X-Precoder ، Max- $d_{min}$  Precoder محدودي القناة الراجعة

عندما  $n1 = 1$   $n2 = 1$  ،  $N_{gamma} = 1$   $n1_{d_{min}} = 1$

كما يظهر الشكل (11) مقارنة الأداء عندما يكون عدد البتات العائد للمرسل عبر القناة الراجعة المحدودة  $n = 6$  bit. ونجد أيضاً أن أداء Max- $d_{min}$  Precoder أفضل من أداء X-Precoder ويعطي ربح بنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR حوالي 1.3 dB عند  $BER = 10^{-3}$ .



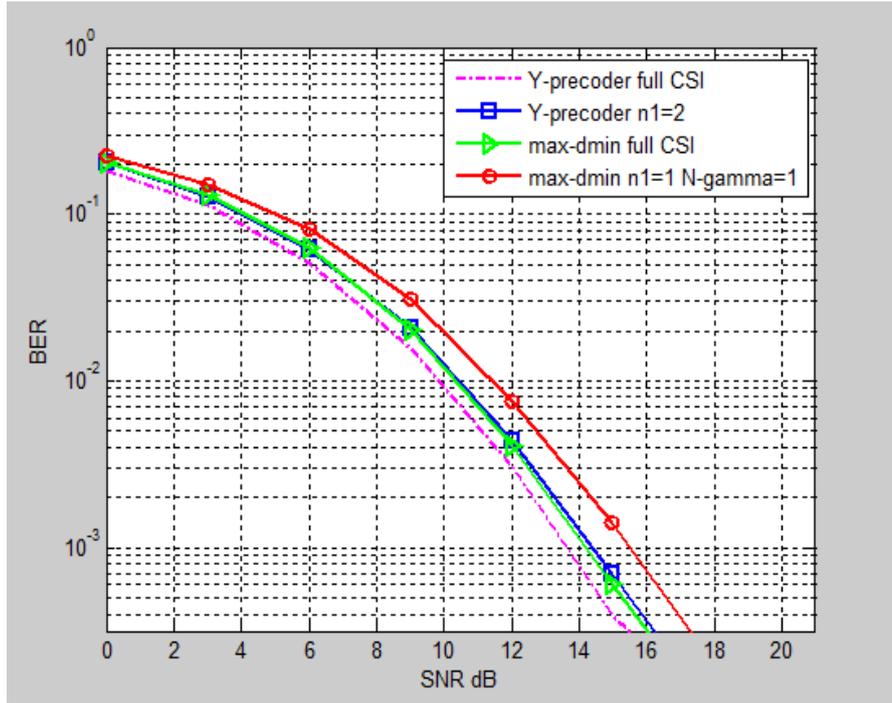
الشكل (11) مقارنة أداء X-Precoder ، PrecoderMax-d<sub>min</sub> محدودتي القناة الراجعة

عندما  $N_{\text{gamma}} = 2n1_{d_{\text{min}}} = 4n1 = 4n2 = 2$

## 2. مقارنة أداء Y-Precoder مع PrecoderMax-d<sub>min</sub>:

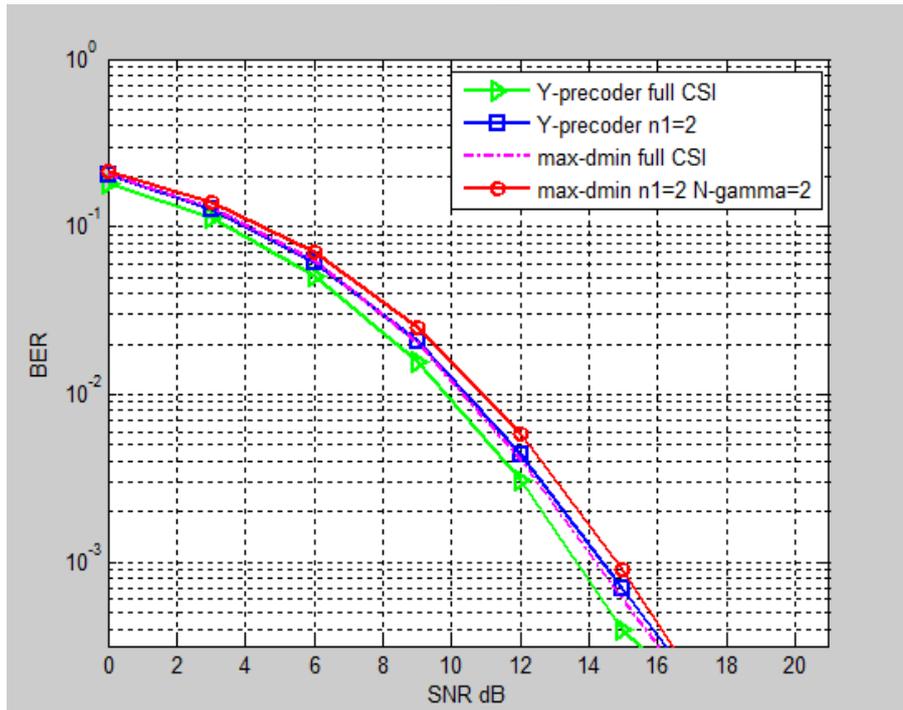
يستعرض الشكل (12) مقارنة أداء تقنيتي Y-Precoder و PrecoderMax-d<sub>min</sub> عندما يكون عدد البتات الكلي العائد للمرسل عبر القناة الراجعة المحدودة  $bitn = 2$ ، حيث نلاحظ من الشكل تدهور قليل في أداء PrecoderMax-d<sub>min</sub> مقارنة مع الأداء الجيد لـ Y-Precoder.

وبمضاعفة عدد البتات الكلي العائد للمرسل بتقنية Precoder Max-d<sub>min</sub> محدودة القناة الراجعة ليصبح  $n = 4$  bit مع الحفاظ على عدد البتات نفسه في تقنية Y-Precoder (2bit) نجد أن أداء الـ BER لكلا التقنيتين متقارب وباختلاف حوالي 0.3 dB فقط لصالح تقنية Y-Precoder عند  $BER = 10^{-3}$  كما هو موضح في الشكل (13).



الشكل (12) مقارنة أداء Y-Precoder ، Max-d<sub>min</sub> Precoder محدودتي القناة الراجعة

عندما  $n_1 = 2, N_{\gamma} = 1, n_{d_{min}} = 1, n_1 = 2$



الشكل (13) مقارنة أداء Y-Precoder ، Max-d<sub>min</sub> Precoder محدودتي القناة الراجعة

عندما  $n_1 = 2, N_{\gamma} = 2, n_{d_{min}} = 2$

## الاستنتاجات والتوصيات:

- قدمت تقنية X and Y Precoder مع دلالات نقل معطيات عالية بتعقيد منخفض مقارنة مع تقنيات ترميز مسبق أخرى، وذلك عند دراستها بشكل مثالي، ولقد بيّنا في هذا البحث أداء هذه التقنية عملياً بوجود قناة راجعة محدودة. ونلخص ما توصلنا إليه بالنقاط الآتية:
- أعطت تقنية X-Precoder بوجود قناة راجعة محدودة نتائج قريبة من الحالة المثالية عند استخدام قناة راجعة محدودة بـ 3bit وما فوق حيث تكون الخسارة في الأداء عند استخدام 6bit حوالي 0.3dB عند  $BER = 10^{-3}$ ، أما في حال توفر متطلبات صارمة على القناة الراجعة المحدودة يمكن استخدام عدد بتات كلي 2bit، لكن ستزداد الخسارة في الأداء إلى 1dB عند  $BER = 10^{-3}$ .
  - قدمت تقنية Y-Precoder بوجود قناة راجعة محدودة نتائج قريبة جداً من الحالة المثالية عند استخدام قناة راجعة محدودة بـ 2bit وما فوق حيث أشارت النتائج إلى أن خسارة الأداء تتراوح ما بين (0.3-0.6) dB عند  $BER = 10^{-3}$ ؛ لذا ننصح باستغلال تقنية Y-Precoder محدود القناة الراجعة في الانظمة التي تفرض قيوداً صارمة على هذه القناة.
  - بمقارنة أداء PrecoderMax-d<sub>min</sub> مع X and Y Precoder من حيث التعقيد نجد أن PrecoderMax-d<sub>min</sub> أكثر تعقيداً، لكن بمقارنتهما من حيث أداء الـ BER نجد ما يأتي:
  - i. أظهرت النتائج التفوق في أداء PrecoderMax-d<sub>min</sub> مقارنة مع X-Precoder عند استخدام عدد البتات الكلي نفسه بالقناة الراجعة المحدودة، حيث يعطي PrecoderMax-d<sub>min</sub> ربحاً في الأداء حوالي 1dB على الأقل عند  $BER = 10^{-3}$ .
  - ii. أظهرت النتائج التفوق في أداء Y-Precoder مقارنة مع PrecoderMax-d<sub>min</sub> عند استخدام قناة راجعة محدودة بـ 2bit، حيث يعطي Y-Precoder ربحاً في الأداء حوالي 1dB عند  $BER = 10^{-3}$ . لكن بمضاعفة عدد البتات الكلي للقناة الراجعة المحدودة (4bit) نحصل على أداء متقارب، ويتم مفاضلة الأداء على أسس أخرى يحددها المصمم مثل درجة التعقيد.

## المراجع:

- [1] FOSCHINI, G. J. *Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas*. Bell labs technical journal. Vol. 1, No. 2, 1996, 41-59.
- [2] GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 1<sup>st</sup> ed., California, 2005, 644.
- [3] MIETZNER, J; SCHOBBER, R; LAMPE, L; GERSTACKER, W. H; A. HOEHER, A. P. *Multiple Antenna Techniques for Wireless Communications – A Comprehensive Literature Survey*. IEEE communications. Surveys & tutorials. Vol. 11, No. 2, second quarter, 2009.
- [4] KWABENA, A. A. *Multiple Input Multiple Output (MIMO) Operation Principles*. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. Thesis, 2013.
- [5] VRIGNEAU, B; LETESSIER, J; ROSTAING, P; COLLIN, L; BUREL, G. *Statistical comparison between max-dmin, max-SNR and MMSE Precoders*. The 40th

- IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Oct. 29 - Nov. 1, 2006, 1611-1614.
- [6] LOVE, D. J; HEATH, R. W. *Limited Feedback Unitary Precoding for Spatial Multiplexing Systems*. IEEE Transactions On Information Theory. Vol. 51, No. 8, 2005, 2967-2976.
- [7] MOHAMMED, S. K; VITERBO, E; CHOCKALINGAM, A; HONG, Y. *MIMO precoding with X-Codes and Y-Codes*. IEEE Transactions On Information Theory. Vol. 57, No. 6, 2011, 3542-3566.
- [8] DIGGAVI, S. N; AL-DHAHIR, N; STAMOULIS, A; CALDERBANK, R. A. *Great expectations: The value of spatial diversity in wireless networks*. Proc. of IEEE. Vol. 92, No. 2, 2004, 219-270.
- [9] HOURANI, H. *An overview of diversity techniques in wireless communication systems*. Communications Lab. Helsinki University of Technology, 2005.
- [10] GESBERT, D; SHAFI, M; SHIU, D; SMITH, P. J; NAGUIB, A. *From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol. 21, No. 3, 2003, 281-302.
- [11] MAHEY, R; MALHOTRA, J. *On MIMO Channel Modeling for the Mobile Wireless Systems*. International Journal of Future Generation Communication and Networking. INDIA. Vol. 8, No. 5, 2015. 23-38.
- [12] BROWN, T; KYRITSI, P; ED CARVALHO, E. *Practical Guide to MIMO Radio Channel: With MATLAB Examples*. Wiley, USA, 2012, 296.
- [13] BEJARANO, O; KNIGHTLY, E. W; PARK, M. *IEEE 802.11ac: From Channelization to Multi-User MIMO*. IEEE Communications Magazine, Vol. 51, NO. 10, 2013. 84-90.
- [14] ANDREWS, J. G; GHOSH, A; MUHAMED, R. *Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking*. 1<sup>nd</sup> ed., Prentice Hall, 2007, 496.
- [15] SHARMA, M. *Effective Channel State Information (CSI) Feedback For MIMO Systems In Wireless Broadband Communications*. Queensland University of Technology, 2014.
- [16] VASHI, R. R; CHOKSI, A. H; SEVAK, M. M. *A Performance Comparison of Spatial Multiplexing MIMO*. International Journal of Computer Applications, Vol. 125, No. 3, 2015, 6-9.
- [17] NGO, Q; BERDER, O; SCALAR, P. *General minimum Euclidean distance-based precoder for MIMO wireless systems*. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Springer International Publishing, 2013, 1-12.
- [18] SHARMA, V. *MIMO Techniques in Downlink LTE Networks: A Review*. International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering, Vol. 4, No. 2, 2015, 325-327.
- [19] CHEHADE, T; COLLIN, L; ROSTAING, P; RADOI, E; BAZZI, O. *Power Allocation Optimization: Linear Precoding Adapted to NB-LDPC Coded MIMO Transmission*, International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2015, Article ID 975139, 2015, 1-11.
- [20] COLLIN, L; BERDER, O; ROSTAING, P; BUREL, G. *Optimal minimum distance-based Precoder for MIMO spatial multiplexing systems*. IEEE Transactions on Signal Processing. Vol. 52, No. 3, 2004, 617-627.
- [21] MOHAMMED, S. K; VITERBO, E; HONG, Y; CHOCKALINGAM, A. *X- and Y-Codes for MIMO precoding*. IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT), 2010, 2143-2147.

[22] CHENG, P; RUI, Y; GUO, Y. J; GUIZANI, M; CHEN, Z. *Limited Feedback Unitary Precoding for MIMO Full Stream Transmission. IEEE Transactions on Vehicular Technology* . Vol.63, No.8, 2014, 4092-4096.

[23] SCAGLIONE, A; STOICA, P; BARBAROSSA, S; GIANNAKIS, G. B; SAMPATH, H. *Optimal designs for space-time linear Precoders and decoders. IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 50, No. 5, 2002, 1051-1064.

[24] LETESSIER, J; VRIGNEAU, B; ROSTAING, P; BUREL, G. *Limited Feedback Unitary Matrix applied to MIMO dmin-based Precoder. 40TH IEEE - ASILOMAR CONF. ON SIGNALS, Systems and Computers*, Oct. 29 -Nov. 1, 2006, 1531-1535.

[25] TRAN, M; NIX, A; DOUFEXI, A. *Mobile WiMAX: Impact of Mobility on the Performance of Limited Feedback Linear Precoding. IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, Taiwan, 2010, 1-5.