المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly
IJEIT
جامعة مصراتة MISURATA UNIVERSITY

مقدمة لنظم الاتصالات اللاخلوية بالهوائيات الكثيفة

فاطمة محمد بلتو
جامعة مصراتة، قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، مصراتة، ليبيا

عمر علي أبوعلة
جامعة مصراتة، قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، مصراتة، ليبيا
omarabuella@eng.misuratau.edu.ly

الملخص— **تعتبر تقنية الاتصالات اللّاخلوية بالهوائيات الكثيفة من الطرق الواعدة لتلبية متطلبات نظم الأجيال التالية للاتصالات. حيث أن الفكرة الأساسية التي تبنى عليها هذه التقنية هي توزيع عدد كبير من الهوائيات (نقاط الوصول أو النفاذ لشبكة الاتصالات اللاسلكية) علي كامل منطقة التغطية لخدمة عدد محدود من المستخدمين باستخدام نفس الموارد من الطيف الترددي والفترة الزمنية. و تعتمد هذه النظم في عملها علي استخدام وحدة معالجة مركزية للتنسيق بين العدد الكبير لنقاط الوصول لضمان جودة خدمة عالية ومتقاربة لجميع المستخدمين في الشبكة بطريقة تضمن عدم تعقيد معالجة الإشارة فيها. هذه الورقة ستقدم شرحا مبسطا للمبادئ الأساسية للنظم اللاخلوية الكثيفة وفكرة عملها، كما ستتطرق بشكل مختصر إلى أهم مميزات هذه الشبكات بالإضافة إلي المشاكل والتحديات الرئيسية التي تواجهها والأفكار المقترحة للتغلب علي هذه التحديات. كما أن هذه الورقة تقدم تفصيلاً للنموذج الرياضي الخاص بهذه النظم في الوصلتين الصاعدة والنازلة.**

الكلمات المفتاحية: **نظم الاتصالات اللّاخلوية بالهوائيات الكثيفة - الأنظمة المركزية والموزعة -الشبكات القابلة للتوسع- الشرائط الراديوية – الجيل الخامس (5G) - الجيل السادس (6G).**

1. المقدمة

إن أحد أهداف نظم الاتصالات الحديثة كشبكات الجيل الخامس (5G) والسادس (6G) هي زيادة معدلات التراسل بشكل كبير مقارنة بما يمكن أن تحققه الشبكات في الأجيال السابقة، ومن بين الحلول التقنية التي تم تبنيها لتحقيق هذا الهدف تقنية الهوائيات المكثفة (Massive MIMO). حيث تجهز نقاط الوصول (APs) أو المحطات القاعدية (BS) في هذه النظم بعدد كبير من الهوائيات (قد يصل إلى المئات) لتوفير خدمات الاتصال لعدد محدود نسبيا من المستخدمين بشكل متزامن من خلال استغلال نفس الموارد المتاحة للشبكة كالحزمة الترددية، ويمكن التمييز بين المستخدمين من خلال اختلاف مواقعهم اعتماداً على مبدأ النفاذ المتعدد بتقسيم الفضاء (SDMA) [1]. بحيث توفر كسباً في القدرة (power or array gain) أوكسب المزج (multiplexing gain) أو كسب التنوع (diversity gain). إن الميزة الأساسية لنظم الهوائيات الكثيفة متعددة المستخدمين هي إمكانية تحقيق كفاءات عالية جدًا لاستغلال الطيف الترددي والطاقة من خلال الاعتماد على معالجة الإشارات إما بطريقة مركزية أو بطريقة موزعة، وبالتالي يمكن أن تلبي هذه العناصر متطلبات جودة الخدمة المحددة لأنظمة الجيل الخامس [2, 3, 4].

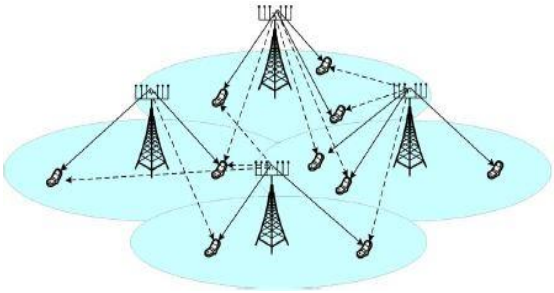
وتصنّف نظم الاتصالات التي تعتمد على تقنية الهوائيات الكثيفة إلى نوعين هما:

أ- أنظمة الهوائيات الكثيفة المركزية (المجمّعة)

تستخدم هذه النظم مجموعة هوائيات مدمجة بأعداد كبيرة في المحطة القاعدية كما هو مبين بالشكل (1)، وتتميز بقلة متطلبات إشارات التأشير والمعلومات الإضافية لضمان تراسل البيانات بالشكل المطلوب، كذلك فهي ذات متطلبات منخفضة بما يتعلق برابط التوصيل الأمامي (fronthaul) [3].

استلمت الورقة بالكامل في 29 مايو 2021 وروجعت في 15 يونيو 2021 وقبلت للنشر في 3 اغسطس 2021،

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 24 اكتوبر 2021.



شكل (1) نموذج لنظام اتصالات مجمع (مركزي) للهوائيات المكثفة [5]

ب-أنظمة الهوائيات الكثيفة الموزعة

ويستخدم هذا النوع عدداً كبيراً من الهوائيات الموزعة جغرافياً في أنحاء الخلية، وبذلك فهذا النموذج يحقق كسب تنوع أعلى مقارنة بالنوع الأول المجمع، مما يقلل من تأثير خبو الحجب أو التظليل (shadow) من خلال استغلال التباين الكبير بين الإشارات الملتقطة بشكل مستقل من الهوائيات المتباعدة جغرافيا، وهو ما يمكن هذه الأنظمة من تحسين مستوى التغطية وجودة الخدمة ويضمن تقديمها بمستوى موحد تقريباً لجميع المستخدمين بالشبكة. لكن هذه المميزات تأتي على حساب زيادة متطلبات الربط الأمامي والخلفي (backhaul) بالشبكة [3, 6]. من حيث المبدأ، يعد مفهوم الهوائيات الكثيفة الموزعة متعدد الخلايا فكرة عامة ويشمل المفهوم الشائع للشبكات متعددة المداخل والمخارج (Network MIMO [7] والنظم متعددة النقاط المنسقة (CoMP) [8] وأنظمة الهوائيات الموزعة (DAS) [9]. على الرغم من أن هذه التقنيات لها إمكانات نظرية كبيرة، إلا أنها تنطوي أيضًا على تحديات عملية بسبب عدة مشاكل مثل: تزامن الشبكة والحاجة إلى زمن تأخير منخفض وكما أنها تحتاج معدل تراسل عال للربط الأمامي بسبب استخدام معالجة الإشارات بطريقة موزعة.

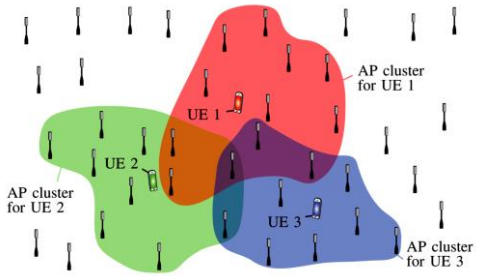
ومن منطلق التطلع لمزيد من التحسين في أداء شبكات الاتصالات اللاسلكية ومواكبةً للمتطلبات المتزايدة بشكل سريع والتي يؤمل أن تلبيها الأجيال التالية من نظم الاتصالات اللاسلكية كالجيل السادس 6G، فقد تم اقتراح دمج تقنية الهوائيات الكثيفة مع فكرة جديدة تُبنى على لامركزية نظم الاتصالات المتنقلة، ألا وهي نظم الاتصالات المتنقلة اللاخلوية [6]. حيث من المعروف أن من أهم الأساليب لزيادة عدد المستخدمين وكذلك تحقيق معدلات تراسل عالية في شبكات الاتصالات هو تكثيف عدد نقاط الوصول، ما يعني زيادة عدد المحطات القاعدية (BS) لكل منطقة جغرافية في نظم الاتصالات الخلوية، وذلك بتقسيم الخلايا إلى وحدات أصغر وأصغر، ويمكن التحكم في هذه الخلايا والتنسيق فيما بينها بشكل مركزي هرمي. ولكن لطبيعة هذا التسلسل الهرمي لايمكن الاستمرار في تقسيم الخلايا إلى أخرى أصغر كلما أردنا زيادة سعة النظام بشكل دائم؛ وذلك بسبب أنه عند مستوى معين من التقسيم سيكون تبادل الإشارات المخصصة للتحكم والتنسيق كبيراً وسيستهلك جُلّ موارد النظام المحدودة بالأساس. وهنا وجب البحث عن حل بديل للتوفيق بين هذين المتناقضين، أي الاستمرار في تصغير الخلايا لزيادة سعة النظام لتحسين الأداء، ولكن دون استهلاك الموارد المتاحة في التحكم والتنسيق. ويكمُن الحل للتغلب على هذه المشكلة في إزالة مسبب هذا العبء غير المرغوب فيه، وذلك بالتخلي عن جزء كبير من مركزية الشبكة أو بالأحرى التخلي عن فكرة الخلوية في نظم الاتصالات المتنقلة لتكون "لاخلوية" (cell-free). عندئذ

يمكن الاحتفاظ بفكرة التنسيق فيما بين نقاط الوصول المتجاورة بشكل محلي محدود، كما يمكن أن يزداد الاعتماد على الإمكانات الحسابية للعقد الطرفية (أجهزة المستخدمين) في تحديد أي نقطة أومجموعة نقاط وصول هي الأفضل لتقديم الخدمة.

وهنا تجدر الإشارة مرة أخرى إلى أنه بالرغم من أن تقنية الهوائيات المكثفة لها إمكانات هائلة لتحسين أداء نظم الاتصالات اللاسلكية، إلا أن هذه الآمال يمكن أن تُحَد بشكل كبير بسبب المشاكل العملية المتعلقة بتنفيذ هذه التقنية، والتي من بينها التداخل بين الخلايا (تلوث الموجهات pilot contamentaion)، وهي من التحديات الرئيسية التي تؤثر بشكل كبيرعلى أداء النظم المعتمدة على هذه التقنية، خصوصاً بالقرب من حواف الخلايا، ولا يمكن إزالة هذا التأثير السلبي طالما أن هذه النظم مرتكزة على فكرة خلوية الشبكة؛ لأن التداخل بين الخلايا متأصل في هذا هذه النظم [3, 4]. مرة أخرى يكمُن الحل للتخلص من التداخل بين الخلايا وبالتالي تحقيق جودة الخدمة المنشودة بالشكل المطلوب في كل مناطق التغطية للشبكة من خلال التخلي عن مبدأ الخلوية واقتراح ما يسمى بشبكات الهوائيات الكثيفة اللاخلوية.

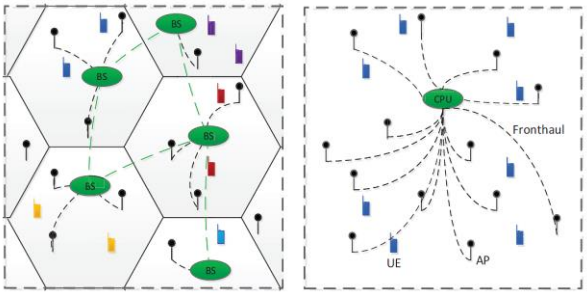
2. نظم الاتصالات بالهوائيات الكثيفة اللاخلوية (CF mMIMO)

تعرف هذه النظم أيضًا بنظم الاتصالات بالهوائيات الكثيفة الموزعة، وفيها يخدم عدد كبير من الهوائيات (التي تعتبر نقاط الوصول للشبكة) عددًا محدوداً من المستخدمين المستقلين الموزعين على مساحة جغرافية واسعة [3]. بحيث تكون هذه الهوائيات مرتبطة بوحدة معالجة مركزية لتنسيق الإرسال والاستقبال فيما بينها بشكل متزامن لتخدم جميع المستخدمين بنفس الموارد المتاحة كحزمة الطيف الترددي عبر نمط التشغيل بالإرسال المزدوج بتقسيم الزمن (TDD) [6 ,10]. وفي هذا النوع من الشبكات لا وجود للخلايا أي لا توجد حدود لمنطقة الإرسال والاستقبال حول كل نقطة من نقاط النفاذ للشبكة، لذلك يطلق على هذه النظم اسم: "نظم الهوائيات المتعددة الكثيفة الخالية من الخلايا"، ولكن يكون جوهر التنسيق في الإرسال هو المستخدم نفسه، بحيث تقدم له الخدمة من خلال نقاط الوصول المجاورة له بشكل مشترك كما في الشكل (2) والتي تنسق فيما بينها بشكل محلي لضمان تقديم الخدمة بالشكل المطلوب والخالي من التداخل عند كل جهاز استقبال [11, 12].



شكل (2) مثال على طريقة تقدسم الخدمة لثلاثة مستخدمين في شبكة خالية من الخلايا مع عدد كبير من نقاط الوصول [12].

ولتبيان عملية تبادل البيانات في هذه النظم بشكل أكثر وضوحًا فإننا نشير إلى أن عدداً من نقاط الوصول الموزعة (APs) والمجهزة بهوائيات مفردة أومتعددة تقوم بتقديم الخدمة لمجموعة من المستخدمين بشكل مشترك من خلال استغلال معلومات حالة القناة CSI المحلية. كما أن وحدة المعالجة المركزية ترسل بيانات الوصلة النازلة (DL) ومعاملات التحكم في الطاقة إلى نقاط الوصول، والتي بدورها ترسل بيانات الوصلة الصاعدة (UL) المستلمة من المستخدمين إلى وحدة المعالجة المركزية عبر الربط الأمامي. ومن هنا يتضح الفرق بين كل من نظم الاتصالات بالهوائيات الكثيفة اللاخلوية (cell-free massive MIMO) والشبكة متعددة المداخل والمخارج (network MIMO)، كما هو مبين بالشكل (3). ففي النظام الأول - اللاخلوي- تقوم عدد كبير من الهوائيات الموزعة جغرافيًا بتقديم الخدمة بشكل مشترك لعدد محدود من المستخدمين من خلال شبكة من وصلات الربط الأمامي ووحدة معالجة مركزية باستخدام نفس الموارد كالتردد والزمن. أما في النظام الثاني فينتشر عدد محدود من الهوائيات جغرافيًا عبر كل خلية وتقدم الخدمة بشكل مشترك لكل المستخدمين في الشبكة اعتماداً على معلومات حالة القناة الكلية (global CSI)، بين الخلايا وتحتوي كل خلية على وحدة معالجة مركزية (CPU) لتبادل CSI المحلية مع الخلايا الأخرى.



(a) Network MIMO (b) CF massive MIMO

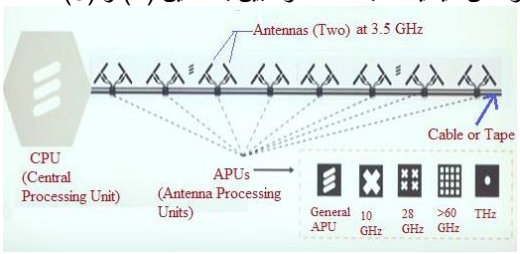
شكل (3) مقارنة بين كل من نظم الهوائيات الكثيفة اللاخلوية والشبكة متعددة المداخل والمخارج [3]

3. الشبكة اللاخلوية القابلة للتوسع

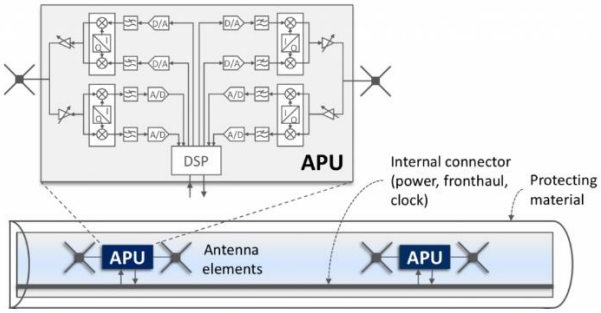
تعمل شبكات الاتصالات الكثيفة الخالية من الخلايا على تحسين أداء النظام مقارنة بالنظم المعتمدة على تقنيات تنسيق الإرسال المشترك متعدد النقاط (joint transmission coordinated multipoint: CoMP-JT) من خلال الاستفادة من فوائد توزيع الهوائيات، ويظهر ذلك بشكل جلي في تحسين الكفاءة الطيفية، وقابلية تطوير وتوسيع النظام، والمعالجة الخطية القريبة من المثالية [4]. لكن أحد التحديات الرئيسة التي تواجه الأنظمة اللاخلوية هو تحقيق فوائد التشغيل بدون زيادة التعقيد ومتطلبات البنية التحتية خصوصاً عندما يراد توفير الخدمة لعدد كبير من المستخدمين في الشبكة. من هنا جاءت فكرة جعل الشبكة قابلة للتوسع [12]. ويمكن تعريف الشبكة القابلة للتوسع على أنها الشبكة التي تكون فيها عمليات المعالجة وإشارات التأشير والتحكم محدودة لكل نقطة وصول وغير معتمدة على عدد المستخدمين. ومن الطرق الممكنة لجعل الشبكة قابلة للتوسع هي بتقسيمها إلي مجموعات متجاورة عنقودية (clusters)، ويتم توفير الخدمة للمستخدم عن طريق عنقود من نقاط الوصول المتجاورة والقريبة من المستخدم بحيث تتشارك المعلومات فيما بينها بشكل محلي ومحدود، في المقابل فإن توفير الخدمة للمستخدم في نظم الاتصالات اللاخلوية كثيفة الهوائيات غير القابلة للتوسع يتم من خلال كل نقاط الوصول الموزعة في كل الشبكة [12]. عند هذا الحد يمكن القول بأنه ليس من الصعب بناء شبكة لاخلوية كثيفة الهوائيات قابلة للتوسع، ولكن الحصول على أداء جيد من هذه الشبكة هو التحدي الحقيقي. وذلك يكمن في إيجاد نظام التحكم الأمثل لتخصيص القدرة عبر الشبكة اللامركزية، خصوصا في الوصلة النازلة، وأيضا فإن الاستغلال الأمثل لبنية وصلات الربط للحصول على شبكة ذات كفاءة عالية من المشاكل التي لاتزال موضع بحث ودراسة.

إن من بين أهم التحديات التي تعيق إنشاء الشبكات اللاخلوية القابلة للتوسع الكم الهائل من التوصيلات والكوابل بين الوحدة المركزية والهوائيات الموزعة، حيث أن هذا الأمر يعتبر غير مرغوب فيه وخيارًا غير عملي. كذلك من الممكن أن تظهر الحاجة لعدد أكبر من الهوائيات في هذه النظم مقارنة بالنظم المركزية ويرجع السبب في ذلك إلى أن ارتفاع الهوائيات في النظم المركزية أعلى، مما يزيد من احتمال التواصل مع المستخدمين بشكل أفضل من خلال تجنب العوائق الفيزيائية كالمباني في بيئة الانتشار؛ على عكس الحال في النظم الموزعة حيث تكون الهوائيات على ارتفاعات منخفضة مما سيحد من أدائها؛ لذلك سيتطلب الأمر توزيع عدد أكبر من هذه الهوائيات عبر منطقة التغطية في الشبكة للتقليل من احتمال الحجب. وبناء مثل هذا النظام يشكل تحدياً كبيراً في حد ذاته؛ لأن التنسيق بين هذا العدد الكبير من الهوائيات الموزعة يحتاج إلي بنية تحتية هائلة وقدر عالٍ من التزامن. من هنا ظهرت فكرة جديدة لحل هذه المشاكل المتعلقة بالتنفيذ والتزامن والتنسيق في هذه النظم وهي ما يعرف بتقنية الشرائط الراديوية (radio sttriipes) والفكرة الأساسية تنبثق من أنه لما كان لابد من ربط الهوائيات البعيدة عن وحدة المعالجة المركزية بكوابل، فلماذا لا تكون هذه الكوابل فعالة بحد ذاتها، بحيث توضع عليها أو (تضمن

بها) مجموعة من الهوائيات الصغيرة، وبالتالي تحويلها من مجرّد كوابل إلي جزء من هيكلية الشبكة كما هو مبين بالشكلين (4) و (5).



شكل (4) الشريط الراديوي [13]



شكل (5) مكونات الشريط الراديوي [13]

ويمكن أن تحتوي الشرائط الراديوية علي التوصيلات اللازمة وهوائيات صغير مرتبطة بها عبر وحدات معالجة إشارات الهوائي (APU) موزعة علي طول هذا الشريط. لكن السؤال الذي يطرح نفسه الآن هو كيف يمكن بناء هذا النظام بشكل صغير بحيث يمكن إدماجه في الكابل علما بأن معدات الاتصال في المحطة القاعدية كبيرة ومعقدة. ويمكن الإجابة هنا ببساطة وذلك باستغلال نفس التقنية المستخدمة في تصميم الأجهزة الطرفية الموجودة بأيدينا اليوم عن طريق تصنيع رقاقات صغيرة لا تحتاج إلا إلي قدر صغير من الطاقة لتشغيلها، والاتجاه إلى العمل على الترددات المليمترية لتصغير أبعاد التصميم بشكل أكبر. وهذه النظم يمكن تصميمها واستخدامها حسب الحاجة وهذا ما يجعلها ذات كفاءة اقتصادية عالية. بالطبيعة لا يمكن تطبيق هذه الفكرة في كل مكان، لكن من أهم التطبيقات العملية لهذه التقنية هي نشرها في المناطق ذات الكثافة العالية للمستخدمين مثل المتاحف والملاعب والمحلات التجارية الكبيرة والمصانع حيث تؤثر العوائق على انتشار الإشارة الراديوية بشكل كبير وقد تحجب الأجهزة الطرفية عن الاتصال بنقاط النفاذ للشبكة.

4. مميزات وعيوب نظم الهوائيات المكثفة اللاخلوية

إن النشر الموزع لنقاط الوصول يتيح العديد من المزايا مثل: إلغاء الترابط بين هوائيات الإرسال مما يعني توفر كسب تنوع على نطاق واسع (macro-diversity gain). كما أن قصر المسافة بين نقاط الوصول والمستخدمين سيؤدي إلى تقليل تخميد المسار وتأثيرات الحجب والتظليل، والأهم من ذلك، الحرية الكبيرة في الإرسال المتزامن للمعلومات والحد من التداخل، ونظرًا لوجود احتمال كبير بأن يكون كل مستخدم محاطاً بعدد كبير من نقاط الوصول الخادمة ستتحسن موثوقية الاتصال ويقل احتمال الانقطاع، وكذلك يمكن أن يتمتع جميع المستخدمين بظروف قناة جيدة مما يحسن بشكل كبير جودة خدمة الاتصال المقدمة لكل المستخدمين [14,3]. ويمكن تلخيص فوائد استخدام هذه التقنية في النقاط التالية [10]:

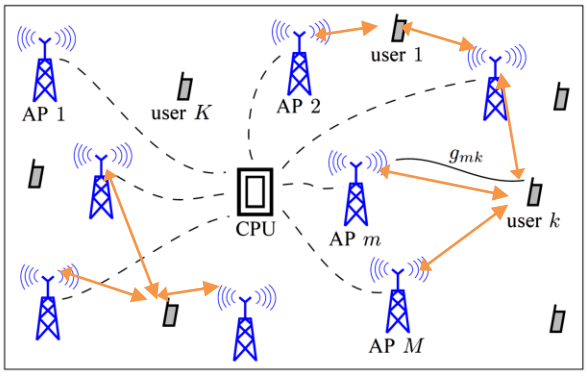
- أنها توفر جودة خدمة (QoS) أكثر اتساقًا بين المستخدمين نظرًا لتطبيقها لمبدأ مركزية المستخدم.
- توفر كسب توجيه شعاعي (beamforming gain) وإمكانية تعدد الإرسال المكاني أوما يعرف بكسب المزج الفضائي (spatial multiplexing gain).
- تحسن كفاءة استخدام الطاقة (energy efficiency) لأكثر من عشرة أضعاف مقارنة بنظم الهوائيات الكثيفة المركزية، وذلك من خلال طرق متطورة لاختيار نقاط الوصول المناسبة لخدمة المستخدمين. كما يمكن لهذه التقنية تحقيق ضعف كفاءة الطاقة مقارنة بنظم الهوائيات الكثيفة الخلوية، وذلك اعتماداً قلة تخميد المسار وخوارزمية (max-min) للتحكم في القدرة [15, 16].
- تجمع بين ثلاث تقنيات: التكثيف الفائق (ultra-densification)، الاتصال بالموجات المليمترية والهوائيات الكثيفة. مما ينتج عنه زيادة معدلات التراسل التي يمكن أن تتوفر للشبكات التي ستعمل بهذه التقنية.

وبطبيعة الحال فإن لهذه التقنية كغيرها من النظم أوجه قصور ومشاكل يمكن التغلب عليها من خلال مزيد من البحث في المجالات المعنية، ونورد في النقاط التالية أهم هذه التحديات:

- معمارية هذه التقنية تتطلب أجهزة موزعة بشكل واسع الانتشار مما قد يزيد من تكلفة التنفيذ.
- كما أنها تتطلب تزامنًا وتنسيقًا دقيقًا بين نقاط الوصول.
- وتتطلب طرقاً بسيطة لكن فعالة لتخصيص موارد النظام، وذلك لتقليل تحميل روابط الاتصال بإشارات التحكم والتأشير.

5. النموذج الرياضي لنظم الاتصالات بالهوائيات الكثيفة اللاخلوية

في هذا الجزء سنقوم بتوضيح النمذجة الرياضية لنظام اتصالات لاخلوي بالهوائيات المكثفة يحوي عدد M من نقاط الوصول و K من المستخدمين كما في [6]. بافتراض أن كل المستخدمين ونقاط الوصول مجهزة بهوائي واحد فقط، وموزعين بشكل عشوائي علي مساحة شاسعة، مع الأخذ في الاعتبار أن نقاط الوصول متصلة بوحدة معالجة مركزية عن طريق ناقل توصيل. كما هو موضح في الشكل (6). وبافتراض أن كل النقاط تخدم كل المستخدمين بشكل متزامن في نفس الموارد كالطيف الترددي والزمن. وكما هو متعارف عليه سنشير فيما يلي إلى الإرسال من نقاط الوصول إلي المستخدمين (بالوصلة النازلة) وإلى الإرسال من المستخدمين إلي نقاط الوصول (بالوصلة الصاعدة).



شكل (6) نظام الاتصالات اللاخلوية بالهوائيات الكثيفة [6]

ولنفرض بداية أن g_{mk} تمثل معامل القناة بين المستخدم k ونقطة الوصول m، ويمكن أن يوصف هذا المعامل بشكل أدق بالمعادلة الآتية

$$g_{mk} = \beta_{mk}^{1/2} h_{mk} \qquad (1)$$

حيث يمثل β_{mk} تخميد المسار (pathloss) والحجب أو التظليل (shadowing) الناتج من الخبو على نطاق واسع (large-scale fading)، أما h_{mk} فهي تمثل خبو المدى القصير (small-scale fading)، وعناصر هذا الخبو مأخوذة من متغيرات عشوائية جاوسية مركبة $\mathcal{CN}(0,1)$ مستقلة ومتطابقة التوزيع لكل من $m = 1, \cdots, M, k = 1, \cdots, K$. ومبرر افتراض استقلالية الخبو على النطاق القصير هو أن نقاط الوصول والمستخدمين موزعين على مساحة واسعة، وبالتالي من الطبيعي أن تكون مسببات تشتت الإشارة مختلفة لكل نقطة وصول وكل مستخدم. وسنفرض في هذا النظام أن جميع نقاط الوصول متصلة بوحدة المعالجة المركزية عبر ناقل توصيل خلفي (backhaul) مثالي يوفر سعة محدود وخالية من الأخطاء. من الناحية العملية ستخضع هذا الناقل لقيود عملية كبيرة، ولاتزال هناك حاجة إلى مزيد من البحث

لتحديد تأثير قيود التوصيل في مثل هذه النواقل على أداء نظم الاتصالات بالهوائيات الكثيفة اللاخلوية.

أ. الإشارات الإرشادية (الموجهات) الصاعدة (Uplink Training)

إن نظم الاتصالات بالهوائيات الكثيفة اللاخلوية تستخدم نطاقًا ترددًيا طيفيًا واسعًا وبالتالي فالمعاملات والكميات g_{mk} و h_{mk} تعتمد على الترددـ لكن سنعتبر أن β_{mk} ثابت ولا يتعلق بالتردد. يُفترض أن تكون قنوات الانتشار ثابتة على الأقل خلال فترات معينة معرفة بفترة الترابط الزمني (coherence time) T_c وحزمة الاتساق الترددي (coherence band) B_c. ومن الضروري إرسال الإشارات الإرشادية وإجراء عملية التدريب خلال كل فترة إرسال لعدد $\tau_c = T_c B_c$ من الرموز (symbols). وسنفترض أن β_{mk} معروف مسبقًا حيثما كان ذلك مطلوبًا. ولنفرض أن τ^{cf} هي عدد العينات التي تحدد مدة التدريب للوصلة الصاعدة في كل فترة ترابط τ أي أن $\tau^{cf} < \tau$، حيث أن الرمز المرتفع cf يشير إلى مصطح "خالٍ من الخلايا".

أثناء مرحلة التدريب يرسل جميع المستخدمين في وقت واحد تسلسلات تدريبية من الرموز المعرفة مسبقا بطول τ^{cf} إلى نقاط الوصول. وبفرض أن $\sqrt{\tau^{cf}}\varphi_k \in \mathbb{C}^{\tau^{cf}\times 1}$، حيث أن $\|\varphi_k\|^2 = 1$ هو التسلسل التدريبي المخصص للمستخدم k، $k = 1, \cdots, K$. عندئذ يمكن التعبير عن المتجه للإشارة الإرشادية المستقبلة عند نقطة الوصول m كالآتي

$$\boldsymbol{y}_{p,m} = \sqrt{\tau^{cf}\rho_p^{cf}}\ \sum_{k=1}^{K} g_{mk}\,\varphi_k + \boldsymbol{w}_{p,m} \qquad (2)$$

حيث ρ_p^{cf} هي النسبة المقيَّسة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) لكل رمز تدريبي و $\boldsymbol{w}_{p,m}$ هي متجه الضوضاء الملتقطة عند نقطة الوصول m. وعناصر هذا المتجه هي قيم عشوائية تتبع التوزيع الاحتمالي الطبيعي المركب $\mathcal{CN}(0,1)$ بمتوسط صفري وتباين قدره 1. واستنادًا إلى الإشارة التدريبية المستلمة $\boldsymbol{y}_{p,m}$، تقدّر نقطة الوصول m القناة g_{mk}، $k = 1, \cdots, K$. وإذا رمزنا إلى إسقاط متجه الإشارة المستلمة $\boldsymbol{y}_{p,m}$ على المحورة الهيرميتية لمتجه الإشارة الإرشادية $\boldsymbol{\varphi}_k^H$ بالرمز $\check{y}_{p,mk}$، عندها يمكن حساب هذا الإسقاط كالتالي

$$\check{y}_{p,mk} = \boldsymbol{\varphi}_k^H \boldsymbol{y}_{p,m}$$

$$= \sqrt{\tau^{cf} p_p^{cf}}\, g_{mk} + \sqrt{\tau^{cf}\rho_p^{cf}} \sum_{k\neq k}^{K} g_{mk}\, \boldsymbol{\varphi}_k^H \boldsymbol{\varphi}_k + \boldsymbol{\varphi}_k^H \qquad (3)$$

على الرغم من أنه بالنسبة لتسلسلات إشارات التدريب العشوائية لاتعتبر الكمية $\check{y}_{p,mk}$ كافية إحصائيا لتقدير g_{mk}، إلا أنه لا يزال بالإمكان استخدام هذه الكمية للحصول على تقدير دون المستوى الأمثل للقناة. ويمكن أن نحصل على تقدير للقناة من خلال التوقع المحافظ على أقل متوسط لمربع الخطأ (MMSE) كالتالي

$$\hat{g}_{mk} = \frac{\mathbb{E}\{\check{y}_{p,mk}^* g_{mk}\}}{\mathbb{E}\{|\check{y}_{p,mk}|^2\}}\check{y}_{p,mk} = C_{mk}\check{y}_{p,mk} \qquad (4)$$

حيث

$$C_{mk} \equiv \frac{\sqrt{\tau^{cf}\rho_p^{cf}}\,\beta_{mk}}{\tau^{cf}\rho_p^{cf}\sum_{k=1}^{K}\beta_{mk}|\boldsymbol{\varphi}_k^H\boldsymbol{\varphi}_k|^2 + 1} \qquad (5)$$

ملاحظة 1: إذا كانت $\tau^{cf} \geq K$ حينها يمكن اختيار متسلسلات الإشارات التدريبية $\boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\varphi}_2, \cdots, \boldsymbol{\varphi}_K$ بحيث تكون متعامدة على بعضها البعض، وبالتالي يختفي الحد الثاني في (3). وسيكون تقدير القناة $\hat{g}_{mk}$ مستقلاً عن $\hat{g}_{mk}, k \neq k$. لكن نظرًا لأن طول فترة الترابط محدود، فإنه وبشكل عام يضطر النظام إلى إعادة استخدام التسلسلات التدريبية مما يولد الفرصة لوجود بعض من التسلسلات غير المتعامدة في الشبكة. وتبعاً لذلك سيسوء تقدير القناة $\hat{g}_{mk}$ بسبب التداخل الناتج عن الإشارات الإرشادية المرسلة من مستخدمين آخرين، مما يعني وجود قيمة للحد الثاني في (3). وهذا ما يسبب ما يسمى تأثير تلوث الموجهات أوتلوث الإشارات المرشدة أو التدريبية.

ملاحظة 2: تقدير القناة يتم بطريقة لامركزية، أي أن كل نقطة وصول تقدر بشكل مستقل القنوات بينها وبين جميع المستخدمين، ولا تتعاون نقاط الوصول في تقدير القناة بشكل جماعي، أي لا يتم تبادل تقديرات القناة بين نقاط الوصول.

ب. إرسال البيانات في الوصلة النازلة

تعامل نقاط الوصول تقديرات القناة على أنها القنوات الحقيقية، وتستخدم تشكيل الحزمة المتقارن (conjugate beamforming) لإرسال الإشارات إلى كل المستخدمين. ويمكن وصف الإشارة المرسلة من نقطة الوصول m رياضيا كالآتي

$$x_m = \sqrt{\rho_d^{cf}} \sum_{k=1}^{k} \eta_{mk}^{1/2}\, \hat{g}_{mk}^* qk(\qquad 6)$$

حيث أن q_k الذي يحقق الشرط: $\mathbb{E}\{|q_k|^2\} = 1$، هو الرمز المخصص للمستخدم k و $\eta_{mk}, m = 1, \cdots, M, k = 1, \cdots, K$ هي معاملات التحكم في الطاقة التي تم اختيارها لتلبية قيود الطاقة في كل نقطة وصول كالتالي

$$\mathbb{E}\{|\boldsymbol{x_m}|^2\} \leq \boldsymbol{\rho_d^{cf}} \qquad (7)$$

وباستخدام الوصف الرياضي للقناة في (1) يمكن إعادة صياغة قيود القدرة المرسلة على النحو التالي:

$$\sum_{k=1}^{K} \eta_{mk}\gamma_{mk} \leq 1, \quad \text{for all } m, \qquad (8)$$

حيث

$$\gamma_{mk} \equiv \mathbb{E}\{|\boldsymbol{g_{mk}}|^2\} \leq \sqrt{\boldsymbol{\tau^{cf}\rho_p^{cf}}}\boldsymbol{\beta_{mk}C_{mk}} \qquad (9)$$

وتوصف الإشارة المستقبلة عند المستخدم k كالآتي

$$\boldsymbol{r_{d,k}} = \sum_{\boldsymbol{m=1}}^{M} \boldsymbol{g}_{mk}\, \boldsymbol{x}_m + \boldsymbol{w}_{d,k}$$

$$= \sqrt{\rho_{\boldsymbol{d}}^{\boldsymbol{cf}}} \sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{k} \eta_{mk}^{1/2}\, \boldsymbol{g}_{mk}\hat{\boldsymbol{g}}_{mk}^* \boldsymbol{q}_{\acute{k}} + \boldsymbol{w}_{d,k} \qquad (10)$$

حيث $\boldsymbol{w}_{d,k}$ هي إشارة ضوضاء $\mathcal{CN}(0,1)$ عند كل مستخدم. ومن ثم يتم الكشف عن $\boldsymbol{q}_k$ من $\boldsymbol{r}_{u,k}$.

ج. إرسال البيانات في الوصلة الصاعدة

في حالة الإرسال في الوصلة الصاعدة يقوم كل المستخدمين بإرسال بياناتهم بشكل متزامن إلى نقاط الوصول، وقبل إرسال البيانات يقوم كل مستخدم بمعالجة بياناته $\boldsymbol{q}_k$ عن طريق معامل التحكم في القدرة $\sqrt{\eta_k}, 0 \leq \eta_k \leq 1$. وبهذا يمكن التعبير عن الإشارة المستقبلة عند نقطة الوصول m بالمعادلة

$$\boldsymbol{y}_{u,m} = \sqrt{\rho_u^{cf}} \sum_{k=1}^{K} \boldsymbol{g}_{mk}\sqrt{\eta_k}\boldsymbol{q}_k + \boldsymbol{w}_{u,m} \qquad (11)$$

حيث أن ρ_u^{cf} هي نسبة الإشارة الى الضوضاء المقيّسة للوصلة الصاعدة، و $\boldsymbol{w}_{u,m}$ هي ضوضاء عشوائية مضافة عند نقطة الوصول وتتبع التوزيع الاحتمالي الطبيعي، أي أن $\boldsymbol{w}_{u,m} \sim \mathcal{CN}(0,1)$.

ولتقدير الرمز المرسل من المستخدم k فان نقطة الوصول تقوم بضرب الإشارة المستقبلة $\boldsymbol{y}_{u,m}$ في مرافق تقدير القناة المحسوب عند هذه النقطة فقط $\hat{g}_{mk}$.

ثم يتم إرسال الكمية التي تم الحصول عليها $g_{mk}^{*}\boldsymbol{y}_{u,m}$ إلى وحدة المعالجة المركزية عبر شبكة التوصيل.

وهكذا فإن وحدة المعالجة المركزية ستتلقى الإشارة التالية

$$\boldsymbol{r}_{u,k} = \sum_{m=1}^{M} \hat{g}_{mk}^{*}\, \boldsymbol{y}_{u,m}$$

$$= \sum_{k=1}^{k}\sum_{m=1}^{M} \sqrt{\rho_u^{cf}\eta_k}\ \hat{g}_{mk}^{*} g_{mk}\, \boldsymbol{q}_k + \sum_{m=1}^{M} \hat{g}_{mk}^{*}\boldsymbol{w}_{u,m}$$

ومن ثم يتم الكشف عن $\boldsymbol{q}_k$ من $\boldsymbol{r}_{u,k}$.

6. الخلاصة

إن الفكرة الأساسية للأنظمة متعددة المداخل والمخارج الكثيفة اللاخلوية هي الاستفادة من جميع مميزات الشبكات كثيفة الهوائيات، وذلك من خلال توفير عدد كبير من نقاط النفاذ للشبكة اللاسلكية مقارنة بعدد المستخدمين، مما يسمح بالحد من التداخل في الشبكة، وتوفير تغطية أفضل مقارنة بنظم الهوائيات الكثيفة التقليدية والخلايا الصغيرة ذات الإرسال غير المنسق. ومع ذلك، لاتزال هناك حاجة إلى مزيد من البحث لتوصيف ونمذجة هذه الأنظمة بشكل كامل، ولإيجاد حلول لبعض التحديات التي تواجهها كالحاجة إلي كم هائل من التوصيلات، إلا أن هذه التقنية تأخذ طريقها بشكل حثيث لتكون في مصاف التقنيات الواعدة للأجيال القادمة من نظم الاتصالات اللاسلكية.

المراجع

[1] Papazafeiropoulos, A., Kourtessis, P., Di Renzo, M., Chatzinotas, S. and Senior, J.M., 2020. Performance analysis of cell-free massive MIMO systems: A stochastic geometry approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *69*(4), pp.3523-3537.

[2] Femenias, G. and Riera-Palou, F., 2020. Fronthaul-constrained cell-free massive MIMO with low resolution ADCs. IEEE Access, 8, pp.116195-116215.

[3] Zhang, J., Chen, S., Lin, Y., Zheng, J., Ai, B. and Hanzo, L., 2019. Cell-free massive MIMO: A new next-generation paradigm. IEEE Access, 7, pp. 99878-99888.

[4] Interdonato, G., Björnson, E., Ngo, H.Q., Frenger, P. and Larsson, E.G., 2019. Ubiquitous cell-free massive MIMO communications. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019(1), pp.1-13.

[5] Zerihun, B.M. and Wondie, Y., 2017, September. Massive MIMO for 5G Cellular Networks: Potential Benefits and Challenges. In International Conference on Information and Communication Technology for Develoment for Africa (pp. 219-227). Springer, Cham.

[6] Ngo, H.Q., Ashikhmin, A., Yang, H., Larsson, E.G. and Marzetta, T.L., 2017. Cell-free massive MIMO versus small cells. IEEE Transactions on Wireless Communications, 16 (3), pp.1834-1850.

[7] S. Venkatesan, A. Lozano, and R. Valenzuela, “Network MIMO: Overcoming intercell interference in indoor wireless systems,” in Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Nov. 2007، pp. 83–87.

[8] R. Irmer, H. Droste, P. Marsch, M. Grieger, G. Fettweis, S. Brueck، H. Mayer, L. Thiele, and V. Jungnickel, “Coordinated multipoint: Concepts, performance, and field trial results,” IEEE Commun. Mag،. vol. 49, no. 2, pp. 102–111, Feb. 2011.

[9] X. You, D. Wang, B. Sheng, X. Gao, X. Zhao, and M. Chen, “Cooperative distributed antenna systems for mobile communications,” IEEE Wireless Commun., vol. 17, no. 3, pp. 35–43, Jun. 2010.

[10] Panda, S., 2018. Performance optimization of cell-free massive MIMO system with power control approach. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 97, pp.210-219.

[11] Mai, Trang C., Hien Quoc Ngo, and Trung Q. Duong. "Cell-free massive MIMO systems with multi-antenna users." 2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE, 2018.

[12] Björnson, E. and Sanguinetti, L., 2020. Scalable cell-free massive MIMO systems. IEEE Transactions on Communications, 68(7), pp.4247-4261.

[13] What is Radio Stripe Advantages and disadvantages of Radio Stripes, url: https://www.rfwireless-world.com/Terminology/ Advantages-and-Disadvantages-of-Radio-Stripes. html.

[14] Alageli, M., Ikhlef, A., Alsifiany, F., Abdullah, M.A., Chen, G. and Chambers, J., 2019. Optimal downlink transmission for cell-free SWIPT massive MIMO systems with active eavesdropping. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 15, pp.1983-1998.

[15] L. D. Nguyen, T. Q. Duong, H. Q. Ngo, and K. Tourki, “Energy efficiency in cell-free massive MIMO with zero-forcing precoding design”، IEEE Commun. Lett., vol. 21, no. 8, pp. 1871–1874, Aug. 2017.

[16] H. Yang and T. L. Marzetta, “Energy efficiency of massive MIMO: Cell-free vs. cellular,” in IEEE VTC Spring. IEEE, 2018, pp. 1–5.