



# إهداء

نهدي بحث تخرُجنا المتواضع لمن يستحقون الشكر والتقدير لمن كانوا لنا  
عوناً وسنداً وأولى الناس بالشكرِ هنا هم الوالدين لما لهما من الفضل الكبير  
وإلى إخواننا الأعزاء وأصدقائنا الذين نشهد لهم بأنهم نعم الرفقاء في جميع  
الأمر ولا ينبغي أنا ننسى أساتذتنا من كان لهم الدور الكبير في استكمال  
هذا البحث ومدنا بالمعلومات القيمة.

# شكر وعرفان

أولاً الحمد لله الذي وفقنا وأعاننا على إنهاء هذا البحث وكان معنا دائماً ومدنا بالقوة والصبر ثم نتوجه بالشكر لأستاذنا الفاضل المشرف على المشروع الدكتور سليم السعيدي الذي رافقنا في مسيرتنا لإنجاز هذا البحث وكان لنا موجهاً وداعماً على الدوام كما نشكر عائلاتنا التي صبرت وتحملت معنا وقدموا لنا دعمهم المعنوي والمادي كما نشكر أصدقائنا وأحبابنا لجهودهم ومساندتهم لنا.

## قائمة الأشكال

الرقم	الإسم	الصفحة
(1 - 2)	شبكة خليوية أساسية حيث تغطي كل محطة قاعدية (BS) منطقة جغرافية موفرا خدماتها لجميع الـ (UE) في المنطقة التي تغطيها ويطلق عليها إسم "الخلية".	5
(2 - 2)	شبكة خليوية مكونة من محطات قاعدية (BS) بداخلها نقاط ساخنة لتحسين الإنتاجية.	6
(3 - 2)	بعض أنواع الهوائيات السلكية	15
(4 - 2)	بعض أنواع هوائيات الفتحة	16
(5 - 2)	أنواع الهوائيات العاكسة	17
(6 - 2)	أنواع الهوائيات العدسية	18
(7 - 2)	أشكال الهوائيات الدقيقة	19
(8 - 2)	أشكال الهوائيات المصفوفية	20
(9 - 2)	مبدأ التعددية المكانية - الزمنية وفق خوارزمية ألاموتي	24
(10 - 2)	المخطط الصندوقي للتجميع المكاني	24
(11 - 2)	مبدأ التعديل المكاني لهوائيين	26
(12 - 2)	مخططات الـ (MU-MIMO) للوصلتين العليا والسفلى	30
(13 - 2)	بعض أشكال مصفوفة هوائيات الـ (Massive MIMO)	31
(14 - 2)	الـ (Massive MIMO) المتعدد الخلايا	32
(15 - 2)	الوصلة السفلى لـ (Massive MIMO)	33
(16 - 2)	بنية الشق الزمني في أنظمة الـ (FDD)	35
(17 - 2)	بنية الشق الزمني في أنظمة الـ (TDD)	35
(18 - 2)	بروتوكول إرسال الـ TDD Massive MIMO	36
(19 - 2)	مقدار إستهلاك القدرة في الشبكة الخليوية	40
(1 - 3)	المخططات الصندوقية لدراسة الكفاءة الطيفية	44

44	المخطط الصندوقي لدراسة مستوى التداخل لا UE	(2 - 3)
45	المخطط الصندوقي لدراسة متوسط الكفاءة الطيفية بدلالة عدد الهوائيات	(3 - 3)
45	المخطط الصندوقي لدراسة متوسط الكفاءة الطيفية بدلالة عدد المستخدمين	(4 - 3)
45	المخطط الصندوقي لدراسة كفاءة الطاقة	(5 - 3)
46	المخطط الصندوقي لدراسة مجموع الـ CP	(6 - 3)
47	واجهة برنامج الماتلاب	(1 - 4)
59	تمثيل العلاقة مابين الـ SNR ومتوسط الـ SE	(1 - 5)
60	قيم دالة الـ gfunction عند زوايا سمت مختلفة للمستخدم	(2 - 5)
61	متوسط مجموع الكفاءة الطيفية بدلالة عدد الهوائيات بمعامل $F=1$	(3 - 5)
62	متوسط مجموع الكفاءة الطيفية بدلالة عدد الهوائيات بمعامل $F=2$ و $F=4$	(4 - 5)
64	تمثيل بياني للعلاقة بين متوسط مجموع الكفاءة الطيفية وعدد المستخدمين للمخططين MR و M-MMSE	(5 - 5)
65	تمثيل بياني للعلاقة بين متوسط مجموع الكفاءة الطيفية وعدد المستخدمين للمخطط M-MMSE وفق نسب مختلفة من M/K	(6 - 5)
66	إجمالي الـ CP باعتبار الـ $K=10$ والـ M متغير	(7 - 5)
68	إجمالي الـ CP باعتبار الـ $M=10$ والـ K متغير	(8 - 5)
69	كفاءة الطاقة ومعدل النقل باعتبار الـ $K=10$ والـ M متغير لمجموعة القيم 1.	(9 - 5)
71	كفاءة الطاقة ومعدل النقل باعتبار الـ $K=10$ والـ M متغير لمجموعة القيم 2	(10 - 5)
72	كفاءة الطاقة بدلالة عدد الهوائيات وعدد المستخدمين إعتماًداً على قيم (Set 1)	(11 - 5)
73	كفاءة الطاقة بدلالة عدد الهوائيات وعدد المستخدمين إعتماًداً على قيم (Set 2)	(12 - 5)

## قائمة الجداول

الصفحة	الإسم	الرقم
3	الخطة الزمنية لإنجاز المشروع	(1 - 1)
10	مقارنة بين أجيال الإتصالات الخمسة	(1 - 2)
29	مقارنة بين تقنية الـ (SU-MIMO) والـ (MU-MIMO)	(2 - 2)
48	قيم المعاملات التي تم إستخدامها في المعادلات (1 - 4) و(2 - 4)	(1 - 4)
49	قيم المعاملات المستخدمة في دراسة مستوى التداخل	(2 - 4)
51	قيم المعاملات المستخدمة في دراسة Sum SE for UL	(3 - 4)
52	المعاملات المستخدمة في دراسة العلاقة بين الـ SE والـ UE	(4 - 4)
56	مجموعتين من القيم لتمثيل نموذجين لدراسة الـ CP	(5 - 4)
56	معاملات ثابتة في الدراسة لكلاً من الحالتين لقيم نموذج الـ CP	(6 - 4)
57	المعاملات المستخدمة في دراسة كفاءة الطاقة بتأثير الـ Throughput	(7 - 4)
63	قيم متوسط مجموع الكفاءة الطيفية لمخططات التجميع	(1 - 5)
67	القيم الناتجة لـ CP الخاصة بمخططات التجميع	(2 - 5)
70	القيم الناتجة لـ EE الخاصة بمخططات التجميع لمجموعة القيم 1	(3 - 5)
71	القيم الناتجة لـ EE الخاصة بمخططات التجميع لمجموعة القيم 2	(4 - 5)
73	القيم الناتجة لـ EE الخاصة بمخططات التجميع لمجموعة القيم 1	(5 - 5)
74	القيم الناتجة لـ EE الخاصة بمخططات التجميع لمجموعة القيم 2	(6 - 5)

## قائمة الاختصارات

<b>MIMO</b>	<b>Multi input multi output</b>
<b>SISO</b>	<b>Single input single output</b>
<b>MU-MIMO</b>	<b>Multi user MIMO</b>
<b>SU-MIMO</b>	<b>Single user MIMO</b>
<b>FDMA</b>	<b>Frequency division multiple access</b>
<b>TDMA</b>	<b>Time division multiple access</b>
<b>CDMA</b>	<b>Code division multiple access</b>
<b>SDMA</b>	<b>Space division multiple access</b>
<b>UE</b>	<b>User equipment</b>
<b>BS</b>	<b>Base station</b>
<b>UL</b>	<b>Up link</b>
<b>DL</b>	<b>Down link</b>
<b>ULF</b>	<b>Up link factor</b>
<b>DLF</b>	<b>Down link factor</b>
<b>SE</b>	<b>Spectral efficiency</b>
<b>EE</b>	<b>Energy efficiency</b>
<b>HE</b>	<b>Hardware efficiency</b>
<b>STC</b>	<b>Space-Time coding</b>
<b>LTE</b>	<b>Long term evaluation</b>
<b>TDD</b>	<b>Time division duplex</b>
<b>FDD</b>	<b>Frequency division duplex</b>
<b>CSI</b>	<b>Channel status information</b>
<b>ATP</b>	<b>Area transmit power</b>
<b>SNR</b>	<b>Signal to noise ratio</b>
<b>LOS</b>	<b>Line of sight</b>
<b>NLOS</b>	<b>Non Line of sight</b>
<b>CP</b>	<b>Circuit power</b>
<b>ASD</b>	<b>Angular standard deviation</b>
<b>MSA</b>	<b>Micro strip antenna</b>
<b>BER</b>	<b>Bit error ratio</b>
<b>PA</b>	<b>Power Amplifier</b>

## ملخص المشروع

تعد الهوائيات في أنظمة الشبكات اللاسلكية الخلوية من أهم عناصرها وذلك لكونها تربط المستخدمين بالشبكة وتتعامل مع الأوساط بالضوضاء الموجودة بها ولذلك يتطلب أن تكون كفاءة الهوائيات عالية كونها العامل الأساسي في زيادة سرعة النقل والكفاءة الطيفية.

وبما أن تصميم الهوائيات يعتبر من المجالات الأساسية التي تحتاج إلى تطوير مستمر لخدمة أنظمة اتصالات الجيل الخامس فقد توصل الباحثين في هذا المجال لما يسمى بالهوائيات متعددة المداخل والمخارج الضخمة (Massive MIMO) والتي هي تطوير لـ (MIMO) المستخدمة في الجيل الرابع والتي تعتمد فكرتها الأساسية على مجموعة من الهوائيات يتم ترتيبها بشكل مصفوفة وذلك لمضاعفة إمكانياتها حيث يتطلب وجود عدة هوائيات أيضا عند المستخدم وبالتالي تكون عملية الإرسال من عدة هوائيات في المحطة القاعدية ويتم الإستقبال من عدة هوائيات عند المستخدم وذلك يفيد في زيادة سرعة النقل وتجنب عدم وصول البيانات للمستخدم أو تأثر الإشارة بالتلاشي أو بالخبو حيث ترسل الإشارة في عدة اتجاهات وبنفس المبدأ يعمل الـ (Massive MIMO) ولكن عدد الهوائيات كبير جدا في المحطة القاعدية حيث يتم وضعها بشكل مناسب لتحقيق التكاملية فيما بينها لرفع إمكانيات الشبكة.

في هذا المشروع سنقوم بدراسة كلا من الكفاءة الطيفية وكفاءة الطاقة لـ (Massive MIMO) والإستهلاكية الخاصة به وذلك بناءً على عدد الهوائيات المستخدمة وعدد المستخدمين في مجال تغطيته وعلى عوامل أخرى مثل نسبة الإشارة للضوضاء وتوضيح العلاقات فيما بينها بيانيا باستخدام برنامج الماتلاب وتتم الدراسة وفق المعادلات الرياضية التي تم التوصل لها والتي تمثل جوانب هذا النوع من الهوائيات.

## Abstract

The antennas in cellular wireless network systems are one of its most important elements because they connect users to the network and deal with the transmission media with the noise in it. Therefore, the antennas' efficiency is required to be high as they are the main factor in increasing the throughput and spectral efficiency.

Since antenna design is one of the basic areas that need continuous development to serve the fifth generation communication systems, researchers in this field have come up with Massive MIMO antennas which are a development of the (MIMO) that used in the fourth generation, which depends on its basic idea on a group of antennas arranged in a matrix in order to double its capabilities as it requires the presence of several antennas also at the user, and thus the transmission process is from several antennas at the base station, and the reception is from several antennas at the user, which is useful in increasing the throughput and avoiding the lack of data reaching the user or the signal being affected By fading where the signal is sent in several directions and the same principle works (Massive MIMO), but the number of antennas is very large in the base station where they are placed appropriately to achieve integration among them to raise the capabilities of the network.

In this project, we will study both the spectral efficiency and the energy efficiency of the (Massive MIMO) and its consumption, based on the number of antennas used, the number of users in its coverage area, and other factors such as the signal-to-noise ratio and clarifying the relationships between them graphically using the MATLAB program. The study is carried out according to mathematical equations Reached and representing aspects of this type of antenna.

# الفهرس

الصفحة	المحتويات
1	الفصل الأول : 1.1 مقدمة
1	2.1 المشاكل المراد حلها
2	3.1 الأهداف الرئيسية للمشروع
2	4.1 الأدوات المستخدمة في إنجاز المشروع
2	5.1 الجدوى الإقتصادية
3	6.1 الخطة الزمنية
4	الفصل الثاني : 1.2 مقدمة
4	2.2 الشبكات الخليوية
7	3.2 تطور الشبكات الخليوية
10	4.2 الهوائيات
11	1.4.2 مبدأ عملها
11	2.4.2 الخصائص الوصفية
13	3.4.2 الخصائص الفنية
15	4.4.2 أنواع الهوائيات
21	5.2 الهوائيات الذكية
21	1.5.2 مبدأ عملها
21	2.5.2 أنواعها
22	3.5.2 عيوبها
22	6.2 متعدد المداخل والمخارج (MIMO)
23	1.6.2 تصنيف متعدد المداخل والمخارج
27	2.6.2 الفوائد الأساسية لتقنية الـ (MIMO)
28	7.2 الـ (SU-MIMO) والـ (MU-MIMO)

30	8.2 مخططات الإتصال لأنظمة الـ (MU-MIMO)
30	9.2 تقنية الـ (Massive MIMO)
32	1.9.2 مميزات الـ (Massive MIMO)
33	2.9.2 بعض النقاط الأساسية في الـ (Massive MIMO)
36	3.9.2 مبدأ عمل الـ (Massive MIMO)
37	4.9.2 الإمكانيات المتاحة لـ (Massive MIMO)
38	5.9.2 تحديات تواجه الـ (Massive MIMO)
39	6.9.2 كفاءة الطاقة Energy Efficiency
41	7.9.2 كفاءة المعدات Hardware Efficiency
41	8.9.2 Energy – Spectral Efficiency Tradeoff
42	10.2 الخلاصة
43	الفصل الثالث : 1.3 مقدمة
43	2.3 طرق جمع البيانات
44	3.3 المتطلبات الوظيفية
47	الفصل الرابع : 1.4 مقدمة
47	2.4 نبذة مختصرة عن الماتلاب
48	3.4 دراسة الكفاءة الطيفية
53	4.4 كفاءة الطاقة
59	الفصل الخامس : 1.5 المقدمة
59	2.5 دراسة الكفاءة الطيفية
66	3.5 كفاءة الطاقة
75	الفصل السادس : 1.6 النتائج
75	2.6 المعوقات
76	3.6 التوصيات

الفصل الأول

مقدمة المشروع

## 1.1 المقدمة

نظام الهوائيات المتعددة أو ما يطلق عليها إختصاراً بالـ(MIMO) وتعني ( Multi Input Multi Output) وهي تقنية حديثة بدأت في عام 1990 وكانت بسيطة مقارنة بما يتم إستخدامها حالياً في الجيل الخامس والتي قامت بحل العديد من المشاكل وتستخدم هذه التقنية في شبكات الإتصال الخليوية أو شبكات الواي فاي وهذه التقنية تركز على مصفوفة مكونة من عدد من الهوائيات والتي تحقق هدفاً تكاملياً لزيادة جودة الخدمة فالمبدأ الأساسي للـ(MIMO) هو أن الإشارات المرسلة من كل من هوائيات الإرسال يتم إستقبالها على كل هوائي من هوائيات الإستقبال فيتم بذلك تقليل إحتمال حدوث التلاشي العميق أو بما يسمى بالتداخل الهدام والذي يؤدي إلى فشل مؤقت في الإتصال بسبب الإنخفاض في نسبة الإشارة إلى الضجيج وهنا تظهر أهمية هذه التقنية وسبب إستخدامها في شبكات الإتصال وقد كان سبب ظهور تقنية الـ(MIMO) وجود مشاكل في شبكات الإتصالات والتي كانت سابقاً تعتمد على تقنية الـ(SISO) والتي كانت تركز على هوائيين فقط هوائي عند المرسل وهوائي عند المستقبل وكانت أبرز المشاكل في هذه التقنية وصولها المحدود للمستخدمين لذلك ظهرت الـ(MIMO) والتي بدورها حلت جميع المشاكل السابقة.

## 2.1 المشاكل المراد حلها

- وجود ضعف في الإنتاجية للشبكات الخليوية الحالية.
- سعة النظام المنخفضة والإزدحام المؤدي لقطع الخدمة.
- الإستهلاكية العالية للقدرة الكهربائية في الهوائيات المستخدمة.
- عدم توفر معلومات كثيرة وكافية عن هذا الموضوع باللغة العربية ومواضيع المجال مشتتة ويصعب إستيعابها.

### 3.1 الأهداف الرئيسية للمشروع

- زيادة الإنتاجية وجودة الخدمة للشبكة اللاسلكية.
- زيادة سعة النظام لتجنب مشاكل قطع الخدمة.
- دراسة نموذج توفير للقدرة الكهربائية ورفع كفاءة الطاقة.
- إثراء القيمة المعرفية عن هذا الموضوع باللغة العربية والمساهمة في ترتيب وتنسيق مواضيع المجال وسردها بصورة مفهومة.

### 4.1 الأدوات المستخدمة في إنجاز المشروع

- الأدوات المادية
  - جهاز الحاسوب.
  - الهواتف الذكية.
- الأدوات البرمجية :
  - برنامج معالجة النصوص (Microsoft Word 2010).
  - برنامج الـ (MATLAB).

### 5.1 الجدوى الاقتصادية

تفيد هذه الأنظمة شركات الإتصالات الخليوية والمستثمرين في هذا المجال في تحقيق زيادة عظيمة في جودة الخدمة المقدمة للمستخدمين وبالتالي سيؤدي ذلك لإرضاء عملاء هذه الشركات مع إمكانية تزويد عملائها بالعديد من الخدمات ويمكن إستخدام هذه الأنظمة في العديد من الإستخدامات سواءاً في شبكات الواي فاي المحلية على مستوى الشركات أو في الشبكات الواسعة وذلك لأنها تضمن وصول المعلومات دون حصول أخطاء وأيضا تحقق سرعات عالية جدا وإمكانية إرسال كم هائل من البيانات مع ضمان وصولها كاملة كما يحدث

في التقنية المسماة بـ التصوير الثلاثي الأبعاد ( الهولوجرافك ) والذي يتم بواسطة الـ(MIMO) والتي تكون صوراً عالية المساحة والتي من الصعب إرسالها عبر القنوات التي سعتها قليلة.

## 6.1 الخطة الزمنية

جدول (1 - 1) : الخطة الزمنية لإنجاز المشروع

الأسبوع الشهر	الأول	الثاني	الثالث	الرابع
ديسمبر				
يناير				
فبراير				
مارس				
إبريل				
يونيو				
يوليو				

الفصل الثاني

الخلفية النظرية

## 1.2 المقدمة

أدى التطور في الشبكات الخليوية إلى تطور عناصر منظومتها وخصوصا في الهوائيات المستخدمة مما أدى لظهور تقنيات متطورة منها ما يدعى بالـ (MIMO) في الجيل الرابع وتم تطويرها للـ (Massive MIMO) في الجيل الخامس وتدعم هذه التقنيات إتصالات متعددة على قناة واحدة حيث يتم تحديد مستخدمين مختلفين من خلال التوقعات المكانية لهم حيث يستخدم الـ (SDMA) لمضاعفة الإرسال المكاني وزيادة معدل نقل البيانات ويمكن تحقيق ذلك بإستخدام مسارات متعددة كقنوات مختلفة لنقل البيانات وهناك أيضا فائدة أخرى لإستخدام تقنية الـ (SDMA) في الشبكات الخليوية والتي هي التخفيف من تأثير التداخل القادم من الخلايا المجاورة.

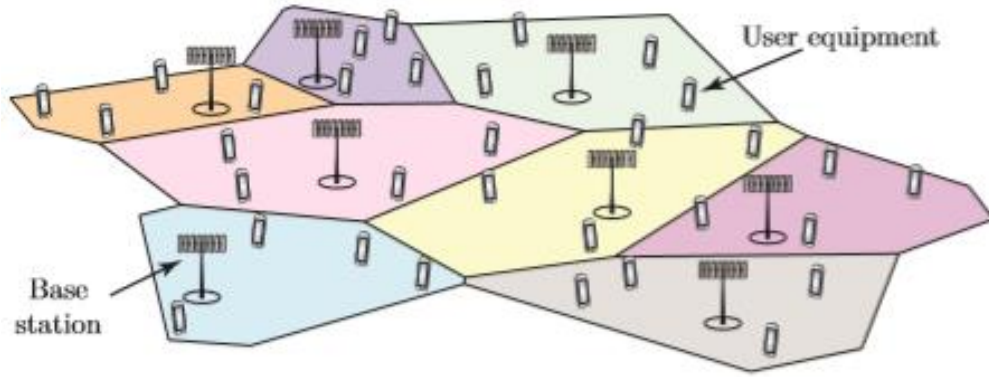
## 2.2 الشبكات الخليوية

تعتبر الشبكات الخليوية من شبكات الإتصال اللاسلكية والتي تعتمد على إشارات الراديو الكهرومغناطيسية والتي تصمم من أجل نقل البيانات من جهاز إلى جهاز آخر.

تنتشر الموجات الكهرومغناطيسية في جميع الإتجاهات من جهاز الإرسال ومع إنتشارها تصل طاقة قليلة جدا للمستقبل والتي تتناسب عكسياً مع المسافة وبالتالي لتقديم خدمات لاسلكية بإشارات عالية القدرة مع إمكانية إستقبالها بشكل كاف في مناطق تغطية واسعة تم إنشاء ما يسمى بطوبولوجيا الشبكة الخليوية بحيث تم تقسيم منطقة التغطية إلى خلايا تعمل بشكل فردي بإستخدام محطة قاعدية ذات موقع ثابت والتي تمثل القطعة التي تسهل الربط بين الجهاز والشبكة.

أصبح المفهوم الخليوي إنجاز كبير وكان المحرك الأساسي لتقديم خدمات لاسلكية خلال الأربعين عام السابقة ويمكننا تعريف مفهوم الشبكة الخليوية بأنها مجموعة من المحطات القاعدية (BS) ومجموعة من تجهيزات المستخدمين (UE) حيث أن كل تجهيز متصل بمحطة قاعدية توفر له

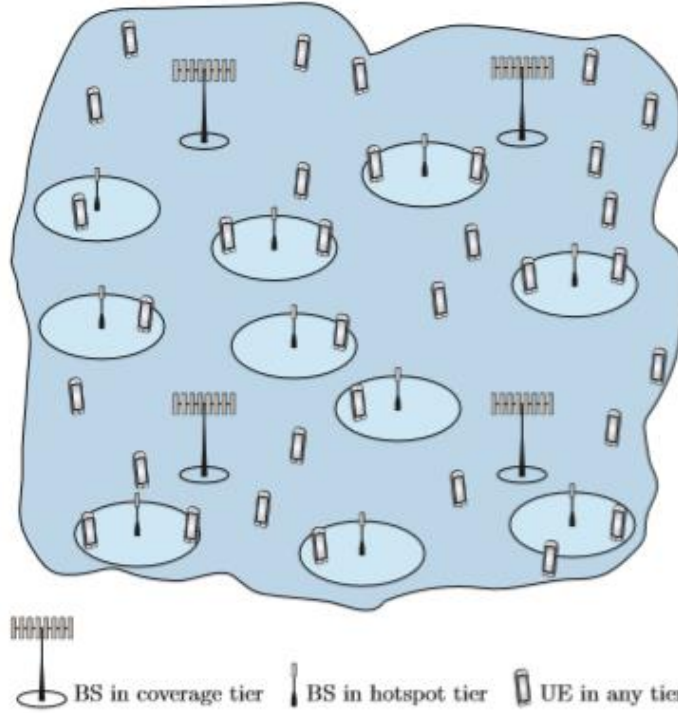
الخدمة وتشير الوصلة السفلى (DL) إلى الإشارات المرسلة من المحطة إلى المستخدم والوصلة العليا (UL) إلى عمليات الإرسال من المستخدم إلى المحطة المرتبط بها.



**الشكل (2 - 1) :** شبكة خلوية أساسية حيث تغطي كل محطة قاعدية (BS) منطقة جغرافية موفرة خدماتها لجميع الـ (UE) في المنطقة التي تغطيها ويطلق عليها اسم "الخلية".

هناك عدة معايير مستخدمة حاليا في الشبكة الخلوية من عائلة بروتوكولات الـ IEEE 802.11 للشبكات المحلية اللاسلكية وأيضا عائلة تقنيات الجيل الثالث (3GPP) مع كلا من أنظمة الإتصال LTE/GSM/UMTS والعائلة المنافسة لها (3GPP2) في الأنظمة IS-95/CDMA2000 حيث تعتبر بعض معايير هذه العائلات تطورات لبعضها البعض وقد تم تحسينها لنفس حالة الإستخدام بينما بعضها لحالات إستخدام مختلفة ويكوّنان معا شبكة غير متجانسة تتكون من مستويين رئيسيين هما :

- التغطية : تتكون من قواعد بيانات خلوية خارجية حيث توفر تغطية واسعة النطاق وتدعم التنقل ومشاركة بين العديد من المستخدمين.
- نقاط ساخنة Hotspot tier : هي عبارة عن BS داخلية توفر إنتاجية عالية في مناطق محلية صغيرة لعدد قليل من المستخدمين.



الشكل (2 - 2) : شبكة خلية مكونة من محطات قاعدية (BS) بداخلها نقاط ساخنة لتحسين الإنتاجية.

تم تصميم الشبكات الخلية في الأصل للإتصالات الصوتية اللاسلكية لكن حالياً يعتبر إرسال البيانات هو المسيطر في الأبحاث والتطوير وبالتالي يمكننا التعبير عن معدل النقل في الشبكات الخلية والذي يعتبر مقياس لأداء الشبكة وللإنتاجية الخاصة بها بالعلاقة الآتية :

$$Area\ Throughput = B * D * SE \quad (1 - 2)$$

حيث أن :

B - عرض النطاق الترددي

D - متوسط مسافة الخلية

SE - الكفاءة الطيفية والتي تمثل مقدار المعلومات التي يمكن نقلها في الثانية الواحدة على مدى

واحد هرتز من عرض النطاق

تعتبر هذه المكونات الثلاثة الرئيسية لتحديد معدل النقل والتي تحتاج لزيادتها لتحقيق إنتاجية أعلى في الشبكات الخليوية المستقبلية.

## 3.2 تطور الشبكات الخليوية

مرت تقنيات شبكات الإتصالات الخليوية بالعديد من التطورات وقد أطلق على ذلك بإسم أجيال الإتصالات والتي كانت تشهد تطور ملحوظ في كل جيل من حيث الأداء والخدمات المقدمة للمستخدمين ويمكن تقسيم الأجيال على النحو التالي :

### • إتصالات الجيل الأول (1G)

بدأ الجيل الأول من الشبكات اللاسلكية في أواخر السبعينات واستمر طوال فترة الثمانينات حيث كانت تستخدم تقنيات الإتصال التماثلية والتي كانت تستخدم لإرسال المكالمات الصوتية فقط عبر الوصول المتعدد بتقسيم التردد (FDMA) .

من أشهر الأنظمة الخاصة بالجيل الأول نظام (AMPS) في الولايات المتحدة والنظام الأوروبي (ETACS) ومن عيوب هذا الجيل أنه كان من غير الممكن إجراء مكالمات بين مستخدمين مع بعضهم البعض في النظامين لعدم تحقيق التوافقية بين النظامين.

### • إتصالات الجيل الثاني (2G)

تم صدور الجيل الثاني من تكنولوجيا الشبكات اللاسلكية في نهاية الثمانينات حيث تم إستخدام الإتصالات الرقمية بدلا من التماثلية بإستخدام تقنية الوصول المتعدد بتقسيم الزمن (TDMA) أو تقنية الوصول المتعدد بتقسيم الكود (CDMA) وقد وفرت أنظمة الجيل الثاني بالإضافة للمكالمات الصوتية خدمات إضافية مثل الرسائل النصية (SMS) ورسائل الصور والوسائط المتعددة (MMS).

يعد نظام الـ GSM أشهر نظام من أنظمة الجيل الثاني والتي تستخدم تقنية الوصول المتعدد بتقسيم الزمن (TDMA) حيث يقسم الإطار الزمني إلى ثمانية فواصل لكل قناة ويستخدم (FDMA) لتقسيم عرض النطاق الترددي إلى قنوات غير متداخلة وأيضا نظام (D-AMPS) في الولايات المتحدة الأمريكية حيث يستخدم تقنية الوصول المتعدد بتقسيم الكود (CDMA).

### • إتصالات الجيل (2.5G)

في هذا الجيل تم إجراء تحسين للنظام حيث تم استخدام مخطط الـ (Packet switch system) بدلا من المخطط المستخدم في كلا من الجيل الأول والثاني (Circuit switch system) وذلك أدى لزيادة في معدل نقل البيانات حيث يتم إرسال بيانات المعلومات بواسطة حزم تحتوي على بيانات عنوانة ويمكن للعديد من المستخدمين استخدام القناة عن طريق إرسال حزمهم إلى الوجهة المحددة الموجود عنوانها في الحزمة.

من أشهر الأنظمة للجيل (2.5G) نظام (GPRS) ونظام (HSCSD) وتعتبر هذه الأنظمة بمثابة تحسين لنظام الـ (GSM) ومرحلة بين نظامي الجيل الثاني والثالث.

### • إتصالات الجيل الثالث (3G)

توفر إتصالات الجيل الثالث مجموعة واسعة من خدمات الوسائط المتعددة بمعدلات نقل عالية تصل إلى 2 ميجابايت بالإضافة إلى الخدمات الأساسية كالمكالمات الصوتية وتم استخدام تقنية الوصول المتعدد بتقسيم الكود عريض النطاق (W-CDMA) حيث تم إنشاء مواصفات الـ (W-CDMA) في مشروع شراكة الجيل الثالث (3GPP).

أشهر نظام من أنظمة الجيل الثالث هو الـ (UMTS) حيث أنه تطوير لنظام الـ (GSM).

## • إتصالات الجيل الرابع (4G)

تعد زيادة معدل نقل البيانات الهدف الرئيسي لأي تحسين في أنظمة الإتصال وهذا ما حدث في الجيل الرابع حيث يوفر معدل نقل يصل إلى 100 ميجابت بالإضافة لميزات الجيل الثالث وإن ما يميز هذا الجيل هو تقنية الـ (MIMO) والتي تمثل دوراً أساسياً في تلبية متطلبات النظام كتعزيز الإرتباط بين نقطتين كما يعد التطور طويل المدى والذي يطلق عليه بـ (LTE) هو العنصر الرئيسي في هذا الجيل.

## • إتصالات الجيل الخامس (5G)

يطلق مصطلح الجيل الخامس لتقنيات الإتصال اللاسلكي الذي يهدف إلى تحسين قدرة الشبكة من خلال توفير معدلات نقل بيانات عالية جداً لتدفق الوسائط المتعددة للمستخدمين حيث تستخدم موجات الملليمتر ذات الترددات العالية.

تم إضافة العديد من التطورات على تصميمات الهوائيات لهذا الجيل وذلك لأنه سيتم تشغيلها على ترددات عالية (28 جيجاهرتز / 38 جيجاهرتز) والذي سينتج عنها أحجام هوائيات صغيرة مناسبة للإستخدام في الهواتف الذكية المحمولة وستدعم أنظمة الجيل الخامس تقنيات الـ (MIMO) والتي تحقق من خلالها كسب عالي من تأثير المصفوفات.

سيكون معدل بيانات أنظمة 5G أعلى من 1 جيجابت في الثانية مقارنة بالأجيال السابقة حيث توفر أنظمة 5G نقلاً أسرع للبيانات وسعة أعلى ووضوحاً في الفيديو والصوت وتدعم الوسائط المتعددة التفاعلية.

## جدول (2 - 1) : مقارنة بين أجيال الإتصالات الخمسة

Technology	1G	2G	3G	4G	5G
Start Year	1970-1990	1990-2004	2004-2010	2010-2020	Soon
Frequency Band	150MHz-900MHz	(800-900)MHz – (1800-1900)MHz	(800-900)MHz – (1600-2000)MHz	2GHz-8GHz	3GHz-300GHz
Data Rate	2Kbps	64Kbps-144Kbps	2Mbps	100Mbps-1Gbps	Higher than 1Gbps
Technology	Analog	Digital	UMTS-CDMA2000	LTE-WiFi-WiMax	WWWW
Switching	Circuit	Circuit-Packet	Packet	Packet	Packet
Multiplexing	FDMA	TDMA-FDMA	CDMA	OFDM	OFDM
Primary Services	Analog Phone Calls	Digital Phone Call-Messages	Data-MMS-Phone Calls-SMS	IP Services	Large Broadcasting

## 4.2 الهوائيات

الهوائيات هي أجهزة أساسية في تركيب أي منظومة إتصالات فهي عبارة عن أجهزة معدنية تستخدم لإرسال و إستقبال الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ ولها ميزة حيث أنها تعمل كمرشح فراغي بحيث تستقبل الموجة الكهرومغناطيسية المحددة وتقوم بإعاقه الموجات الأخرى " موجات التشويش " على مدخل المستقبلات كما يلعب الهوائي دوراً أساسياً وفعالاً في النظم الرادارية المختلفة ومنظومات التحكم والاستشعار عن بعد وفي علوم الفضاء .

يعود الهوائي إلى عالم الفيزياء هاينريش هيرتز الذي بدورة قام بإثبات المعادلات الرياضية التي قام بإستنتاجها جيمس ماكسويل في عام 1886 وإستطاع هيرتز في نفس العام وفي تجربته الأولى بإستقبال موجات كهرومغناطيسية صادرة من مرسل قام هو أيضا ببنائه وكان الهوائي الذي قام

بتصميمه يسمى ثنائي قطب هيرتز حيث كان مكون من قطبيتين.

بعد تجربة هيرتز وفي عام 1893 قام الفيزيائي نيكولا تسلا بتجارب على دوائر رنين كهربائية بسيطة تصدر ترددات عالية وقام بعد ثلاث سنوات بإستقبال موجات صادرة من جهاز بواسطة مستقبل يبعد 30 كيلومتر عن جهاز الإرسال الذي كان يعمل بتردد يقدر ب 2 ميغاهيرتز وقد توصل بعد ذلك لإختراعين عن نقل الطاقة لاسلكياً.

وبعد هذه الجهود المبذولة من العلماء السابقين جاء العالم الإيطالي ماركوني وطور ما قام به تسلا حيث قام بإستقبال موجات كهرومغناطيسية مرسله من إيرلندا وقام بإستقبالها عبر المحيط الأطلسي حيث قام بإستخدام هوائي مربع الشكل على إرتفاع 100 متر.

## 1.4.2 مبدأ عملها

تتكون الموجات الكهرومغناطيسية من مجالين أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي مرتبطان ببعضهما البعض وينتشران في الفراغ دون حدوث فقد في طاقتهما وتنتج الموجات الكهرومغناطيسية عملياً من مصدر مجال كهربائي أو مصدر مجال مغناطيسي يغذيه تيار متردد.

## 2.4.2 الخصائص الوصفية

### • أبعاد الهوائي

الطول الموجي للموجات التي يرسلها ويستقبلها الهوائي هي من تقوم بتحديد أبعاد الهوائي فكلما زاد الطول الموجي تزيد أبعاد الهوائي والعكس حيث كلما قل الطول الموجي تقل أبعاد الهوائي.

### • الدعامات

وهي الجزء المسئول عن تثبيت الهوائي بصورة جيدة مثل الأبراج بعيداً عن أي أجسام معدنية أو أي مواد جاذبة للموجات المغناطيسية ويجب أن تكون الهوائيات معزولة عن الدعامات ومن

أبرز المواد العازلة والتي تقوم بعزل الهوائي عن المعادن المحيطة به : الزجاج والسيراميك والبلستيك الذي يستخدم على أجسام متحركة .

#### • المعادن

تصنع الهوائيات من المعادن والتي لها توصيلية عالية وهذه المعادن هي الألمنيوم والنحاس والحديد والذهب الذي يستخدم في الهوائيات الصغيرة مثل الجوال والتي تعمل في نطاق ترددي كبير.

#### • الحماية الجوية

غالبا ما يتم تثبيت الهوائيات خارج الأبنية مما يجعلها عرضة للعوامل الجوية ولتجنب ذلك توجب حماية الهوائيات من هذه العوامل وذلك لأن الأعمار الافتراضية للهوائيات تصل إلى عشرات السنين فالكثير من الهوائيات تُغطى بأغلفة من القماش أو الورق المقوى حتى لا تتأثر بالعوامل الجوية المختلفة وأيضا لتجنب حدوث تغير في سطح الطبق الخاص بالهوائي مما يؤدي إلى فقدانه لخصائصه الفنية .

#### • خطوط التغذية

هي الوصلات التي تربط المرسل بالهوائي أو المستقبل بالهوائي ولها أنواع يمكن تعريفها بالآتي:

- خط النقل للنطاق 30 ميغا هيرتز.
- الكيل المحوري للنطاق 1000 ميغا هيرتز.
- هوائي البوق للنطاقات فوق ال 1000 ميغا هيرتز.

ويعتمد تحديد نوع الخط المستخدم وفق شرطين هما :

- نوع الهوائي ( مقاومة الدخول للهوائي ).
- التردد الذي يعمل عنده الهوائي .

### 3.4.2 الخصائص الفنية

أهمية الخصائص الفنية للهوائيات تكمن في تحديد كفاءتها ولكل هوائي خصائص فنية مختلفة عن غيره وهي معايير من خلالها نستطيع مقارنة الهوائيات بعضها ببعض ويمكننا معرفة الخصائص الفنية للهوائي عبر مقارنته بما يسمى بالهوائي المثالي والذي حُددت خصائصه الفنية وهو هوائي نظري أما الهوائيات العملية لا تحقق المواصفات والخصائص الخاصة بالهوائي المثالي ويمكننا تعريفه أنه هوائي يبث كل الطاقة القادمة إليه من المرسل في الإتجاه أو الإتجاهات المطلوبة وبالإستقطاب المرغوب.

ويمكن تلخيص الخصائص كالآتي :

#### • رسم الإشعاع

هو عبارة عن رسم يبين كيفية توزيع الطاقة المنتشرة من الهوائي في الفراغ أو الوسط المحيط به وله أهمية كبيرة حيث أنه يحدد كيفية تثبيت وتوجيه الهوائي وأيضا التطبيق الذي يعمل فيه الهوائي ويمكننا القول أن الطاقة المنبعثة من الهوائي تتوزع بطريقتين :

○ متساوية في جميع الإتجاهات Omnidirectional Antenna.

○ مركزة في إتجاه معين Directive Antenna.

وهناك طريقتين للحصول على رسم الإشعاع :

- طريقة حسابية و ذلك بتحليل الهوائي رياضياً.
- طريقة معملية وذلك بإستخدام هوائيين أحدهما مستقبل ويكون المرسل هو المراد رسم الإشعاع له حيث يدور حول المستقبل 360 درجة وعند كل نقطة يقوم المستقبل بقياس كمية الطاقة عندها.

### • مقاومة الإشعاع

هي مقاومة متغيرة للهوائي وتساوي نسبة الطاقة المنبعثة من الهوائي إلى مربع التيار الداخل له عند نقطة التغذية وهي عبارة عن مقاومة تخيلية وذلك لأنها تُحسب ولا تُقاس ويتم حسابها وفق المعادلة الآتية:

$$R_r = P_r / i^2 \quad (2 - 2)$$

### • كفاءة الهوائي

وهي تساوي نسبة الطاقة المنبعثة من الهوائي إلى الطاقة الداخلة له حيث أن الطاقة الداخلة له تساوي مجموع الطاقة المنبعثة من الهوائي و الطاقة المفقودة بداخلة.

$$\eta = P_r / P_{in} \quad (3 - 2)$$

### • الكسب الإتجاهي

والمقصود هنا بالكسب الإتجاهي هو نسبة كثافة الطاقة المنبعثة من الهوائي في إتجاه معين إلى كثافة الطاقة المنبعثة من هوائي مرجعي عند نفس النقطة.

ويحسب الكسب الإتجاهي بالمعادلة الآتية :

$$D = P_r / P_{ref} \quad (4 - 2)$$

ويمكن الإشارة إلى أن الطاقة المنبعثة من الهوائي تكون أصغر دائماً من الطاقة الداخلة إليه وهذا يدل على أن الهوائي لا يقوم بتكبير الطاقة الداخلة إليه وإنما يقوم بتركيزها في اتجاه معين مما يجعل النقاط التي تكون في هذا الإتجاه تبدو وكأن كثافة الطاقة بها مكبرة نسبياً عن التي توجد في الإتجاهات الأخرى.

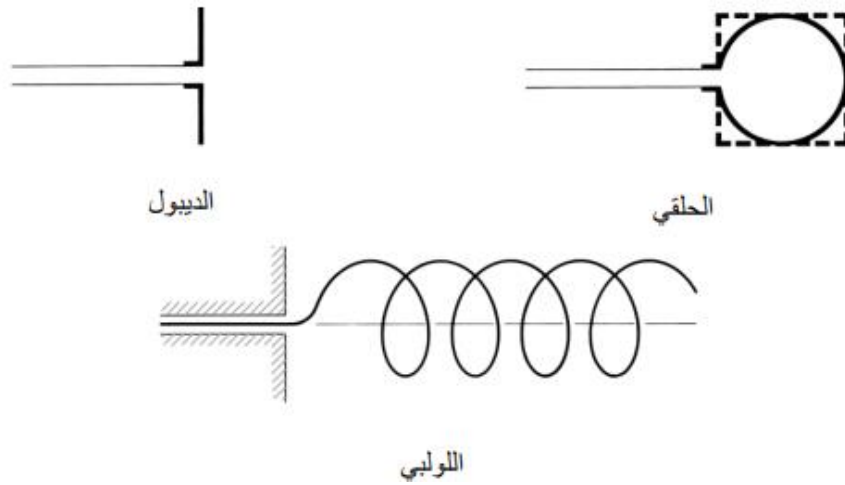
#### • إستقطاب الهوائي

يقوم المجال الكهربائي في الموجة الكهرومغناطيسية بتحديد الإستقطاب فهناك ثلاثة أنواع للإستقطاب وهي الخطية والدائرية والبيضاوية ويجب ضبط هوائي الإستقبال على نفس الإستقطاب المستخدم في هوائي الإرسال لإستقبال الموجة الكهرومغناطيسية.

### 4.4.2 أنواع الهوائيات

#### • الهوائيات السلكية

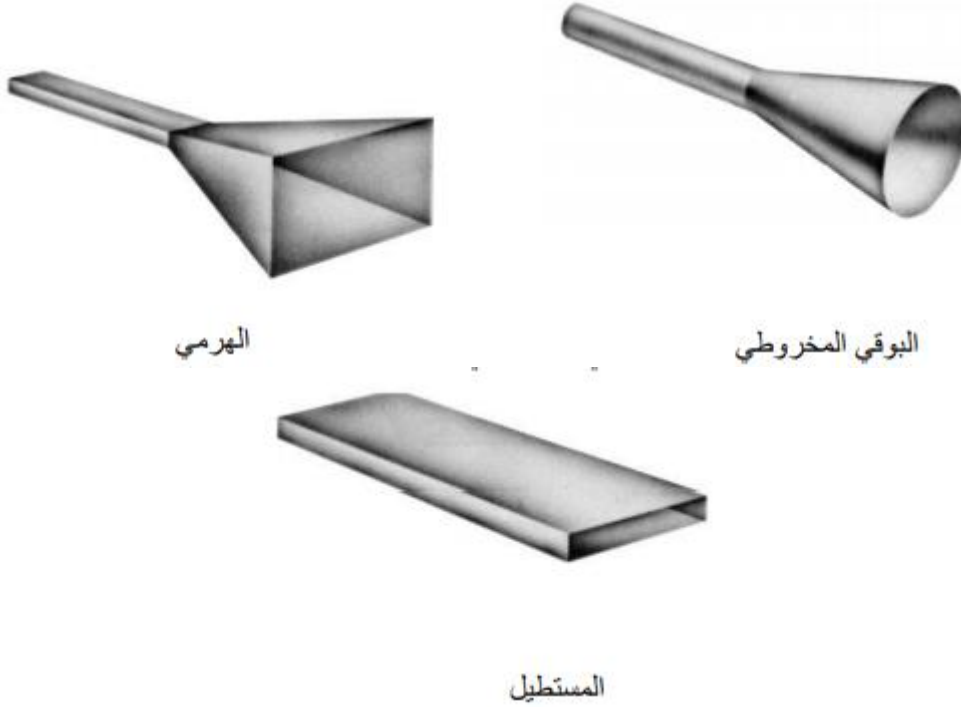
تعتبر هذه الهوائيات هي السائدة والمألوفة والتي نشاهدها على أسطح المنازل والسيارات والسفن والطائرات ولها أشكال عديدة أهمها الهوائيات الحلقية واللولبية وهوائيات الديبول والأشكال الآتية توضح هذه الأنواع.



الشكل (2 - 3) : بعض أنواع الهوائيات السلكية

## • هوائيات الفتحة

لهذه الهوائيات إستخدامات مفيدة في التطبيقات الفضائية والطائرات وذلك بسبب سهولة إندماج الفتحة الخاصة بها مع جسم الطائرة الخارجي وتغطيتها بعازل مناسب كما أن لها أنواع كما هو موضح بالشكل.

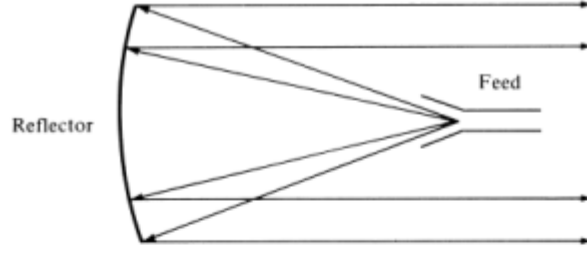


الشكل (2 - 4) : بعض أنواع هوائيات الفتحة.

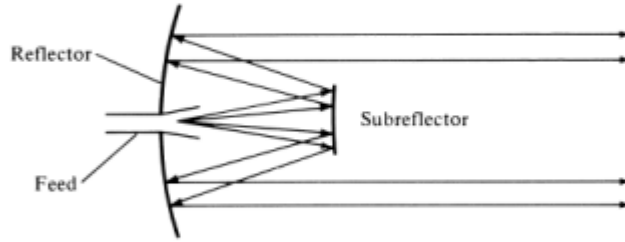
## • الهوائيات العاكسة

لقد كان من النتائج المبهرة لإكتشاف الفضاء الخارجي هو التقدم الذي جرى تحقيقه في علم الهوائيات فقد تم توظيف نماذج معقدة من الهوائيات لتحقيق الإتصالات عبر مسافات كبيرة وإرسال و إستقبال الإشارات عبر ملايين الكيلومترات ويعتبر الهوائي العاكس القطعي أحد الأمثلة الأوسع إنتشاراً على الهوائيات العاكسة وقد تم بناء هوائيات مماثلة بأقطار تصل حتى 305 متر تفيد هذه الأبعاد الكبيرة في الحصول على الريح العالي الضروري لإرسال و إستقبال

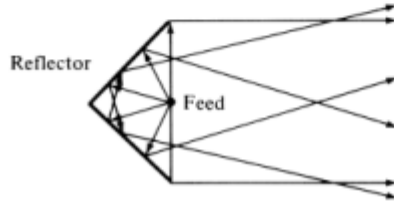
الإشارات عبر مسافات تصل إلى ملايين الكيلومترات كما ينتشر إستخدام الهوائي الزاوي العاكس أيضا وتوضح الأشكال الآتية تشكيلات الهوائيات العاكسة.



(a) Parabolic reflector with front feed



(b) Parabolic reflector with Cassegrain feed

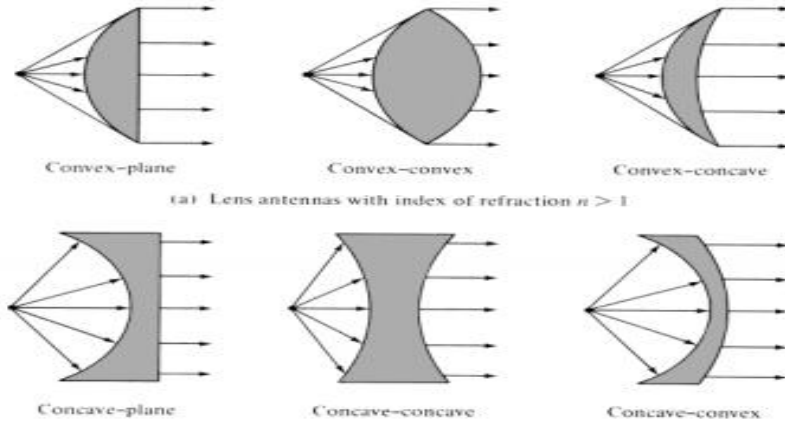


(c) Corner reflector

الشكل (2 - 5) : أنواع الهوائيات العاكسة.

#### • الهوائيات العدسية

تستخدم الهوائيات العدسية من أجل تجميع الطاقة الكهرومغناطيسية المتباعدة ومنع تشتتها في إتجاهات غير مرغوبة وتحويلها إلى أمواج مستوية ويمكن إستخدام الهوائيات العدسية بدلا من الهوائيات العاكسة القطعية خصوصا في الترددات العالية وذلك لأن أبعاد الهوائيات العدسية وأوزانها تصبح كبيرة جدا في الترددات المنخفضة.



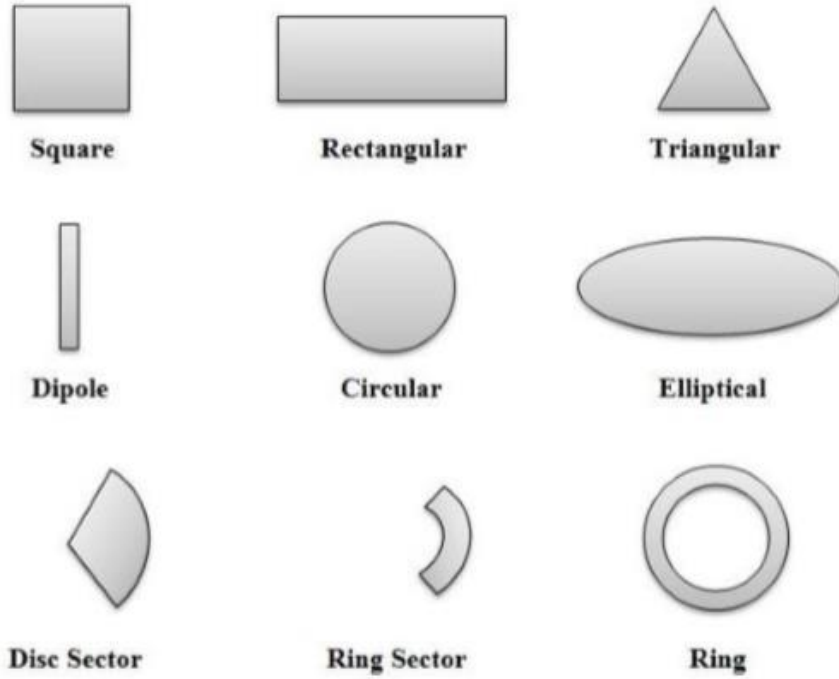
الشكل (2 - 6) : أنواع الهوائيات العدسية.

#### • الهوائيات الدقيقة

الهوائيات الدقيقة (MSA) أو بما تسمى بهوائيات التصحيح أو الهوائيات المطبوعة تم استخدام هذا النوع من الهوائيات في سبعينات القرن الماضي وانتشر استخدامها ذلك الوقت وخصوصا في التطبيقات الفضائية وحاليا يكثر استخدامها في تطبيقات الهاتف المحمول وذلك لإمكانية طباعتها على لوحة الدائرة الخاصة بالهاتف ويتم تصنيعها بسهولة وبتكلفة منخفضة.

يتكون هذا النوع من الهوائيات من رقعة مشعة مصنوعة من المعدن الموضوعة فوق طبقة عازلة يليها طبقة من المعدن المستخدم في أول طبقة ويتناسب حجم هذا الهوائي بشكل عكسي مع تردد تشغيله ولذلك يستخدم هذا النوع من الهوائيات في الجيل الخامس وذلك للنطاقات الترددية العالية التي يعمل عندها والتي تقدر بالحيجاهيرتز وبالتالي فإن الأحجام المناسبة للهوائي عند هذه النطاقات تقدر بالمليمتر.

يوضح الشكل الآتي العديد من الأشكال التي تأتي على شكلها الهوائيات الدقيقة :



الشكل (2 - 7) : أشكال الهوائيات الدقيقة.

- مميزات هذا النوع من الهوائيات تتمثل في :
  - خفيف الوزن وصغير الحجم وله شكل رفيع.
  - سهولة التصنيع وقليلة التكلفة.
  - التوافقية العالية مع الأسطح المختلفة.
  - سهولة طرق تغذيتها.
  - إمكانية إستخدامها في شكل مصفوفة عند دمجها مع ناقل الحركة الطوري كما في الهوائيات الذكية.
  - يدعم الإستقطاب الخطي والدائري.
- لكن تحكم هذا النوع من الهوائيات بعض القيود والتي هي :
  - محدودية النطاق الترددي.
  - إنخفاض الكفاءة.

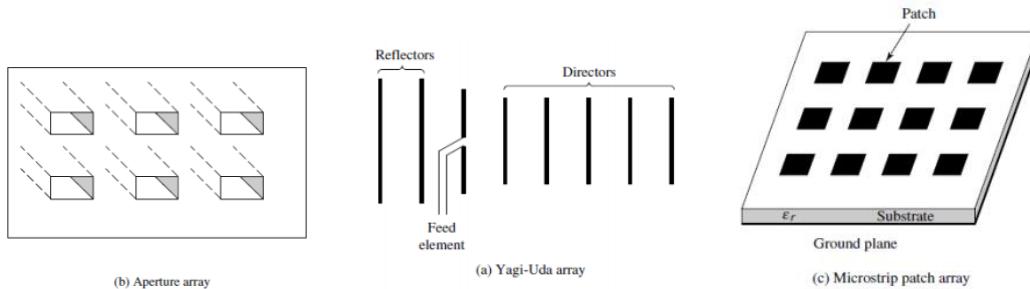
○ يستخدم فقط في الترددات العالية.

- طرق التغذية :

لتغذية الهوائيات الدقيقة توجد العديد من الطرق لذلك يمكن تصنيف هذه الطرق لفئتين رئيسيتين هما Contacting – Non Contacting حيث تعني فئة الإتصال أنه يتم التوصيل بين الرقعة المشعة وخط التغذية بصورة مباشرة حيث أن أكثر طرق الإتصال شيوعا هي التغذية المحورية والـ (Micro-strip Line) أما الفئة الثانية فئة عدم الإتصال تعتمد على التغذية الكهرومغناطيسية حيث لا يوجد إتصال مباشر بين الرقعة وخط التغذية وأكثر الطرق شيوعا في هذا النوع هو إقتران الفتحة وتوصيل الفجوة والتغذية المقترنة التقريبية.

#### • الهوائيات المصفوفية

تحتاج العديد من التطبيقات إلى خصائص إشعاعية لا يمكن تحقيقها بإستخدام عنصر هوائي واحد وذلك لأن لديهم إتجاهية منخفضة نسبيا وبذلك نقوم بإستخدام عدة عناصر بتوزيع هندسي وكهربائي مناسبين للحصول على الخصائص الإشعاعية المطلوبة فتتراكب المخططات الإشعاعية للعناصر مكونة إشعاع أعظمي في أحد الإتجاهات وإشعاع أصغري في إتجاهات اخرى حيث من الضروري أن تتداخل الحقول الجزئية بشكل بناء في الإتجاه المطلوب وتتداخل بشكل مدمر في المساحة المتبقية ويوضح الشكل التالي بعض أنواع الهوائيات المصفوفية.



الشكل (2 - 8) : أشكال الهوائيات المصفوفية.

## 5.2 الهوائيات الذكية

هي عبارة عن مصفوفة من العناصر التي هي مسؤولة عن البث والإشعاع وتكون مرتبطة بمعالج إشارة متعدد المداخل والمخارج فيقوم بمعالجة الإشارات الرقمية الداخلة إليه وفق خوارزمية معينة تمكنه من توجيه أقصى إشعاع نحو المستخدم المرغوب.

### 1.5.2 مبدأ عملها

تعتمد فكرة عمله بعكس الهوائيات العادية على ثلاثة عوامل هي النظم البرمجية ومعالجة الإشارات الرقمية وإنتشار الموجات حيث أن نمط الإشعاع فيها غير ثابت وإنما يتغير وفقاً للإشارة القادمة من المستقبل وبناءً على زاوية وصول الإشارة القادمة من المستقبل يقوم الهوائي بإعادة توجيه الإشعاع بما يخدم المستخدم ويعتمد ذلك على خوارزميات معينة وأنظمة لها قدرة على معالجة الإشارات الداخلة والخارجة ومن ثم التحكم في معالجتها نحو الهدف.

### 2.5.2 أنواعها

تقسم الهوائيات الذكية اعتماداً على النمط الإشعاعي الخاص بالهوائي وأيضاً معدل التداخل والقدرة على الحد منه وهما نوعين :

#### • هوائي الشعاع المتبدل

وفيه تقسم المنطقة التي يغطيها إلى عدة قطاعات بحيث يغطي كل قطاع 120 درجة بعدة أنماط اشعاعية ثابتة ويكون أعظم كسب في مركز الإشعاع.

## • الهوائي التكيفي

ويمثل هذا النوع النموذج الأكثر ذكاء وكفاءة في تكنولوجيا الهوائيات الحديثة حيث وان هذا النظام من الهوائيات له القدرة على توجيه كل النمط الإشعاعي نحو المستخدم المرغوب وتصفير الإشعاع في اتجاه إشارات التداخل أو المستخدمين غير المرغوبين، أن القدرة على منع إشارات التداخل إضافة إلى امكانية جعل المستخدم في مركز النمط الإشعاعي هما أهم ما يميز هذا النظام عن نظام الهوائي المتبدل.

### 3.5.2 عيوبها

- زيادة التكلفة لتعقيد أنظمة الإرسال والاستقبال.
- إدارة عملية الإرسال والاستقبال أصبحت أكثر صعوبة.
- بحركة المستقبل ينخفض معدل نقل البيانات.

### 6.2 متعدد المداخل والمخارج (MIMO)

عبارة عن مجموعة من تقنيات الإتصال اللاسلكي تستخدم لمضاعفة سعة الوصلة الراديوية بواسطة الهوائيات وتحقيق زيادة خطية في معدل الإرسال وتكون هذه الزيادة متناسبة مع العدد الأصغر من أعداد الهوائيات في كلا من المرسل والمستقبل كما أن لمتعدد المداخل والمخارج MIMO وظائف أو مميزات أخرى حيث تقوم بتحسين الوثوقية وتحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج وبالتالي تزيد مجالات التغطية في أنظمة الإتصالات الخليوية.

والمبدأ الأساسي للـ MIMO هو أن الإشارات المرسله يتم إستقبالها على كل هوائي إستقبال فيتم بذلك تقليل إحتمال حدوث ما يسمى بالخفوت العميق مما يؤدي إلا تقليل إحتمال إنقطاع الخدمة وبالتالي يتحسن الأداء وفق معدل الخطأ (BER) وكما هو واضح فهذه الأنظمة تتفوق وبشكل كبير

على أنظمة الإتصالات اللاسلكية وحيدة الهوائي في الإرسال والإستقبال فقد أظهرت الـ MIMO زيادة واضحة في سعة القناة دون الحاجة إلى عرض مجال ترددي إضافي أو قدرة إرسال أكبر.

## 1.6.2 تصنيف أنظمة متعدد المداخل والمخارج

هناك معيارين لتصنيف هذه الأنظمة:

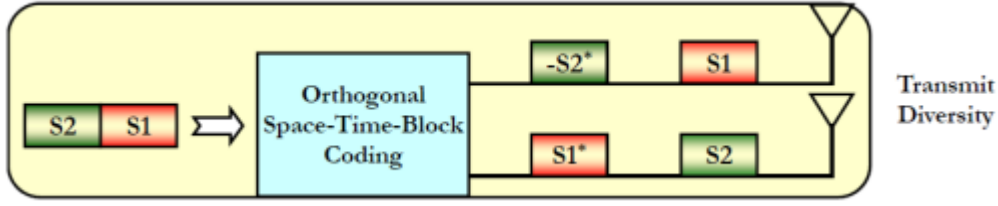
### • التصنيف بحسب الوظيفة

#### ○ تقنيات التعددية Diversity

الغرض من التعددية هو زيادة وثوقية الإتصال وذلك يتم عن طريق زيادة نسبة الإشارة إلى الضجيج وهناك نوعين من التعددية وهي تعددية إرسال وتعددية إستقبال والمبدأ الأساسي لها هو إرسال عدة نسخ للمعلومات بواسطة عدد من هوائيات الإرسال متباعدة عن بعضها البعض بمسافة كافية حيث يضمن إستقلال كل مسار عن غيره وبهذا يتم الإستقبال من عدة مسارات مستقلة وتحقيق ربح تعددية تام .

تؤدي التعددية إلى بعض التكرار في البعد المكاني والخوارزميات الخاصة بتقنيات تعددية الإستقبال هي طرق جمع الإشارات المعروفة وتعتبر خوارزميات الترميز المكاني - الزمني Coding Time-Space في جهة الإرسال وتعتبر طريقة التجميع بالنسبة العظمى وطريقة الأرجحية العظمى من أفضل الطرائق المستخدمة في تقنيات التعددية STC.

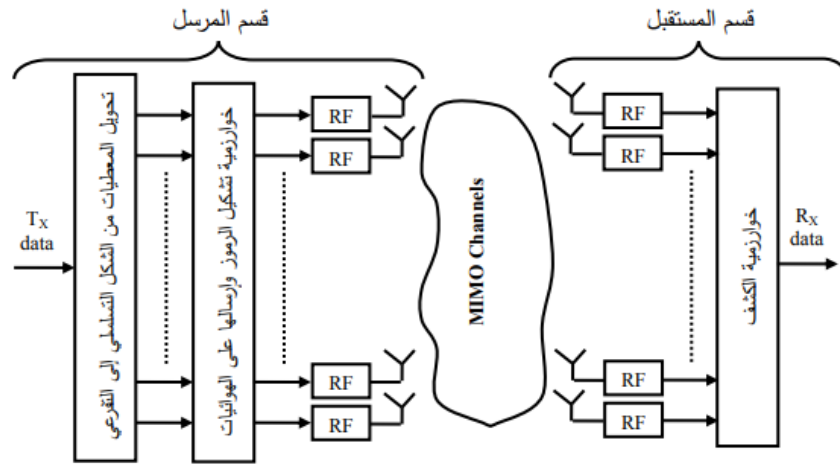
تعتبر خوارزمية ألاموتي من أشهر خوارزميات الـ STC والتي يكون فيها عدد هوائيات الإرسال إثنين فقط وتعتمد على رمزين مختلفين  $S_1, S_2$  ضمن فترتين زمنيتين مختلفتين أيضا بحيث يتم إرسال الرمز  $S_1$  عبر الهوائي الأول خلال الفترة الزمنية الأولى وإرسال الرمز  $S_2$  عبر الهوائي الثاني أما في الفترة الثانية فيتم إرسال الرمز  $S_2$  عبر الهوائي الأول والرمز  $S_1$  عبر الهوائي الثاني ويوضح الشكل (2 - 9) خوارزمية ألاموتي.



الشكل (2 - 9) : مبدأ التعددية المكانية - الزمنية وفق خوارزمية الأموتي

### ○ التجميع المكاني Spatial Multiplexing

الهدف من تقنيات التجميع المكاني هو زيادة معدل إرسال البيانات وبالتالي تحقيق زيادة الفعالية الطيفية المتمثلة بعدد البتات المرسلة في الثانية الواحدة لكل هيرتز وذلك عن طريق الإرسال الفرعي للبيانات ويتم ذلك عندما تكون القنوات الخاصة بال MIMO غير مترابطة ويمكننا القول أن التجميع المكاني يقوم على تقسيم تسلسل البتات المدخلة إلى عدد  $N$  تسلسل ثم تعديلها و إرسالها معا في نفس الوقت بواسطة عدد من هوائيات الإرسال ويجب أن تكون عدد تسلسل البتات أصغر من أو يساوي عدد هوائيات الإرسال ويتم ذلك دون الحاجة إلى قدرة عالية أو عرض نطاق إضافي وبذلك قد تضاعف معدل نقل البيانات عدد  $N$  مرة أما في الإستقبال فيتم حذف التداخلات ومن ثم فصل الإشارات المرسلة المختلفة عن بعضها البعض.



الشكل (2 - 10) : المخطط الصندوقي للتجميع المكاني

تقنيات الكشف في الإرسال بالتجميع المكاني :

▪ كاشف الإجبار الصفري

هو من الكواشف الخطية والبسيطة من ناحية التنفيذ والذي يعتمد على إيجاد مقلوب شبه مصفوفة القناة.

▪ كاشف متوسط مربع الخطأ الأصغر

وهو من الكواشف الخطية أيضا وفي حال كانت نسبة الإشارة إلى الضجيج منخفضة فإن هذا الكاشف هو الأفضل لذلك حيث يأخذ بعين الاعتبار الضجيج والتداخل.

▪ كاشف خوارزمية BLAST

هو من الكواشف غير الخطية حيث يعتمد على التغذية العكسية بإتخاذ القرار ومن أجل إزالة التداخل بين الإشارات عند كل هوائي سوف نستخدم خوارزمية تدعى (OSIC) وهي خوارزمية إلغاء التداخل المتعاقب المنظم وهذه الخوارزمية أقترح لكشف V-BLAST ومبدأ هذه الخوارزمية يعتمد أولا على أحد الكواشف الخطية بحيث يتم كشف رمز التعديل الأول على الهوائي الأقل تأثراً بالضجيج أي الذي له نسبة SNR أكبر من باقي الإشارات على الهوائيات الأخرى ثم يطرح الرمز المكشوف (التداخل الناتج عن الرمز المكشوف) من الرموز الأخرى ثم بعد ذلك يتم كشف رمز الإشارة الأقوى اللاحقة للرموز المتبقية ثم يطرح الرمز المكشوف من الرموز الأخرى المتبقية وهكذا تستمر العملية حتى يتم كشف كل الرموز.

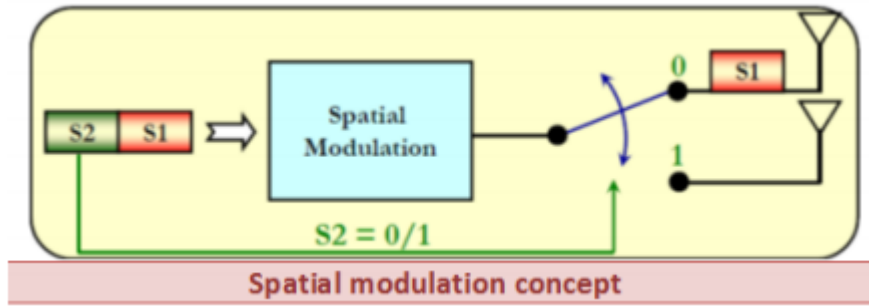
○ تقنيات تشكيل الحزمة

تتم الإستفادة من معلومات حالة القناة CSI في كل من المرسل والمستقبل لتحقيق تشكيل

الحزمة وذلك بهدف الحصول على فتحة إشعاعية انتقائية زاوياً يستفاد منها من أجل توجيه حزمة الإرسال في اتجاه ما مرغوب إن تشكيل الحزمة يؤدي إلى زيادة في نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR لدى المستقبل وهو قادر على حذف التداخلات المختلفة والتداخل الناتج عن القناة المجاورة co-channel وبالتالي يسمح بتشكيل الحزمة بدعم مستخدمين عديدين.

#### ○ التعديل المكاني

يقوم التعديل المكاني بتفعيل هوائي إرسال وحيد أو أكثر في كل لحظة إرسال، وذلك بحسب معلومات المدخل، وبوضوح أكثر فإن تسلسل بتات المعلومات المرسل مرتبب برقم الهوائي، وتتم الاستفادة من استقلال خفوت القنوات المرتبطة بهوائيات الإرسال، وكمثال عليها نذكر مثلاً التعديل بإزاحة المكان SSK وعلى الرغم من أن الخرج يزداد فقط لوغاريتمياً مع عدد هوائيات الإرسال، فإن التعديل المكاني قادر على خفض تعقيد كل من المرسل والمستقبل. وكذلك الوصول إلى فعالية طيفية عالية بمساعدة عدد كافي وكبير من الهوائيات.



الشكل (2 - 11) : مبدأ التعديل المكاني لهوائيين.

#### ● التصنيف بحسب توفر معلومات حالة القناة CSI

##### ○ أنظمة MIMO حلقة مفتوحة (CSIT) Open loop

في هذه الأنظمة تكون معلومات حالة القناة CSI غير متوفرة لدى المرسل وفي هذه الحالة يمكن إستخلاص معلومات حالة القناة في المستقبل من خلال تخمين بمساعدة رموز

تجريبية pilot وبالمقابل يمكن تجنب إجراء التقدير في الإستقبال إذا تم إستخدام تقنيات كشف تفاضلية في تلك الحالة يمكن لتقنيات MIMO غير متماسكة الوصول إلى ربح تجميع أو ربح تعددية أو ربح تشكيل حزمة في الإستقبال.

○ أنظمة MIMO حلقة مغلقة (CSIT) Close loop

في أنظمة MIMO ذات الحلقة المغلقة تكون معلومات حالة القناة CSI متوفرة بالنسبة لكل من المرسل والمستقبل وبمساعدة CSIT يصبح من الممكن الوصول إلى ربح تشكيل حزمة في الإرسال من البديهي أنه بوجود معلومات حالة القناة CSIT تامة لدى المرسل فإن نظام الـ MIMO ذو الحلقة المغلقة يعطي أداء أفضل من نظام الـ MIMO ذو الحلقة المفتوحة وذلك وفقا لكل قياسات الأداء.

## 2.6.2 الفوائد الأساسية لتقنية الـ (MIMO)

### • ربح التعددية

زيادة الوثوقية هي الهدف الذي يحققه ربح التعددية حيث ينتج هذا الربح نتيجة إستقبال نسخ عديدة من الإشارة بعد تعرضها لأنواع خفوت مستقلة ويمكن تحقيق التعددية عن طريق إرسال أو إستقبال الإشارة من عدة مسارات بخفوت مختلف وأيضا يتحقق عن طريق تعددية الإرسال ويمكن التعبير عن ربح التعددية بالعلاقة الآتية:

$$G_d = \lim_{SNR \rightarrow \infty} \left( \frac{\log(P_e(SNR))}{\log(SNR)} \right) \quad (5-2)$$

## • ربح المصفوفة

ربح المصفوفة أو ما يسمى بربح تشكيل الحزمة ويعبر عن متوسط الزيادة في نسبة الإشارة إلى الضجيج بسبب الجمع المتناسك من عدة هوائيات في المستقبل أو في المرسل أو كليهما وهو يتطلب معرفة تامة للقناة لدى المرسل والمستقبل ويتعلق بعدد هوائيات الإرسال والإستقبال والفتحة الناتجة عن هوائيات الإستقبال باتجاه زاوي محدد ويتم ذلك عن طريق الإختيار المناسب للأوزان العقدية المناسبة لكل هوائي وكلما كانت إشارات الهوائيات مترابطة كلما كان تشكيل الحزمة أفضل فإذا كان الإتصال يحقق خط رؤية مباشر بين المرسل والمستقبل فإن ربح تعددية الإرسال يضاف له ربح تعددية الإستقبال.

## • ربح التجميع

يمكن لقنوات الـ MIMO أن تدعم الإرسال التفرعي للمعطيات في حالة التجميع المكاني ويتعلق عدد السلاسل التفرعية الممكنة برتبة مصفوفة القناة اللحظية H ورتبة المصفوفة بدورها تتعلق بالخصائص المكانية لبيئة الإنتشار الراديوية ونعرف ربح التجميع على أنه الزيادة في معدل نقل المعلومات بدون إستهلاك طاقة أو عرض نطاق إضافي ويعبر عنه بالعلاقة الآتية :

$$G_{max} = \lim_{SNR \rightarrow \infty} \left( \frac{C(SNR)}{\log(SNR)} \right) \quad (6-2)$$

## 7.2 الـ (SU-MIMO) والـ (MU-MIMO)

أدى النمو في تكنولوجيا الـ MIMO إلى ظهور أنظمة إتصالات جديدة ومنها ما يعرف بمسمى الـ (MU-MIMO) غالباً ما ينظر لهذا النظام بأنه إمتداد لـ (SDMA) وتدعم هذه التقنية إتصالات متعددة على قناة واحدة حيث يتم تحديد مستخدمين مختلفين من خلال التوقعات المكانية لهم حيث يستخدم الـ (SDMA) لمضاعفة الإرسال المكاني وزيادة معدل نقل البيانات ويمكن تحقيق ذلك بإستخدام مسارات متعددة كقنوات مختلفة لنقل البيانات وهناك أيضاً فائدة

أخرى لإستخدام تقنية الـ(SDMA) في الشبكات الخليوية والتي هي التخفيف من تأثير التداخل القادم من الخلايا المجاورة.

عادة ما يشير لأنظمة الـ MIMO للإتصالات التقليدية على أنها أنظمة للمستخدم الفردي والتي يطلق عليها (SU-MIMO) وذلك لأنه وفي هذه الأنظمة تتصل نقطة الوصول مع محطة متنقلة واحدة فقط أما بالنسبة للـ(MU-MIMO) ففيها تم تجهيز كلا من نقطة الوصول والمحطات المتنقلة بهوائيات متعددة على عكس الـ (SU-MIMO) فإن نقطة الوصول قادرة على الإتصال بالعديد من المحطات المتنقلة فأنظمة الـ (MU-MIMO) تهدف لإستخدام أجهزة إستقبال متعددة من أجل تحسين معدل الإتصال مع الحفاظ على مستوى الموثوقية و تحسين أداء النظام وذلك لإمكانية العديد من المستخدمين التواصل في نفس الوقت على نفس النطاق ومع ذلك تتعرض شبكات الـ(MU-MIMO) لتداخل قوي في نفس القناة وهو ما لا ينطبق على الـ (SU-MIMO) وقد تم إقتراح العديد من الأساليب لإدارة التداخل لحل المشكلة حيث اعتمدت هذه الأساليب على تقنية تشكيل الحزم.

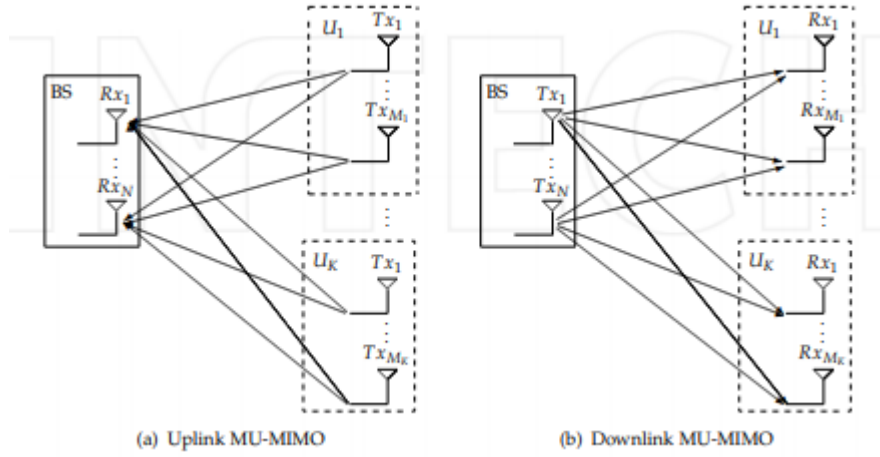
يعتمد أداء كلا من النظامين الـ (SU-MIMO) والـ (MU-MIMO) من حيث الإنتاجية على مستوى الـ SNR فعند مستوى SNR أدنى يكون أداء الـ (SU-MIMO) جيد أما عند مستوى SNR أعلى توفر الـ (MU-MIMO) أداء أفضل.

**جدول (2 - 2) : مقارنة بين تقنية الـ (MU-MIMO) والـ (SU-MIMO)**

Feature	MU-MIMO	SU-MIMO
Main aspect	BS communicates with multiple users	BS communicates with a single user
Purpose	MIMO capacity gain	Data rate increasing for single user
Advantage	Multiplexing gain	No interference
CSI	Perfect CSI is required	No CSI
Throughput	Higher throughput at high SNR	Higher throughput at low SNR

## 8.2 مخططات الإتصال لأنظمة الـ (MU-MIMO)

تتضمن مخططات الإتصال كلا من الوصلة العلوية والوصلة السفلية لنظام الـ (MU-MIMO) ففي حالة إتصال الوصلة العلوية يرسل المستخدمين إشارات إلى المحطة الاساسية أما في حالة الوصلة السفلية فيحدث العكس حيث تقوم المحطة بالإرسال للمستخدمين ويوضح الشكل أدناه كلا من الوصلتين العلوية والسفلية.



الشكل (2 - 12) : مخططات الـ (MU-MIMO) للوصلتين العليا والسفلى

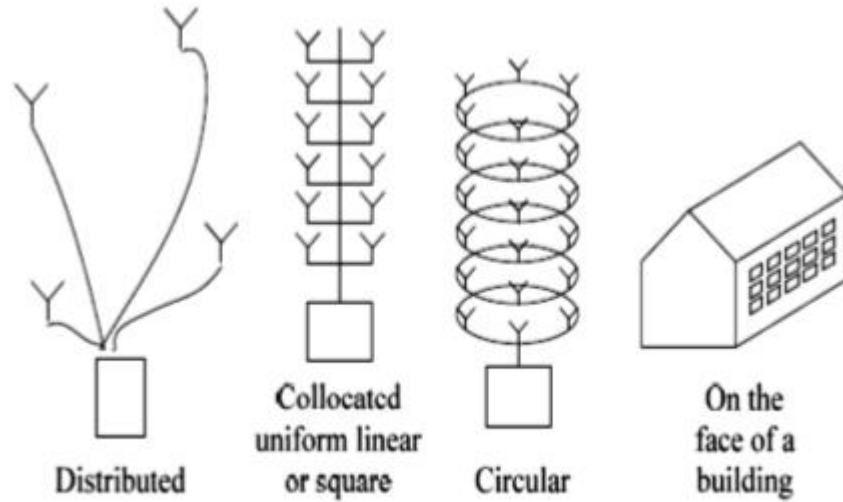
## 9.2 تقنية الـ ( Massive MIMO )

تعتبر تقنية الـ (Massive MIMO) من التقنيات الناشئة والمستخدمه في الجيل الخامس وهي عبارة عن توسيع لتقنية الـ (MIMO) التقليدية والتي تعتمد على تقنية الإرسال اللاسلكي المتعدد (Wireless multicast) حيث تستخدم العديد من مصفوفات الهوائيات التي تخدم في نفس الوقت العديد من المحطات المتنقلة والتي قد تكون إما من هوائي وحيد أو متعددة الهوائيات.

يساعد العدد الكبير من الهوائيات على تركيز الطاقة على مناطق أصغر وذلك لتحسين الإنتاجية بشكل هائل وزيادة الكفاءة في الطاقة المشعة كما أنها أصبحت عامل فعال في التعامل مع التداخل الكبير في القناة وذلك للعلاقة العكسية بين التداخل وعدد الهوائيات في الـ BS وأيضا لمعالجة الطلبات المتزايدة لحركة البيانات المتنقلة وتعتبر العامل الرئيسي في تطوير شبكات النطاق العريض

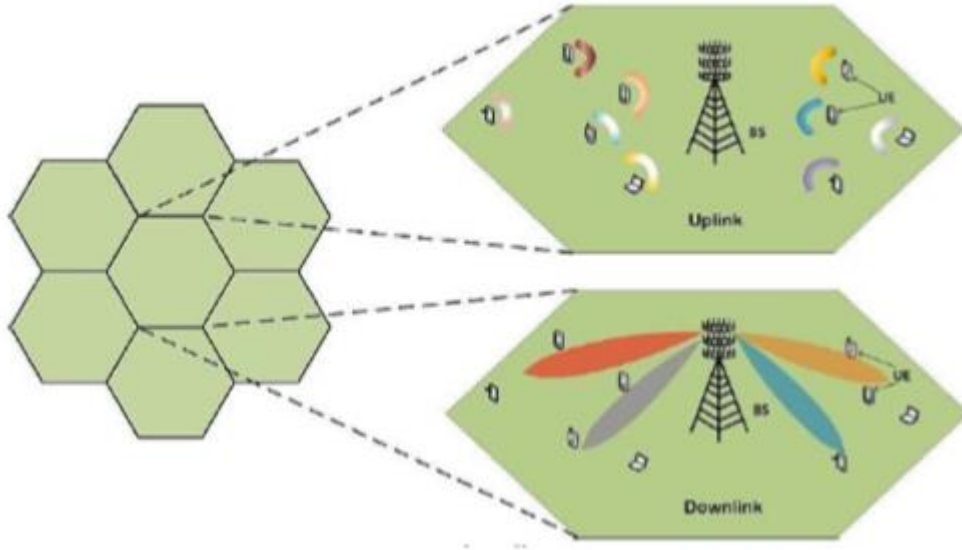
المستقبلية والتي ستكون موفرة للطاقة وآمنة وإستخدامها بكفاءة للطيف الترددي كما تعتبر تقنية مهمة للبنية التحتية المستقبلية للمجتمع الرقمي المستقبلي.

تعتبر الـ (Massive MIMO) عنصر هام في منظومة الجيل الخامس وذلك للكسب العالي الذي تحققه ومعدل البيانات اللاسلكية الكبير ولتحقيقه للوثوقية وذلك لإستخدام عدد ضخم من الهوائيات في المحطة القاعدية كما أنه يقلل من القدرة المشعة من خلال تركيز الطاقة للمستخدمين المتنقلين بإستخدام تقنيات ما قبل الترميز (Precoding) وذلك من خلال توجيه الطاقة لمستخدمين محددين ولهذا الأسباب تم إستخدام التقنية في نظام الجيل الخامس.



الشكل (2 - 13) : بعض أشكال مصفوفة هوائيات الـ (Massive MIMO)

ويمكننا تعريف الـ (Massive MIMO) على أنه وببساطة تطبيق لمصفوفة ضخمة من الهوائيات في المحطة القاعدية ويمكن تعريفها أيضا من خلال إرتباطها بنسبة المستخدمين إلى عدد الهوائيات التي تقدم الخدمة لهم.



الشكل (2 - 14) : الـ (Massive MIMO) المتعدد الخلايا

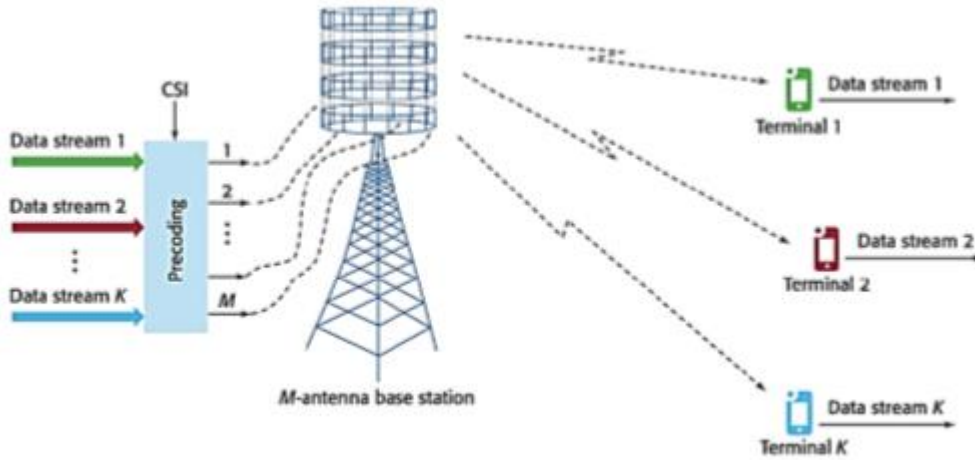
## 1.9.2 مميزات الـ (Massive MIMO)

- يمكن لـ (Massive MIMO) أن تقلل وبشكل كبير من النداخل داخل الخلية.
- زيادة عدد الهوائيات في المحطة القاعدية يزيد من إمكانية إلغاء الضوضاء الحاصل للإشارة.
- إمكانية زيادة سعة النظام بمقدار 10 مرات أو أكثر بسبب تعدد الإرسال المكاني في الوقت نفسه.
- تحسين كفاءة الطاقة في حدود الـ 100 مرة وذلك يعود لوجود عدد كبير من الهوائيات حيث يمكن تركيز الطاقة بشكل حاد في مناطق صغيرة في الفضاء.
- إمكانية بناء الـ (Massive MIMO) باستخدام مكونات منخفضة التكلفة.
- تقليل القدرة المرسله حيث في الوصلة العليا يكون استنزاف الطاقة في البطارية أبطأ بينما في الوصلة السفلى فيتم إستهلاك الكثير من الطاقة الكهربائية في المحطة القاعدية وذلك عبر الدوائر ومكبرات الطاقة وأنظمة التبريد المرتبطة بها ومن ثم فإن التقليل في الطاقة الخاصة بالتردد اللاسلكي من شأنه أن يساعد في خفض الإستهلاك في المحطة القاعدية.

- إمكانية تقليل زمن الوصول بشكل كبير وذلك لأن الـ (Massive MIMO) يعتمد على قانون الأعداد الكبيرة من أجل متوسط تأثير التلاشي أو الخبو بحيث لا يحد الخبو من زمن الانتقال فيه.
- تعمل تقنية الـ (Massive MIMO) على تبسيط طبقة الوصول المتعدد بحيث يمكن إعطاء كل طرف عرض النطاق الترددي بالكامل مما يلغي الحاجة إلى جدولة التردد ويجعل معظم إشارات التحكم في الطبقة المادية زائدة عن الحاجة.

## 2.9.2 بعض النقاط الأساسية في الـ (Massive MIMO)

تعتمد الفكرة الرئيسية للـ (Massive MIMO) على الحصول على جميع فوائد الـ (MIMO) التقليدية ولكن بشكل أفضل حيث تتمثل هذه الفوائد بتوفير زيادة كبيرة في الإنتاجية ولكن بدون أي زيادة إضافية بعرض نطاق الحزمة أو قدرة الإرسال ومن أجل تحقيق هذه الفوائد يجب أن تكون عدد الهوائيات في المحطة القاعدية أكبر من أو يساوي عدد المستخدمين التي تقدم لهم الخدمة في نفس الوقت حيث أن الـ (Massive MIMO) تقنية تعتمد على التجميع المكاني والذي بدوره يعتمد على معلومات حالة القناة CSI بالوصلتين العليا والسفلى حيث تستخدم الـ CSI في المحطة القاعدية لتنفيذ عملية ما قبل الترميز على سلاسل بيانات الوصلة الهابطة قبل عملية الإرسال.



الشكل (2 - 15) : الوصلة السفلى للـ (Massive MIMO)

أما في الوصلة العليا يمكن الحصول على الـ CSI بسهولة من خلال معرفة البيانات في الإشارة المرشدة أو الدليلية المخصصة والمرسلة للمحطة القاعدية حيث يتم استخدامها لتخمين إستجابة القناة أما في الوصلة العليا يصعب ذلك بسبب مغناطيسية هوائيات المحطة فيتم إرسال سلاسل مرشدة أو دليلية إلى الطرفيات وإستخدامها لتخمين إستجابة القناة ثم إعادة النتيجة إلى المحطة القاعدية لكن يعتبر هذا غير عملي في تقنية الـ (Massive MIMO) وذلك للأسباب الآتية:

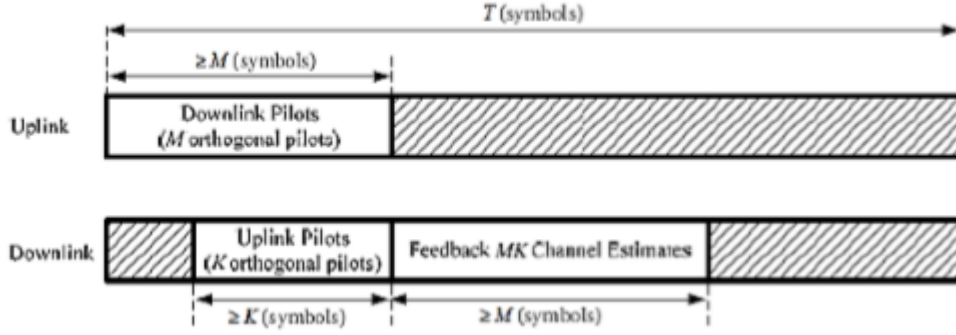
- كمية المصادر الزمنية الترددية المطلوبة لسلاسل الإشارة الدليلية بالوصلة السفلى تتناسب وبشكل كبير مع عدد الهوائيات وبالتالي تحتاج الـ (Massive MIMO) تحتاج لمصادر أكثر.
- تقاس عدد إستجابات القناة المخمنة من قبل كل طرف بعدد هوائيات المحطة وبالتالي فإن المصادر اللازمة للوصلة العليا والتي من خلالها يتم تقديم تغذية عكسية لـ CSI للمحطة القاعدية ستكون أكثر بكثير مما كانت عليه في الـ MIMO التقليدية.

يمكن حل المشكلتين المذكورتين أعلاه بإستخدام نموذج Time Division Duplex وإستغلال ميزة تبادلية القناة بين قنوات الوصلة العليا والسفلى خلال فترة زمن تماسك القناة أما عندما يكون عدد المستخدمين وعدد الهوائيات في المحطة القاعدية صغير عندها يمكن إستخدام نموذج Frequency Division Duplex.

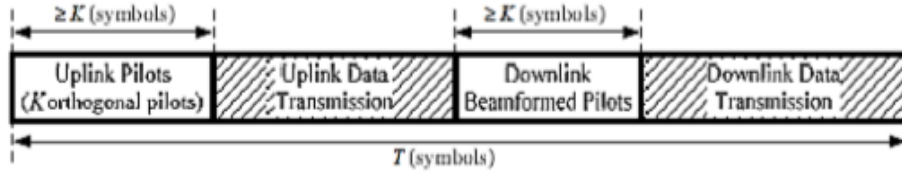
وبالتالي فإن النقاط الأساسية لـ (Massive MIMO) تتمثل بالآتي :

#### 1- عملية الـ (TDD) :

حيث تعتبر نموذج للتقسيم المزدوج ويوجد نموذجين الأول هو (FDD) الذي يتم فيه إستخدام طيف ترددي مختلف في إرسال الوصلتين العليا والسفلى لذلك تكون قنوات الوصلتين غير تبادلية أما بالنسبة لنموذج الـ (TDD) فيتم فيه إستخدام الطيف الترددي ذاته في إرسال الوصلتين وتكون قنوات الوصلتين تبادلية.



الشكل (2 - 16) : بنية الشق الزمني في أنظمة الـ (FDD)



الشكل (2 - 17) : بنية الشق الزمني في أنظمة الـ (TDD)

نلاحظ في الـ (FDD) أن العملية تتطلب  $M+K$  قناة للوصلة العليا و  $M$  قناة للوصلة السفلى أما في الـ (TDD) نلاحظ أن العملية تتطلب  $2K$  قناة للوصلتين العليا والسفلى.

## 2- المعالجة الخطية :

بما أن عدد الهوائيات في الـ BS ضخم وعدد المستخدمين كبير فإن معالجة الإشارة عن المستخدمين لابد أن تتعامل مع مصفوفات بأبعاد كبيرة ونتيجة لذلك فإن المعالجة الخطية في الـ (Massive MIMO) هي الأمثل.

## 3- الإنتشار الملائم :

ويعني ذلك أن تكون القناة بين مصفوفة الهوائيات في المحطة القاعدية والمستخدمين جيدة التكيف.

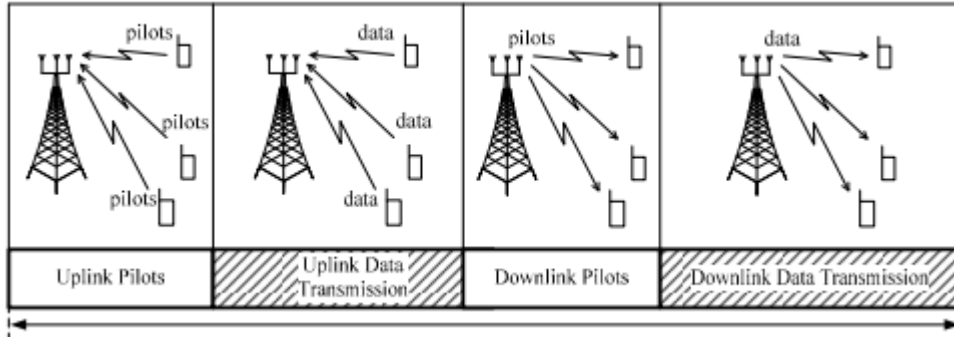
4- مصفوفة هوائيات الـ (Massive MIMO) في المحطة لا تكون ضخمة فيزيائياً.

5- قابلية التوسع (Scalable):

يمكن زيادة عدد الهوائيات بالقدر المطلوب دون الحاجة في زيادة تقدير القناة وذلك لأن معالجة الإشارات عند كل مستخدم بسيطة ولا تعتمد على وجود مستخدمين آخرين حيث إضافة أو إسقاط بعض المستخدمين من الخدمة لا يؤثر على أنشطة المستخدمين الآخرين.

### 3.9.2 مبدأ عمل الـ (Massive MIMO)

يتم تشغيل مشغل الـ (TDD) خلال فترة الإتصال حيث تتم عملية تقدير القناة وهنا يتم تهيئة الوصلة العليا والوصلة السفلى ويتم نقل بيانات كل من الوصلتين ويمكن توضيح ذلك عبر البروتوكول (TDD Massive MIMO) الموضح في الشكل أدناه.



الشكل (2 - 18) : بروتوكول إرسال الـ TDD Massive MIMO

وبحسب البروتوكول الموضح فإنه وخلال فترة التماسك لدينا ثلاث عمليات على الشكل الآتي :

#### 1- تخمين القناة :

حيث أن المحطة القاعدية تحتاج لـ CSI لكشف الإشارات المرسلة من المستخدمين بالوصلة العليا ومن أجل عملية ما قبل الترميز للإشارات في الوصلة السفلى حيث يمكن الحصول على الـ CSI من خلال تهيئة الوصلة العليا بتخصيص سلسلة دلالية

لكل مستخدم لإرسالها للمحطة القاعدية بعدها يتم تخمين القنوات بالإعتماد على الإشارات الدليلية المستقبلية من المستخدمين.  
بالإضافة أيضا يحتاج كل مستخدم لمعرفة جزئية عن الـ CSI من خلال توجيه الوصلة السفلى وذلك لكشف الإشارات المرسله من الـ BS.

2- إرسال بيانات الوصلة العليا :

حيث يستخدم جزء من فترة التماسك من أجل إرسال البيانات الخاصة بجميع المستخدمين إلى الـ BS بعد ذلك تستخدم الـ BS تخمين القناة وتقنيات التجميع الخطي لكشف الإشارات المرسله من المستخدمين.

3- إرسال بيانات الوصلة السفلى :

أما هنا فتقوم الـ BS بإرسال الإشارات لجميع المستخدمين بحيث تستخدم تخمين القناة الخاص بها بالإضافة للرموز المخصصة للمستخدمين.

## 4.9.2 الإمكانات المتاحة للـ (Massive MIMO)

يمكن للـ (Massive MIMO) أن يلبي طلبات تحتاج إليها الشبكات اللاسلكية المستقبلية والتي أهمها :

- إمكانية زيادة سعة النظام عشرة أضعاف أو أكثر بالوقت ذاته بالإضافة لتحسين كفاءة الطاقة مئات الأضعاف.

إن المبدأ الأساسي الذي يجعل الزيادة الهائلة في كفاءة الطاقة ممكنة هو وجود عدد كبير من الهوائيات بالإضافة إلى تقنية التجميع المكاني المستخدمة في الـ (Massive MIMO) وتمثل المعادلة الآتية سعة النظام لإرسال الوصلة العليا :

$$C_{sum} = K \log_2(1 + M_{Pu}) \quad (7 - 2)$$

حيث يمثل الـ  $K$  كسب التجميع والـ  $M$  كسب المصفوفة ويمكننا الحصول على كفاءة طيفية ضخمة وكفاءة طاقة عندما تكون الـ  $M$  و الـ  $K$  كبيرة بدون أي زيادة في قدرة الإرسال لكل محطة ويمكننا في نفس الوقت خدمة المزيد من المستخدمين في نفس نطاق التردد بالإضافة لزيادة معدل النقل لكل مستخدم وأيضا بمضاعفة عدد هوائيات المحطة القاعدية يمكننا تقليل قدرة الإرسال بمقدار 3 ديسيبل مع الحفاظ على جودة الخدمة الأصلية.

- إمكانية التصنيع بمكونات ذات قدرة منخفضة وبتكلفة قليلة.
- يتم في الـ (Massive MIMO) إستبدال مكبرات الـ 50 Watt الفائقة الخطية المستخدمة في الأنظمة التقليدية إلى مئات المكبرات ذات التكلفة القليلة مع قدرة خرج تقدر بالملي وات ويعتمد الـ (Massive MIMO) على قانون الأعداد الضخمة للحد من الضجيج والخفوت وعيوب الأجهزة وذلك عند جمع الإشارات المستقبلية من الهوائيات معا.
- زيادة المناعة ضد التداخل والتشويش المتعمد.

## 5.9.2 تحديات تواجه الـ (Massive MIMO)

- تدهور الإشارة الدليلية (Pilot Contamination)
- تتكون الشبكات الخلوية العملية من العديد من الخلايا بسبب التوافر المحدود للطيف الترددي حيث يتعين على العديد من الخلايا أن تشترك في نفس موارد التردد الزمني وبالتالي لا يمكننا تعيين تسلسلات دليلية متعامدة لجميع المستخدمين في جميع الخلايا بسبب محدودية فاصل القناة فيجب إعادة إستخدام التسلسلات الدليلية المتعامدة من خلية إلى أخرى لذلك فإن تقدير القناة الذي تم الحصول عليه في خلية معينة سيكون ملوثاً بواسطة قنوات الـ Pilot التي يرسلها المستخدمين في خلايا أخرى فيسمى هذا التأثير بتدهور الإشارة الدليلية والذي بدوره يقلل من أداء النظام.

تأثير تدهور الإشارة الدليلية هو قيد أساسي متأصل في الـ (Massive MIMO) لا يتلاشى حتى عند زيادة عدد الهوائيات في المحطة القاعدية وقد بذلت جهود كبيرة للحد من هذا التأثير ويمكن التخفيف من التلوث التجريبي بشكل فعال بإستخدام مخطط تعيين رائد على علم بالتغاير بين الخلايا وما زالت الأبحاث جارية حول هذا الموضوع.

#### • الإنتشار الغير ملائم (Unfavorable Propagation)

تعمل تقنية الـ (Massive MIMO) في بيئات إنتشار ملائمة ومع ذلك من الناحية العملية قد تكون هناك بيئات إنتشار حيث تكون القنوات غير ملائمة وعلى سبيل المثال في بيئات الإنتشار التي تكون فيها عدد المشتتات صغيرة مقارنة بأعداد المستخدمين أو تكون القنوات ما بين المستخدمين والمحطة تشترك في بعض المشتتات فإن القناة غير ملائمة ويمكن الحد من هذه المشكلة بتوزيع هوائيات المحطة على مساحة كبيرة. أحد الحلول لحل هذه المشكلة هو توزيع هوائيات الـ BS على مساحة واسعة.

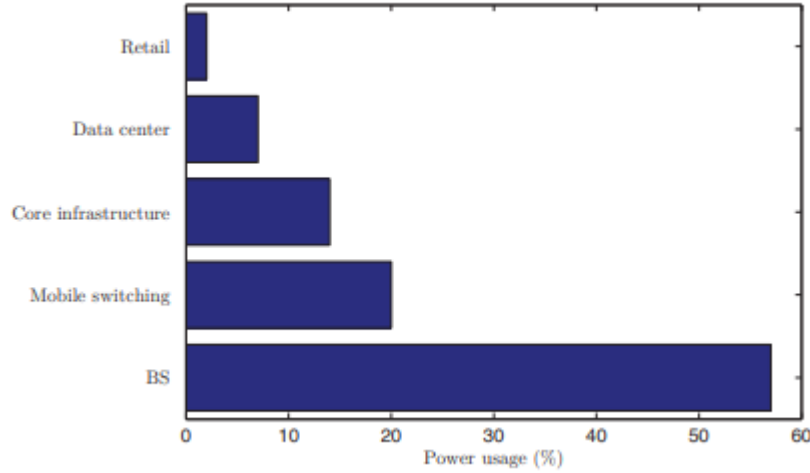
#### • معايير وتصميمات جديدة مطلوبة

سيكون من المفيد جدا إذا تم نشر الـ (Massive MIMO) في الأنظمة الحالية مثل الـ LTE ومع ذلك فإن معيار الـ LTE يسمح فقط بما يصل إلى 8 منافذ للهوائي في المحطة القاعدية وأيضا مع الـ (Massive MIMO) يجب إستبدال جهاز الإرسال والإستقبال المكلف 50 وات بعدد كبير من الهوائيات منخفضة الطاقة وغير مكلفة ويجب أيضا مراعاة تصميمات الأجهزة ذات الصلة وهذا يتطلب جهداً هائلاً من الأوساط الأكاديمية والصناعية.

## 6.9.2 كفاءة الطاقة Energy Efficiency

إستهلاك الطاقة يشكل مصدر قلق كبير للشبكات الخلوية المستقبلية ولذلك فإن التقنيات الحديثة تركز على كفاءة الطاقة الخاصة بالأجهزة المستخدمة وكما هو الحال مع تقنية الجيل الخامس الـ (Massive MIMO) الذي يتمكن من تحسين الإنتاجية مع توفير قدر كبير من الطاقة وتم

تحليل كفاءة الطاقة له بناءً على نموذج إستهلاك طاقة واقعي (CP) وهو نموذج تم تطويره لشبكات الـ (Massive MIMO).



الشكل (2 - 19) : مقدار إستهلاك القدرة في الشبكة الخليوية

إذا إستمر معدل النمو السنوي لحركة المكالمات للشبكات الخليوية في حدود 41% - 59% فإن معدل النقل يجب أن يزيد بمقدار 1000 على مدى الـ 15-20 سنة القادمة وبالتالي يجب إتخاذ التدابير المضادة للنشطة لذلك حيث أن الشبكات الحالية تعتمد على بنية تحتية مركزية صلبة يتم تشغيلها بواسطة الشبكة الكهربائية ومصممة لزيادة الإنتاجية وحمل المكالمات الذي يمكن لكل خلية التعامل معه.

يشير الـ (Energy Efficiency) إلى مقدار الطاقة اللازمة لتحقيق قدر معين من العمل ويمكن تعريفها بالنسبة للشبكة الخليوية أنه عدد البتات التي يمكن نقلها بشكل موثوق لكل وحدة طاقة.

$$EE = \frac{\text{Throughput}}{\text{Power consumption}} \quad (2 - 8)$$

المقياس المستخدم لقياس طاقة الإرسال التي تستهلكها شبكة لاسلكية هو طاقة إرسال المنطقة (ATP) والذي يعرف على أنه متوسط استخدام الطاقة في الشبكة إلى معدل نقل البيانات لكل وحدة مساحة ويقاس بـ (W / km<sup>2</sup>) :

$$ATP = Transmit\ power * D \quad (9 - 2)$$

حيث أن الـ D هي متوسط كثافة الخلية.

ويمكن قياس الـ (EE) بالببت / جول ويمكن إعتبارها نسبة فائدة إلى تكلفة حيث تتم مقارنة جودة الخدمة (الإنتاجية) بالتكاليف المرتبطة (إستهلاك الطاقة) وذلك يعبر عن كفاءة توصيل الببتات في الشبكة.

## 7.9.2 كفاءة المعدات Hardware Efficiency

يحسن الـ (Massive MIMO) من كفاءة الأجهزة (HE) حيث تكون الخسارة في الـ (SE) من استخدام أجهزة ذات جودة قليلة صغيرة جدا ولا تكاد تذكر بحيث يمكن الحد من التشوه الناتج عن الأجهزة بإضافة هوائيات للمحطة القاعدية.

## 8.9.2 Energy-Spectral Efficiency Tradeoff

يمكن زيادة الكفاءة الطيفية للخلية بزيادة القدرة المرسله وبالتالي يؤثر ذلك سلبا على الشبكة لزيادة إستهلاك الطاقة إما بشكل مباشر عن طريق زيادة قدرة الإرسال أو بشكل غير مباشر بإستخدام المزيد من الأجهزة وبالتالي تقل كفاءة الطاقة لكن في الواقع العملي لا يتم الأمر بهذه الصورة حيث توجد ظروف تشغيل يمكن إستخدامها لزيادة كلا من الـ (EE) والـ (SE) بشكل مشترك.

## 10.2 الخلاصة

تم في هذا الفصل تغطية الخلفية النظرية بشكل شامل للمشروع بحيث تم توضيح أهم المفاهيم الرئيسية له وتبيين جوانبها بالإعتماد على النظريات السابقة والنظريات الحالية في محاولة بناء فكرة متكاملة للقارئ أو الباحث في هذا المجال وأيضاً توضيح أهمية المشروع بالنسبة للشبكات اللاسلكية المستقبلية ومدى تأثيره الإيجابي فيها وفي مساهمته لزيادة فعاليتها.

الفصل الثالث

تحليل المشروع

### 1.3 المقدمة

سيتم في هذا القسم توضيح المتطلبات الوظيفية والتي تتمثل ببناء المخططات الصندوقية التي بواسطتها يتم تطبيق الـ Massive MIMO عبر الماتلاب بالمعادلات الخاصة بكل حالة سيتم تحليلها في الفصل الرابع وتوضيح نتائجها في الفصل الخامس حيث سيتم في هذا الفصل توضيح خطوات التحليل التي سيتم إتباعها والتي على ضوءها سيتم تطبيق المشروع.

### 2.3 طرق جمع البيانات

#### • البحث في المصادر

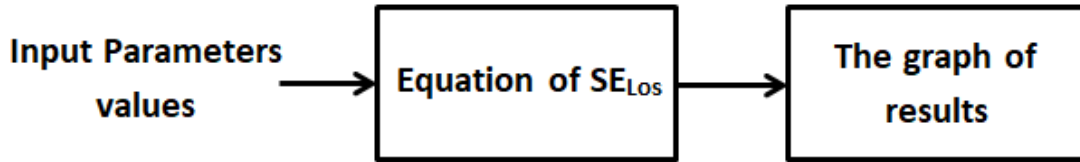
تم القيام بعملية بحث شاملة في عدة مصادر تخص المشروع وذلك للحصول على معلومات أكثر توسعية في هذا الجانب في محاولة وضع فكرة مفهومة عن المشروع وعن جميع جوانبه.

#### • البحث الإلكتروني

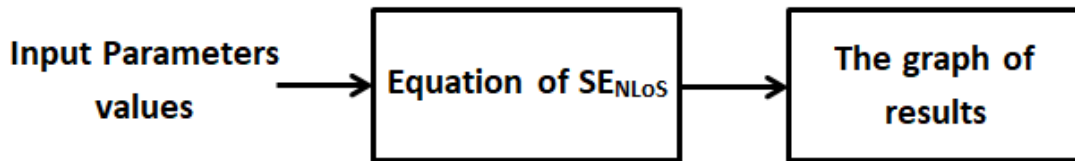
حيث تم البحث في العديد من المواقع العلمية الإلكترونية والموثوقة للحصول على معلومات تعزز الفكرة الرئيسية للمشروع من مقالات علمية أو أبحاث في هذا الجانب.

### 3.3 المتطلبات الوظيفية

- دراسة الكفاءة الطيفية.



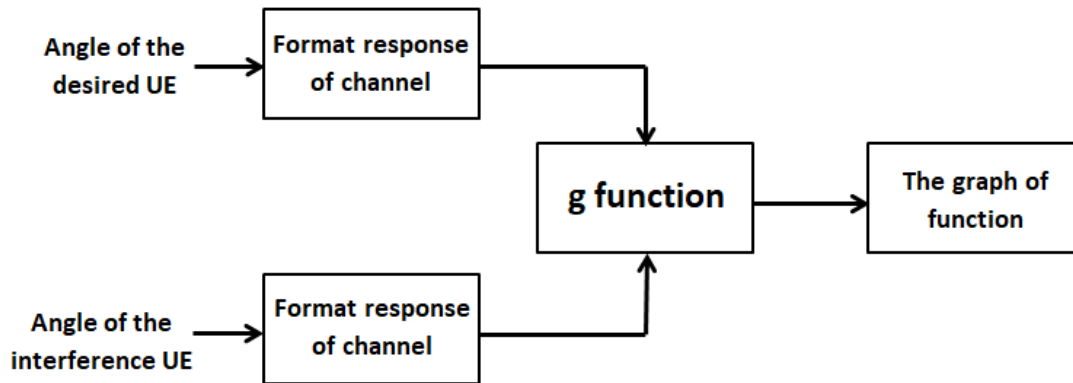
a) The SE for line-of-sight



b) The SE for Non line-of-sight

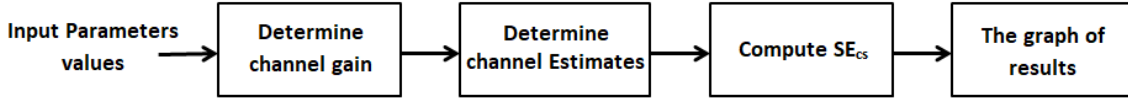
الشكل (3 - 1) : المخططات الصندوقية لدراسة الكفاءة الطيفية للحالتين الـ LoS والـ NLoS.

- دراسة مستوى التداخل



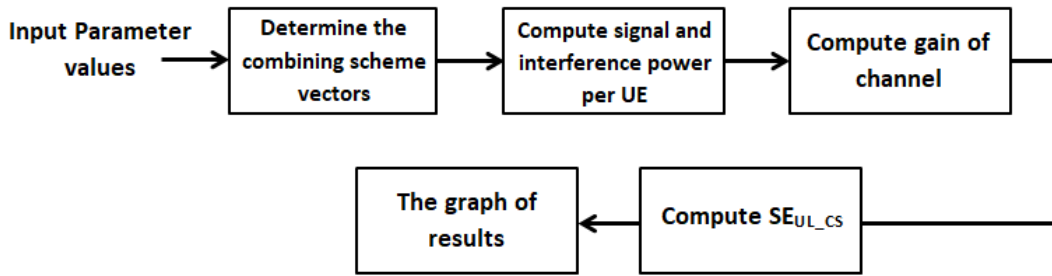
الشكل (3 - 2) : المخطط الصندوقي لدراسة مستوى التداخل للـ UE

• متوسط الكفاءة الطيفية وعدد الهوائيات



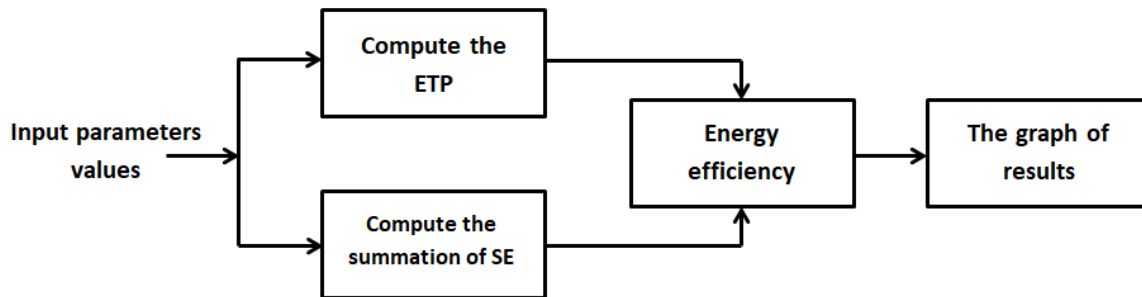
الشكل (3 - 3) : المخطط الصندوقي لدراسة متوسط الكفاءة الطيفية بدلالة عدد الهوائيات

• متوسط الكفاءة الطيفية وعدد المستخدمين



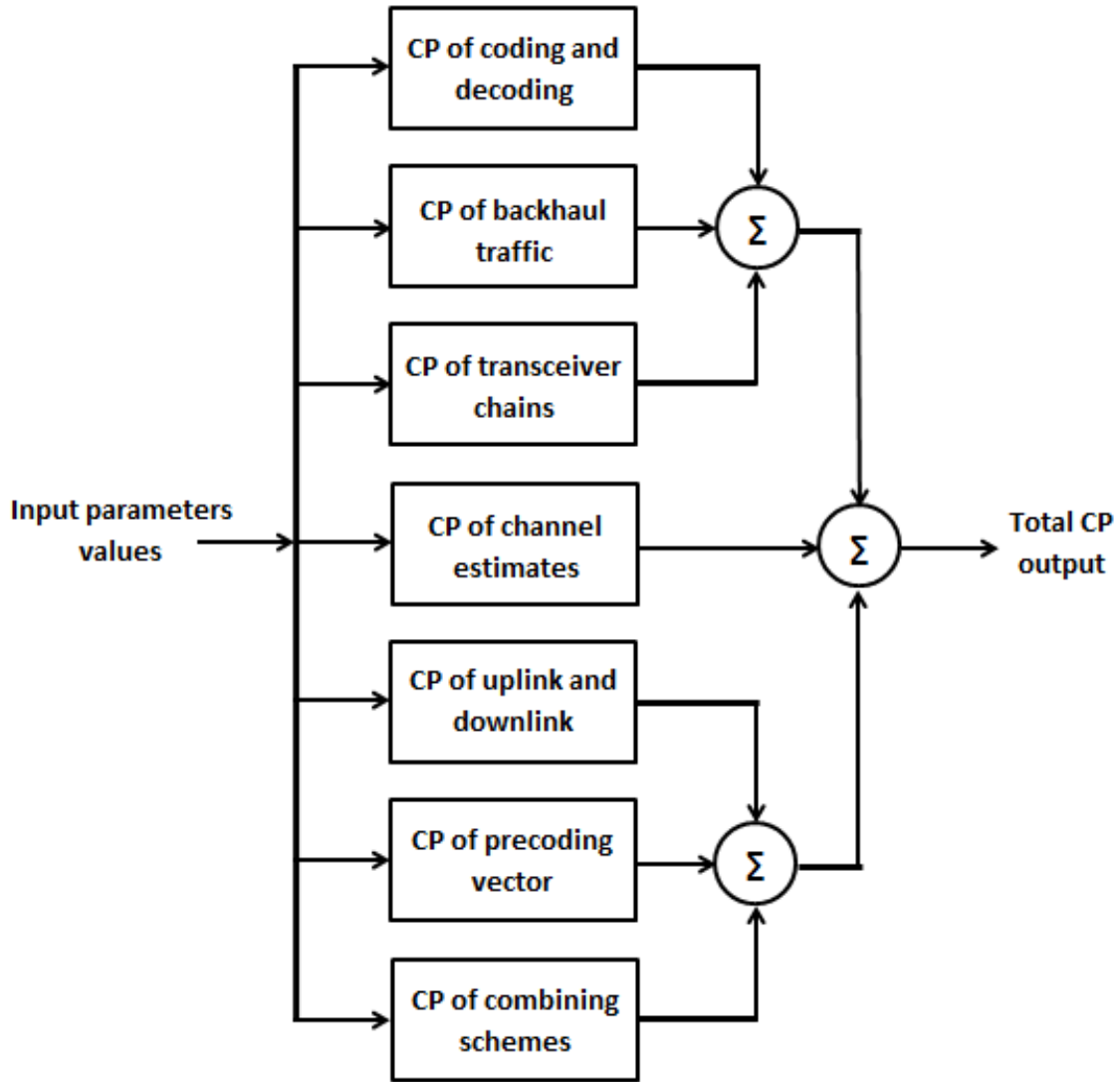
الشكل (4 - 3) : المخطط الصندوقي لدراسة متوسط الكفاءة الطيفية بدلالة عدد المستخدمين

• كفاءة الطاقة



الشكل (5 - 3) : المخطط الصندوقي لدراسة كفاءة الطاقة

## Circuit Power •



الشكل (3 - 6) : المخطط الصندوقي لدراسة مجموع الـ CP

الفصل الرابع

الدراسة الرياضية للمشروع

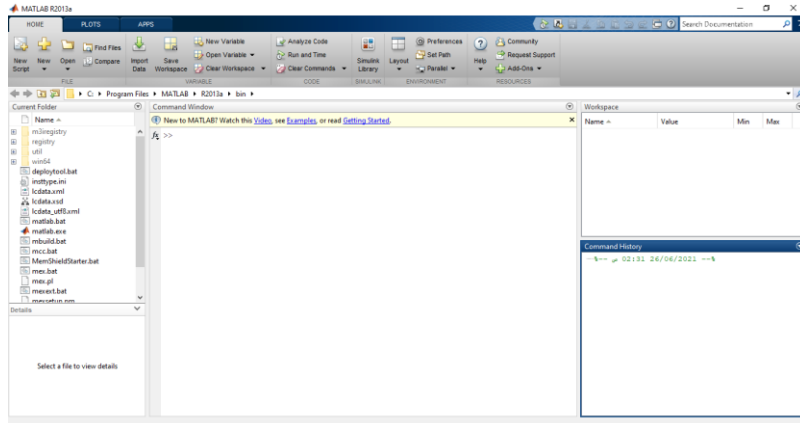
## 1.4 المقدمة

في هذا الفصل سيتم محاكاة الـ Massive MIMO في برنامج الماتلاب ودراسة العوامل الأساسية والتي تمت عملية التطوير عليها وعمل دراسة تحليلية وفق المعادلات التي تم التوصل لها والخروج بالنتائج البيانية والتي سيتم تمثيلها في الفصل الخامس.

## 2.4 نبذة مختصرة عن الماتلاب

برنامج الماتلاب هو عبارة عن برنامج هندسي يقوم بعمليات التحليل والتمثيل للبيانات وذلك بمعالجتها وفق قواعد البيانات الخاصة به حيث يمكنه إجراء العمليات الحسابية مثل حل المعادلات الجبرية والمعادلات التفاضلية والتكاملية ومختلف العمليات الرياضية المعقدة كما يتم أيضا استخدام البرنامج في مجالات عديدة منها مجال أنظمة التحكم ومجال الميكانيكا ومجال المحاكاة الإلكترونية وفي مجالات الطيران والدفاع الجوي والعديد من المجالات الهندسية التطبيقية.

تم إبتكار هذا البرنامج من قبل شخصين الأول هو أستاذ رياضيات وأستاذ في علوم الحاسوب في جامعة متشيجين وجامعتي ستانفورد ونيو مكسيكو ويدعى كليف مولر أما الآخر فهو جاك ليتل وهو المؤسس لشركة Mathworks كما أنه المساعد في وضع تخطيط برنامج الماتلاب وهو حاصل على شهادة البكالوريوس في الهندسة الكهربائية وعلوم الحاسوب من جامعة MIT كما أنه حصل على شهادة M.S.E.E من جامعة ستانفورد.



الشكل (4 - 1) : واجهة برنامج الماتلاب

### 3.4 دراسة الكفاءة الطيفية

#### • الكفاءة الطيفية والـ SNR

سيتم دراسة الكفاءة الطيفية للمستخدمين المطلوبين أو المستهدفين في كلاً من الحالتين الـ LoS وفي حالة الـ NLoS ودراسة مستوى الكثافة الطيفية بدلالة الـ SNR لحالات مختلفة من قوى التداخل بين الخلايا وفي نماذج مختلفة للقناة.

أما بالنسبة للحالة الأولى الخاصة بـ LoS ستتم الدراسة بإفترض أن المحطة القاعدية تعرف إستجابة القنوات وستكون الدراسة وقف المعادلة الآتية لكلاً من المعاملين الـ  $\beta$  والـ SNR.

$$SE_{LoS} = \log_2 \left( \frac{1+SNR}{(\beta*SNR)+1} \right) \quad (1-4)$$

حيث أن :

مستوى التداخل بين الخلايا -  $\beta$

نسبة الإشارة للضوضاء - SNR

أما بالنسبة للحالة الثانية الخاصة بـ NLoS سيتم تمثيلها وفق المعادلة الخاصة بها الموضحة أدناه:

$$SE_{NLoS} = \frac{e^{\frac{1}{SNR}E} \left( \frac{1}{SNR} \right) - e^{\frac{1}{SNR*\beta}E} \left( \frac{1}{SNR*\beta} \right)}{\log_e(2)*(1-\beta)} \quad (2-4)$$

جدول (1-4) : قيم المعاملات التي تم إستخدامها في المعادلات (1-4) و(2-4)

Parameter	Value
SNR <sub>dB</sub>	-10 – 30
$\beta$	$10^{-1}, 10^{-3}$

• دراسة مستوى التداخل

في هذا الجزء سيتم دراسة مستوى التداخل للإشارات بتأثير زاوية السمات للمستخدمين حيث سيتم إختبار زاوية الإتجاه الأنسب لتحقيق مستوى التداخل المطلوب في المدى من 180- وحتى الـ 180 وذلك بتطبيق معادلة الـ gfunction والتي بدورها تقوم بحساب مستوى التداخل.

في البداية سيتم إنشاء إستجابة القناة بالنسبة للمستخدمين المستهدفين والمستخدمين المتأثرين بالتداخل حيث تم إعتداد زاوية المستخدمين المستهدفين بـ 30° والمتأثرين بالتداخل في المدى من 180° إلى 180° وستتمثل معادلة إستجابة القناة بالعلاقة الآتية :

$$h_i = e^{2\pi j d_H \sin(\omega_i)} \dots e^{2\pi j d_H \sin(\omega_i)(M-1)} \quad (3-4)$$

حيث أن :

$\beta_i$  - الخبو واسع النطاق

$d_H$  - المصفوفة الأفقية الموحدة للهوائيات وتقاس بعدد الأطوال الموجية بين الهوائيات

$\omega_i$  - زاوية السمات للمستخدمين

وستتم الدراسة بالنسبة لكل الهوائيات بحيث يتم دراسة إستجابة القناة للتداخل وإيجاد مستوى التداخل عندها بواسطة المعادلة الآتية:

$$gfunction = \frac{h_i * h_d}{M} \quad (4-4)$$

جدول (4 - 2) : قيم المعاملات المستخدمة في دراسة مستوى التداخل

Parameter	Value
M	1 - 100
$\omega_d$	30°
$\omega_i$	-180° - 180°

• دراسة متوسط مجموع الكفاءة الطيفية للوصلة العليا

- متوسط الكفاءة الطيفية وعدد الهوائيات

سيتم دراسة متوسط المجموع للكفاءة الطيفية بالنسبة للوصلة العليا بدلالة عدد الهوائيات وأيضا معامل الـ Pilot reuse factor وستتم الدراسة على عدة مخططات تجميع.

سيتم في البداية حساب إحصائيات القناة لحالة تشغيل واحدة حيث سيتم إنشاء مصفوفات إرتباط مكاني لجميع الـ UEs مع الـ BSs في الخلايا وحساب متوسط الكسب الفعلي في القناة عبر العلاقة الموضحة أدناه :

$$GON = G_S - P_N \quad (5 - 4)$$

حيث أن :

$P_N$  - قدرة الضوضاء

$G_S$  - التكبير الحاصل للإشارة

حيث أن قدرة الضوضاء يتم حسابها وفق العلاقة الآتية :

$$P_N = -174 + 10\text{Log}_{10}(B) + N_F \quad (6 - 4)$$

بعد ذلك يتم حساب تقديرات القناة بإستخدام مصفوفات إرتباط الخطأ وحساب طول تسلسل عينات القناة المرشدة Pilot Channal.

بعد الإنتهاء من العمليات السابقة يتم إحتساب مجموع الـ SE لكل UE في الخلية لكل مخطط تجميع وفق القيم الموضحة في الجدول (4 - 3).

جدول (4 - 3) : قيم المعاملات المستخدمة في دراسة Sum SE for UL

Parameter	value
Number of BSs	16
M	10 - 100
K	10
Pilot reuse factor	1 - 2 - 4
Setups	100
Realizations	100
Bandwidth	20 MHz
Noise Figure	7 <sub>dB</sub>
$\tau c$	200
ASD	10
Pathloss exponent	3.76
Standard Deviation of shadow fading	10
Length of square area	1000m
Average channel gain	-35.3
Minimum distance between BSs and UEs	35m
Antenna spacing	0.5 (Half wavelength)
Accuracy	2
Total power transmit of uplink per UE	100mW

#### - متوسط الكفاءة الطيفية وعدد المستخدمين

سيتم دراسة متوسط الكفاءة الطيفية كدالة لعدد المستخدمين UEs لكل خلية للمخططين الـ MR ومخطط الـ M-MMSE حيث تم إعتداد القيمتين 10 و 100 لعدد الهوائيات ونسبة الإشارة إلى الضوضاء بالقيمة 0<sub>dB</sub> ومقدار التداخل بين الخلايا يساوي -10dB .

سيتم توليد قنوات الحالتين الخاصة بالإنتشار والتي هي الـ LoS والـ NLoS حيث تم إعتبار تشتت رايلي الغير المرتبط كنموذج للقناة وتم وضع قيم عشوائية لزوايا الـ UEs في الحدود من الصفر وحتى الـ 360°.

بعد ذلك تم حساب الـ SE للمخططين MR وM-MMSE في حالة الـ LoS بإستخدام المعادلة :

$$SE_{LOS} = \sum_{K=1}^K \text{Log}_2 \left( 1 + \frac{M}{\sum_{i=1}^K g(\omega_{0K}, \omega_{0i}) + \beta \sum_{i=1}^K g(\omega_{0K}, \omega_{1i}) + \frac{1}{SNR_0}} \right) \quad (7-4)$$

وحساب الـ NLoS وفق المعادلة الخاصة به للمخططين حيث ستتضمن عملية الحساب متجهات المخطط وقدرة الإشارة وقدرة التداخل لكل الـ UEs والكسب الفعلي للقناة في الخلية. سيتم بعد ذلك تمثيل القيم بيانيا للتوصل للإستنتاجات بخصوص الدراسة لتوضيح العلاقة ما بين متوسط الكفاءة الطيفية وعدد المستخدمين في الخلية.

**جدول (4 - 4) :** المعاملات المستخدمة في دراسة العلاقة بين الـ SE والـ UE

Parameter	Value
SNR <sub>dB</sub>	0 <sub>dB</sub>
K	1-20
M	10,100
Realizations	10000
β <sub>dB</sub>	-10 <sub>dB</sub>
Antenna spacing	0.5

## 4.4 كفاءة الطاقة

في هذا القسم سيتم دراسة ما يُعرف بـ CP بمخططات التجميع المختلفة وأيضاً كفاءة الطاقة EE والعلاقات التي تربطها بالـ throughput وعدد الهوائيات وعدد المستخدمين.

### • Circuit Power

سيتم مقارنة مجموع الـ CP في مخططات التجميع والترميز المختلفة عند عدد هوائيات محددة في الـ BS وبالنسبة لعدد المستخدمين في كل خلية .

سيتم تغيير كلا من قيم الـ M والـ K وتحديدتها في كل صورة بإعتبار أن معامل الـ f يساوي الواحد وأيضاً بإعتبار أن كل قناة مرشدة لديها سلسلة من العينات وسنرمز لها بـ  $\tau_p = K$  وعدد العينات لكل فترة تستخدم للبيانات  $\tau_c - \tau_p = 190 - K$  حيث أن عدد العينات للـ UL تمثل بالمعادلة :

$$\tau_u = \frac{1}{3}(\tau_c - \tau_p) \quad (8 - 4)$$

وعدد العينات للـ DL تمثل بالمعادلة :

$$\tau_d = \frac{2}{3}(\tau_c - \tau_p) \quad (9 - 4)$$

تم إعتماد قيمة القدرة المرسله بـ 20 dbm للوصلة العليا والسفلى الخاصة بالمستخدم حيث أن الإنتثار المحلي الغاوسي والممثل كإنحراف معياري زاوي أعتمد كنموذج للقناة.

ولحساب مجموع الـ CP لكل مخطط تجميع يتم أولاً حساب القدرة الخاصة بالترميز وفك الترميز والخاصة أيضاً بـ Backhaul traffic وذلك وفق العلاقات الآتية :

$$CP_{CD} = (P_{COD} + P_{DEC}) * B * SumSE_{CS} \quad (10 - 4)$$

$$CP_{BH} = P_{BH} * B * SumSE_{CS} \quad (11 - 4)$$

حيث أن الـ  $P_{COD}$  هي القدرة الخاصة بالترميز والـ  $P_{DEC}$  بـ فك الترميز والـ  $B$  تمثل عرض النطاق والـ  $SumSE_{cs}$  مجموع الكفاءة الطيفية لكل مخطط تجميع أما الـ  $P_{BH}$  فتمثل قيمة القدرة الخاصة بـ Backhaul traffic.

بعد ذلك يتم احتساب الـ  $CP$  الخاصة بسلاسل الإرسال والإستقبال وفق العلاقة :

$$CP_{TC} = M * P_A + P_{BS} + K * P_{UL} \quad (12 - 4)$$

حيث أن الـ  $P_A$  قدرة الهوائيات والـ  $P_{BS}$  قدرة المحطة القاعدية أما الـ  $P_{UL}$  فتمثل قدرة الوصلة العليا.

بعد ذلك يتم احتساب الـ  $CP$  لتقديرات القناة والتي يعبر عنها بالعلاقة :

$$CP_{CE} = \frac{3 * K * B}{(\tau c * L)(M * \tau p + M^2)} \quad (13 - 4)$$

يأتي بعد ذلك حساب كلاً من الـ  $CP$  لـ  $UL$  والـ  $DL$  وذلك وفق العلاقة :

$$CP_{UL-DL} = \frac{(\tau c - \tau p) * 3 * B}{(\tau c * L) + M * K} \quad (14 - 4)$$

يأتي بعد ذلك حساب الـ  $CP$  لمتجهات الترميز وفق العلاقة التالية:

$$CP_{PV} = \frac{4 * M * K * B}{(\tau c * L)} \quad (15 - 4)$$

نأتي بعد ذلك لحساب كلاً من الـ  $CP$  لمتجهات التجميع لكل مخطط حيث أن لكل مخطط معادلة

تمثل الـ  $CP$  الخاصة فيه فمخطط  $MR$  يتم تمثيل الـ  $CP$  عبر العلاقة التالية :

$$CP_{MR} = \frac{7 * B * K}{(\tau c * L)} \quad (16 - 4)$$

أما بالنسبة لمخطط الـ  $RZF$  فيمثل بالعلاقة :

$$CP_{RZF} = 3B \frac{\left(\frac{3 * M * K}{2}\right) + \left(\frac{3 * K^2 * M}{2}\right) + \left(\frac{K^3 - K}{3}\right)}{\tau c * L} \quad (17 - 4)$$

أما مخطط الـ M-MMSE يمثل بالمعادلة :

$$CP_{M-MMSE} = 3B \frac{L(3 * M^2 + M) \left(\frac{K}{2}\right) + \left(\frac{M^3}{3}\right)}{\tau c * L} \quad (18 - 4)$$

$$\frac{+2M + M * \tau p(\tau p - K)}{\tau c * L}$$

أما بالنسبة للمخططين S-MMSE و ZF يمثلان بالعلاقتين :

$$CP_{S-MMSE} = 3B \frac{\frac{3 * M^2 * K}{2} + \frac{M * K}{2} + \frac{M^3 - M}{3} + \frac{7}{3}M}{\tau c * L} \quad (19 - 4)$$

$$CP_{ZF} = \frac{\frac{3 * K^2 * M}{2} + \frac{M * K}{2} + \frac{K^3 - K}{3} + \frac{7}{3}K}{\tau c * L} \quad (20 - 4)$$

بعد الإنتهاء من حساب الـ CP لكل جزء يتم حساب المجموع وذلك بعلمي الجمع المباشر للقيم كما هو موضح أدناه :

$$CP_T = CP_{FIX} + CP_{TC} + CP_{UL-DL} + CP_{PV} + \quad (21 - 4)$$

$$CP_{CE} + CP_{CD-CS} + CP_{BH-CS} + CP_{CS}$$

سيتم الدراسة على مجموعتين من القيم ممثلتين في الجدول التالي:

**جدول (4 - 5) :** مجموعتين من القيم لتمثيل نموذجين لدراسة ال-CP

Parameter	Set 1	Set 2
Fixed Power	10 W	5 W
BS Power	0.2 W	0.1 W
Antennas Power	0.4 W	0.2 W
UE Power	0.2 W	0.1 W
Encoding Data Power	0.1 W/(Gbit/s)	0.01 W/(Gbit/s)
Decoding Data Power	0.8 W/(Gbit/s)	0.08 W/(Gbit/s)
BS computational efficiency	75 Gflops/W	750 Gflops/W
Power for backhaul traffic	0.25 W/(Gbit/s)	0.025 W/(Gbit/s)

بالإضافة لبعض المعاملات الأخرى الموضحة في الجدول (4 - 6).

**جدول (4 - 6) :** معاملات ثابتة في الدراسة لكلاً من الحالتين لقيم نموذج ال-CP

Parameter	Value
K	10
L	16
B	20MHZ
$\tau_c$	200
$\tau_p$	K
UL fraction	1/3
DL fraction	2/3

#### • كفاءة الطاقة بتأثير ال-Throughput

ستتم دراسة كفاءة الطاقة وتأثيرها بمعدل النقل للبيانات لكل خلية بمخططات التجميع حيث سيتم دراسة إمكانية زيادة كلا من ال-EE ومعدل النقل أن القيم الخاصة بمعدل النقل ستكون متأثرة بقيم ال-K والتي ستمثل بالقيمة 10 وال-M ستكون قيمها محصورة ما بين ال-10 وحتى ال-200.

ستتم الدراسة على مجموعات القيم الممثلة في الجدول (4 - 5) وتحديد المخطط الأكثر توفيراً لكفاءة الطاقة بمعدل النقل المناسب بالإضافة لبعض المعاملات الثابتة في كلاً من حالي الدراسة ممثلة بالجدول التالي :

**جدول (4 - 7) :** المعاملات المستخدمة في دراسة كفاءة الطاقة بتأثير ال Throughput.

Parameter	Value
ULF	1/3
DLF	2/3
L	16
M	10-200
K	10-20
Setups	5
Transmit Power	0.1W
Pilot reuse factor	1
PA efficiency of UE	0.4
PA efficiency of BS	0.5
$\tau c$	200
$\tau p$	F * K
Bandwidth	20MHz

ووفق القيم الموضحة في الجدول يتم حساب ال ETP الكلية والمقصود بها القدرة المرسله الفعالة وتمثل بالعلاقة :

$$ETP = \frac{KP_T \left( \frac{\tau p}{PA_{UE}} + (\tau c - \tau p) \frac{ULF}{PA_{UE}} + \frac{DLF}{PA_{BS}} \right)}{\tau c} \quad (22 - 4)$$

بعد ذلك يتم حساب مجموع ال CP للمخططات كما في الحالات الموضحة بالعلاقات السابقة ووفقها يتم حساب كفاءة الطاقة لكل مخطط وفق العلاقة التي تربط بين ال CP وال ETP والممثلة بـ :

$$EE_{CS} = \frac{B * SumSE_{CS}}{ETP + CP_{CS}} \quad (23 - 4)$$

حيث يتم تعويض قيم كلا من الـ  $\text{SumSE}_{\text{CS}}$  والـ  $\text{CP}_{\text{CS}}$  بالعلاقات والقيم الخاصة بكل مخطط وحساب كفاءة الطاقة لكل مخطط على حدا.

• كفاءة الطاقة بتأثير قيم الـ  $M$  والـ  $K$

في هذا القسم سيتم توضيح ما يمكن تحقيقه من قيم الـ  $EE$  مع مخطط الـ  $M$ - $MMSE$  والـ  $RZF$  والـ  $MR$  لمجموعة قيم مختلفة لكلا من الـ  $K$  والـ  $M$  حيث أن عدد المستخدمين تم تمثيلها بالقيم من 10 إلى 100 بمقدار زيادة يساوي الـ 10 أما عدد الهوائيات فمن 20 وحتى الـ 200 بنفس مقدار الزيادة.

ستتم الدراسة وفق القيم للحالتين الممثلة بالجدول (4 - 5) وستكون نفس الدراسة السابقة لكن سيتم التمثيل للنتائج الخاصة بكل مخطط حسب عدد الهوائيات  $M$  وعدد المستخدمين  $UE$ .

الفصل الخامس

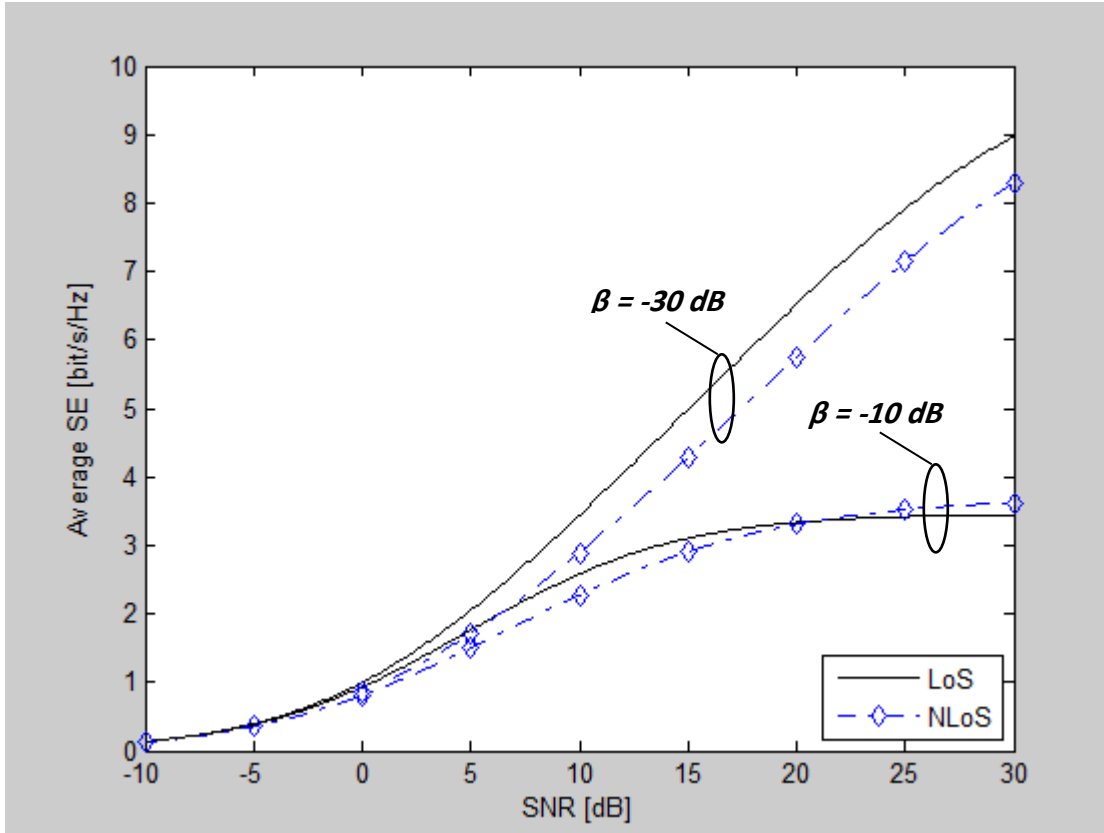
نتائج الدراسة

## 1.5 المقدمة

سيتم في هذا الفصل توضيح النتائج والعلاقات الخاصة بالمحاكاة لجميع المعادلات الرياضية الموجودة في الفصل الرابع وعرضها في مخططات بيانية كخرج لبرنامج الماتلاب وتبيين جميع النقاط حولها.

## 2.5 دراسة الكفاءة الطيفية

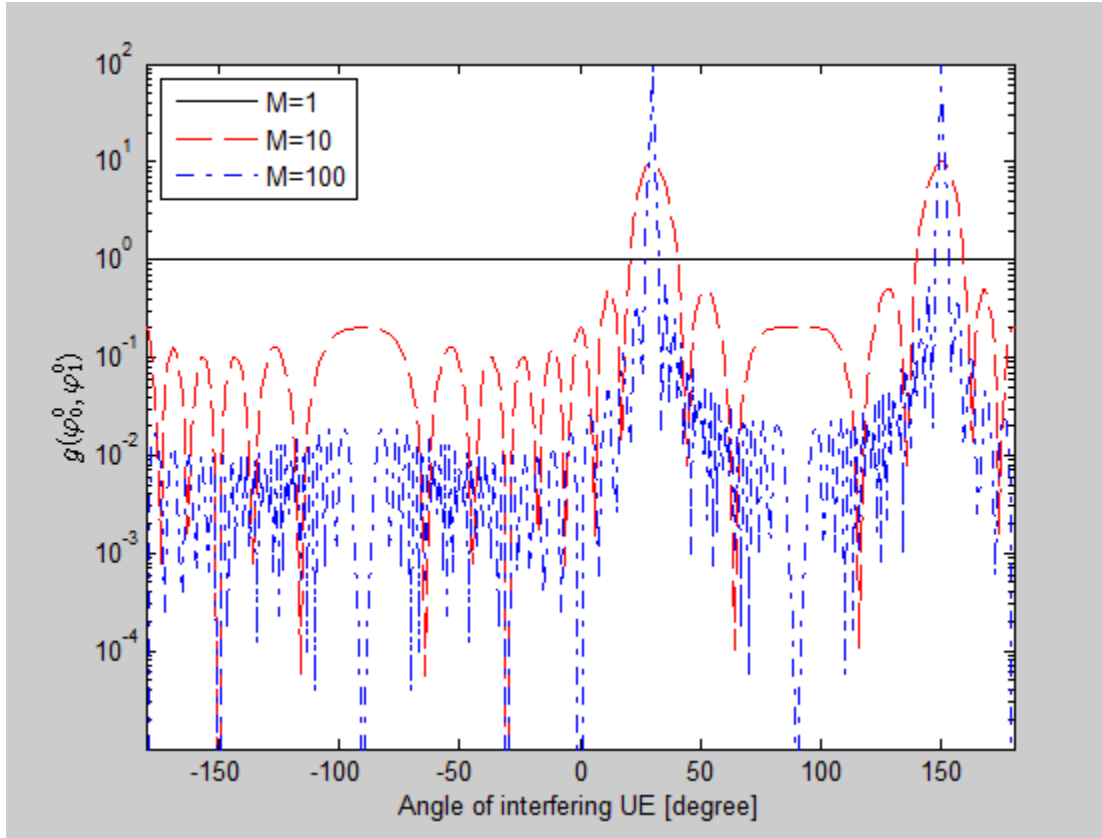
- الكفاءة الطيفية والـ SNR



الشكل (5 - 1) : تمثيل العلاقة ما بين الـ SNR ومتوسط الـ SE

يتضح لنا في كلاً من الحالتين الـ LoS والـ NLoS أن العلاقة بين الـ SNR ومتوسط الـ SE طردية إلا أن في الحالة NLoS قيمة الـ SE منخفضة قليلاً نسبة إلى الـ LoS وبالتالي نستنتج أن الـ SE عبارة عن دالة متزايدة للـ SNR حيث كلما زادت قيمتها زاد متوسط الكفاءة.

• دراسة مستوى التداخل



الشكل (5 - 2) : قيم دالة الـ gfunction عند زوايا سمت مختلفة للمستخدم

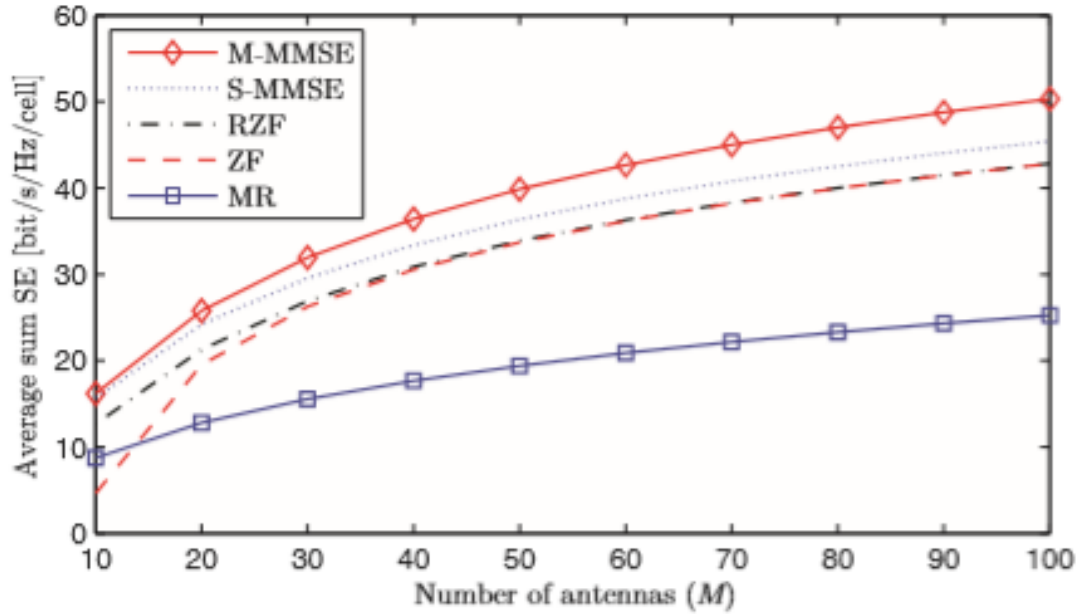
نلاحظ أن الـ gfunction تساوي الواحد في حالة الهوائي الواحد لكن عندما يكون للـ BS هوائيات متعددة فإن قيم الـ gfunction تعتمد على زاوية الإتجاه للـ UEs.

نجد أن قيم مستوى التداخل الأعلى عندما تكون الزاوية تساوي الـ  $30^\circ$  وعند الـ  $150^\circ$  والتي تمثل الزاوية العكسية للزاوية  $30^\circ$  وبالتالي فإن الدالة عند هذه الزوايا تساوي الـ  $M$  وذلك لأن الإشارات المتداخلة مجتمعة بشكل متماسك في المخطط MR تماما مثل الإشارة المطلوبة.

لكن نلاحظ تناقص المستوى بشكل سريع بزيادة الـ  $M$  وبالتالي يتذبذب مستوى التداخل مع زوايا الإتجاه للـ UE ويكون أضعف بما يقارب  $1/M$  وبالتالي فإن الهوائيات المتعددة في الـ BS ساعدت على قمع التداخل طالما زوايا المستخدمين مختلفة بما فيه الكفاية.

### • متوسط مجموع الكفاءة الطيفية للوصلة العليا

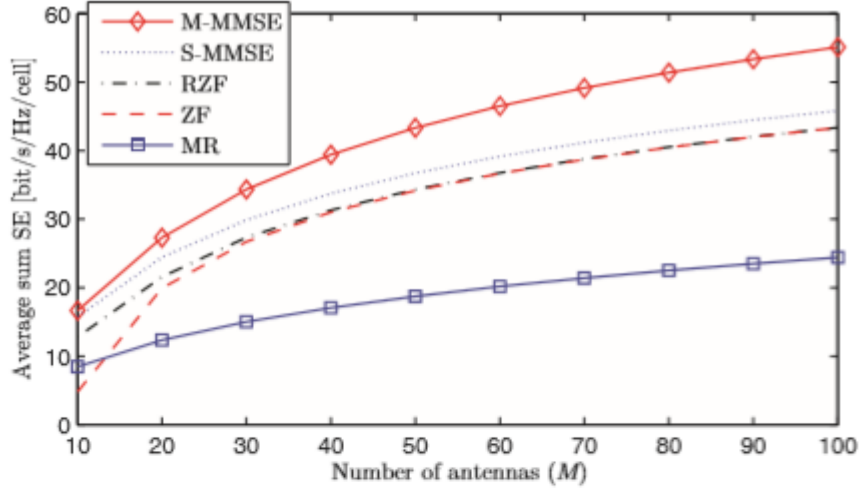
○ متوسط مجموع الكفاءة وعدد الهوائيات



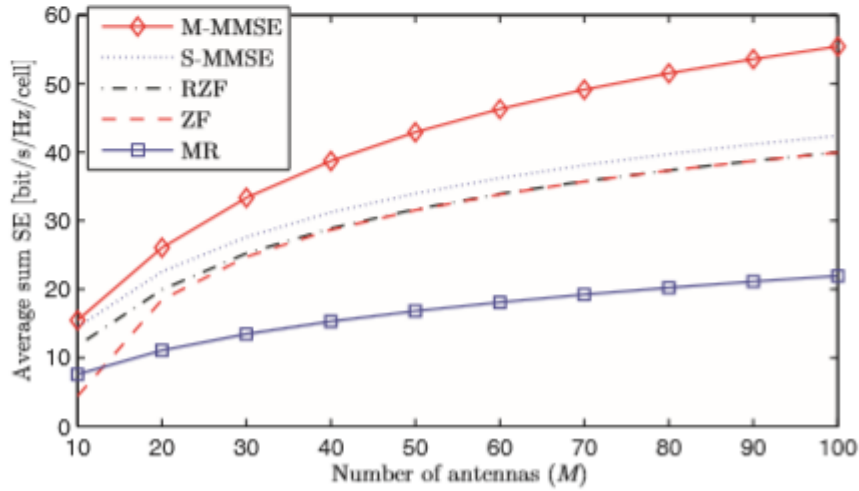
الشكل (5 - 3) : متوسط مجموع الكفاءة الطيفية بدلالة عدد الهوائيات بمعامل  $F=1$

يوضح الشكل السابق متوسط مجموع الكفاءة الطيفية للوصلة العليا كدالة لعدد الهوائيات في المحطة القاعدية بإعتبار أن معامل الـ (Pilot reuse factor) يساوي الواحد فنلاحظ أن الـ M-MMSE يعطي أعلى نسبة كفاءة طيفية بينما يعطي الـ S-MMSE نسبة أعلى بمقدار 10%

55% من ال ZF و RZF اللذان يعطيان نفس ال SE في النطاق  $M \geq 20$  لكن يتدهور ال SE في النطاق  $M < 20$  وذلك لأن ال BS لا تتمتع بحرية لإلغاء التداخل دون إلغاء جزء من الإشارة المطلوبة لذلك يجب تجنب ال ZF للحصول على الكفاءة في النطاق الكلي.



(a) Pilot reuse factor  $f = 2$ .



(b) Pilot reuse factor  $f = 4$ .

الشكل (5 - 4) : متوسط مجموع الكفاءة الطيفية بدلالة عدد الهوائيات بمعامل

$$F=4 \text{ و } F=2$$

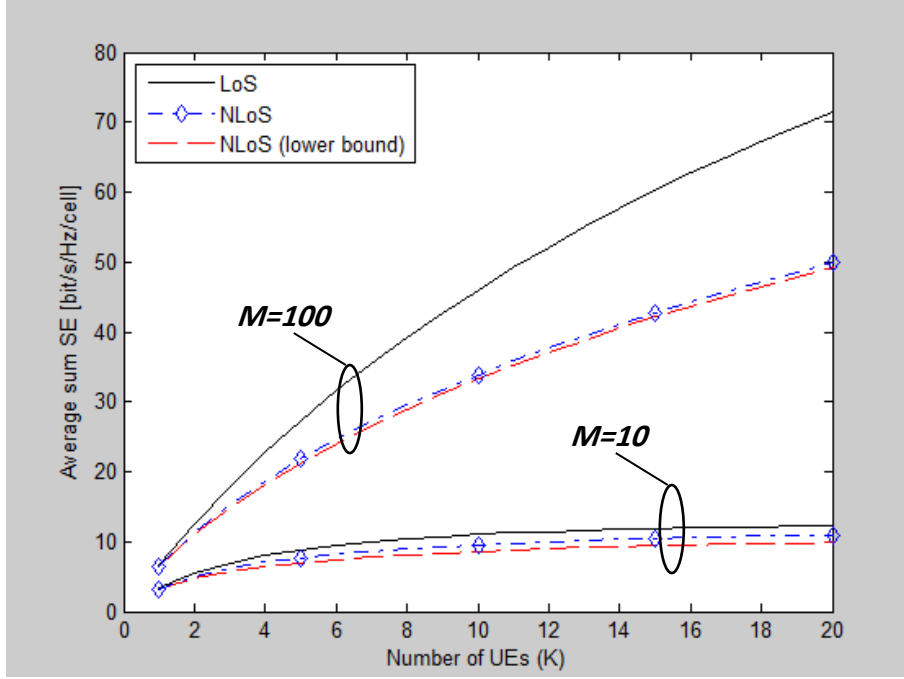
يوضح الشكلين السابقين متوسط الكفاءة الطيفية كدالة لعدد الهوائيات لكن لمعامل  $F$  مختلف حيث الشكل الأول عندما يكون  $F=2$  والثاني عندما يكون  $F=4$  فنلاحظ أن مخطط الـ  $M$ - $MMSE$  لا تتغير عنده الكفاءة بفارق كبير بتغير معامل الـ  $F$  وكذلك الـ  $MR$  أما بالنسبة لكلا من الـ  $ZF$  و الـ  $RZF$  والـ  $S$ - $MMSE$  فنلاحظ فيهم إنخفاض معدل الكفاءة عند زيادة معامل إعادة استخدام الإشارة الدليلية وبالتالي فإن أكثر المخططات إستقرارية هو الـ  $M$ - $MMSE$  والـ  $MR$  إلا أن الأول يوفر كفاءة عالية.

يوضح الجدول الآتي القيم الناتجة عن الدراسات السابقة:

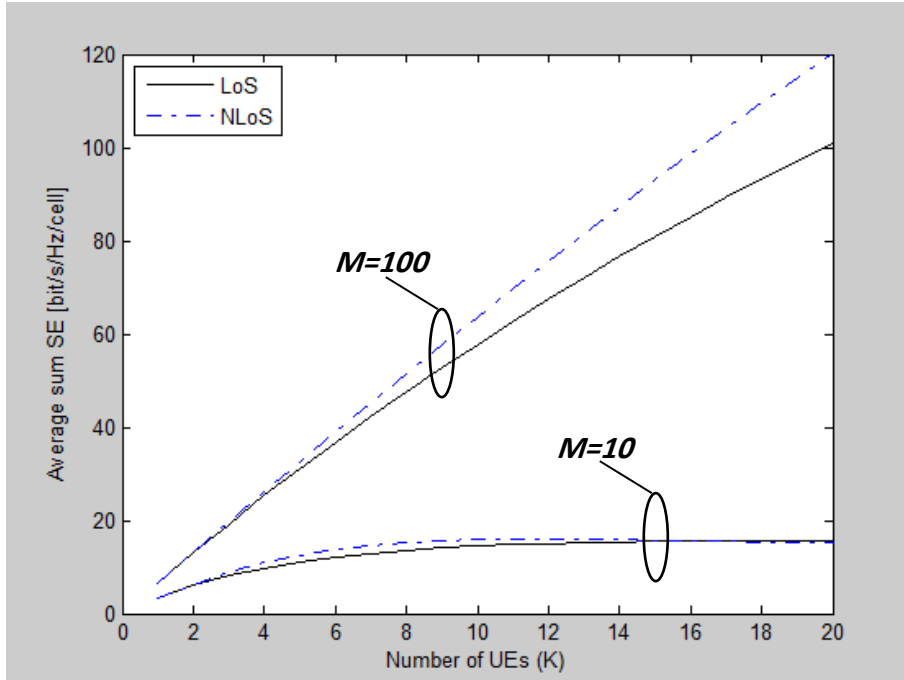
**جدول (5 - 1) :** قيم متوسط مجموع الكفاءة الطيفية لمخططات التجميع

Schemes	F=1	F=2	F=3
<b>M-MMSE</b>	50.32	55.10	55.41
<b>S-MMSE</b>	45.39	45.83	42.41
<b>RZF</b>	42.83	43.37	39.99
<b>ZF</b>	42.80	43.34	39.97
<b>MR</b>	25.25	24.41	21.95

○ متوسط مجموع الكفاءة وعدد المستخدمين



a) MR Combining



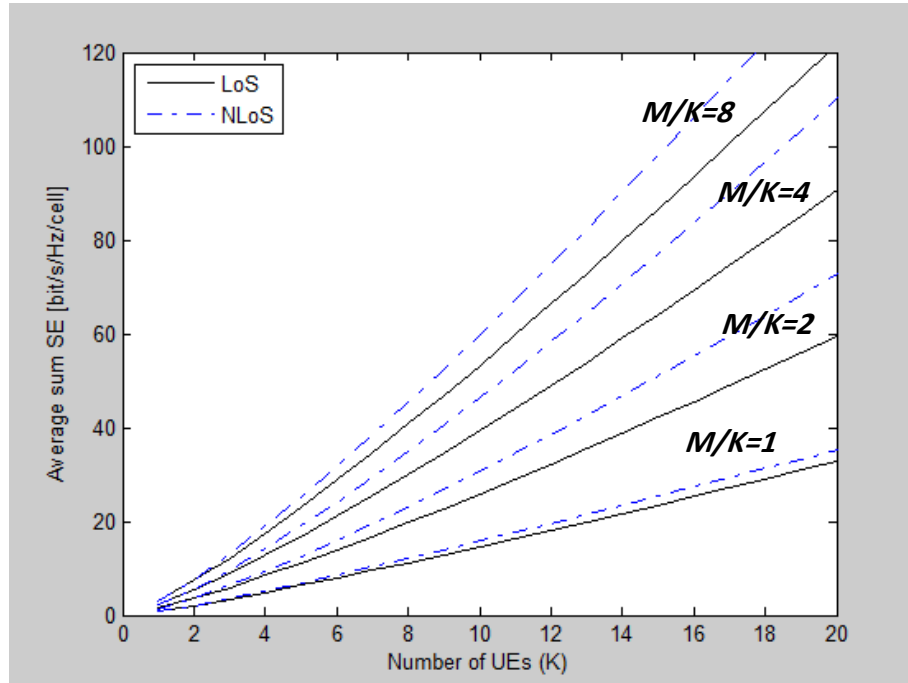
b) M-MMSE Combining

الشكل (5 - 5) : تمثيل بياني للعلاقة بين متوسط مجموع الكفاءة الطيفية

وعدد المستخدمين للمخططين MR و M-MMSE.

يوضح الشكل بأن الكفاءة الطيفية تزداد بزيادة عدد المستخدمين في الخلية لكن نلاحظ أن الزيادة عند عدد هوائيات يساوي 10 بطيء جدا مقارنة عند عدد هوائيات يساوي 100 حيث أن نسبة الزيادة في الـ SE كبيرة جدا بزيادة عدد المستخدمين وذلك لأن إستجابة القناة لكل UE في هذه الحالة تُمثل بـ 100 بُعد مكاني ولذلك يزداد مجموع الـ SE بشكل خطي مع عدد الـ UEs.

يكون مجموع الـ SE أقل بكثير مع الـ NLoS مقارنة بالـ LoS في المخطط الـ MR بينما نحصل على نتيجة معاكسة عند إستخدام مخطط الـ M-MMSE والسبب في ذلك هو أن كل UE يتأثر بالتداخل مع العديد من الـ UEs في حالة الـ NLoS بينما يتسبب عدد قليل فقط من الـ UE بزوايا متشابهة في حدوث تداخل في حالة الـ LoS ففي الـ MR يكون الـ SE أقل في حالة الـ NLoS بسبب قدرة التداخل أما في الـ M-MMSE فإن التداخل يتم إلغائه كما في الـ LoS وذلك بسبب وجود عدد قليل من الـ UEs ذات القنوات الموازية تقريبا لقناة الـ UEs المطلوبين وبالتالي فإن الـ SE أعلى في الـ NLoS عند إستخدام الـ M-MMSE.

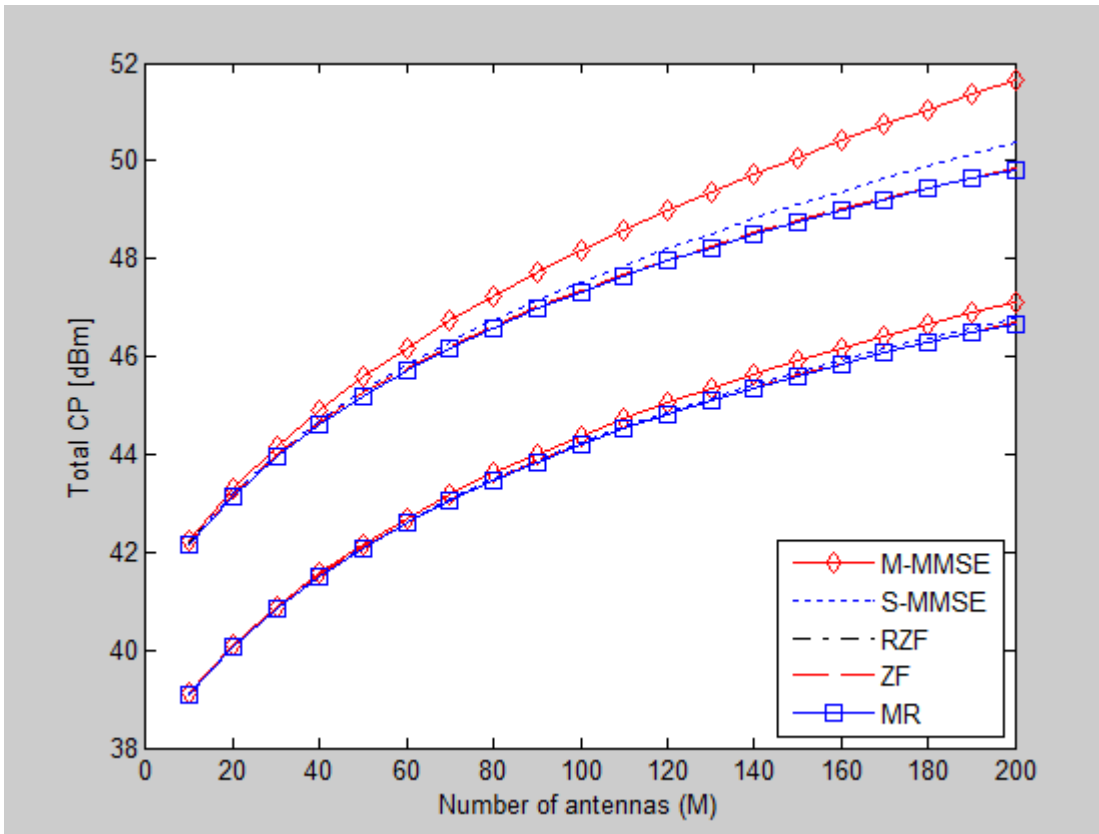


الشكل (5 - 6) : تمثيل بياني للعلاقة بين متوسط مجموع الكفاءة الطيفية وعدد المستخدمين للمخطط M-MMSE وفق نسب مختلفة من M/K.

يوضح الشكل حساب علاقة متوسط الـ SE في مخطط الـ M-MMSE مع عدد المستخدمين حيث تكون الزيادة بعدد الهوائيات بنسب  $M/K$  وكما نلاحظ فإن مجموع الـ SE يزداد بزيادة نسبة الـ  $M/K$ .

### 3.5 كفاءة الطاقة

#### • The total of circuit power



الشكل (5 - 7) : إجمالي الـ CP بإعتبار الـ  $K=10$  والـ  $M$  متغير.

يوضح الشكل إجمالي الـ CP لكل خلية بالنسبة للـ UL والـ DL في مخططات التجميع المختلفة حيث تم إعتبار الـ  $K=10$  بينما الـ  $M$  تتغير من 10 وحتى الـ 200 ، نلاحظ أن الـ CP يزداد بزيادة عدد الهوائيات ( $M$ ) لجميع المخططات ونجد أن أعلى قيمة في المخطط M-MMSE يليه المخطط S-MMSE حيث يقوم بتقليل الـ CP بمقدار 0.5% وحتى 25% وذلك بسبب عدم

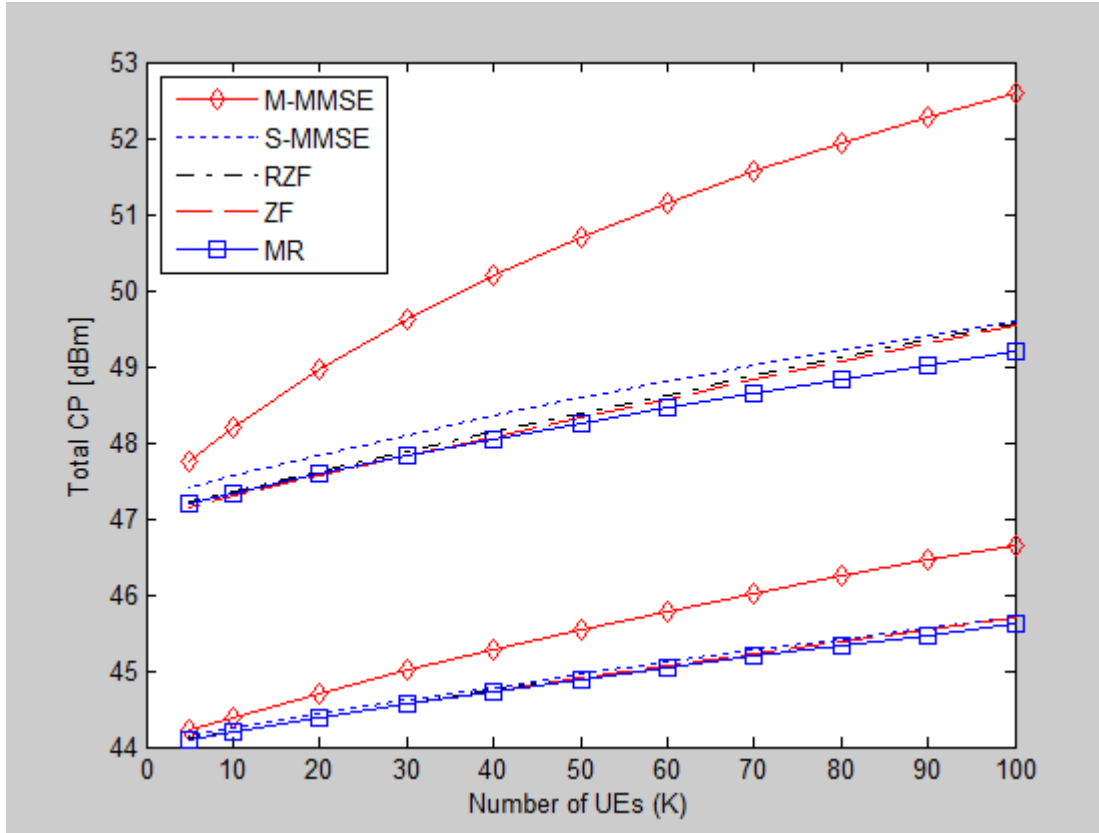
حساب تقديرات القنوات بين الخلايا مع ذلك فإن الـ M-MMSE يوفر SE أعلى من S-MMSE يمكننا التحديد كم الناحية الكمية أن الـ CP المطلوب بواسطة M-MMSE لـ M=100 و K=10 هو 48.16 dBm بينما S-MMSE يقدر بـ 47.5 dBm .

ترجع الزيادة في الـ CP للـ M-MMSE لتعويضها بنسبة SE أعلى تقدر بـ 10% من S-MMSE في كلا من الـ (UL) والـ (DL) .

أما بالنسبة لمجموعة القيم الأخرى يكون الـ CP في الـ M-MMSE بنسبة أعلى بينما في كلا من المخططين ZF و RZF نسبة الـ CP أقل أما مخطط الـ MR فيتميز بأنه الأقل من بين جميع المخططات.

جدول (5 - 2) : القيم الناتجة للـ CP الخاصة بمخططات التجميع

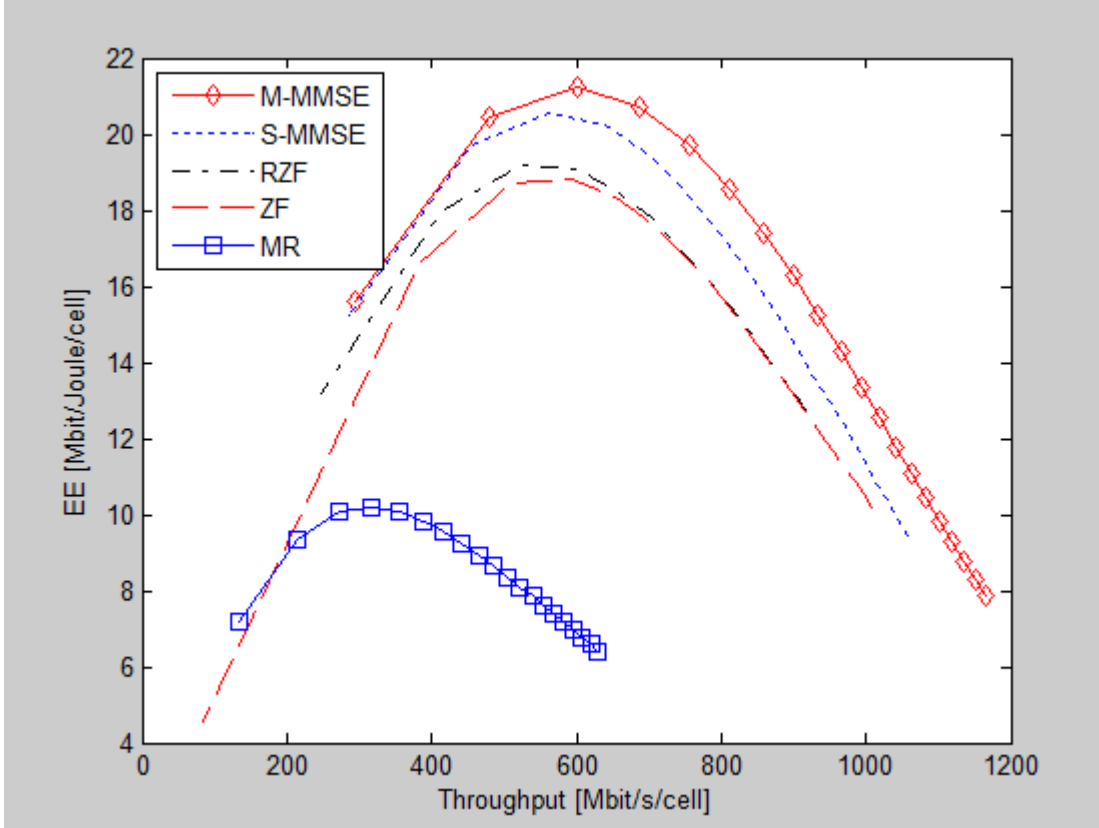
Scheme	Value set 1	Value set 2
M-MMSE	65.48 W	27.42 W
S-MMSE	56.35 W	26.51 W
RZF	54.43 W	26.32 W
ZF	54.43 W	26.32 W
MR	53.96 W	26.27 W



الشكل (5 - 8) : إجمالي ال CP بإعتبار ال  $M=10$  وال  $K$  متغير.

أما بالنسبة لهذا الشكل فقد قمنا بإعتبار كلا من ال  $M$  بقيمة ثابتة تساوي ال 10 وال  $K$  متغير من 10 وحتى ال 100 وبالتالي نلاحظ إزدياد ال CP بزيادة عدد المستخدمين وأن المخطط M-MMSE هو الأعلى والمخطط MR هو الأدنى.

• كفاءة الطاقة بتأثير الـ Throughput



الشكل (5 - 9) : كفاءة الطاقة ومعدل النقل بإعتبار الـ  $K=10$  والـ  $M$  متغير لمجموعة القيم 1.

يوضح الشكل كفاءة الطاقة بالنسبة لمعدل النقل لكل خلية لكل مخططات التجميع حيث تعتمد قيم معدل النقل على عدد الـ  $K$  والـ  $M$  يوفر الـ  $M$ -MMSE أعلى كفاءة لأي قيمة لمعدل النقل يليه مخطط الـ  $MR$  أما الـ  $S$ -MMSE فلديه أدنى أداء وبالتالي يتضح لنا أن مخطط  $M$ -MMSE يحقق الإنجاز في كلا من الـ  $SE$  والـ  $EE$  رغم التعقيد الحسابي لمعالجته وكما نلاحظ فإن الزيادات في معدل النقل تؤدي إلى خسارة كبيرة في الـ  $EE$ .

يتضح لنا من الشكل أن أقصى قيمة للـ EE مع الـ M-MMSE تساوي 21.26 Mb/J ويتم تحقيقه عند معدل نقل يقدر بـ 600Mbit/s/cell وهو ما يتوافق مع إنتاجية المنطقة التي تساوي 9.6 Gbit/s/km<sup>2</sup>.

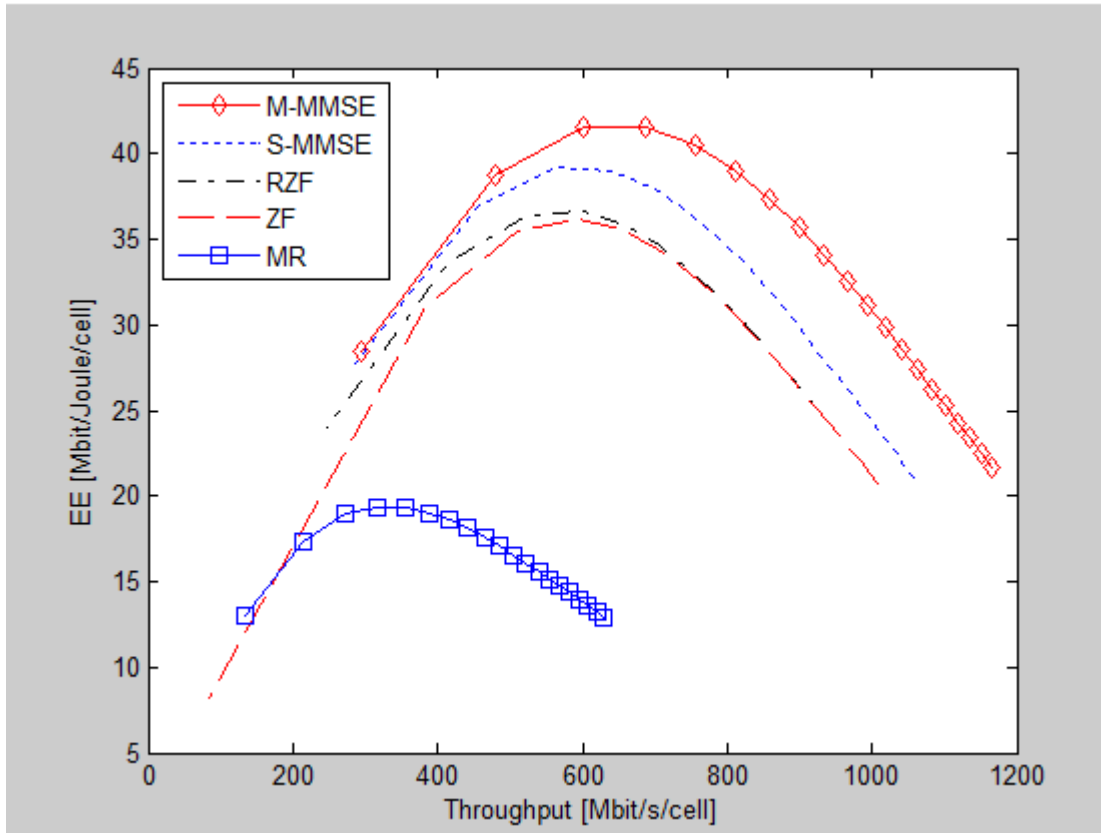
أما بالنسبة لمخطط S-MMSE يتم الحصول على الحد الأقصى للـ EE عند M=30 لكن بنسبة أقل من M-MMSE بـ 3.2% وبمعدل نقل أقل بـ 6% بالمقارنة مع الـ M-MMSE.

بالنسبة للمخططين ZF و RZF يحققان أداءً مشابه حيث أن أقصى EE يحققانه يساوي 19Mb/J عند M=30 بإنتاجية تقدر بـ 8.83Gbit/s/km<sup>2</sup>.

أما مخطط MR فأقصى EE يحققه يساوي 10.10Mb/J بإنتاجية تقدر بـ 5.07 Gbit/s/km<sup>2</sup>.

**جدول (3 - 5) : القيم الناتجة للـ EE الخاصة بمخططات التجميع لمجموعة القيم 1**

Scheme	EE set 1	Area throughput
M-MMSE	20.73 Mb/J	11 Gbit/s/km <sup>2</sup>
RZF	19.07 Mb/J	9.6 Gbit/s/km <sup>2</sup>
MR	10.18 Mb/J	5.07 Gbit/s/km <sup>2</sup>



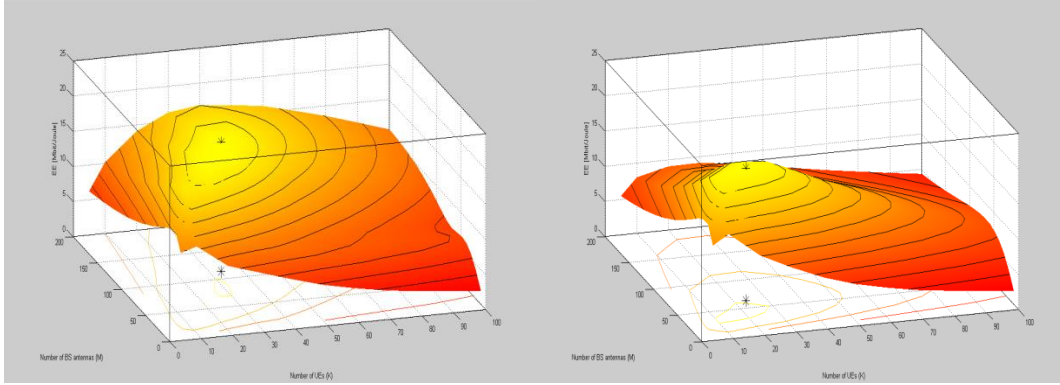
الشكل (5 - 10) : كفاءة الطاقة ومعدل النقل بإعتبار الـ  $K=10$  والـ  $M$  متغير لمجموعة القيم 2.

في هذا الشكل نلاحظ تضاعف الـ EE لجميع المخططات تقريبا ولكن بالإتجاهات نفسها.

جدول (5 - 4) : القيم الناتجة للـ EE الخاصة بمخططات التجميع لمجموعة القيم 2

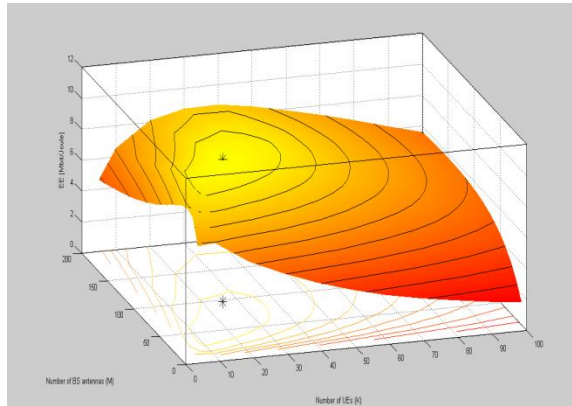
Scheme	EE set 2	Area throughput
M-MMSE	41.53 Mb/J	11 Gbit/s/km <sup>2</sup>
RZF	36.63 Mb/J	9.6 Gbit/s/km <sup>2</sup>
MR	19.38 Mb/J	5.07 Gbit/s/km <sup>2</sup>

• كفاءة الطاقة بتأثير قيم الـ  $M$  والـ  $K$



a) RZF

b) M-MMSE



c) MR

الشكل (5 - 11) : كفاءة الطاقة بدلالة عدد الهوائيات وعدد المستخدمين إعتياداً على قيم (Set 1)

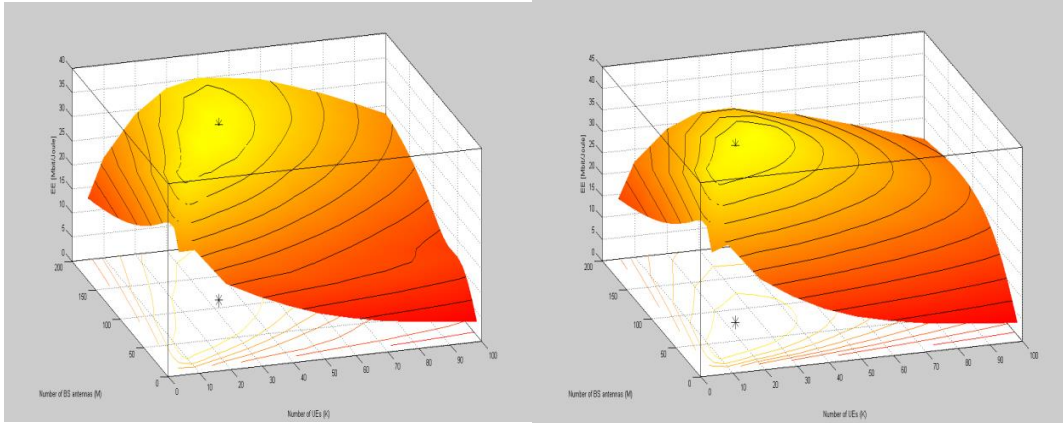
يوضح الشكل ما يمكن تحقيقه من قيم كفاءة الطاقة (EE) مع كلا من المخططات الثلاثة عند قيم مختلفة من الـ  $M$  والـ  $K$  فنلاحظ أن أفضل كفاءة هي لمخطط M-MMSE عند  $M, K=40, 20$  أما بالنسبة لمخطط RZF فإن سطح الـ (EE) أكثر سلاسة من الـ M-MMSE حيث أن هناك مجموعة من قيم الـ  $M$  والـ  $K$  توفر كفاءة مثلى تقريباً.

يوضح الجدول التالي القيم المحققة خلال الدراسة :

جدول (5 - 5) : القيم الناتجة للـ EE الخاصة بمخططات التجميع لمجموعة القيم 1

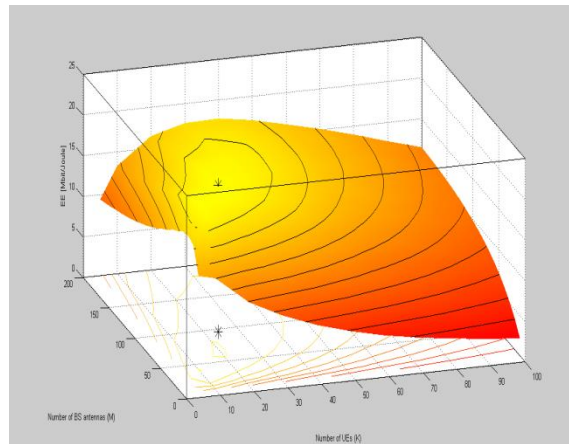
Schemes	( M , K )	Maximal EE	Area throughput
M-MMSE	( 40 , 20 )	20.73 Mbit/J	13.71 Gbit/s/km <sup>2</sup>
RZF	( 90 , 30 )	20.25 Mbit/J	20.97 Gbit/s/km <sup>2</sup>
MR	( 60 , 20 )	10.63 Mbit/J	7.64 Gbit/s/km <sup>2</sup>

أما بالنسبة لمجموعة القيم الثانية تم التوصل للنتائج الآتية :



a) RZF

b) M-MMSE



c) MR

الشكل (5 - 12) : كفاءة الطاقة بدلالة عدد الهوائيات وعدد المستخدمين إعتماًداً على قيم (Set 2)

جدول (5 - 6) : القيم الناتجة للـ EE الخاصة بمخططات التجميع لمجموعة القيم 2

Schemes	( M , K )	Maximal EE	Area throughput
M-MMSE	( 60 , 20 )	44.00 Mbit/J	17.33 Gbit/s/km <sup>2</sup>
RZF	( 90 , 30 )	39.33 Mbit/J	20.97 Gbit/s/km <sup>2</sup>
MR	( 70 , 20 )	20.14 Mbit/J	8.3 Gbit/s/km <sup>2</sup>

الفصل السادس

الإستنتاجات والمعوقات

والتوصيات

## 1.6 الاستنتاجات

- إمكانية زيادة الكفاءة الطيفية بزيادة نسبة الإشارة إلى الضوضاء عند نسب التداخل القليلة.
- الزيادة في عدد الهوائيات تحسن من مستوى التداخل الحاصل بين المستخدمين عند زوايا الإتجاه المختلفة لهم.
- إمكانية رفع الكفاءة الطيفية عند زيادة عدد الهوائيات لكن بنسب متفاوتة لكل مخططات التجميع.
- تأثير الكفاءة الطيفية بعدد المستخدمين حيث أن الزيادة لعددهم ترفع من مستوى الكفاءة وتكون الزيادة عالية عند زيادة عدد الهوائيات.
- إمكانية تحقيق كفاءة طاقة عالية عند معدلات إنتاجية محددة حيث أن الزيادة أو النقصان في الإنتاجية يؤدي لتدهور مستوى الكفاءة.

## 2.6 المعوقات

- عدم وجود نموذج عملي مطبق لإختبار الدراسة حيث أن كافة المعلومات هي عبارة عن نظريات علمية رياضية للموضوع.
- في حال الرغبة في تطبيق المشروع للشبكات اللاسلكية الحالية يتوجب تغيير البنية التحتية من حيث الأجهزة والبرمجيات.

### 3.6 التوصيات

- تصميم مصفوفة الهوائيات ودراسة الإشعاع لها بأحد برامج المحاكاة المخصصة لذلك مثل برنامج CST أو غيره.
- البحث في حلول للمشاكل العملية التي توجه المشروع مثل تدهور الإشارة الدالية والإنتشار الغير ملائم.

## المراجع

### - المراجع الإنجليزية :

- E. Björnson, J. Hoydis and L. Sanguinetti. (2017) Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency
- Abu Saada, M., Skaik, T. F., & Alhalabi, R. (2017). Design of Efficient Microstrip Linear Antenna Array for 5G Communications Systems.
- Al-Tarifi, M. A., Sharawi, M. S., & Shamim, A. (2018). Massive MIMO antenna system for 5G base stations with directive ports and switched beamsteering capabilities.
- Tareq H. Elhabbash. (2019) Design of MIMO Antenna for Future 5G Communication Systems. The Islamic University of Gaza.
- Muhammad Ali Qashah, Hashed Ahmed Al-hamdani, Ashraf Motee'ah khoshafa, Abdulqadr Saeed Al-sumee, Zeyad Ahmed Al-shehab. Massive MIMO for Fifth Generation Wireless Systems. IBB UNIVERSITY.
- Hien Quoc Ngo.(2015) Massive MIMO : Fundamentals and System Designs.

### - المراجع العربية :

- عبدالناصر نوفل. (2014) نظام متعدد المداخل والمخارج MIMO متكيف لقنوات الإتصالات المتغيرة الخفوت. المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.
- المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني. (2009) الهوائيات وإنتشار الموجات.

### - المواقع الإلكترونية :

- <http://www.researchgate.com>
- <http://www.masivemimobook.com/>

الملاحق

## Function Channel Estimates

```
function[Hhat_MMSE,C_MMSE,tau_p,R,H,Hhat_EW_MMSE,C_EW_MMSE,Hhat_LS,C_LS
]=functionChannelEstimates(R,channelGaindB,nbrOfRealizations,M,K,L,p,f)
%Generate uncorrelated Rayleigh fading channel realizations
H =
(randn(M,nbrOfRealizations,K,L,L)+1i*randn(M,nbrOfRealizations,K,L,L));

%Prepare a matrix to save the channel gains per UE
betas = zeros(K,L,L);

%Go through all channels and apply the channel gains to the spatial
%correlation matrices
for j = 1:L

    for l = 1:L

        for k = 1:K

            if channelGaindB(k,j,l)>-Inf

                %Extract channel gain in linear scale
                betas(k,j,l) = 10^(channelGaindB(k,j,l)/10);

                %Apply channel gain to correlation matrix
                R(:, :, k, j, l) = betas(k, j, l) * R(:, :, k, j, l);

                %Apply correlation to the uncorrelated channel realizations
                Rsqrt = sqrtm(R(:, :, k, j, l));
                H(:, :, k, j, l) = sqrt(0.5)*Rsqrt*H(:, :, k, j, l);

            else

                betas(k, j, l) = 0;
                R(:, :, k, j, l) = 0;
                H(:, :, k, j, l) = 0;

            end

        end

    end

end

%Length of pilot sequences
tau_p = f*K;
```

```

%Generate pilot pattern
if f == 1

    pilotPattern = ones(L,1);

elseif f == 2 %Only works in the running example with its 16 BSs

    pilotPattern = kron(ones(2,1),[1; 2; 1; 2; 2; 1; 2; 1]);

elseif f == 4 %Only works in the running example with its 16 BSs

    pilotPattern = kron(ones(2,1),[1; 2; 1; 2; 3; 4; 3; 4]);

elseif f == 16 %Only works in the running example with its 16 BSs

    pilotPattern = (1:L)';

end

%Store identity matrix of size M x M
eyeM = eye(M);

%Generate realizations of normalized noise
Np = sqrt(0.5)*(randn(M,nbrOfRealizations,K,L,f) +
li*randn(M,nbrOfRealizations,K,L,f));

%Prepare to store MMSE channel estimates
Hhat_MMSE = zeros(M,nbrOfRealizations,K,L,L);

%Prepare to store estimation error correlation matrices
C_MMSE = zeros(M,M,K,L,L);

%Prepare for EW-MMSE estimation
if nargout >= 5

    %Prepare to store EW-MMSE channel estimates
    Hhat_EW_MMSE = zeros(M,nbrOfRealizations,K,L,L);

    %Prepare to store estimation error correlation matrices
    C_EW_MMSE = zeros(M,M,K,L,L);

end

%Prepare for LS estimation
if nargout >= 7

    %Prepare to store EW-MMSE channel estimates
    Hhat_LS = zeros(M,nbrOfRealizations,K,L,L);

    %Prepare to store estimation error correlation matrices
    C_LS = zeros(M,M,K,L,L);

end

```

```

for j = 1:L

    %Go through all f pilot groups
    for g = 1:f

        %Extract the cells that belong to pilot group g
        groupMembers = find(g==pilotPattern)';

        %Compute processed pilot signal for all UEs that use these pilots
        yp = sqrt(p)*tau_p*sum(H(:,:,,g==pilotPattern,j),4) +
            sqrt(tau_p)*Np(:,:,,j,g);

        %Go through all UEs
        for k = 1:K

            %Compute the matrix that is inverted in the MMSE estimator
            PsiInv = (p*tau_p*sum(R(:,:,k,g==pilotPattern,j),4) + eyeM);

            %If EW-MMSE estimation is to be computed
            if nargout >= 5
                %Compute a vector with elements that are inverted in the
                %EW-MMSE estimator
                PsiInvDiag = diag(PsiInv);
            end

            %Go through the cells in pilot group g
            for l = groupMembers

                %Compute MMSE estimate of channel between BS l and UE
                %in cell j
                RPsi = R(:,:,k,l,j) / PsiInv;
                Hhat_MMSE(:,:,k,l,j) = sqrt(p)*RPsi*yp(:,:,k);

                %Compute corresponding estimation error correlation matrix
                C_MMSE(:,:,k,l,j) = R(:,:,k,l,j) - p*tau_p*RPsi*R(:,:,k,l,j);

                %If EW-MMSE estimation is to be computed
                if nargout >= 5

                    %Compute EW-MMSE estimate of channel between BS l and UE k
                    %in cell j
                    A_EW_MMSE = diag(sqrt(p)*diag(R(:,:,k,l,j)) ./ PsiInvDiag);
                    Hhat_EW_MMSE(:,:,k,l,j) = A_EW_MMSE*yp(:,:,k);

                    %Compute corresponding estimation error correlation
                    %matrix
                    productAR = A_EW_MMSE * R(:,:,k,l,j);

                    C_EW_MMSE(:,:,k,l,j) = R(:,:,k,l,j) - (productAR + productAR') *
                    sqrt(p)*tau_p + tau_p*A_EW_MMSE*PsiInv*A_EW_MMSE';

                end

            end

        end

    end

end

```

```

        %If LS estimation is to be computed
        if nargout >= 7

            %Compute LS estimate of channel between BS l and UE k in
            cell j
            A_LS = 1/(sqrt(p)*tau_p);
            Hhat_LS(:, :, k, l, j) = A_LS*yp(:, :, k);

            %Compute corresponding estimation error correlation
            matrix
            productAR = A_LS * R(:, :, k, l, j);

            C_LS(:, :, k, l, j) = R(:, :, k, l, j) - (productAR + productAR') *
            sqrt(p)*tau_p + tau_p*A_LS*PsiInv*A_LS';

        end

    end

end

end

end

end

```

## Function Compute SE

```

function [SE_MR, SE_RZF, SE_MMMSE, SE_ZF, SE_SMMSE] =
functionComputeSE(Hhat, C, R, tau_c, tau_p, nbrOfRealizations, M, K, L, p)

%Store identity matrices of different sizes
eyeK = eye(K);
eyeM = eye(M);

%Compute the pre-log factor (normalized with number of channel
realizations) assuming only uplink transmission
prelogFactor = (tau_c-tau_p)/(tau_c*nrOfRealizations);

%Prepare to store simulation results
SE_MR = zeros(K, L);

if nargout > 1
    SE_RZF = zeros(K, L);
end

if nargout > 2
    SE_MMMSE = zeros(K, L);

```

```

%Compute sum of all estimation error correlation matrices at every BS
C_totM = reshape(p*sum(sum(C,3),4),[M M L]);

end

if nargout > 3
    SE_ZF = zeros(K,L);
end

if nargout > 4
    SE_SMMSE = zeros(K,L);

    %Compute sum of intra-cell estimation error correlation matrices at
    every BS
    CR_totS = zeros(M,M,L);

    for j = 1:L
        CR_totS(:, :, j) = p*(sum(C(:, :, :, j, j), 3)+sum(sum(R(:, :, :, [1:j-1
        j+1:end], j), 3), 4));
    end
end

%% Go through all channel realizations
for n = 1:nbOfRealizations

    %Go through all cells
    for j = 1:L

        %Extract channel estimate realizations from all UEs to BS j
        Hhatallj = reshape(Hhat(:, n, :, :, j), [M K*L]);

        %Compute MR combining
        V_MR = Hhatallj(:, K*(j-1)+1:K*j);

        if nargout > 1 %Compute RZF combining
            V_RZF = (p*V_MR)/(p*(V_MR'*V_MR)+eyeK);
        end

        if nargout > 2 %Compute M-MMSE combining
            V_MMMSE = (p*(Hhatallj*Hhatallj')+C_totM(:, :, j)+eyeM)\(p*V_MR);
        end

        if nargout > 3 %Compute ZF combining with the small
            regularization term 1e-12 for numerical stability
            V_ZF = V_MR/(V_MR'*V_MR+1e-12*eyeK);
        end

        if nargout > 4 %Compute S-MMSE combining
            V_SMMSE = (p*(V_MR*V_MR')+CR_totS(:, :, j)+eyeM)\(p*V_MR);
        end
    end
end

```

```

%Go through all UEs in cell j
for k = 1:K
    %%MR combining
    v = V_MR(:,k); %Extract combining vector

%Compute numerator and denominator of instantaneous SINR
    numerator = p*abs(v'*Hhat(:,n,k,j,j))^2;
    denominator = p*sum(abs(v'*Hhatallj).^2) +
    v'*(C_totM(:, :,j)+eyeM)*v - numerator;

    %Compute instantaneous SE for one channel realization
    SE_MR(k,j) = SE_MR(k,j) +
    prelogFactor*real(log2(1+numerator/denominator));

    %%ZF combining
    if nargout > 3

        v = V_ZF(:,k); %Extract combining vector

        %Compute numerator and denominator of instantaneous SINR
        numerator = p*abs(v'*Hhat(:,n,k,j,j))^2;
        denominator = p*sum(abs(v'*Hhatallj).^2) +
        v'*(C_totM(:, :,j)+eyeM)*v - numerator;

        %Compute instantaneous SE for one channel realization
        SE_ZF(k,j) = SE_ZF(k,j) +
        prelogFactor*real(log2(1+numerator/denominator));

    end

    %%RZF combining
    if nargout > 1

        v = V_RZF(:,k); %Extract combining vector

        %Compute numerator and denominator of instantaneous SINR
        numerator = p*abs(v'*Hhat(:,n,k,j,j))^2;
        denominator = p*sum(abs(v'*Hhatallj).^2) +
        v'*(C_totM(:, :,j)+eyeM)*v - numerator;

        %Compute instantaneous SE for one channel realization
        SE_RZF(k,j) = SE_RZF(k,j) +
        prelogFactor*real(log2(1+numerator/denominator));

    end

    %%S-MMSE combining
    if nargout > 4

        v = V_SMMSE(:,k); %Extract combining vector

```

```

%Compute numerator and denominator of instantaneous SINR
numerator = p*abs(v'*Hhat(:,n,k,j,j))^2;
denominator = p*sum(abs(v'*Hhatallj).^2) +
v'*(C_totM(:, :, j)+eyeM)*v - numerator;

%Compute instantaneous SE for one channel realization
SE_SMMSE(k,j) = SE_SMMSE(k,j) +
prelogFactor*real(log2(1+numerator/denominator));

end

%%M-MMSE combining
if nargin > 2

    v = V_MMMSE(:,k); %Extract combining vector

%Compute numerator and denominator of instantaneous SINR
numerator = p*abs(v'*Hhat(:,n,k,j,j))^2;
denominator = p*sum(abs(v'*Hhatallj).^2) +
v'*(C_totM(:, :, j)+eyeM)*v - numerator;

%Compute instantaneous SE for one channel realization
SE_MMMSE(k,j) = SE_MMMSE(k,j) +
prelogFactor*real(log2(1+numerator/denominator));

end

end

end

end

```

## function CP computation

```

function [P_MR,P_RZF,P_MMMSE,P_ZF,P_SMMSE] =
functionCPcomputation(Mrange,K,L,B,tau_c,tau_p,valueSet,sumSE_MR,sumSE_
RZF,sumSE_MMMSE,sumSE_ZF,sumSE_SMMSE)

[P_FIX,P_LO,P_BS,P_UE,P_COD,P_DEC,L_BS,P_BT]=functionCPmodel(valueSet);

%Prepare to store simulation results
P_MR = zeros(length(Mrange),1);
P_TC = zeros(length(Mrange),1);
P_CE = zeros(length(Mrange),1);
P_SP_RT = zeros(length(Mrange),1);
P_SP_DL = zeros(length(Mrange),1);
P_SP_UL_MR = zeros(length(Mrange),1);

%Compute CP for coding and decoding
P_CD_MR = (P_COD + P_DEC)*B*sumSE_MR;

```

```

%Compute CP for backhaul traffic
P_BH_MR = P_BT*B*sumSE_MR;

%Repeat computations for RZF
if nargin>8
    P_RZF = zeros(length(Mrange),1);
    P_CD_RZF = (P_COD + P_DEC)*B*sumSE_RZF;
    P_BH_RZF = P_BT*B*sumSE_RZF;
    P_SP_UL_RZF = zeros(length(Mrange),1);
end

%Repeat computations for M-MMSE
if nargin>9
    P_MMMSE = zeros(length(Mrange),1);
    P_CD_MMMSE = (P_COD + P_DEC)*B*sumSE_MMMSE;
    P_BH_MMMSE = P_BT*B*sumSE_MMMSE;
    P_SP_UL_MMMSE = zeros(length(Mrange),1);
end

%Repeat computations for ZF
if nargin>10
    P_ZF = zeros(length(Mrange),1);
    P_CD_ZF = (P_COD + P_DEC)*B*sumSE_ZF;
    P_BH_ZF = P_BT*B*sumSE_ZF;
    P_SP_UL_ZF = zeros(length(Mrange),1);
end

%Repeat computations for S-MMSE
if nargin>11
    P_SMMSE = zeros(length(Mrange),1);
    P_CD_SMMSE = (P_COD + P_DEC)*B*sumSE_SMMSE;
    P_BH_SMMSE = P_BT*B*sumSE_SMMSE;
    P_SP_UL_SMMSE = zeros(length(Mrange),1);
end

%Go through all number of antennas
for index = 1:length(Mrange)

    %Extract current number of antennas
    M = Mrange(index);

    %Compute CP for transceiver chains
    P_TC(index) = M*P_BS + P_LO + K*P_UE;

    %Compute CP for channel estimation with all other schemes, where
    only
    %the channels to UEs in other cells are estimated
    P_CE(index) = 3*K*B/(tau_c*L_BS)*(M*tau_p + M^2);

    %Compute CP for UL reception and DL transmission
    P_SP_RT(index) = (tau_c - tau_p)*3*B/(tau_c*L_BS)*M*K;

    %Compute CP for computation of precoding vectors
    P_SP_DL(index) = 4*M*K*B/(tau_c*L_BS);

```

```

%Sum up the power terms that are independent of the processing
scheme
P_SAME = P_FIX + P_TC(index) + P_SP_RT(index) + P_SP_DL(index);

%Compute CP for computation of the combining vectors with different
%scheme
P_SP_UL_MR(index) = 7*B*K/(tau_c*L_BS);

%Compute the final CP values
P_MR(index) = P_SAME + P_CE(index) + P_CD_MR(index) +
P_BH_MR(index) + P_SP_UL_MR(index);

%Repeat same computations for RZF
if nargin>8
    P_SP_UL_RZF(index) = 3*B*(3*K^2*M/2 + 3*M*K/2 + (K^3 - K)/3 +
(7/3)*K)/(tau_c*L_BS);
    P_RZF(index) = P_SAME + P_CE(index) + P_CD_RZF(index) +
P_BH_RZF(index) + P_SP_UL_RZF(index);
end

%Repeat same computations for M-MMSE
if nargin>9
    P_SP_UL_MMMSE(index) = 3*B*(L*(3*M^2 + M)*K/2 + M^3/3 + 2*M +
M*tau_p*(tau_p-K))/(tau_c*L_BS);
    P_MMMSE(index) = P_SAME + P_CE(index) + P_CD_MMMSE(index) +
P_BH_MMMSE(index) + P_SP_UL_MMMSE(index);
end

%Repeat same computations for ZF
if nargin>10
    P_SP_UL_ZF(index) = 3*B*(3*K^2*M/2 + M*K/2 + (K^3 - K)/3 +
(7/3)*K)/(tau_c*L_BS);
    P_ZF(index) = P_SAME + P_CE(index) + P_CD_ZF(index) +
P_BH_ZF(index) + P_SP_UL_ZF(index);
end

%Repeat same computations for S-MMSE
if nargin>11
    P_SP_UL_SMMSE(index) = 3*B*(3*M^2*K/2 + M*K/2 + (M^3 - M)/3 +
(7/3)*M)/(tau_c*L_BS);
    P_SMMSE(index) = P_SAME + P_CE(index) + P_CD_SMMSE(index) +
P_BH_SMMSE(index) + P_SP_UL_SMMSE(index);
end

end

```

## function CP model

```
function [P_FIX,P_LO,P_BS,P_UE,P_COD,P_DEC,L_BS,P_BT]=  
functionCPmodel(valueset)
```

```
%% Define parameter values for Value set 1
```

```
if valueset == 1
```

```
    P_FIX = 10;
```

```
    P_LO = 0.2;
```

```
    P_BS = 0.4;
```

```
    P_UE = 0.2;
```

```
    P_COD = 0.1*10(-9);
```

```
    P_DEC = 0.8*10(-9);
```

```
    L_BS = 75*109;
```

```
    P_BT = 0.25*10(-9);
```

```
%% Define parameter values for Value set 2
```

```
elseif valueset == 2
```

```
    P_FIX = 5;
```

```
    P_LO = 0.1;
```

```
    P_BS = 0.2;
```

```
    P_UE = 0.1;
```

```
    P_COD = 0.01*10(-9);
```

```
    P_DEC = 0.08*10(-9);
```

```
    L_BS = 750*109;
```

```
    P_BT = 0.025*10(-9);
```

```
end
```

## function Example Setup

```
function [R,channelGaindB] =
functionExampleSetup(L,K,M,accuracy,ASDdeg)

%Set the length in meters of the total square area
squareLength = 1000;

%Number of BSs per dimension
nbrBSsPerDim = sqrt(L);

%Pathloss exponent
alpha = 3.76;

%Average channel gain in dB at a reference distance of 1 meter
%-35.3 dB corresponds to -148.1 dB at 1 km
constantTerm = -35.3;

%Standard deviation of shadow fading
sigma_sf = 10;

%Minimum distance between BSs and UEs
minDistance = 35;

%Define the antenna spacing (in number of wavelengths)
antennaSpacing = 1/2; %Half wavelength distance

%Distance between BSs in vertical/horizontal direction
interBSDistance = squareLength/nbrBSsPerDim;

%Deploy BSs on the grid
locationsGridHorizontal =
repmat(interBSDistance/2:interBSDistance:squareLength-
interBSDistance/2,[nbrBSsPerDim 1]);
locationsGridVertical = locationsGridHorizontal';
BSpositions = locationsGridHorizontal(:) + 1i*locationsGridVertical(:);

%Compute all nine alternatives of the BS locations when using wrap
around
wrapHorizontal = repmat([-squareLength 0 squareLength],[3 1]);
wrapVertical = wrapHorizontal';
wrapLocations = wrapHorizontal(:)' + 1i*wrapVertical(:)';
BSpositionsWrapped = repmat(BSpositions,[1 length(wrapLocations)]) +
repmat(wrapLocations,[L 1]);

%Prepare to put out UEs in the cells
UEpositions = zeros(K,L);
perBS = zeros(L,1);

%Prepare to store normalized spatial correlation matrices
R = zeros(M,M,K,L,L,length(ASDdeg));

%Prepare to store average channel gain numbers (in dB)
channelGaindB = zeros(K,L,L);
```

```

% Go through all the cells
for l = 1:L

    %Put out K UEs in the cell, uniformly at random. The procedure is
    %iterative since UEs that do not satisfy the minimum distance are
    %replaced with new UEs
    while perBS(l)<K

        %Put out new UEs
        UERemaining = K-perBS(l);
        posX = rand(UERemaining,1)*interBSDistance - interBSDistance/2;
        posY = rand(UERemaining,1)*interBSDistance - interBSDistance/2;
        posXY = posX + li*posY;

        %Keep those that satisfy the minimum distance
        posXY = posXY(abs(posXY)>=minDistance);

        %Store new UEs
        UEpositions(perBS(l)+1:perBS(l)+length(posXY),l) = posXY +
        BSpositions(l);
        perBS(l) = perBS(l)+length(posXY);

    end

    %Go through all BSs
    for j = 1:L

        %Compute the distance from the UEs in cell l to BS j with a wrap
        %around topology, where the shortest distance between a UE and the
        %nine different locations of a BS is considered
        [distancesBSj,whichpos] = min(abs( repmat(UEpositions(:,l),[1
        size(BSpositionsWrapped,2)]) - repmat(BSpositionsWrapped(j,:),[K
        1]) ),[],2));

        %Compute average channel gain using the large-scale fading model
        %while neglecting the shadow fading
        channelGaindB(:,l,j) = constantTerm -
        alpha*10*log10(distancesBSj);

        %Compute nominal angles between UE k in cell l and BS j, and
        %generate spatial correlation matrices for the channels using the
        %local scattering model
        for k = 1:K

            angleBSj = angle(UEpositions(k,l)-
            BSpositionsWrapped(j,whichpos(k)));

            %Use the exact implementation of the local scattering model
            if accuracy == 1

                for spr = 1:length(ASDdeg)

```

```

        R(:,:,k,l,j,spr) =
functionRlocalscattering(M,angleBSj,ASDdeg(spr),antennaSpacing);

        end

        %Use the approximate implementation of the local scattering model
        elseif accuracy == 2
            for spr = 1:length(ASDdeg)

                R(:,:,k,l,j,spr) =
functionRlocalscatteringApprox(M,angleBSj,ASDdeg(spr),antennaSpacing);

            end

        end

    end

end

end

    %Go through all UEs in cell l and generate shadow fading
    realizations
    for k = 1:K

        %Generate shadow fading realizations
        shadowing = sigma_sf*randn(1,1,L);
        channelGainShadowing = channelGaindB(k,l,:) + shadowing;

        %Check if another BS has a larger average channel gain to the UE
        %than BS l
        while channelGainShadowing(1) < max(channelGainShadowing)

            %Generate new shadow fading realizations (until all UEs in cell
            %l has its largest average channel gain from BS l)
            shadowing = sigma_sf*randn(1,1,L);
            channelGainShadowing = channelGaindB(k,l,:) + shadowing;

        end

        %Store average channel gains with shadowing fading
        channelGaindB(k,l,:) = channelGainShadowing;

    end

end

```

## Compute CP 1

```
load section5_Mvarying_K10_20;

%Number of UEs per BS
k_index = 1; %Selecting K = 10 from the loaded SE results
K = Krange(k_index);

%Fractions of data samples used for UL and DL
ULfraction = 1/3;
DLfraction = 2/3;

%Compute joint UL/DL sum SE using the fractions of UL/DL data
sumSE_MMMSE = ULfraction*sumSE_MMMSE_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_MMMSE_DL(:,k_index);
sumSE_SMMSE = ULfraction*sumSE_SMMSE_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_SMMSE_DL(:,k_index);
sumSE_RZF = ULfraction*sumSE_RZF_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_RZF_DL(:,k_index);
sumSE_ZF = ULfraction*sumSE_ZF_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_ZF_DL(:,k_index);
sumSE_MR = ULfraction*sumSE_MR_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_MR_DL(:,k_index);

%Number of BSs
L = 16;

%Communication bandwidth
B = 20e6;

%Select length of coherence block
tau_c = 200;

%Select length of pilot sequences
tau_p = K;

%Prepare to store simulation results
P_MMMSE = zeros(length(Mrange),2);
P_SMMSE = zeros(length(Mrange),2);
P_RZF = zeros(length(Mrange),2);
P_ZF = zeros(length(Mrange),2);
P_MR = zeros(length(Mrange),2);

%% Compute CP values for different value sets
for valueset = 1:2

    [P_MR(:,valueset),P_RZF(:,valueset),P_MMMSE(:,valueset),P_ZF(:,valueset)
    ),P_SMMSE(:,valueset)] =
    functionCPcomputation(Mrange,K,L,B,tau_c,tau_p,valueset,sumSE_MR,sumSE_
    RZF,sumSE_MMMSE,sumSE_ZF,sumSE_SMMSE);

end
```

```

%% Plot the simulation results
figure;
hold on; box on;

for valueset = 1:2

    plot(Mrange,10*log10(P_MMMSE(:,valueset)/0.001),'rd-
', 'LineWidth',1);

plot(Mrange,10*log10(P_SMMSE(:,valueset)/0.001),'b:', 'LineWidth',1);
plot(Mrange,10*log10(P_RZF(:,valueset)/0.001),'k-.', 'LineWidth',1);
plot(Mrange,10*log10(P_ZF(:,valueset)/0.001),'r--', 'LineWidth',1);
plot(Mrange,10*log10(P_MR(:,valueset)/0.001),'bs-', 'LineWidth',1);

end

xlabel('Number of antennas (M)');
ylabel('Total CP [dBm]');
legend('M-MMSE', 'S-MMSE', 'RZF', 'ZF', 'MR', 'Location', 'SouthEast');

```

## Compute CP 2

```

load section5_M100_Kvarying;

%Fractions of data samples used for UL and DL
ULfraction = 1/3;
DLfraction = 2/3;

%Compute joint UL/DL sum SE using the fractions of UL/DL data
sumSE_MMMSE = ULfraction*sumSE_MMMSE_UL + DLfraction*sumSE_MMMSE_DL;
sumSE_SMMSE = ULfraction*sumSE_SMMSE_UL + DLfraction*sumSE_SMMSE_DL;
sumSE_RZF = ULfraction*sumSE_RZF_UL + DLfraction*sumSE_RZF_DL;
sumSE_ZF = ULfraction*sumSE_ZF_UL + DLfraction*sumSE_ZF_DL;
sumSE_MR = ULfraction*sumSE_MR_UL + DLfraction*sumSE_MR_DL;

%Number of BSs
L = 16;

%Number of BS antennas
M = 100;

%Communication bandwidth
B = 20e6;

%Select length of coherence block
tau_c = 200;

%Select length of pilot sequences
tau_p = Krange;

```

```

%%Prepare to store simulation results
P_MMMSE = zeros(length(Krange),2);
P_SMMSE = zeros(length(Krange),2);
P_RZF = zeros(length(Krange),2);
P_ZF = zeros(length(Krange),2);
P_MR = zeros(length(Krange),2);

%% Compute CP values for different value sets
for valueset = 1:2

    for k = 1:length(Krange)

        %%Compute the total CP with different schemes

        [P_MR(k,valueset),P_RZF(k,valueset),P_MMMSE(k,valueset),P_ZF(k,valueset)
        ],P_SMMSE(k,valueset)] =
        functionCPcomputation(M,Krange(k),L,B,tau_c,tau_p(k),valueset,sumSE_MR,
        sumSE_RZF,sumSE_MMMSE,sumSE_ZF,sumSE_SMMSE);

    end

end

%% Plot the simulation results
figure;
hold on; box on;

for valueset = 1:2

    plot(Krange,10*log10(P_MMMSE(:,valueset)/0.001),'rd-
    ','LineWidth',1);hold on;

    plot(Krange,10*log10(P_SMMSE(:,valueset)/0.001),'b:','LineWidth',1);
    plot(Krange,10*log10(P_RZF(:,valueset)/0.001),'k-.','LineWidth',1);
    plot(Krange,10*log10(P_ZF(:,valueset)/0.001),'r--','LineWidth',1);
    plot(Krange,10*log10(P_MR(:,valueset)/0.001),'bs-','LineWidth',1);

end

xlabel('Number of UEs (K)');
ylabel('Total CP [dBm]');
legend('M-MMSE','S-MMSE','RZF','ZF','MR','Location','NorthWest');

```

## Compute EE set 1 with K&M

```
%Select the value set
valueset = 1;

%Load SE simulation data
load section5_Mvarying_Kvarying.mat;

%Number of BSs
L = 16;

%Communication bandwidth
B = 20e6;

%PA efficiency UEs and BSs
mu_UE = 0.4;
mu_BS = 0.5;

%Define the pilot reuse factor
f = 1;

%Select length of coherence block
tau_c = 200;

%Fractions of data samples used for UL and DL
ULfraction = 1/3;
DLfraction = 2/3;

%Transmit power per UE in W
p = 0.1;

%Compute joint UL/DL sum SE using the fractions of UL/DL data
sumSE_MMMSE = ULfraction*sumSE_MMMSE_UL + DLfraction*sumSE_MMMSE_DL;
sumSE_RZF = ULfraction*sumSE_RZF_UL + DLfraction*sumSE_RZF_DL;
sumSE_MR = ULfraction*sumSE_MR_UL + DLfraction*sumSE_MR_DL;

%Prepare to save simulation results
EE_MR = zeros(length(Mrange),length(Krange));
EE_RZF = zeros(length(Mrange),length(Krange));
EE_MMMSE = zeros(length(Mrange),length(Krange));

%% Go through all number of BS antennas
for m = 1:length(Mrange)

    %Go through all number of UEs
    for k = 1:length(Krange)

        %Compute length of pilot sequences
        tau_p = f*Krange(k);
```

```

    %Compute the total CP with different schemes
    [P_MR,P_RZF,P_MMMSE] =
functionCPcomputation(Mrange(m),Krange(k),L,B,tau_c,tau_p,valueSet,sumS
E_MR,sumSE_RZF,sumSE_MMMSE);

    %Compute total effective transmit power
    ETP_total = Krange(k)*p*(tau_p/mu_UE + (tau_c-
tau_p)*(ULfraction/mu_UE + DLfraction/mu_BS))/tau_c;

    %Compute EE with MR
    EE_MR(m,k) = (B*sumSE_MR(m,k))./(ETP_total + P_MR);

    %Compute EE with RZF
    EE_RZF(m,k) = (B*sumSE_RZF(m,k))./(ETP_total + P_RZF);

    %Compute EE with M-MMSE
    EE_MMMSE(m,k) = (B*sumSE_MMMSE(m,k))./(ETP_total + P_MMMSE);

end

end

%% Plot simulation results

%Plot Figure 5.14a
figure;
hold on; box on; grid on;

surf(Krange,Mrange,EE_MMMSE/10^6,'EdgeColor','none');
colormap(autumn);
shading interp
hold on
contour3(Krange,Mrange,EE_MMMSE/1e6,10,'k')
[~,I] = max(EE_MMMSE(:));
[row,col] = ind2sub(size(EE_MMMSE),I); %2D maximizer
Kopt = Krange(col); %Optimal number of UEs
Mopt = Mrange(row); %Optimal number of BS antennas
hold on
plot3(Kopt,Mopt,EE_MMMSE(row,col)/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceC
olor','black');
hold on
plot3(Kopt,Mopt,min(min(EE_MMMSE))/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFace
Color','black');

view([-17 32]);

xlabel('Number of UEs (K)')
ylabel('Number of BS antennas (M)');
zlabel('EE [Mbit/Joule]');

```

```

%Plot Figure 5.14b
figure;
hold on; box on; grid on;

surfc(Krange,Mrange,EE_RZF/10^6,'EdgeColor','none');
colormap(autumn);
shading interp
hold on
contour3(Krange,Mrange,EE_RZF/1e6,10,'k')
[~,I] = max(EE_RZF(:));
[row,col] = ind2sub(size(EE_RZF),I); %2D maximizer
Kopt = Krange(col); %Optimal number of UEs
Mopt = Mrange(row); %Optimal number of BS antennas
hold on
plot3(Kopt,Mopt,EE_RZF(row,col)/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceColor','black');
hold on
plot3(Kopt,Mopt,min(min(EE_RZF))/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceColor','black');

view([-17 32]);

xlabel('Number of UEs (K)')
ylabel('Number of BS antennas (M)');
zlabel('EE [Mbit/Joule]');

```

```

%Plot Figure 5.14b
figure;
hold on; box on; grid on;

surfc(Krange,Mrange,EE_MR/10^6,'EdgeColor','none');
colormap(autumn);
shading interp
hold on
contour3(Krange,Mrange,EE_MR/1e6,10,'k')
[EE_max,I] = max(EE_MR(:));
[row,col] = ind2sub(size(EE_MR),I); %2D maximizer
Kopt = Krange(col); %Optimal number of UEs
Mopt = Mrange(row); %Optimal number of BS antennas
hold on
plot3(Kopt,Mopt,EE_MR(row,col)/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceColor','black');
hold on
plot3(Kopt,Mopt,min(min(EE_MR))/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceColor','black');

view([-17 32]);

xlabel('Number of UEs (K)')
ylabel('Number of BS antennas (M)');
zlabel('EE [Mbit/Joule]');

```

## Compute EE set 2 with K&M

```
%Select the value set
valueset = 2;

%Load SE simulation data, generated using the code from Section 4
load section5_Mvarying_Kvarying.mat;

%Number of BSs
L = 16;

%Communication bandwidth
B = 20e6;

%PA efficiency UEs and BSs
mu_UE = 0.4;
mu_BS = 0.5;

%Define the pilot reuse factor
f = 1;

%Select length of coherence block
tau_c = 200;

%Fractions of data samples used for UL and DL
ULfraction = 1/3;
DLfraction = 2/3;

%Transmit power per UE in W
p = 0.1;

%Compute joint UL/DL sum SE using the fractions of UL/DL data
sumSE_MMMSE = ULfraction*sumSE_MMMSE_UL + DLfraction*sumSE_MMMSE_DL;
sumSE_RZF = ULfraction*sumSE_RZF_UL + DLfraction*sumSE_RZF_DL;
sumSE_MR = ULfraction*sumSE_MR_UL + DLfraction*sumSE_MR_DL;

%Prepare to save simulation results
EE_MR = zeros(length(Mrange),length(Krange));
EE_RZF = zeros(length(Mrange),length(Krange));
EE_MMMSE = zeros(length(Mrange),length(Krange));

%% Go through all number of BS antennas
for m = 1:length(Mrange)

    %Go through all number of UEs
    for k = 1:length(Krange)

        %Compute length of pilot sequences
        tau_p = f*Krange(k);
```

```

        %Compute the total CP with different schemes
        [P_MR,P_RZF,P_MMMSE] =
functionCPcomputation(Mrange(m),Krange(k),L,B,tau_c,tau_p,valueSet,sumS
E_MR,sumSE_RZF,sumSE_MMMSE);

        %Compute total effective transmit power
        ETP_total = Krange(k)*p*(tau_p/mu_UE + (tau_c-
tau_p)*(ULfraction/mu_UE + DLfraction/mu_BS))/tau_c;

        %Compute EE with MR
        EE_MR(m,k) = (B*sumSE_MR(m,k))./(ETP_total + P_MR);

        %Compute EE with RZF
        EE_RZF(m,k) = (B*sumSE_RZF(m,k))./(ETP_total + P_RZF);

        %Compute EE with M-MMSE
        EE_MMMSE(m,k) = (B*sumSE_MMMSE(m,k))./(ETP_total + P_MMMSE);

    end

end

%% Plot simulation results

%Plot Figure 5.14a
figure;
hold on; box on; grid on;

surf(Krange,Mrange,EE_MMMSE/10^6,'EdgeColor','none');
colormap(autumn);
shading interp
hold on
contour3(Krange,Mrange,EE_MMMSE/1e6,10,'k')
[~,I] = max(EE_MMMSE(:));
[row,col] = ind2sub(size(EE_MMMSE),I); %2D maximizer
Kopt = Krange(col); %Optimal number of UEs
Mopt = Mrange(row); %Optimal number of BS antennas
hold on
plot3(Kopt,Mopt,EE_MMMSE(row,col)/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceC
olor','black');
hold on
plot3(Kopt,Mopt,min(min(EE_MMMSE))/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFace
Color','black');

view([-17 32]);

xlabel('Number of UEs (K)')
ylabel('Number of BS antennas (M)');
zlabel('EE [Mbit/Joule]');

%Plot Figure 5.14b

```

```

figure;
hold on; box on; grid on;

surfc(Krange,Mrange,EE_RZF/10^6,'EdgeColor','none');
colormap(autumn);
shading interp
hold on
contour3(Krange,Mrange,EE_RZF/1e6,10,'k')
[~,I] = max(EE_RZF(:));
[row,col] = ind2sub(size(EE_RZF),I); %2D maximizer
Kopt = Krange(col); %Optimal number of UEs
Mopt = Mrange(row); %Optimal number of BS antennas
hold on
plot3(Kopt,Mopt,EE_RZF(row,col)/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceColor','black');
hold on
plot3(Kopt,Mopt,min(min(EE_RZF))/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceColor','black');

view([-17 32]);

xlabel('Number of UEs (K)')
ylabel('Number of BS antennas (M)');
zlabel('EE [Mbit/Joule]');

```

%Plot Figure 5.14b

```

figure;
hold on; box on; grid on;

surfc(Krange,Mrange,EE_MR/10^6,'EdgeColor','none');
colormap(autumn);
shading interp
hold on
contour3(Krange,Mrange,EE_MR/1e6,10,'k')
[EE_max,I] = max(EE_MR(:));
[row,col] = ind2sub(size(EE_MR),I); %2D maximizer
Kopt = Krange(col); %Optimal number of UEs
Mopt = Mrange(row); %Optimal number of BS antennas
hold on
plot3(Kopt,Mopt,EE_MR(row,col)/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceColor','black');
hold on
plot3(Kopt,Mopt,min(min(EE_MR))/1e6,'k*','MarkerSize',16,'MarkerFaceColor','black');

view([-17 32]);

xlabel('Number of UEs (K)')
ylabel('Number of BS antennas (M)');
zlabel('EE [Mbit/Joule]');

```

## Compute EE set 1

```
%Load SE simulation data
load section5_Mvarying_K10_20;

%Number of UEs per BS
k_index = 1; %Selecting K = 10 from the loaded SE results
K = Krange(k_index);

%Fractions of data samples used for UL and DL
ULfraction = 1/3;
DLfraction = 2/3;

%Compute joint UL/DL sum SE using the fractions of UL/DL data
sumSE_MMMSE = ULfraction*sumSE_MMMSE_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_MMMSE_DL(:,k_index);
sumSE_SMMSE = ULfraction*sumSE_SMMSE_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_SMMSE_DL(:,k_index);
sumSE_RZF = ULfraction*sumSE_RZF_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_RZF_DL(:,k_index);
sumSE_ZF = ULfraction*sumSE_ZF_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_ZF_DL(:,k_index);
sumSE_MR = ULfraction*sumSE_MR_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_MR_DL(:,k_index);

%Number of BSs
L = 16;

%Communication bandwidth
B = 20e6;

%PA efficiency UEs and BSs
mu_UE = 0.4;
mu_BS = 0.5;

%Define the pilot reuse factor
f = 1;

%Select length of coherence block
tau_c = 200;

%Compute length of pilot sequences
tau_p = f*K;

%Transmit power per UE in W
p = 0.1;

%Compute total effective transmit power
ETP_total = K*p*(tau_p/mu_UE + (tau_c-tau_p)*(ULfraction/mu_UE +
DLfraction/mu_BS))/tau_c;

%% Go through the two value sets of the CP model
for valueset = 1:2
```

```

    %Compute the total CP with different schemes
    [P_MR,P_RZF,P_MMMSE,P_ZF,P_SMMSE] =
functionCPcomputation(Mrange,K,L,B,tau_c,tau_p,valueSet,sumSE_MR,sumSE_
RZF,sumSE_MMMSE,sumSE_ZF,sumSE_SMMSE);

    %Compute EE with M-MMSE
    EE_MMMSE = (B*sumSE_MMMSE)./(ETP_total + P_MMMSE);

    %Compute EE with S-MMSE
    EE_SMMSE = (B*sumSE_SMMSE)./(ETP_total + P_SMMSE);

    %Compute EE with RZF
    EE_RZF = (B*sumSE_RZF)./(ETP_total + P_RZF);

    %Compute EE with ZF
    EE_ZF = (B*sumSE_ZF)./(ETP_total + P_ZF);

    %Compute EE with MR
    EE_MR = (B*sumSE_MR)./(ETP_total + P_MR);

    %Plot simulation results
    figure;

    plot(B*sumSE_MMMSE/10^6,EE_MMMSE/10^6, 'rd-', 'LineWidth',1);hold
on;
    plot(B*sumSE_SMMSE/10^6,EE_SMMSE/10^6, 'b:', 'LineWidth',1);
    plot(B*sumSE_RZF/10^6,EE_RZF/10^6, 'k-.', 'LineWidth',1);
    plot(B*sumSE_ZF/10^6,EE_ZF/10^6, 'r--', 'LineWidth',1);
    plot(B*sumSE_MR/10^6,EE_MR/10^6, 'bs-', 'LineWidth',1);

    xlabel('Throughput [Mbit/s/cell]');
    ylabel('EE [Mbit/Joule/cell]');
    legend('M-MMSE', 'S-MMSE', 'RZF', 'ZF', 'MR', 'Location', 'NorthWest');

end

```

## Compute EE set 2

```

%Load SE simulation data
load section5_Mvarying_K10_20;

%Number of UEs per BS
k_index = 2; %Selecting K = 10 from the loaded SE results
K = Krange(k_index);

%Fractions of data samples used for UL and DL
ULfraction = 1/3;
DLfraction = 2/3;
%Compute joint UL/DL sum SE using the fractions of UL/DL data

```

```

sumSE_MMMSE = ULfraction*sumSE_MMMSE_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_MMMSE_DL(:,k_index);
sumSE_SMMSE = ULfraction*sumSE_SMMSE_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_SMMSE_DL(:,k_index);
sumSE_RZF = ULfraction*sumSE_RZF_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_RZF_DL(:,k_index);
sumSE_ZF = ULfraction*sumSE_ZF_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_ZF_DL(:,k_index);
sumSE_MR = ULfraction*sumSE_MR_UL(:,k_index) +
DLfraction*sumSE_MR_DL(:,k_index);

%Number of BSs
L = 16;

%Communication bandwidth
B = 20e6;

%PA efficiency UEs and BSs
mu_UE = 0.4;
mu_BS = 0.5;

%Define the pilot reuse factor
f = 1;

%Select length of coherence block
tau_c = 200;

%Compute length of pilot sequences
tau_p = f*K;

%Transmit power per UE in W
p = 0.1;

%Compute total effective transmit power
ETP_total = K*p*(tau_p/mu_UE + (tau_c-tau_p)*(ULfraction/mu_UE +
DLfraction/mu_BS))/tau_c;

%% Go through the two value sets of the CP model
for valueset = 1:2

    %Compute the total CP with different schemes
    [P_MR,P_RZF,P_MMMSE,P_ZF,P_SMMSE] =
functionCPcomputation(Mrange,K,L,B,tau_c,tau_p,valueset,sumSE_MR,sumSE_
RZF,sumSE_MMMSE,sumSE_ZF,sumSE_SMMSE);

    %Compute EE with M-MMSE
    EE_MMMSE = (B*sumSE_MMMSE)./(ETP_total + P_MMMSE);

    %Compute EE with S-MMSE
    EE_SMMSE = (B*sumSE_SMMSE)./(ETP_total + P_SMMSE);

    %Compute EE with RZF

```

```

EE_RZF = (B*sumSE_RZF)./(ETP_total + P_RZF);

%Compute EE with ZF
EE_ZF = (B*sumSE_ZF)./(ETP_total + P_ZF);

%Compute EE with MR
EE_MR = (B*sumSE_MR)./(ETP_total + P_MR);

%Plot simulation results
figure;

plot(B*sumSE_MMMSE/10^6,EE_MMMSE/10^6, 'rd-', 'LineWidth',1);hold
on;
plot(B*sumSE_SMMSE/10^6,EE_SMMSE/10^6, 'b:', 'LineWidth',1);
plot(B*sumSE_RZF/10^6,EE_RZF/10^6, 'k-.', 'LineWidth',1);
plot(B*sumSE_ZF/10^6,EE_ZF/10^6, 'r--', 'LineWidth',1);
plot(B*sumSE_MR/10^6,EE_MR/10^6, 'bs-', 'LineWidth',1);

xlabel('Throughput [Mbit/s/cell]');
ylabel('EE [Mbit/Joule/cell]');
legend('M-MMSE', 'S-MMSE', 'RZF', 'ZF', 'MR', 'Location', 'NorthWest');

end

```

## gfunction

```

%Define the range of BS antennas
Mvalues = [1 10 100];

%Angle of the desired UE
varphiDesired = pi/6;

%Range of angles of the interfering UE
varphiInterfererDegrees = -180:1:180;
varphiInterfererRadians = varphiInterfererDegrees*(pi/180);

%Define the antenna spacing (in number of wavelengths)
antennaSpacing = 1/2; %Half wavelength distance

%Preallocate matrix for storing the simulation results
gfunction = zeros(length(varphiInterfererDegrees),length(Mvalues));

%% Go through all number of antennas
for m = 1:length(Mvalues)

```

```

    %Generate channel response for the desired UE
    hdesired =
exp(1i*2*pi*antennaSpacing*sin(varphiDesired)*(0:Mvalues(m)-1)');

    %Go through all angles of interfering UE
    for n = 1:length(varphiInterfererRadians)

        %Generate channel response for the interfering UE
        hinterfering =
exp(1i*2*pi*antennaSpacing*sin(varphiInterfererRadians(n))*(0:Mvalues(m)
)-1)');

        %Compute the g-function , using its definition
        gfunction(n,m) = abs(hdesired'*hinterfering)^2/Mvalues(m);

    end

end

%% Plot the simulation results
figure;
hold on; box on;

plot(varphiInterfererDegrees,gfunction(:,1),'k-','LineWidth',1);
plot(varphiInterfererDegrees,gfunction(:,2),'r--','LineWidth',1);
plot(varphiInterfererDegrees,gfunction(:,3),'b-.','LineWidth',1);

xlabel('Angle of interfering UE [degree]');
ylabel('$g(\varphi_0^0,\varphi_1^0)$','Interpreter','latex');

set(gca,'Yscale','log');
xlim([-180 180]);
ylim([1e-5 1e2]);

legend('M=1','M=10','M=100','Location','NorthWest');

```

## Compute SE with No. of UE

```

%Define the SNR
SNR = 1;

%Define betabar (strength of inter-cell interference)
betabar = 1e-1;

%Define the range of number of UEs
K = 1:20;

%Define range of number of BS antennas

```

```

M = [10 100];

%Extract the maximal number of UEs and BS antennas
Kmax = max(K);
Mmax = max(M);

%Select number of Monte Carlo realizations for the line-of-sight (LoS)
%angles and of the non-line-of-sight (NLoS) Rayleigh fading
numberOfRealizations = 10000;

%Generate NLoS channels using uncorrelated Rayleigh fading
H_NLoS_desired =
sqrt(1/2)*(randn(Mmax,Kmax,numberOfRealizations)+1i*randn(Mmax,Kmax,num
berOfRealizations));
H_NLoS_interfering =
sqrt(betabar/2)*(randn(Mmax,Kmax,numberOfRealizations)+1i*randn(Mmax,Km
ax,numberOfRealizations));

%Generate random UE angles from 0 to 2*pi
varphiDesired = 2*pi*rand(1,Kmax,numberOfRealizations);
varphiInterfering = 2*pi*rand(1,Kmax,numberOfRealizations);

%Define the antenna spacing (in number of wavelengths)
antennaSpacing = 1/2;

%Generate LoS channels with different random UE angles
H_LoS_desired = exp( repmat((0:Mmax-1)', [1 Kmax numberOfRealizations])
.* repmat(-2i*pi*antennaSpacing*sin(varphiDesired), [Mmax 1 1]) );
H_LoS_interfering = sqrt(betabar)*exp( repmat((0:Mmax-1)', [1 Kmax
numberOfRealizations]) .* repmat(-
2i*pi*antennaSpacing*sin(varphiInterfering), [Mmax 1 1]) );

%Preallocate matrices for storing the simulation results
SE_MR_NLoS_montecarlo = zeros(length(K),length(M));
SE_MR_LoS = zeros(length(K),length(M));
SE_MMSE_NLoS_montecarlo = zeros(length(K),length(M));
SE_MMSE_LoS_montecarlo = zeros(length(K),length(M));

%% Go through all Monte Carlo realizations
for n = 1:numberOfRealizations

    %Output simulation progress
    disp([num2str(n) ' realizations out of '
num2str(numberOfRealizations)]);

    %Go through the range of number of UEs
    for kindex = 1:length(K)

        %Go through the range of number of BS antennas
        for mindex = 1:length(M)

```

```

%Compute the SE with MR under LoS propagation

%Compute the uplink SE with MR combining
argumentsDesired = 2*pi*antennaSpacing*(
repmat(sin(varphiDesired(1,1:K(kindex),n)), [K(kindex) 1]) -
repmat(sin(varphiDesired(1,1:K(kindex),n))', [1 K(kindex)])) );
argumentsInterfering = 2*pi*antennaSpacing*(
repmat(sin(varphiDesired(1,1:K(kindex),n)), [K(kindex) 1]) -
repmat(sin(varphiInterfering(1,1:K(kindex),n))', [1 K(kindex)])) );
oneminuscos = (1-cos(argumentsDesired)) + eye(K(kindex));

%Compute the uplink SE with MR combining
SE_MR_LoS(kindex,mindex) = SE_MR_LoS(kindex,mindex) +
sum(log2(1 + SNR*M(mindex)*ones(1,K(kindex))) ./ ((SNR/M(mindex))*sum(
(1-cos(M(mindex)*argumentsDesired)) ./ oneminuscos,1) +
(SNR/M(mindex))*betabar*sum((1-cos(M(mindex)*argumentsInterfering)) ./
(1-cos(argumentsInterfering)), 1) + 1)))/numberOfRealizations;

%Compute the SE with M-MMSE under LoS propagation

%Compute the M-MMSE combining vectors
MMMSEvectors = ( SNR*
H_LoS_desired(1:M(mindex),1:K(kindex),n)*H_LoS_desired(1:M(mindex),1:K(
kindex),n)' +
SNR*H_LoS_interfering(1:M(mindex),1:K(kindex),n)*H_LoS_interfering(1:M(
mindex),1:K(kindex),n)' + eye(M(mindex))) \
(SNR*H_LoS_desired(1:M(mindex),1:K(kindex),n)));

%Compute the intra-cell channel powers after M-MMSE
combining
channelgainsIntracell =
abs(MMMSEvectors'*H_LoS_desired(1:M(mindex),1:K(kindex),n)).^2;

%Extract desired signal power for each UE
signalpowers = diag(channelgainsIntracell);

%Extract and compute interference powers for each UE
interferencepowers = sum(channelgainsIntracell,2) -
signalpowers +
sum(abs(MMMSEvectors'*H_LoS_interfering(1:M(mindex),1:K(kindex),n)).^2,
2);

%Compute the effective 1/SNR after noise amplification
scalednoisepower = (1/SNR)*sum(abs(MMMSEvectors').^2,2);

%Compute the uplink SE with M-MMSE combining
SE_MMSE_LoS_montecarlo(kindex,mindex) =
SE_MMSE_LoS_montecarlo(kindex,mindex) + sum(log2(1 +
signalpowers./(interferencepowers+scalednoisepower)))/numberOfRealizati
ons;

```

```

        %Compute the SE with MR under NLoS propagation, for one
realization of the Rayleigh fading

        %Compute the MR combining vectors
MRvectors = H_NLoS_desired(1:M(mindex),1:K(kindex),n);

        %Compute the intra-cell effective channel gains after MR
filtering
        channelgainsIntracell =
abs(MRvectors'*H_NLoS_desired(1:M(mindex),1:K(kindex),n)).^2;

        %Extract desired signal power for each UE
signalpowers = diag(channelgainsIntracell);

        %Extract and compute interference powers for each UE
interferencepowers = sum(channelgainsIntracell,2) -
signalpowers +
sum(abs(MRvectors'*H_NLoS_interfering(1:M(mindex),1:K(kindex),n)).^2,2)
;

        %Compute the effective 1/SNR after noise amplification
scalednoisepower = (1/SNR)*sum(abs(MRvectors').^2,2);

        %Compute the uplink SE with MR combining
SE_MR_NLoS_montecarlo(kindex,mindex) =
SE_MR_NLoS_montecarlo(kindex,mindex) + sum(log2(1 +
signalpowers./(interferencepowers+scalednoisepower)))/numberOfRealizati
ons;

        %Compute the SE with M-MMSE under NLoS propagation for one
%realization of the Rayleigh fading

        %Compute the M-MMSE combining filter
MMMSEvectors = ( SNR*
H_NLoS_desired(1:M(mindex),1:K(kindex),n)*H_NLoS_desired(1:M(mindex),1:
K(kindex),n)' + SNR*
H_NLoS_interfering(1:M(mindex),1:K(kindex),n)*H_NLoS_interfering(1:M(mi
ndex),1:K(kindex),n)' + eye(M(mindex)) ) \
(SNR*H_NLoS_desired(1:M(mindex),1:K(kindex),n)));

        %Compute the intra-cell effective channel gains after MSE
filtering
        channelgainsIntracell =
abs(MMMSEvectors'*H_NLoS_desired(1:M(mindex),1:K(kindex),n)).^2;

        %Extract desired signal power for each UE
signalpowers = diag(channelgainsIntracell);

        %Extract and compute interference powers for each UE
interferencepowers = sum(channelgainsIntracell,2) -
signalpowers +
sum(abs(MMMSEvectors'*H_NLoS_interfering(1:M(mindex),1:K(kindex),n)).^2
,2);

```

```

        %Compute the effective 1/SNR after noise amplification
        scalednoisepower = (1/SNR)*sum(abs(MMMSEvectors').^2,2);

        %Compute the uplink SE with M-MMSE combining
        SE_MMSE_NLoS_montecarlo(kindex,mindex) =
SE_MMSE_NLoS_montecarlo(kindex,mindex) + sum(log2(1 +
signalpowers./(interferencepowers+scalednoisepower)))/numberOfRealizati
ons;

    end

end

end

%Compute the lower bound in (1.44) on the SE under NLoS propagation
SE_MR_NLoS_lower = zeros(length(K),length(M));

for mindex = 1:length(M)
    SE_MR_NLoS_lower(:,mindex) = K .* log2(1 + SNR*(M(mindex)-1) ./ (
(K-1)*SNR + K*SNR*betabar + 1 ) );
end

%% Plot the simulation results for MR combining
figure(1);
hold on; box on;

for mindex = 1:length(M)

    plot(K,SE_MR_LoS(:,mindex),'k-', 'LineWidth',1);
    plot(K(1),SE_MR_NLoS_montecarlo(1,mindex), 'bd-.', 'LineWidth',1);
    plot(K,SE_MR_NLoS_lower(:,mindex)', 'r--', 'LineWidth',1);

plot(K(5:5:end),SE_MR_NLoS_montecarlo(5:5:end,mindex), 'bd', 'LineWidth',
1);
    plot(K,SE_MR_NLoS_montecarlo, 'b-.', 'LineWidth',1);
end

xlabel('Number of UEs (K)');
ylabel('Average sum SE [bit/s/Hz/cell]');

legend('LoS', 'NLoS', 'NLoS (lower bound)', 'Location', 'NorthWest');

%% Plot the simulation results for M-MMSE combining
figure(2);
hold on; box on;

for mindex = 1:length(M)

```

```

    plot(K,SE_MMSE_LoS_montecarlo(:,mindex),'k-','LineWidth',1);
    plot(K,SE_MMSE_NLoS_montecarlo(:,mindex),'b-.','LineWidth',1);

end

xlabel('Number of UEs (K)');
ylabel('Average sum SE [bit/s/Hz/cell]');

legend('LoS','NLoS','Location','NorthWest');
ylim([0 120]);

```

## Compute SE with No. of UE and (M/K)

```

%Define the SNR
SNR = 1;

%Define betabar (strength of inter-cell interference)
betabar = 1e-1;

%Define the range of number of UEs
K = 1:20;

%Define range of antenna-UE ratios
c = [1 2 4 8];

%Extract the maximal number of UEs and BS antennas
Kmax = max(K);
Mmax = Kmax*max(c);

%Select number of Monte Carlo realizations for the line-of-sight (LoS)
%angles and of the non-line-of-sight (NLoS) Rayleigh fading
numberOfRealizations = 10000;

%Generate NLoS channels using uncorrelated Rayleigh fading
H_NLoS_desired =
sqrt(1/2)*(randn(Mmax,Kmax,numberOfRealizations)+1i*randn(Mmax,Kmax,num
berOfRealizations));
H_NLoS_interfering =
sqrt(betabar/2)*(randn(Mmax,Kmax,numberOfRealizations)+1i*randn(Mmax,Km
ax,numberOfRealizations));

%Generate random UE angles from 0 to 2*pi
varphiDesired = 2*pi*rand(1,Kmax,numberOfRealizations);
varphiInterfering = 2*pi*rand(1,Kmax,numberOfRealizations);

%Define the antenna spacing (in number of wavelengths)
antennaSpacing = 1/2;

%Generate LoS channels with different random UE angles

```

```

H_LoS_desired = exp( repmat((0:Mmax-1)', [1 Kmax numberOfRealizations])
.* repmat(-2i*pi*antennaSpacing*sin(varphiDesired), [Mmax 1 1]) );
H_LoS_interfering = sqrt(betabar)*exp( repmat((0:Mmax-1)', [1 Kmax
numberOfRealizations]) .* repmat(-
2i*pi*antennaSpacing*sin(varphiInterfering), [Mmax 1 1]) );

%Preallocate matrices for storing the simulation results
SE_MMSE_NLoS_montecarlo = zeros(length(K),length(c));
SE_MMSE_LoS_montecarlo = zeros(length(K),length(c));

%% Go through all Monte Carlo realizations
for n = 1:numberOfRealizations

    %Output simulation progress
    disp([num2str(n) ' realizations out of '
num2str(numberOfRealizations)]);

    %Go through the range of number of UEs
    for kindex = 1:length(K)

        %Go through the range of antenna-UE ratios
        for cindex = 1:length(c)

            %Compute the number of antennas
            M = K(kindex)*c(cindex);

            %Compute the SE with M-MMSE under LoS propagation for one
            %realization of the UE angles

            %Compute the M-MMSE combining filter
            MMMSEfilter = ( SNR*
H_LoS_desired(1:M,1:K(kindex),n)*H_LoS_desired(1:M,1:K(kindex),n)' +
SNR*H_LoS_interfering(1:M,1:K(kindex),n)*H_LoS_interfering(1:M,1:K(kind
ex),n)' + eye(M) ) \ (SNR*H_LoS_desired(1:M,1:K(kindex),n));

            %Compute the intra-cell effective channel gains after M-
            MMSE filtering
            channelgainsIntracell =
            abs(MMMSEfilter'*H_LoS_desired(1:M,1:K(kindex),n)).^2;

            %Extract desired signal power for each UE
            signalpowers = diag(channelgainsIntracell);

            %Extract and compute interference powers for each UE
            interferencepowers = sum(channelgainsIntracell,2) -
            signalpowers +
            sum(abs(MMMSEfilter'*H_LoS_interfering(1:M,1:K(kindex),n)).^2,2);

            %Compute the effective 1/SNR after noise amplification
            scalednoisePower = (1/SNR)*sum(abs(MMMSEfilter').^2,2);

```

```

        %Compute the uplink SE with M-MMSE combining
        SE_MMSE_LoS_montecarlo(kindex,cindex) =
SE_MMSE_LoS_montecarlo(kindex,cindex) + sum(log2(1 +
signalpowers./(interferencepowers+scalednoisepower)))/numberOfRealizati
ons;

        %Compute the SE with M-MMSE under NLoS propagation for one
        %realization of the Rayleigh fading

        %Compute the M-MMSE combining filter
        MMMSEfilter = ( SNR*
H_NLoS_desired(1:M,1:K(kindex),n)*H_NLoS_desired(1:M,1:K(kindex),n)' +
SNR*
H_NLoS_interfering(1:M,1:K(kindex),n)*H_NLoS_interfering(1:M,1:K(kindex
),n)' + eye(M) ) \ (SNR*H_NLoS_desired(1:M,1:K(kindex),n));

        %Compute the intra-cell effective channel gains after MSE
filtering
        channelgainsIntracell =
abs(MMMSEfilter'*H_NLoS_desired(1:M,1:K(kindex),n)).^2;

        %Extract desired signal power for each UE
        signalpowers = diag(channelgainsIntracell);

        %Extract and compute interference powers for each UE
        interferencepowers = sum(channelgainsIntracell,2) -
signalpowers +
sum(abs(MMMSEfilter'*H_NLoS_interfering(1:M,1:K(kindex),n)).^2,2);

        %Compute the effective 1/SNR after noise amplification
        scalednoisepower = (1/SNR)*sum(abs(MMMSEfilter').^2,2);

        %Compute the uplink SE with M-MMSE combining
        SE_MMSE_NLoS_montecarlo(kindex,cindex) =
SE_MMSE_NLoS_montecarlo(kindex,cindex) + sum(log2(1 +
signalpowers./(interferencepowers+scalednoisepower)))/numberOfRealizati
ons;

    end

end

end

%% Plot the simulation results
figure(1);
hold on; box on;

for cindex = 1:length(c)

    plot(K,SE_MMSE_LoS_montecarlo(:,cindex),'k-','LineWidth',1);
    plot(K,SE_MMSE_NLoS_montecarlo(:,cindex),'b-.','LineWidth',1);

```

```

end

xlabel('Number of UEs (K)');
ylabel('Average sum SE [bit/s/Hz/cell]');

legend('LoS', 'NLoS', 'Location', 'NorthWest');
ylim([0 120]);

```

## SNR and SE

```

%Define the SNR range for analytical curves
SNRdB = -10:0.1:30;
SNR = 10.^(SNRdB/10);

%Define the SNR range for Monte Carlo simulations
SNRdB_montecarlo = -10:5:30;
SNR_montecarlo = 10.^(SNRdB_montecarlo/10);

%Define the different beta_bar values (strength of inter-cell
interference)
betabar = [1e-1 1e-3];

%Preallocate matrices for storing the simulation results
SE_LoS = zeros(length(betabar),length(SNR));
SE_NLoS = zeros(length(betabar),length(SNR));
SE_NLoS_montecarlo = zeros(length(betabar),length(SNR_montecarlo));

%Select number of Monte Carlo realizations of the Rayleigh fading
numberOfFadingRealizations = 100000;

% Go through different strengths of the interference
for b = 1:length(betabar)

    %Compute SE under line-of-sight (LoS) propagation
    SE_LoS(b,:) = log2(1+SNR./(betabar(b)*SNR+1));

    %Generate uncorrelated Rayleigh fading channel realizations
    fadingRealizationsDesired =
    (randn(numberOfFadingRealizations,1)+1i*randn(numberOfFadingRealization
s,1))/sqrt(2);
    fadingRealizationsInterference =
    (randn(numberOfFadingRealizations,1)+1i*randn(numberOfFadingRealization
s,1))/sqrt(2);

    %Compute SE under non-line-of-sight (NLoS) propagation , using
Monte Carlo simulations for the channel realizations
    SE_NLoS_montecarlo(b,:) =
    mean(log2(1+abs(fadingRealizationsDesired).^2*SNR_montecarlo ./ (

```

```

abs(fadingRealizationsInterference).^2*SNR_montecarlo*betabar(b
+1)),1);

    %Compute SE under non-line-of-sight (NLoS) propagation
    SE_NLoS(b,:) = (exp(1./SNR).*expint(1./SNR) -
exp(1./betabar(b)*SNR)).*expint(1./betabar(b)*SNR))/((1-
betabar(b))*log(2));

end

%% Plot the simulation results
figure;
hold on; box on;

for b = 1:length(betabar)

    plot(SNRdB,SE_LoS(b,:), 'k-', 'LineWidth',1);
    plot(SNRdB_montecarlo(1),SE_NLoS_montecarlo(1), 'bd-
.', 'LineWidth',1);
    plot(SNRdB_montecarlo,SE_NLoS_montecarlo, 'bd', 'LineWidth',1);
    plot(SNRdB,SE_NLoS(b,:), 'b-', 'LineWidth',1);

end

xlabel('SNR [dB]');
ylabel('Average SE [bit/s/Hz]');

legend('LoS', 'NLoS', 'Location', 'SouthEast');
ylim([0 10]);

```

## SE and Num of antenna

```

%Number of BSs
L = 16;

%Number of UEs per BS
K = 10;

%Define the range of BS antennas
Mrange = 10:10:100;

%Extract maximum number of BS antennas
Mmax = max(Mrange);

%Define the range of pilot reuse factors
fRange = [1 2 4];

%Select the number of setups with random UE locations

```

```

nbrOfSetups = 100;

%Select the number of channel realizations per setup
nbrOfRealizations = 100;

%% Propagation parameters

%Communication bandwidth
B = 20e6;

%Total uplink transmit power per UE (mW)
p = 100;

%Noise figure at the BS (in dB)
noiseFigure = 7;

%Compute noise power
noiseVariancedBm = -174 + 10*log10(B) + noiseFigure;

%Select length of coherence block
tau_c = 200;

%Use the approximation of the Gaussian local scattering model
accuracy = 2;

%Angular standard deviation in the local scattering model (in degrees)
ASDdeg = 10;

%Prepare to save simulation results
sumSE_MR = zeros(length(Mrange),length(fRange),nbrOfSetups);
sumSE_ZF = zeros(length(Mrange),length(fRange),nbrOfSetups);
sumSE_RZF = zeros(length(Mrange),length(fRange),nbrOfSetups);
sumSE_SMMSE = zeros(length(Mrange),length(fRange),nbrOfSetups);
sumSE_MMMSE = zeros(length(Mrange),length(fRange),nbrOfSetups);

%% Go through all setups
for n = 1:nbrOfSetups

    %Output simulation progress
    disp([num2str(n) ' setups out of ' num2str(nbrOfSetups)]);

    %Compute channel statistics for one setup
    [R,channelGaindB] = functionExampleSetup(L,K,Mmax,accuracy,ASDdeg);

    %Compute the normalized average channel gain, where the
    normalization
    %is based on the noise power
    channelGainOverNoise = channelGaindB - noiseVariancedBm;

    %Go through all number of antennas

```

```

for m = 1:length(Mrange)

    %Output simulation progress
    disp([num2str(m) ' antennas out of ' num2str(length(Mrange))]);

    %Go through all pilot reuse factors
    for s = 1:length(fRange)

        %Extract pilot reuse factor
        f = fRange(s);

        %Generate channel realizations with estimates and
estimation
        %error correlation matrices
        [Hhat,C,tau_p,Rscaled] =
functionChannelEstimates(R(1:Mrange(m),1:Mrange(m),:,:,:),channelGainOverNoise,nbrOfRealizations,Mrange(m),K,L,p,f);

        %Compute SEs
        [SE_MR,SE_RZF,SE_MMMSE,SE_ZF,SE_SMMSE] =
functionComputeSE(Hhat,C,Rscaled,tau_c,tau_p,nbrOfRealizations,Mrange(m),K,L,p);

        %Save average sum SE per cell
        sumSE_MR(m,s,n) = mean(sum(SE_MR,1));
        sumSE_ZF(m,s,n) = mean(sum(SE_ZF,1));
        sumSE_SMMSE(m,s,n) = mean(sum(SE_SMMSE,1));
        sumSE_RZF(m,s,n) = mean(sum(SE_RZF,1));
        sumSE_MMMSE(m,s,n) = mean(sum(SE_MMMSE,1));

        %Delete large matrices
        clear Hhat C Rscaled;

    end

end

%Delete large matrices
clear R;

end

%% Plot the simulation results
for s = 1:length(fRange)

    figure(s);
    hold on; box on;

    plot(Mrange,mean(sumSE_MMMSE(:,s,:),3),'rd-','LineWidth',1);
    plot(Mrange,mean(sumSE_SMMSE(:,s,:),3),'b:','LineWidth',1);
    plot(Mrange,mean(sumSE_RZF(:,s,:),3),'k-.','LineWidth',1);
    plot(Mrange,mean(sumSE_ZF(:,s,:),3),'r--','LineWidth',1);

```

```
plot(Mrange,mean(sumSE_MR(:,s,:),3),'bs-','LineWidth',1);  
  
xlabel('Number of antennas (M)');  
ylabel('Average sum SE [bit/s/Hz/cell]');  
legend('M-MMSE','S-MMSE','RZF','ZF','MR','Location','NorthWest');  
ylim([0 60]);
```

```
end
```