

# تشكيل حزمة الاشعاع الهجين في شبكات الجيل الخامس بالاعتماد على تحليل القيمة الفردية

د.م. ايلي خليل

## ملخص

تعد عملية تشكيل الشعاع الـ **Beamforming** عملية أساسية في شبكات الجيل الخامس، و ذلك بهدف التغلب على المعوقات الناتجة عن اعتماد الأمواج الميليمترية لنقل البيانات، والتي تعاني من فقد مسار كبير وتتأثر بمختلف العوائق .

كما أنه لا بد من أجل التعامل مع هذه الخصائص اعتماد عدد كبير من الهوائيات (**Massive MIMO**) ، مما يجعل من الصعب الاعتماد على تشكيل الحزمة الرقمي بسبب المعوقات الطاقية الناتجة عن ضرورة وجود سلسلة راديوية خاصة بكل هوائي ، مما دفع باتجاه تطوير خوارزميات تشكيل الحزمة الهجينة.

سندرس في هذا البحث آلية تشكيل الحزمة الهجين بالاعتماد على طريقة تحليل القيمة الفردية، وسنقوم بإجراء محاكاة للنظام بالاعتماد على هذه الطريقة ونقارن أداءه مع حالة تشكيل الحزمة الرقمي الكامل

الكلمات المفتاحية : تشكيل حزمة الاشعاع، شبكات الجيل الخامس، الأمواج الميليمترية ، الأنظمة متعددة الدخل والخرج الهائلة

# Hybrid Beamforming in 5G Network using Singular Value Decomposition

**Dr. Eng. ElieKhalil**

Beamforming is an essential process in 5G networks, with the aim of overcoming the obstacles resulting from the adoption of millimeter waves to transmit data, which suffer from large path loss and are affected by various obstacles.

Also, in order to deal with these characteristics, a large number of (Massive MIMO) antennas must be adopted, which makes it difficult to rely on digital beamforming due to the energy constraints resulting from the necessity of having a radio chain for each antenna, which has pushed towards developing hybrid beam forming algorithms.

In this paper, we will study the mechanism of hybrid beamforming based on the Singular value Decomposition method, and we will simulate the system based on this method and compare its performance with the case of full digital beamforming.

**-1 مقدمة:**

تعتمد شبكات الجيل الخامس الخليوية على الأمواج المليمترية كطبقة فيزيائية لنقل البيانات، وذلك بهدف تأمين معدلات نقل بيانات عالية؛ حيث يعتمد أي نظام اتصالات لاسلكي لتأمين الطلب المتزايد على الكفاءة الطيفية (SE) ، وعرض النطاق الترددي، وقد كانت جميع التقنيات اللاسلكية تعمل على ترددات ضمن النطاق 300MHZ و 3GHZ ، وبما أن تكنولوجيا الطبقة المادية المستعملة قد بلغت سعة شانون (Shanon capacity) [1] ، فالخيار الوحيد غير المستكشف هو عرض النطاق الترددي للنظام. لذلك يكمن جوهر الشبكات اللاسلكية لنظام 5G في استعمال التردد العالي لنطاق الأمواج المليمترية، والذي يتراوح من 30GHz إلى 300GHz .

دفع الاعتماد على الأمواج المليمترية الى استخدام أنظمة Massive MIMO وذلك بهدف التغلب على العوائق الناجمة عن اعتماد الامواج المليمترية؛ حيث إن خصائص انتشار الإشارات المليمترية فريدة من نوعها بسبب الطول الموجي الصغير جداً مقارنة بحجم معظم الكائنات في البيئة؛ حيث يزداد فقد المسار بسبب صغر الأطوال الموجية للموجات المليمترية، كما أنها أكثر عرضة لآثار الغلاف الجوي، والخفوت الناجم عن الجسم البشري، ولا يمكن أن تنتشر جيداً خلال معظم المواد، الى جانب أن طول الموجة الصغير للأمواج المليمترية، يسمح بتكديس عدد كبير من الهوائيات ضمن مساحة صغيرة، ولكن هذا سيعني استهلاك كبير في الطاقة الأمر الذي يصبح من الصعب معه التنفيذ العملي لهذه الطريقة؛ وبالتالي فمن المهم جداً تقديم حلول ذات كفاءة في استهلاك الاستطاعة مع الحفاظ على المتطلبات الفنية.

إن معالجة الإشارة في الأنظمة الميكروية التقليدية مع عدد محدود من عناصر الهوائي سواء عبر عملية وزن بقم ثابتة، أو تشكيل الحزمة المتكيف، يمكن أن تتم بسهولة في المجال الرقمي الأساسي، بينما في الاشارات المليمترية ومع اعتماد الـ Massive MIMO ، فإن عملية تشكيل الحزمة الـ Beamforming ستستخدم عدد كبير من

الهوائيات، وهنا لن تعد طرائق تشكيل الحزمة الرقمية التقليدية مجدية؛ حيث إنه يجب أن يتصل كل هوائي بسلسلة راديوية RF خاصة به مما يعني تكلفة كبيرة وتعقيد كبير واستهلاك كبير للطاقة؛ حيث أن عدد الهوائيات يمكن أن يصل في المحطة الرئيسية الى المئات وحتى الآلاف، كما أن طرائق تشكيل حزمة الشعاع المتكيفة المتطورة لم تستعمل بعد على نطاق واسع في اتصالات الأمواج الميلترية، بسبب زيادة النفقات العامة لمعالجة الإشارات والتأخير الحاصل، كل هذه المعوقات فرضت توجهاً جديداً في تشكيل الحزمة، وهو تشكيل الحزمة الهجين بين الرقمي و التماثلي، وذلك بهدف تقليل عدد السلاسل الراديوية مع الإبقاء على عدد الهوائيات الكبير [2].

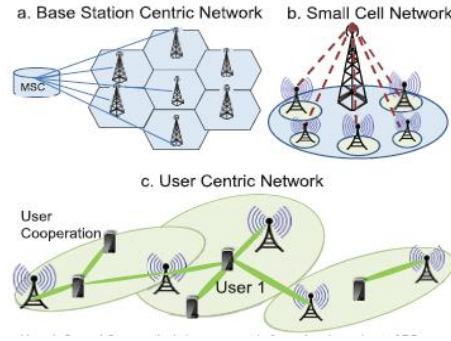
## 2- هدف البحث:

نعمل في هذا البحث على دراسة طريقة تشكيل حزمة الإشعاع الهجينة في أنظمة الجيل الخامس عبر الاعتماد على طريقة تحليل القيمة الفردية للقناة، وتم إجراء محاكاة لهذه الطريقة باستخدام برنامج الماتلاب (نرفق في الملحق A الكود البرمجي المستعمل للمحاكاة) وإظهار جدواها ومقارنتها مع طريقة تشكيل الحزمة الرقمية الكاملة.

## 3- بنية نظام 5G:

إن عرض النطاق الترددي في الطيف اللاسلكي التقليدي المحدود، وضرورة تقليل زمن التأخير الى رتبة ميلي ثانية دفع بالشبكات اللاسلكية لكسر نموذج الشبكة ذات المحطة الأساسية (BS) المحورية، ويوضح الشكل (1) هذه الحركة التدريجية من التمركز حول الـ BS الى شبكة تعتمد مركزية الجهاز. فقد تم التركيز على طرائق تصميم الشبكات التي تتمركز حول المستخدم، فالمستخدم لم يعد الحلقة النهائي في الشبكة اللاسلكية .

تتصل شبكات الجيل الخامس بعقد متنوعة ذات تباعد مختلف؛ حيث سيتم نشر عدة أنواع من الخلايا الصغيرة و micro و pico و femto ، وبالتالي فإن شبكات 5G الكثيفة سوف تعاني من تداخل عالي من القنوات المشتركة، وهذا يدفع بدوره نحو توجيه أكبر للهوائيات.



الشكل (1) (a) مركزية المحطة الرئيسية (b) شبكة الخلايا الصغيرة (c) الشبكة ذات المركزية عند المستخدم

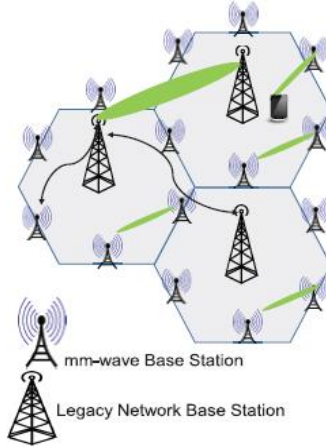
كما أن الفصل بين مستوى المستخدم، أو المعطيات ومستوى التحكم هو: من النقاط الأساسية عند تصميم شبكات الجيل الخامس، مما سيسمح باعتماد مفهوم الشبكات المعرفة برمجياً، إلى جانب إمكانية التشغيل المتداخل السلس بين مختلف الشبكات.

### 3-1 الشبكة الراديوية:

تقترح شبكة 5G - كما ذكرنا - استخدام الترددات العالية للاتصال، والتي تتميز بانتشار واختراق محدودة للغاية في البيئة الخارجية، وبالتالي، لا يمكن أن يكون تصميم العقدة في الشبكات الخلوية ثابت وفق نمط محدد، بل سيتم النشر بشكل متنوع وفق الحاجة، فالنشر المكثف للغاية ضروري في المناطق التي تتطلب ارتفاع معدلات البيانات، مثل محطات المترو ومراكز التسوق والمكاتب [3].

إن الكسب الكبير الناتج عن تشكيل حزمة الإشعاع سيزيد التغطية؛ حيث سيقلل التداخل ويحسن جودة الرابط في حواف الخلية. هذه الميزة ستمكن محطات BS الميلترية من تقليل التأخير، وتوفير حلول فعالة من حيث التكلفة. يظهر الشكل (2) نظاماً مختلطاً لموجة ميلترية في الجيل الخامس مع شبكة 4G القديمة، مما يتيح للمستخدم التبدل بين الشبكتين بالتناوب للحصول على تجربة أفضل، يمكن أيضاً استخدام طيف الموجة

الميلترية للبيانات فقط ، في حين أن نظام التحكم يمكن أن يتم عن طريق استخدام شبكات 4G التقليدية [2].



الشكل (2) العمل المشترك لشبكة الجيل الخامس وشبكة الجيل الرابع التقليدية

### 2-3 الهوائيات :

تسمح الأطوال الموجية الصغيرة للإشارات الميلترية بتصغير أحجام الهوائيات، وتقليل التباعد بينهم مما سيعني إمكانية استعمال عدد أكبر من الهوائيات الصغيرة، وسيسهل التحكم بالمطال والطور للإشارة عبر مصفوفة الهوائيات بتحسين توجيه الموجة الكهرومغناطيسية في الاتجاه المرغوب، والغائها في باقي الاتجاهات.

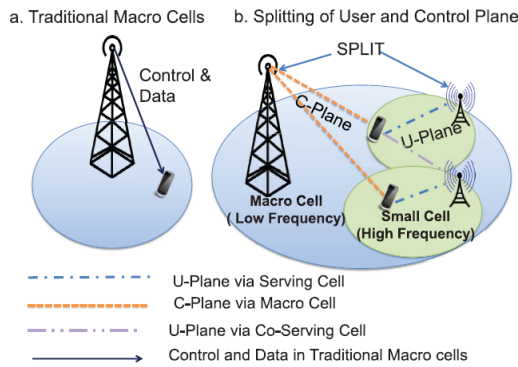
يعتمد النشر الناجح لشبكات 5G على فعالية تصميم مصفوفة الهوائيات، ولا بد من استخدام مصفوفات الهوائيات الذكية متعدد الحزم الإشعاعية لتحقيق قدرات الوصول المتعدد بتقسيم الفراغ **SDMA Space-division multiple access**؛ حيث تساعد الهوائيات الذكية في التخفيف من التداخل، مع الحفاظ على منطقة التغطية المثلى، وتخفيض استطاعة الإرسال لكل من الهاتف المحمول ومحطة الإرسال. بالإضافة الى أنه ومن أجل الهوائي نفسه يمكن أن ننقل المزيد من الطاقة لتردد أعلى عن طريق استخدام الحزم الإشعاعية الضيقة [4]، وسيتيح تطبيق الهوائي الذكي نفس القناة ليتم

استخدامها من قبل مختلف الحزم. مما يقلل من واحدة من المشاكل الرئيسية في الاتصالات اللاسلكية وهي تداخل القناة المجاورة.

### 3-3 الشبكات المصممة برمجياً (SDN) Software Design Network :

ان التغييرات في بنية الشبكة والهوائيات المستعملة في 5G تؤكد على ضرورة نشر خلايا صغيرة، وزيادة عدد الهوائيات. بالتالي فإن تنظيم العديد من المخدمات وأجهزة التوجيه وصيانتها في بيئة كثيفة كخلايا الجيل الخامس يعد تحدياً معقداً، لذا تم اقتراح فكرة الشبكات المصممة برمجياً (SDN) كحل مبسط لهذا التحدي المعقد؛ حيث يتم الفصل بين مستويات التحكم (c-plane)، ومستويات البيانات او تسمى بمستوى المستخدم (U-Plane)، وبالتالي إدخال السرعة والمرونة في شبكات الجيل الخامس [5].

يظهر الشكل (3) عملية الفصل هذه، والتي تؤمن زيادة في قدرة مستوى البيانات للمستخدم، وبالتالي تصبح مستقلة عن موارد التحكم. هذا يمنح شبكة 5G معدل نقل بيانات عالية في المواقع المطلوبة، من دون تكبد كلفة زائدة لمستوى التحكم. تتم عملية فصل مستوى البيانات عن مستوى التحكم باستخدام مكونات برنامجية. هذه المكونات البرنامجية هي المسؤولة عن إدارة مستوى التحكم، وبالتالي تخفيف قيود التجهيزات ومحدداتها [3].



الشكل (3) الفصل بين مستوى التحكم ومستوى البيانات في نظام الجيل الخامس الخليوي

### 4-3 سحابة شبكة الوصول الراديوي (Cloud RAN) :

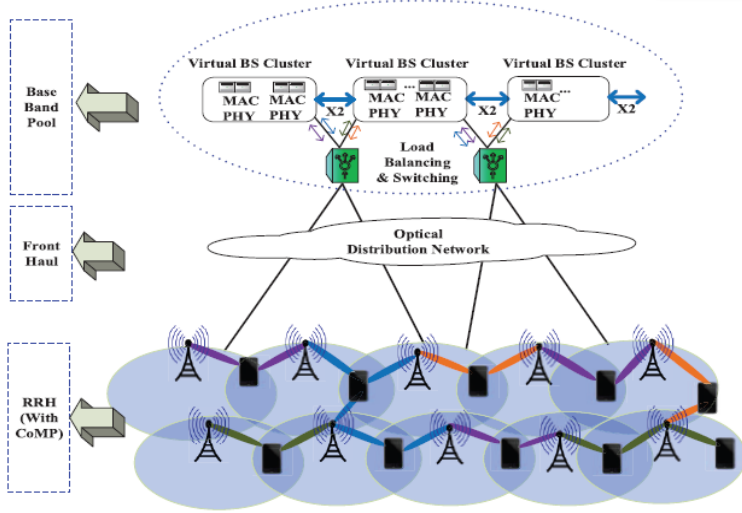
تحل سحابة شبكة الوصول الراديوي (C-RAN) بعض المشاكل الرئيسية المرتبطة بزيادة الطلب على ارتفاع معدلات البيانات . تعمل الصناعة اللاسلكية على اتخاذ تدابير لتعزيز قدرة الشبكة عن طريق إضافة المزيد من الخلايا ، وتنفيذ تقنيات MIMO ، إنشاء بنية معقدة من الشبكات غير المتجانسة HetNets ونشر الخلايا الصغيرة. ولكن ، التداخل بين الخلايا سيزداد ، والتكلفة والنفقات التشغيلية ستزداد مما سيعوق هذه الجهود. وهنا اقترحت C-RAN لتحسين بنية النظام ، والتنقل ، وأداء التغطية والطاقة وبنفس الوقت يقلل من كيفية نشر الشبكة و التشغيل.

تستند سحابة شبكة الوصول الراديوي (C-RAN) على أساسيات المركزية والواقع الافتراضي؛ حيث يتم تجميع الموارد الأساسية في BaseBand Unit (BBU) ، وتقع في مكان بعيد (ليس في مواقع الخلايا).

يبين الشكل (4) بنية C-RAN النموذجية ، مع BBUs من عدة مواقع متحكم بها وتتمركز في تجمع BBU الظاهري. وهذا يؤدي الى مكاسب إحصائية مضاعفة و كفاءة ووفرة في استخدام الطاقة والموارد ، بالتالي تجمعات BBU الافتراضية تزيد من سهولة التوسع و خفض التكاليف وتكامل الخدمات المختلفة والتخفيض في استهلاك الوقت للتجارب الميدانية [3].

بينما تتألف الواجهات الراديوية عن بعد Remote Radio Heads (RHH) ، من مكونات جهاز الإرسال ، والمكبرات وتجهيزات المعالجة الرقمية والتحويلات الرقمية التناظرية ، مضخمات الطاقة والمرشحات [3] ، و ترتبط RRHs إلى تجمع BBU بواسطة الألياف الضوئية . وتمكن القدرة الحوسبية السحابية بسهولة من التعامل مع جميع عمليات التحكم المعقدة.





الشكل (4) سحابة شبكة الوصول الراديوي

#### 4- تشكيل الحزمة الهجين:

بعد تشكيل الحزمة الهجين عاملاً حاسماً في إمكانية استعمال الإشارات المليمترية واعتماد الـ Massive MIMO ، ومن دون هذه الآلية سيكون استعمال الأمواج المليمترية مكلفاً ومعقداً جداً في حال اعتماد تكوين الشعاع الرقمي فحسب، أو سيعتريه عدم الدقة و تزايد التداخل بين المستخدمين في حال اعتماد تشكيل الحزمة التماثلي فقط.

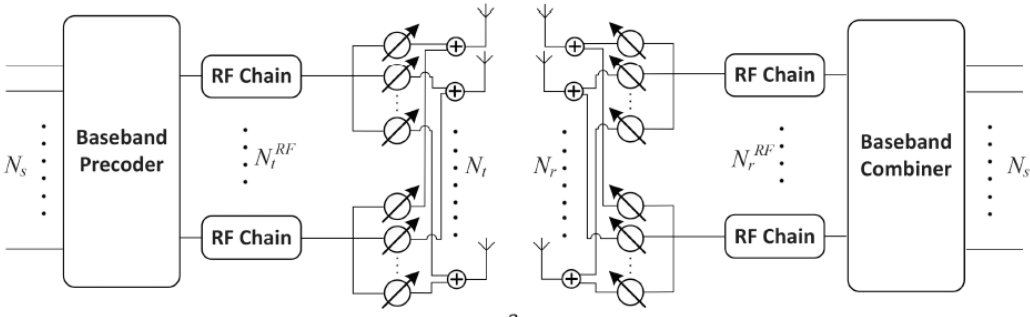
بالإضافة الى أن استعمال تشكيل الحزمة الهجين سيزيد بصورة واضحة كفاءة الطاقة؛ حيث يقلل من طاقة الإرسال المحتملة للوصلة الهابطة والوصلة الصاعدة من خلال آلية التجميع المتناسك، وزيادة مساحة اشعاع الهوائي [2]؛ حيث يمكن أن نزيد من كفاءة الطاقة في الوصلة الصاعدة عن طريق الحد من طاقة الإرسال المطلوبة لكل جهاز مستعمل (UE) ، وهو ما يتناسب عكسياً مع عدد الهوائيات في BS مع عدم وجود انخفاض في الأداء.

كما أن زيادة عدد الهوائيات، يسمح باستخدام مضخمات الترددات الراديوية منخفضة التكلفة في رتبة  $m$  Watt ، لأن إجمالي الطاقة المنقولة تتناسب طردياً مع  $1/N_r$ ؛ حيث

$N_r$  هو عدد هوائيات الإرسال [2] ، على عكس مصفوفات الهوائيات الكلاسيكية، والتي تستخدم هوائيات قليلة تتغذى من مكبرات ذات طاقة عالية وبالتالي سينعكس هذا الأمر على تخفيف الكلفة التشغيلية.

ويقسم تشكيل الحزمة الهجين الى نمطين اساسين : متصل كامل (Full connected) ومتصل جزئي (Sub-connected) ، في حالة المتصل الكلي تتصل كل سلسلة راديوية RF بكامل الهوائيات، بينما في النوع الجزئي تتصل كل سلسلة راديوية بمصفوفة جزئية من مصفوفة الهوائيات الكلية [2].

تتكون عملية تشكيل الحزمة الهجينة كما هو مبين في الشكل (5) من مرحلة تشكيل الحزمة الرقمي (Digital Precoding) ، والتي يتم فيها تحديد معاملات وزن وفقاً لأحد تقنيات الـ Precoding المستعملة لتشكيل الحزمة في أنظمة MIMO ثم مجموعة من السلاسل الراديوية RF ، والتي تتكون من مجموعة من التجهيزات الالكترونية كالمبدل من رقمي الى تماثلي ADC و ثم مرحلة تشكيل الحزمة التماثلي .



الشكل (5) تشكيل الحزمة الهجين

يمكن تنفيذ آلية تشكيل الشعاع التماثلي إما عن طريق مزيجات طور متحكم بها رقمياً، أو عبر مفاتيح إلكترونية (Switches)، أو هوائي عدسة (Leans antenna). إن ميزة

استعمال مزيجات الطور المتحكم بها رقمياً هو امكانية تشكيل الشعاع الرقمي من تصحيح مشكلة عدم الدقة الذي سيحدث عند استعمال مزيجات الطور؛ حيث يقضي على التداخل المتبقي بين تدفقات البيانات، إلى جانب أنها تحقق كسب مصفوفة عالي، لكنها تعاني من ارتفاع استهلاك الطاقة والخطأ الكمي لأن الإزاحات الطورية المتاحة محدودة. بينما طريقة تشكيل الحزمة التماثلي على أساس مفاتيح فهي منخفضة الطاقة و ذات تعقيد منخفض حيث تحقيق انخفاض في استهلاك الطاقة في حدود 45-70 % لأحجام مجموعة القياسية وعدد متساو من السلاسل الراديوية بالمقارنة مع مزيجات الطور غير أنها ذات ربح مصفوفة أقل بالمقارنة مع مزيجات الطور [6].

تتجز عملية تشكيل الحزمة الرقمية باعتماد أحد خوارزميات تشكيل الحزمة التقليدية في الـ MIMO ، مع ضبط المعاملات بحيث تتناسب مع القيود المفروضة بسبب تشكيل الحزمة التماثلي ، وسنعمد في دراستنا على استعمال طريقة تحليل القيمة الفردية لانجاز تشكيل الحزمة الرقمي.

### 5- تشكيل الحزمة الهجين بالاعتماد على تحليل القيمة المفردة:

نفرض لدينا مرسل مزود بـ  $N_t$  هوائي، و بـ  $N_t^{RF}$  سلسلة راديوية RF، متصل مع مستقبل مزود بعدد هوائيات  $N_r$  ، و  $N_r^{RF}$  سلسلة راديوية ، فبالنالي سيتلقى المستقبل  $N_t^{RF}$  تدفق واحد للبيانات،

بفرض لدينا  $N_s$  رمز بيانات، سنتجز عملية تشكيل الحزمة الرقمي في البداية، كما هو مبين في الشكل (5)؛ حيث ستمرر هذه البيانات عبر مشفر أولي أساسي في المجال الرقمي (Baseband Precoder)  $F_{BB}$  المكون من مصفوفة  $N_t^{RF} \times N_s$  من المعاملات التي سنحددها لاحقاً ثم تحول سلاسل البيانات المشفرة الى المجال الراديوي لتتم عملية تشكيل الحزمة التماثلي (analog Beamforming)  $F_{RF}$  المكون من

مصفوفة  $N_t \times N_t^{RF}$  من الأوزان، بالتالي ستكون مصفوفة المشفر الجامعة هي

$$F = F_{BB} F_{RF}$$

إن معاملات المشفر الرقمي تتغير بالمطال والطور، بينما معاملات تشكيل الحزمة التماثلي ذات مطال ثابت وتتغير في الطور فقط، وتكون قيمة هذا المطال  $1/\sqrt{N_t}$  في حال اعتمدت مزيجات الطور.

يمكن نمذجة الإشارة المرسله من المستقبل على النحو:

$$x = F.S \quad (1)$$

حيث  $S$  هو شعاع رموز البيانات المرسله وهو بطول  $1 \times N_s$  رمز، وهي رموز مستقلة لكل مستخدم وذات طاقة واحدة وتحقق:

$$E[S_i S_j^*] = 0, i \neq j \quad \text{و} \quad E[S_i S_i^*] = 1/\sqrt{N_t}$$

تعطى الإشارة المستقبلية بالشكل:

$$y_i = Hx + n = HFS + n \quad (2)$$

حيث  $H_i$  هي القناة بين الـ BS و المستخدم  $UE_i$  و  $n$  هو الضجيج الغاوصي .

سيقوم المستقبل الآن بإجراء عملية تسوية للإشارة الواردة عبر مجمع رقمي (Digital Combiner) ، ومجمع تماثلي (Analog Combiner)  $W_{RF}$  ، فبالتالي تكون مصفوفة المجمع الكلية هي  $W_i = W_{BB} W_{RF}$  ؛ حيث ستم معالجة الإشارة المستقبلية، وبالتالي سنحصل على شعاع البيانات المخمنه وفق [7] :

$$\hat{s}_i = W^H HFS + W_i^H n_i \quad (3)$$

توصف القناة اللاسلكية الميليمترية H - وفق النموذج التالي [8]:

$$H = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{n_{cl}}^{N_{cl}} \sum_p^{N_p} \rho_{n_{cl}} g_{n_{cl},p}(t) \cdot \alpha_{n_{cl},p}^{R_x}(\varphi_{n_{cl},p}^{R_x}, \theta_{n_{cl},p}^{R_x}) \cdot \alpha_{n_{cl},p}^{T_x}(\varphi_{n_{cl},p}^{T_x}, \theta_{n_{cl},p}^{T_x})^H \quad (4)$$

حيث  $N_{cl}$  عدد clusters و  $N_p$  عدد المسارات ضمن كل Cluster.

الاستطاعة الجزئية الخاصة بكل Cluster  $\rho_{n_{cl}}$ .

و  $g_{n_{cl},p}(t)$  ربح قناة الخفوت ضيق النطاق العقدي.

و  $\alpha_{n_{cl},p}^{R_x}(\varphi_{n_{cl},p}^{R_x}, \theta_{n_{cl},p}^{R_x}) \subset C^{N_r}$  و  $\alpha_{n_{cl},p}^{T_x}(\varphi_{n_{cl},p}^{T_x}, \theta_{n_{cl},p}^{T_x}) \subset C^{N_t}$  هما تابعا استجابة

مصفوفتي الاستقبال والإرسال ثلاثية الأبعاد على التوالي وبالتالي سينتج لدينا مصفوفة

مكونة من  $N_r$  صف و  $N_t$  عمود.

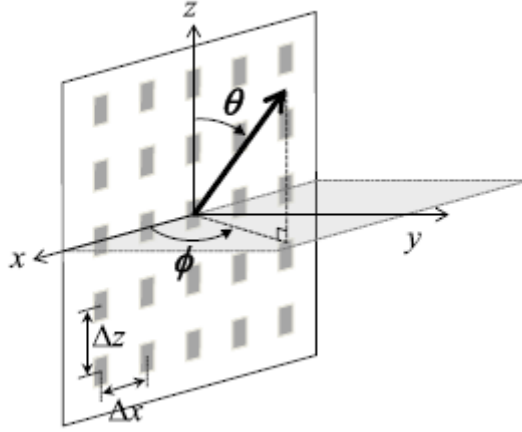
سنعتمد في دراستنا على مصفوفة هوائيات استقبال وإرسال مستوية عمودية (Uniform Planer Array) - كما هو مبين في الشكل (6) - وهو ما سيدعم تشكيل الحزمة ثلاثي البعد (D-Beamforming3).

سنعتمد في تنفيذ تشكيل الحزمة التماثلي على شبكة من مزيحات الطور، وبالتالي كل قيم المصفوفة

سكون ذات مطال ثابت  $1/\sqrt{N_t}$  عند الإرسال، و  $1/\sqrt{N_r}$  عند المستقبل.

تعطى مصفوفة تشكيل الحزمة التماثلية  $F_{RF}$  بالشعاع التالي :

$$F_{RF} = [W^{(0,0)}, \dots, W^{(n-1,m-1)}]$$



الشكل (6) مصفوفة الهوائيات العمودية المستطيلة المستعملة

يتم اختيار معاملات مصفوفة تشكيل الحزمة التماثلي من CodeBook محددة مسبقا لعدد من الزوايا يغطي عدد من الاحتمالات بحسب دقة هذه الCodebook ، وتتألف الCodebook من مجموعة من الاشعة، أو تسمى بالكلمات المشفرة (CodeWord)، وكل كلمة مشفرة هي عبارة عن مجموعة من قيم الازاحة الطورية التي ستطبق على كل عناصر الهوائي.

يتم تشكيل الCodebook بهدف تكبير ربح المصفوفة في اتجاه محدد، ولا بد من أجل مصفوفات مستوية أن تدعم الCodebook تشكيل الحزمة ثلاثي البعد (3D-Beamforming)، أي تكبير ربح المصفوفة في من أجل كلا الزاويتين  $\theta, \varphi$ .

بفرض  $F$  هي الCodebook المستعملة سيكون عدد اشعتها مساوياً لـ  $2^{N_\theta N_\varphi}$  ؛

حيث  $N_\theta$  هو عدد زوايا  $\theta$  المعتمدة و  $N_\varphi$  هو عدد الزوايا  $\varphi$  المعتمدة، عندها سيكون شكل الأشعة التي سيتكون منها الCodebook على النحو التالي:

؛ حيث :  $K_\phi$  ستأخذ قيم من 0 حتى  $2^{N_\phi} - 1$  و  $K_\theta$  ستأخذ القيم من 0 حتى  $2^{N_\theta} - 1$  [9].

بعد إرسال المحطة الرئيسية إشارة من أجل كل Codeword ، سيقوم المستقبل باختيار زوج من الـ CodeWord ، بما يكبر الاستطاعة المستقبلية لديه [9]:

$$(F_{RF}, W_{RF}) = \arg \max_{W_{RF}, F_{RF} \in F} |W_{RF}^* H F_{RF}| \quad (5)$$

بعد أن يحدد كل مستخدم زوج معاملات مصفوفة تشكيل الحزمة التماثلي الخاصة به عند المرسل والمستقبل، سيتم الآن تحديد معاملات تشكيل الحزمة الرقمي (Precoding) وذلك بالاعتماد على طريقة تحليل القيمة الفردية Singular value . SVD Decomposition

أولاً نشكل القناة الرئيسية الفاعلة (Effective Baseband Channel) ، فبعد اختيار معاملات تشكيل الحزمة الخطي تعطى القناة وفق [9] :

$$\begin{aligned} H_{eff} &= W_{RFi}^* H_i F_{RFi} \\ &= \sqrt{N_i N_r} g_i(t) W_{RFi} F_{RFi} \end{aligned} \quad (6)$$

ثم نقوم بتحليل القيمة الفردية SVD لمصفوفة القناة الفعالة كما يلي [10] :

$$H_{effi} = UAV^H \quad (7)$$

حيث  $U, V$  هما مصفوفتان واحدتان ، و  $A$  هي مصفوفة قطرية تحوي قيم أحادية  
 The  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$  في قطرها، و  $(*)^H$  تعني المرافق العقدي للمنقول  
 . conjugate transpose operation

عندها وبهدف تعظيم المعلومات المتبادلة وكبح التداخلات يعطى المشفر الرقمي  
 بالاعتماد على SVD كما يلي [11] :

$$F_{BB} = V \quad (8)$$

$$W_{BB} = U \quad (9)$$

غير أن هذه القيم لمعاملات تشكيل الحزمة الرقمي لابد أن يتم ضبطها من أجل أن تلائم  
 محددات استطاعة الـ Precoding ، وذلك لوجود عملية تشكيل حزمة تماثلية الى جانب  
 عملية تشكيل الحزمة الرقمية لذا يجب أن يتحقق الشرط الآتي [12]:

$$\|F_{RF} F_{BB}\|_F^2 = N_s \quad (10)$$

$$\|W_{RF} W_{BB}\|_F^2 = N_s \quad (11)$$

وبالتالي لابد من ضبط معاملات المشفر والمجمع الرقمي لتصبح على النحو [12] :

$$F_{BB} = \frac{VN_s}{\|F_{RF} F_{BB}\|_F^2} \quad (12)$$

$$W_{RF} = \frac{UN_s}{\|W_{RF} W_{BB}\|_F^2} \quad (13)$$



سنجري الآن محاكاة لهذا النظام باستخدام برنامج الماتلاب، حيث تمت النمذجة من أجل عدد هوائيات  $N=128$  و  $N=256$  ومن أجل عدد سلاسل راديوية  $N_i^{RF} = 16$  و  $N_i^{RF} = 8$ ، ونرفق في الملحق (A) الكود البرمجي الذي تم استعماله في المحاكاة ورسم النتائج التي تم التوصل اليها

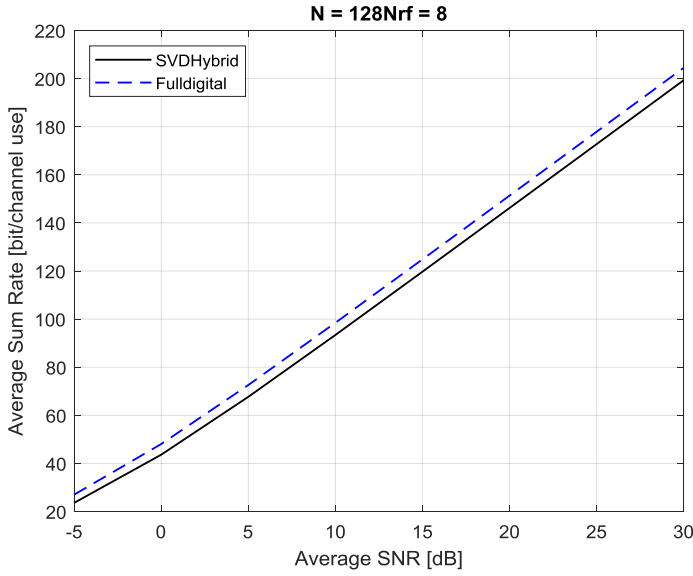
وسندرس أولاً أداء تشكيل الحزمة الهجين باعتماد خوارزمية تحليل القيمة الفردية، وسنقارن أداءها مع حالة تشكيل الحزمة الرقمي الكامل من أجل كل حالة من الحالات المدروسة.

يتبين من الشكل (7) أن الطريقة الهجينة المتبعة تقدم أداء قريب من الطريقة الرقمية بالكامل حيث بلغ معدل نقل البيانات في حالة الطريقة المتبعة عند استعمال 128 هوائي و 8 سلاسل راديوية  $199.3 \text{ bit/channel}$  من أجل  $\text{SNR}=30 \text{ dB}$  بينما بلغ في الحالة الرقمية الكاملة  $204.5 \text{ bit/channel}$

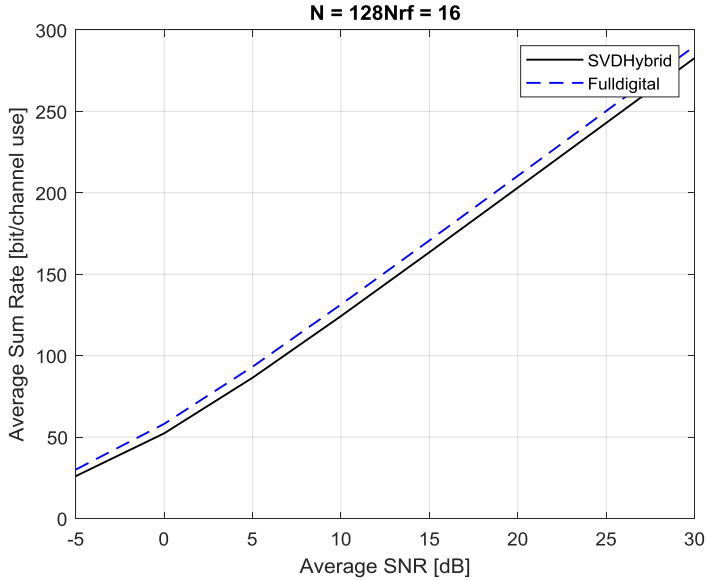
كما تبين من الشكل (8) نفس النتيجة في حالة استعمال 16 سلسلة راديوية حيث بلغ معدل نقل البيانات للطريقة المقترحة  $282.8 \text{ bit/channel}$  من أجل  $\text{SNR}=30\text{dB}$  بينما بلغ في الحالة الرقمية الكاملة  $290.1 \text{ bit/channel}$ .

وبمقارنة نتائجنا مع النتائج التي تم التوصل اليها في البحث [13] الذي درس اعتماد طريقة تشكيل الحزمة الهجينة باعتماد الـ SVD فقد بلغ معدل نقل البيانات 160 bit/channel من أجل  $\text{SNR}=0 \text{ dB}$  و  $380 \text{ bit/channel}$  من أجل  $\text{SNR}=10\text{dB}$  و من أجل 256 هوائي ارسال و 64 هوائي استقبال.

وتختلف النتائج التي تم التوصل اليها بسبب اختلاف البارامترات المدروسة في البحث [13] والبارامترات المستعملة في هذا البحث ، ولكن كلا الباحثين أثبتا امكانية اعتماد تشكيل الحزمة الهجين بالاعتماد على الـ SVD وأنه يقدم أداء مقارب للحالة الرقمية الكاملة.



الشكل (7) معدل نقل البيانات لنظام تشكيل حزمة هجين من أجل  $N=128$  و  $N_t^{RF} = 8$

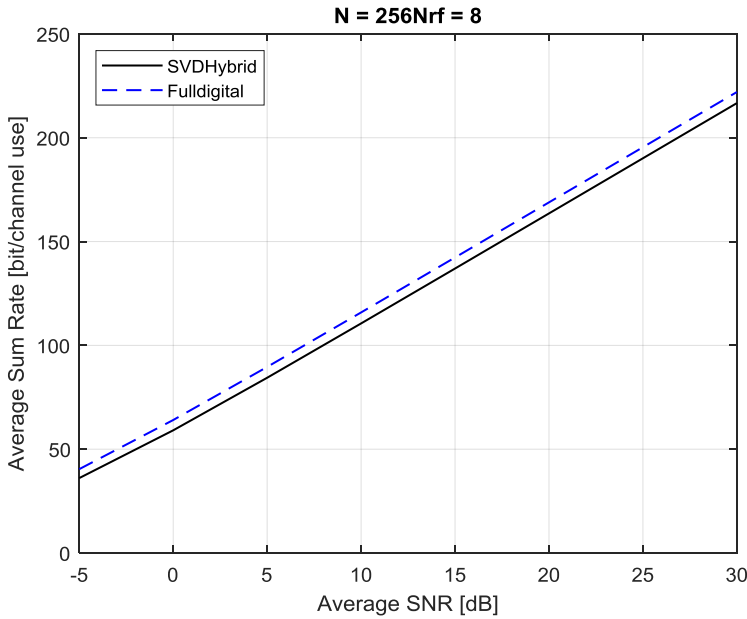


الشكل (8) معدل نقل البيانات لنظام تشكيل حزمة هجين من أجل  $N=128$  و  $N_t^{RF} = 16$

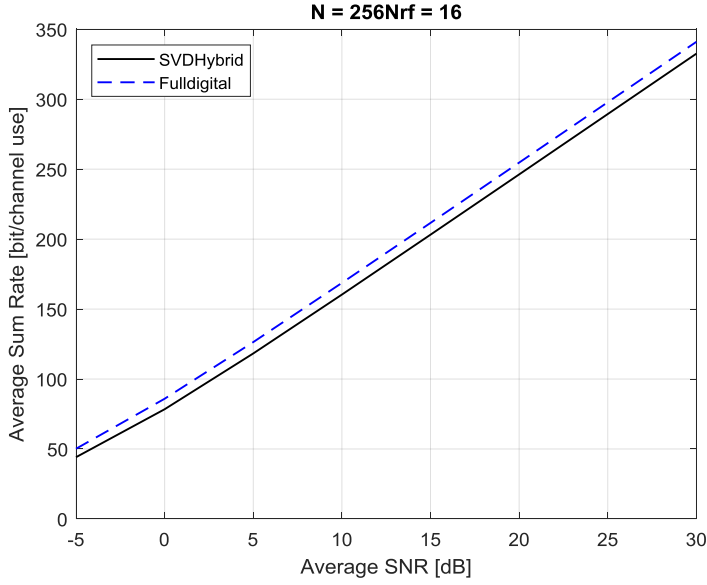
كما يتبين من الشكل (9) أن زيادة عدد الهوائيات من أجل الطريقة المدروسة في حالة استعمال 8 سلاسل راديوية من 128 الى 256 سيزيد من معدل نقل

البيانات من 199.3 bit/channel الى 216.7 bit/channel وبالتالي تحقيق زيادة مهمة في معدل نقل البيانات من دون زيادة الكلفة واستهلاك الطاقة الناجم عن زيادة عدد السلاسل الراديوية.

كما يتبين من الشكل (10) أن زيادة عدد الهوائيات من أجل الطريقة المدروسة في حالة استعمال 16 سلاسل راديوية من 128 الى 256 سيزيد من معدل نقل البيانات من 282.8 bit/channel الى 332.6 bit/channel من دون زيادة الكلفة واستهلاك الطاقة الناجم عن زيادة عدد السلاسل الراديوية وذلك بزيادة عدد الهوائيات وهو الأمر الذي لا يعد مكلفاً.



الشكل (7) معدل نقل البيانات لنظام تشكيل حزمة هجين من أجل  $N=256$  و  $N_t^{RF} = 8$



الشكل (7) معدل نقل البيانات لنظام تشكيل حزمة هجين من أجل  $N=256$  و  $N_{rf} = 16$

#### 6- خلاصة:

- 1- يمكن بالاعتماد على طريقة SVD لتشكيل حزمة الاشعاع الهجين تأمين معدل نقل بيانات قريب من معدل نقل البيانات في الحالة الرقمية الكاملة
- 2- يمكن تحسين معدل نقل البيانات عبر زيادة عدد الهوائيات من دون زيادة عدد السلاسل الراديوية مما يؤمن تحسين في الأداء من دون زيادة الكلفة واستهلاك الطاقة
- 3- توصل البحث الى امكانية الحصول على معدل نقل بيانات bit/channel 332.6 من أجل 256 هوائي ارسال و 282.8 bit/channel من أجل 16 هوائي ارسال.

## المراجع:

- [1] B. Bangerter, S. Talwar, R. Arefi, and K. Stewart, "Networks and devices for the 5G era," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 90–96, Feb. 2014.
- [2] Shajahan Kutty, , Debarati Sen, "Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey", DOI 10.1109/COMST.2015.2504600, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2016.
- [3] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 3rd Quart., 2016.
- [4] J. Mo, P. Schniter, N. Gonz´alez-Prelcic, and R. W. Heath Jr, "Channel estimation in millimeter wave MIMO systems with one-bit quantization," *Proc. of the Asil. Conf. on Sig. Sys. and Comp.*, 2014.
- [5] G. Rebeiz, S.-Y. Kim, O. Inac, W. Shin, O. Gurbuz, Y.-C. Ou, F. Golcuk, T. Kanar, and B.-H. Ku, "Millimeter-wave large-scale phasedarrays for 5G systems," in *Microwave Symposium (IMS), 2015 IEEE MTT-S International*, May 2015, pp. 1–3.
- [6] J. Wang et al., "Scalable Beamforming for 11ay," *IEEE 802.11 Documents* Jan. 2016. [Online]. Available: [https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=SSW&is\\_group=00ay](https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=SSW&is_group=00ay)
- [7] D. H. N. Nguyen, L. B. Le, and T. Le-Ngoc, "Hybrid MMSE precoding for mmWave multiuser MIMO systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2017, pp. 1–6.
- [8] Vutha Va; Takayuki Shimizu; Gaurav Bansal; Robert W. Heath Jr., "Millimeter Wave Vehicular Communications: A Survey," in *Millimeter Wave Vehicular Communications: A Survey* , now, 2016.
- [9] D. H. N. Nguyen, L. B. Le, and T. Le-Ngoc, "Hybrid MMSE precoding for mmWave multiuser MIMO systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2017, pp. 1–6.
- [10] O. El Ayach et al., "Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 3, Mar. 2014, pp.1499–1513.

[11] Ture Peken, Sudarshan Adiga, Ravi Tandon, and Tamal Bose, " Deep Learning for SVD and Hybrid Beamforming", Department of Electrical and Computer Engineering University of Arizona, Tucson, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020.

[12] M. Li, Z. Wang, X. Tian and Q. Liu, "Joint hybrid precoder and combiner design for multi-stream transmission in mmWave MIMO systems," in IET Communications, vol. 11, no. 17, pp. 2596-2604, 30 11 2017.

[13] A. Rozé, M. Crussière, M. H elard, and C. Langlais, "Comparison between a hybrid digital and analog beamforming system and a fully digital massive MIMO system with adaptive beamsteering receivers in millimeter-Wave transmissions," in Proc. Int. Symp. Wireless Commun. Syst., Poznań, Poland, 2016, pp. 86–91.