الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصيـــة ITU-R P.1407-4

(2009/10)

الانتشار عبر مسيرات متعددة وتحديد معلمات خصائصه

السلسلة P

انتشار الموجات الراديوية

الاتحاد الدولي للاتصالات

تمهيـــد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد لمدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/publ/R-REC/en)

السلسلة	العنـــوان
BO	البث الساتلي
BR	التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية
BS	الخدمة الإذاعية (الصوتية)
BT	الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)
F	الخدمة الثابتة
M	الخدمة المتنقلة وخدمة التحديد الراديوي للموقع وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة
P	انتشار الموجات الراديوية
RA	علم الفلك الراديوي
S	الخدمة الثابتة الساتلية
RS	أنظمة الاستشعار عن بعد
SA	التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية
SF	تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة
SM	إدارة الطيف
SNG	التجميع الساتلي للأخبار
TF	إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت
V	المفردات والمواضيع ذات الصلة

ملاحظة: *تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.*

النشر الإلكتروني
جنيف، 2010

© ITU 2010

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذه المنشورة بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

التوصيـــة ITU-R P.1407-4

الانتشار عبر مسيرات متعددة وتحديد معلمات خصائصه

(المسألة ITU-R 203/3)

(2009-2007-2005-2003-1999)

مجال التطبيق

تشرح التوصية ITU-R P.1407 طبيعة الانتشار عبر مسيرات متعددة وتحدد المعلمات المناسبة للوصف الإحصائي لتأثيرات المسيرات المتعددة وتقدم أمثلة على تأثيرات الترابط فيما بين مسيرات الانتشار وحسابها.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) ضرورة تقدير تأثيرات المسيرات المتعددة على الخدمات التي تستخدم الأنظمة الرقمية؛

ب) أنه من المحبذ توحيد المصطلحات والتعابير المستخدمة في وصف المسيرات المتعددة،

توصـــي

1 باستخدام المصطلحات والتعاريف الواردة في الملحق 1 لوصف مفاهيم المسيرات المتعددة على نحو متسق؛

2 باستخدام مفاهيم الترابط الواردة في الملحق 2 لتحليل تأثيرات الأنظمة ذات المدخلات والمخرجات المتعددة (MIMO).

الملحق 1

1 مقدمة

في الأنظمة الراديوية ذات الهوائيات منخفضة الارتفاع، كثيراً ما تكون هناك مسيرات غير مباشرة متعددة بين المرسل والمستقبل جراء الانعكاسات من الأشياء المحيطة بهما، وذلك بالإضافة إلى المسير المباشر عند وجود خط بصر بينهما. ولهذا الانتشار متعدد المسيرات أهمية خاصة في البيئات الحضرية، حيث ترتد انعكاسات قوية عن أوجه الأبنية وأسطح الطرق المعبدة. وفي المحصلة، تتألف الإشارة المستقبَلة من مجموع عناصر عدة تختلف اتساعاتها وزوايا طورها واتجاهات ورودها.

ويمكن اعتبار أن هناك نظامين للتباين المكاني الناتج في شدة الإشارة:

أ) الخبو السريع الذي يتغيّر عبر مسافات من مضاعفات طول الموجة بفعل التغيّرات في زوايا الطور لمختلف مكونات الإشارة في المقام الأول؛

ب) الخبو البطيء الذي يتغيّر عبر مسافات أطول ويعزى أساساً إلى تغيّرات في خسارة الحجب بالأشياء المحيطة.

وعلاوة على ذلك، يمكن لمختلف مكونات الإشارة أن تتعرض لإزاحة دوبلر (Doppler) بمقادير مختلفة نتيجةً لحركة الأجهزة المتنقلة أو أشياء عاكسة مثل المركبات.

ويمكن وصف القناة المتنقلة ذات المسيرات المتعددة بدلالة استجابتها النبضية التي تتغير بمعدل يتوقف على سرعة حركة الجهاز المتنقل و/أو الناثرات. لذلك، يجب أن يكون المستقبل قادراً على التعامل مع تشوه الإشارة الناجم عن أصداء في القناة، وكذلك مع التغيّرات السريعة في طبيعة هذا التشوه. ويرد وصف مثل هذه الخصائص لقناة راديوية متنقلة في المظاهر الجانبية لتأخر القدرة وأطياف دوبلر التي يمكن الحصول عليها من قياسات سبر القناة عريضة النطاق.

وتبدي الإشارات المرسلة من وإلى المركبات المتنقلة في بيئات حضرية أو حراجية تقلبات متطرفة في الاتساع بحكم الانتشار المتعدد. وتشيع حالات خبو بمقدار 30 dB أو أكثر دون المستوى المتوسط. ويتخذ الشكل الإحصائي لشدة المجال الآنية، لدى قياسها على مسافات تبلغ بضع عشرات من أطوال الموجة، توزيع رايلي (Rayleigh) تقريباً. وتتفاوت كثيراً القيم المتوسطة للتوزيعات القطاعية الصغيرة هذه من منطقة إلى أخرى، حسب ارتفاع وكثافة وتوزيع التلال والأشجار والأبنية والهياكل الأخرى.

وخصائص الانتشار متعدد المسيرات هي أحد العوامل الرئيسية في التحكم بجودة الاتصالات المتنقلة الرقمية. ومادياً، فإن خصائص الانتشار متعدد المسيرات تعني ضمناً عدد المسيرات المتعددة والاتساع وفارق طول المسير (التأخر) وزاوية الورود. ويمكن وصف هذه الخصائص من المظهر الجانبي لتأخر القدرة. وبدلاً من ذلك، فإن تحويل فوريه (Fourier) للاستجابة النبضية المعقدة ينتج عنه دالة نقل معقدة تعطي خصائص الاتساع مقابل التردد الخاصة بها الانتقائية الترددية لتعدد المسيرات، وتتصل بعرض نطاق الارتباط.

وترد في الفقرتين 2 و3 تعاريف معلمات قناة القطاع الصغير (أو الحجم الصغير). وبعد ذلك، تُستعمل إحصاءات معلمات الحجم الصغير لإيجاد دالات التوزيع التراكمية (CDF). وتغطي دالة التوزيع التراكمية للحجم المتوسط أحد طرق القياس التي تمتد بواقع عشرات إلى مئات الأمتار. وتُعتبر مجموعة البيانات المجمعة من عدد من الطرق متوسطة الحجم وصفاً واسع النطاق أو شاملاً يمثّل البيئة المستطلَعة، من قبيل التضاريس الجبلية وبيئة مدن وضواحيها وغرف كبيرة داخل المباني وممرات، وما إلى ذلك.

ويمكن وصف قناة خطية متغيّرة مع الوقت بمرشاح مستعرض خطي. ويحوي خرج هذا المرشاح مجموع نسخ عن إشارة الدخل مؤخرة وموهّنة ومنزاحة دوبلرياً. ثم تمثَّل القناة بدالة تمديد دوبلر للتأخر التي يشار إليها أحياناً بدالة التناثر. وتمثل هذه البدالة ظاهرة تعدد المسيرات بالأبعاد الثلاثة لفائض التأخر وتردد دوبلر وكثافة القدرة. وتلائم هذه الصيغة بصورة خاصة تحقيق محاكاة العتاد في شكل مرشاح مستعرض دينامي.

2 معلمات المظاهر الجانبية للتأخر

1.2 تعاريف المظهر الجانبي لتأخر القدرة

يمكن حساب المعلمات المناسبة للوصف الإحصائي لزمن التأخر الناجم عن تعدد المسيرات من أي نوع من الأنواع الثلاثة للمظاهر الجانبية لتأخر القدرة: المظهر الجانبي للتأخر اللحظي في القدرة؛ أو المظهر الجانبي لتأخر القدرة قصير الأمد؛ أو المظهر الجانبي لتأخر القدرة طويل الأمد، وهي جميعها إما متوسطات زمنية يتحصل عليها عندما يكون المستقبل ثابتاً وتمثل تغايرات في البيئة، أو متوسطات مكانية يتحصل عليها عندما يكون المستقبل متحركاً.

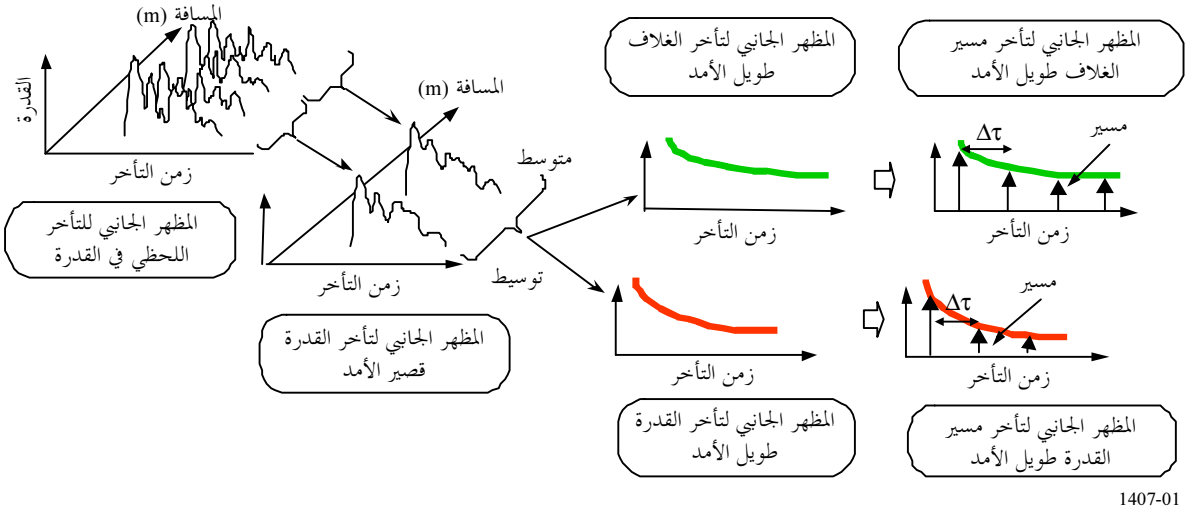
وتُقدم تعاريف المظاهر الجانبية لتأخر القدرة على النحو المبين في الشكل 1.

والمظهر الجانبي للتأخر اللحظي في القدرة هو كثافة قدرة الاستجابة النبضية عند لحظة معينة وعند نقطة معينة.

في حين يتحصل على المظهر الجانبي لتأخر القدرة قصير الأمد من خلال التوسيط المكاني للمظاهر الجانبية للتأخر اللحظي في القدرة عبر عدة عشرات من الأطوال الموجية داخل المدى الذي يتم فيه الحفاظ على نفس مكونات المسيرات المتعددة من أجل القضاء على التغاير الناجم عن الخبو السريع.

الشـــكل 1

تعريف المظاهر الجانبية لتأخر القدرة



ويتحصل على المظهر الجانبي لتأخر القدرة طويل الأمد من التوسيط المكاني للمظاهر الجانبية لتأخر القدرة قصير الأمد على نفس المسافة تقريباً من المحطة القاعدة (BS) من أجل القضاء على التغايرات الناجمة عن الحجب.

والمظاهر الجانبية لتأخر القدرة طويل الأمد ذات الزيادة الواضحة في زمن التأخير، تتم معايرتها باستبانة زمنية قدرها $1/B$، حيث B هو عرض النطاق، وتعرف بأنها مظاهر جانبية لتأخر مسير قدرة طويل الأمد بدلاً من مظاهر جانبية مستمرة لتأخر القدرة.

ومن ناحية أخرى، يعرف المظهر الجانبي لتأخر الغلاف طويل الأمد بأنه القيمة المتوسطة للمظاهر الجانبية لتأخر القدرة قصير الأمد عند نفس المسافة تقريباً من المحطة القاعدة؛ وهو يعبر عن شكل المظهر الجانبي للتأخر عند المنطقة المعنية.

2.2 تعاريف المعلمات الإحصائية

ترد أدناه المعلمات المناسبة للوصف الإحصائي لتأثيرات المسيرات المتعددة. *ومتوسط التأخر* هو المتوسط المرجح لقدرة فائض التأخرات المقيس ويعطى بالعزم الأول للمظهر الجانبي لتأخر القدرة (مربع اتساع الاستجابة النبضية).

وامتداد التأخر الفعال (r.m.s.) هو الانحراف المعياري المرجح لقدرة فائض التأخرات ويعطى بالعزم الثاني للمظهر الجانبي لتأخر القدرة. وهو يوفر مقياساً لقابلية تغيّر متوسط التأخر.

ونافذة التأخر هي طول القسم المتوسط من المظهر الجانبي لتأخر القدرة الذي يحوي نسبة مئوية معينة (90% عادةً) من مجمل القدرة الموجودة في تلك الاستجابة النبضية.

ويعرَّف *فاصل التأخر* على أنه طول الاستجابة النبضية بين قيمتي فائض التأخر اللتان تشيران إلى أول مرة يتجاوز فيها اتساع الاستجابة النبضية عتبة معينة، وآخر مرة يهبط دونها. وتتوقف العتبة المستعملة على المدى الديناميّ لتجهيزات القياس: وتقع القيمة النمطية بمقدار 20 dB دون مستوى الذروة للمظهر الجانبي للتأخر.

ويعرَّف *عرض نطاق الترابط* على أنه نطاق الترددات الذي تقع فيه دالة الترابط الذاتي لدالة النقل فوق عتبة معينة؛ وتبلغ قيمة نمطية للعتبة 0,5.

و*عدد المسيرات المتعددة أو مكونات الإشارة* هو عدد الذرى في مظهر جانبي لتأخر القدرة والتي يقع اتساعها ضمن dB A من أعلى ذروة وفوق المستوى الأدنى للضوضاء.

1.2.2 الطاقة الكلية

و*الطاقة الكلية*، P_m، للاستجابة النبضية هي:

$$P_m = \int_{t_0}^{t_3} P(t)\, \mathrm{d}\, t \tag{1}$$

حيث:

$P(t)$: كثافة القدرة للاستجابة النبضية

t: التأخر بالنسبة لمرجع زمني

t_0: اللحظة التي تتجاوز فيها $P(t)$ مستوى القطع لأول مرة

t_3: اللحظة التي تتجاوز فيها $P(t)$ مستوى القطع لآخر مرة.

2.2.2 متوسط زمن التأخر

ويعطى متوسط التأخر، T_D، بالعزم الأول للمظهر الجانبي لتأخر القدرة:

$$T_D = \frac{\int_0^{\tau_e} \tau P(\tau)\ \mathrm{d}\,\tau}{\int_0^{\tau_e} P(\tau)\ \mathrm{d}\,\tau} - \tau_a \tag{2a}$$

حيث:

τ: متغيّر فائض تأخر زمني ويساوي $t - t_0$

τ_a: وقت ورود أول مكوّن مستقبَل من المسيرات المتعددة (الذروة الأولى في المظهر الجانبي)

$\tau_e = t_0 - t_3$.

وفي الشكل المنفصل، تصبح المعادلة (2a):

$$T_D = \frac{\sum_{i=1}^{N} \tau_i P(\tau_i)}{\sum_{i=1}^{N} P(\tau_i)} - \tau_M \tag{2b}$$

$$\tau_i = (i-1)\,\Delta\tau = (i-1)/B \qquad (i = 1, 2, \ldots, N)$$

حيث $i = 1$ وN هما مؤشران عن العينة الأولى والأخيرة في المظهر الجانبي للتأخر فوق مستوى العتبة، على التوالي، وM هو المكون الأول المستقبَل من المسيرات المتعددة (الذروة الأولى في المظهر الجانبي).

ويمكن تحديد التأخرات من العلاقة التالية:

$$t_i(\mu\mathrm{s}) = 3.3 r_i \qquad \mathrm{km} \tag{3}$$

حيث r_i هو مجموع المسافات من المرسل إلى عاكس المسيرات المتعددة، ومن العاكس إلى المستقبل، أو هو مجمل المسافة من المرسل إلى المستقبل لـ t_{LOS}.

3.2.2 جذر متوسط التربيع لامتداد التأخر

ويعرَّف جذر متوسط التربيع (r.m.s.) لامتداد التأخر بالجذر التربيعي للعزم المركزي الثاني:

$$S = \sqrt{\frac{\int_0^{\tau_e} (\tau - T_D - \tau_a)^2 P(\tau)\, \mathrm{d}\tau}{\int_0^{\tau_e} P(\tau)\, \mathrm{d}\tau}} \tag{4a}$$

وفي صورة مختلفة مع الاستبانة الزمنية $\Delta\tau$، تصبح المعادلة (4a) كالتالي:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\tau_i - T_D - \tau_M)^2 P(\tau_i)}{\sum_{i=1}^{N} P(\tau_i)}} \tag{4b}$$

4.2.2 نافذة التأخر

ونافذة التأخر، W_q، هي طول القسم الأوسط من المظهر الجانبي لتأخر القدرة الذي يحوي نسبة مئوية معينة، q، من القدرة الكلية:

$$W_q = (t_2 - t_1) \tag{5}$$

حيث يعرَّف الحدان t_1 وt_2 بالمعادلة:

$$\int_{t_1}^{t_2} P(t)\, \mathrm{d}t = \frac{q}{100} \int_{t_0}^{t_3} P(t)\, \mathrm{d}t = \frac{q}{100} P_m \tag{6}$$

وتنقسم الطاقة خارج النافذة إلى شطرين متساويين $\left(\frac{100 - q}{200}\right) P_m$.

5.2.2 فاصل التأخر

ويعرّف فاصل التأخر، I_{th}، على أنه الفارق الزمني بين اللحظة t_4 عندما يتجاوز اتساع المظهر الجانبي لتأخر القدرة عتبة معينة P_{th} لأول مرة، واللحظة t_5 عندما يهبط دون تلك العتبة للمرة الأخيرة:

$$I_{th} = (t_5 - t_4) \tag{7}$$

6.2.2 عرض نطاق ترابط التردد

ويوفر تحويل فوريه لكثافة قدرة الاستجابة النبضية الترابطَ الذاتي $C(f)$ لدالة النقل:

$$C(f) = \int_0^{\tau_e} P(\tau)\ \exp(-j\, 2\, \pi f \tau)\, \mathrm{d}\tau \tag{8}$$

وفي قناة ريسيان (Rician)، تقصّر المعادلة (8) في تقدير عرض نطاق الترابط. والأدق في مثل تلك القنوات أن يقدَّر عرض نطاق الترابط من دالة ترابط التردد المتباعد التي يُحصل عليها من دالة النقل المعقدة المتغيّرة مع الزمن بحساب معامل الترابط لمختلف المباعدات الترددية.

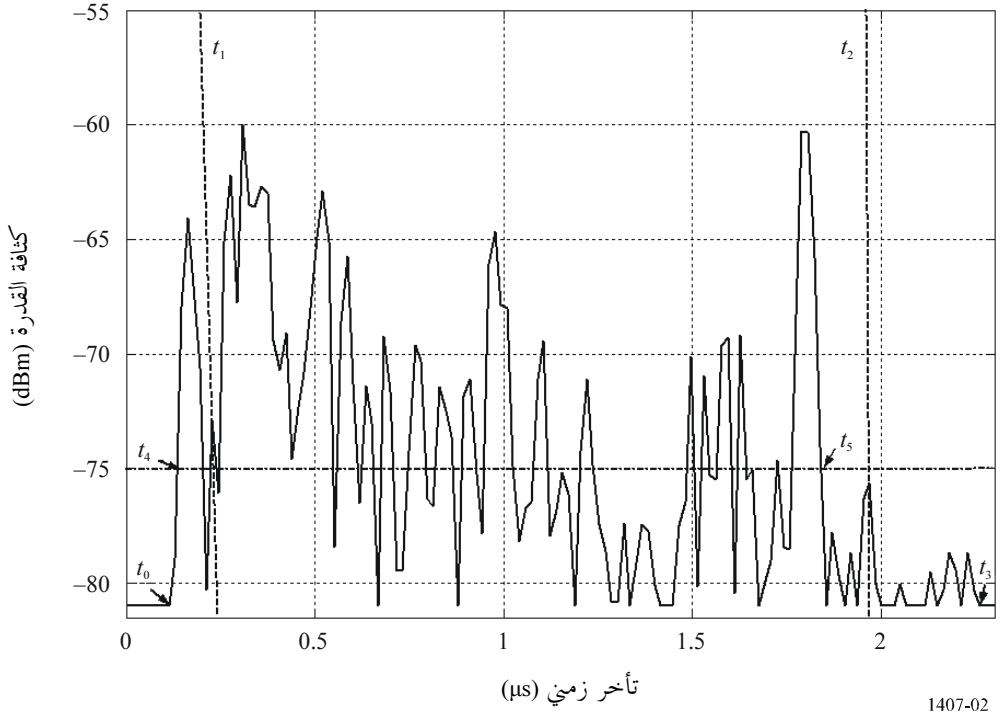
ويعرَّف عرض نطاق الترابط B_x على أنه التردد الذي يساوي فيه الترابط الذاتي $|C(f)|$ نسبة x% من $C(f = 0)$.

7.2.2 القيم الموصى بها للمعلمات

ويوصى من أجل تحليل البيانات بنوافذ تأخر لنسب 50% و75% و90% من القدرة، وبفواصل تأخر لعتبات مقدارها 9 و12 و15 dB دون الذروة وبعرض نطاق ترابط لنسبة 50% و90% من الترابط. وتجدر الإشارة إلى أن تأثيرات الضوضاء والإشارات الطفيلية في النظام (من الترددات الراديوية حتى معالجة البيانات) يمكن أن تكون كبيرة جداً. ومن ثم، من المهم أن تحدَد عتبة الضوضاء و/أو الإشارات الطفيلية بدقة في الأنظمة وأن يُتخذ هامش السلامة فوق ذلك. ويوصى بهامش للأمان قدره 3 dB لضمان سلامة النتائج. ويوصى بأن يكون الحد الأدنى لنسبة ذروة الإشارة إلى الإشارة الطفيلية، مثلاً، 15 dB (عدا هامش الأمان البالغ 3 dB)، وأن يُستعمل ذلك كمعيار قبول قبل إدراج الاستجابة النبضية في الإحصاءات.

ويرد في الشكل 2 مثال عن استعمال بعض هذه المصطلحات.

الشـــكل 2



مظهر جانبي لتأخر القدرة يبيّن المعلمات التالية: تُميَّز نافذة التأخر، W_{90}، الحاوية 90% من القدرة المستقبَلة بين خطين عموديين متقطعين (t_1 وt_2)، ويقع فاصل التأخر، I_{15}، الذي يحوي الإشارة فوق مستوى 15 dB دون الذروة بين t_4 وt_5. ويشير t_0 وt_3 إلى بداية ونهاية المظهر الجانبي فوق الحد الأدنى للضوضاء.

3 المعلمات المتعلقة باتجاه الورود

1.3 تعاريف المظاهر الجانبية لقدرة زاوية الورود

يمكن حساب المعلمات المناسبة للوصف الإحصائي لتأثيرات المسيرات المتعددة إما من مظاهر جانبية زاوية لحظية للقدرة أو من مظاهر جانبية زاوية للطاقة قصيرة أو طويلة المدى. وتمثل هذه القيمة إما المتوسطات الزمنية المتحصل عليها عندما يكون المستقبِل مستقراً وتمثل التحرك في البيئة، أو المتوسطات المكانية المتحصلة عندما يكون المستقبِل في حالة حركة.

وكما يبين الشكل 4، يتم الحصول على تعاريف المظاهر الجانبية لزاوية الورود.

والمظهر الجانبي للقدرة اللحظية لزاوية الورود هو كثافة قدرة الاستجابة النبضية عند لحظة معينة وعند نقطة معينة.

في حين يتحصل على المظهر الجانبي لقدرة زاوية الورود قصيرة الأمد من خلال التوسيط المكاني للمظاهر الجانبية للقدرة اللحظية لزاوية الورود عبر عدة عشرات من الأطوال الموجية داخل المدى الذي يتم فيه الحفاظ على نفس مكونات المسيرات المتعددة من أجل القضاء على التغاير الناجم عن الخبو السريع.

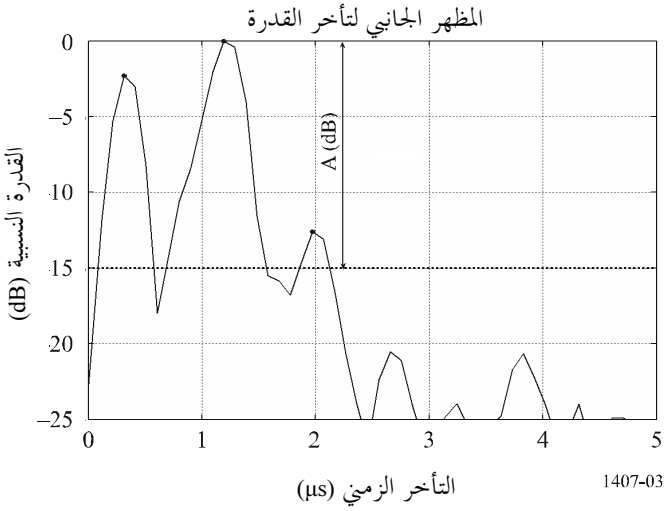
ويتحصل على المظهر الجانبي لقدرة زاوية الورود طويلة الأمد من التوسيط المكاني للمظاهر الجانبية لقدرة زاوية الورود قصيرة الأمد على نفس المسافة تقريباً من المحطة القاعدة (BS) من أجل القضاء على التغايرات الناجمة عن الحجب.

والمظاهر الجانبية لقدرة زاوية الورود طويلة الأمد ذات القيم الكبيرة للزاوية، تتم معايرتها بالاستبانة الزاوية للهوائي، وتعرف بأنها مظاهر لمسيرات قدرة زاوية الورود طويلة الأمد بدلاً من مظاهر جانبية مستمرة لقدرة زاوية الورود.

ومن ناحية أخرى، يعرف المظهر الجانبي لغلاف زاوية الورود طويل الأمد بأنه القيمة المتوسطة للمظاهر الجانبية لمسيرات قدرة زاوية الورود قصيرة الأمد عند نفس المسافة تقريباً من المحطة القاعدة؛ وهو يعبر عن شكل المظهر الجانبي لقدرة زاوية الورود عند المنطقة المعنية.

الشـــكل 3

المظهر الجانبي لتأخر القدرة مبيناً مكونات المسيرات المتعددة فوق مستوى العتبة



2.3 تعاريف المعلمات الإحصائية

يرد فيما يلي تعاريف المعلمات المناسبة للوصف الإحصائي لتأثيرات المسيرات المتعددة:

زاوية الورود المتوسطة هي متوسط القدرة المرجحة لاتجاهات الورود المقيسة ويعبر عنها باللحظة الأولى لطيف سمت القدرة (ويمكن أن يطلق عليها أيضاً المظهر الجانبي الزاوي للقدرة.)

والمظهر الجانبي الزاوي للقدرة هو الخاصية الزاوية للقدرة داخل سوية السمت/السوية الأفقية.

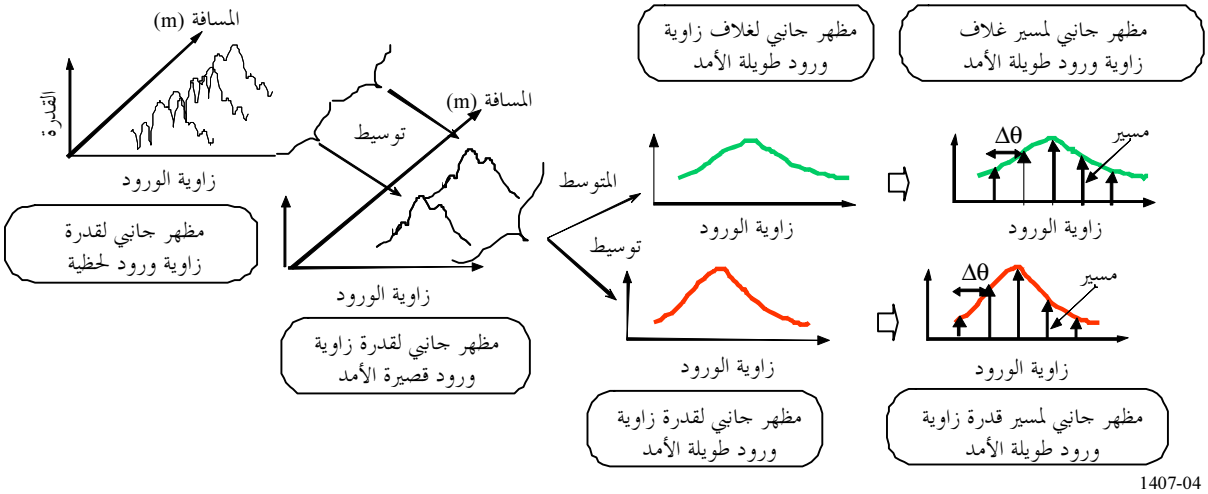
وجذر متوسط تربيع الانتشار الزاوي هو الانحراف المعياري للقدرة المرجحة لاتجاه الورود ويعبر عنه باللحظة الثانية للمظهر الجانبي الزاوي للقدرة. وهو يعطي مقياساً للتغير في متوسط زاوية الورود.

والنافذة الزاوية هي عرض الجزء الأوسط للمظهر الجانبي الزاوي للقدرة المحتوي على نسبة مئوية معينة معرفة من الطاقة الإجمالية الموجودة في قياس ذلك المظهر الجانبي الزاوي للقدرة.

وتعرف *الفترة الزاوية* (أو *التباعد الزاوي*) بأنها عرض الاستجابة النبضية (أو عرض المظهر الجانبي الزاوي) بين قيمتين لاتجاه الورود. وهي تحدد الزاوية الأولى التي يتجاوز فيها اتساع المظهر الجانبي الزاوي عتبة معينة والزاوية الأخيرة التي تقل فيها قيمة الاتساع عن هذه العتبة. وتعتمد العتبة المستخدمة على المدى الديناميي لجهاز القياس: تبلغ القيمة النموذجية dB 20 تحت سوية الذروة للمظهر الجانبي الزاوي.

الشـــكل 4

تعاريف المظاهر الجانبية لقدرة زاوية الورود



1.2.3 الطاقة الإجمالية

بفرض القدرة المستقبلة في الاتجاه θ هي $P(\theta)$.

فإن *الطاقة الإجمالية* P_0، للمظهر الجانبي الزاوي تعرف بأنها القدرة فوق سوية العتبة L_0 التي تفصل بين الإشارة والضوضاء، كما هو مبين في الشكل 5:

$$P_0 = \int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta)\mathrm{d}\theta \tag{9a}$$

حيث:

θ: تقاس بالتقدير الدائري من اتجاه الإشارة الأساسية (يفترض أن تكون مستقرة داخل فترة القياس)

$P(\theta)$: قدرة المظهر الجانبي الزاوي فوق سوية العتبة L_0؛ حيث إن القدرة أسفل السوية L_0، $P(\theta) = 0$

L_0: سوية مع هامش معين (يوصى بأن يكون dB 3) فوق أرضية الضوضاء

θ_0: هي زاوية الورود عندما تتجاوز $P(\theta)$ سوية العتبة للمرة الأولى في $\theta_{max}(-\pi, \pi)$

θ_3: هي زاوية الورود عندما تتجاوز $P(\theta)$ سوية العتبة L_0 للمرة الأخيرة في $\theta_{max}(-\pi, \pi)$.

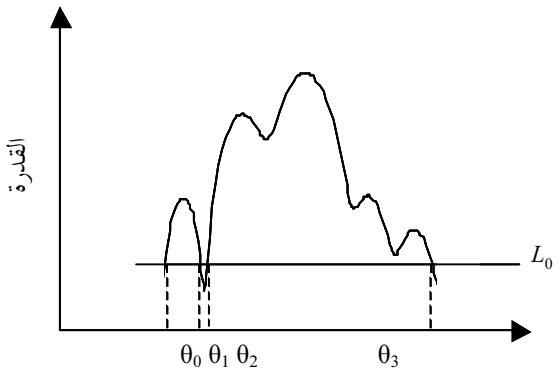
وتصبح الصورة المتفردة للمعادلة (9a) على النحو التالي:

$$P_0 = \sum_{i=1}^{N} P(\theta_i) \tag{9b}$$

حيث $i = 1$ وN هما رقما العينتين الأولى والأخيرة بالمظهر الجانبي الزاوي للقدرة اللتان تقعان فوق سوية العتبة، على التوالي.

الشـــكل 5

الطاقة الإجمالية



2.2.3 زاوية الورود المتوسط

زاوية الورود المتوسط، T_A، يُعبَّر عنها باللحظة الأولى للمظهر الجانبي الزاوي للقدرة:

$$T_A = \frac{1}{P_0}\int_{\theta_0}^{\theta_3} \theta P(\theta)\mathrm{d}\theta \tag{10a}$$

وهناك شكل مختلف للمعادلة (10a) مع الاستبانة الزاوية $\Delta\theta$، تكون على النحو التالي:

$$T_A = \frac{\sum_{i=1}^{N} \theta_i P(\theta_i)}{\sum_{i=1}^{N} P(\theta_i)} \tag{10b}$$

$$(\theta_i = (i-1)\,\Delta\theta \ (i = 1,2,\ldots..,N))$$

حيث $i = 1$ وN رقما العيّنتين الأولى والأخيرة بالمظهر الجانبي الزاوي للقدرة اللتان تقعان فوق سوية العتبة، على التوالي.

3.2.3 جذر متوسط تربيع (r.m.s) الانتشار الزاوي

يُعرَّف متوسط جذر تربيع الانتشار الزاوي S_A لاتجاه الورود على النحو التالي:

$$S_A = \sqrt{\frac{1}{P_0}\int_{\theta_0}^{\theta_3} (\theta - T_A)^2 P(\theta)\mathrm{d}\theta} \tag{11a}$$

وهناك صورة مختلفة للمعادلة (11a) مع الاستبانة الزاوية $\Delta\theta$، تكون على النحو التالي:

$$S_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\theta_i - T_A)^2 P(\theta_i)}{\sum_{i=1}^{N} P(\theta_i)}} \tag{11b}$$

حيث $i = 1$ وN هما رقما العيّنتين الأولى والأخيرة للمظهر الجانبي الزاوي للقدرة اللتان تقعان فوق سوية العتبة، على التوالي.

4.2.3 النافذة الزاوية

النافذة الزاوية θ_w هي عرض الجزء الأوسط للمظهر الجانبي الزاوي للقدرة الذي يحتوي على نسبة مئوية q من القدرة الإجمالية على النحو الموضح في الشكل 6:

$$\theta_w = \theta_{w2} - \theta_{w1} \tag{12}$$

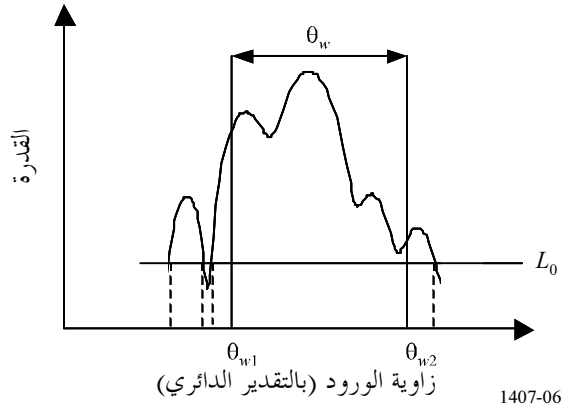
حيث يعرف الحدّان θ_{w1} و θ_{w2} على النحو التالي:

$$\int_{\theta_{w1}}^{\theta_{w2}} P(\theta)\,d\theta = \frac{q}{100}\int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta)\,d\theta = \frac{q}{100}P_0 \tag{13}$$

وتنقسم الطاقة خارج النافذة إلى جزأين متساويين $\left(\frac{100-q}{200}\right)P_0$.

الشـــكل 6

النافذة الزاوية



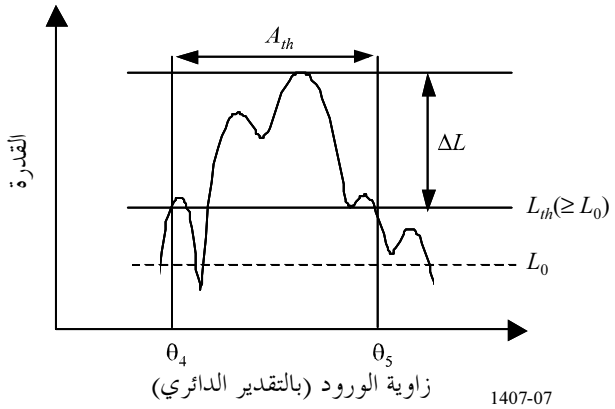
5.2.3 الفترة الزاوية (التباعد الزاوي)

تُعرّف الفترة الزاوية A_{th}، بأنها الفرق الزاوي بين الزاوية θ_4 عندما يتجاوز اتساع المظهر الجانبي الزاوي للقدرة للمرة الأولى عتبة معينة L_{th} والزاوية θ_5 عندما يقل الاتساع عن هذه العتبة للمرة الأخيرة كما هو مبين في الشكل 7:

$$A_{th} = \theta_5 - \theta_4 \tag{14}$$

الشـــكل 7

الفترة الزاوية



6.2.3 مسافة الترابط المكاني

بالنسبة للقنوات متعددة المدخلات ومتعددة المخرجات (MIMO) على وجه الخصوص، يتحصل على معامل الترابط المكاني لتباعدات مختلفة d من دالة النقل المعقدة المتغيرة زاوياً للمظهر الجانبي الزاوي للقدرة. ويحدد معامل الترابط المكاني $R(d)$، على النحو التالي:

$$R(d) = \frac{\int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta)\, \exp(-j2\pi d \sin\theta/\lambda)\, d\theta}{\int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta)\, d\theta} \tag{15}$$

حيث:

d: المسافة بالنسبة لتباعدات مختلفة

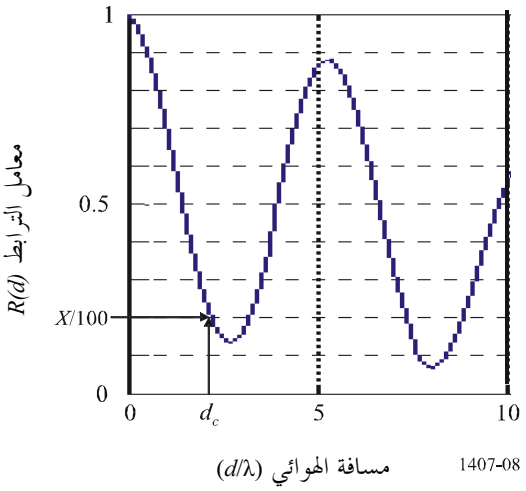
λ: طول الموجه.

وكما يبين الشكل 8، فإن مسافة الترابط المكاني d_c تُعرَّف بأنها مسافة القطع الأولى التي يساوي عندها $|R(d)|$ النسبة x% في $|R(d=0)|$.

$$|R(d_c)|/|R(0)| = x/100 \tag{16}$$

الشـــكل 8

مسافة الترابط المكاني



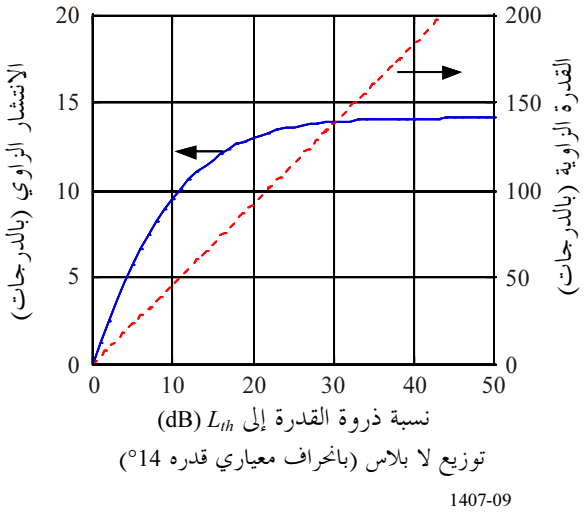
7.2.3 المعلمات الموصى بها

يوصى بأن تسمح النوافذ الزاوية لقدرات 50% و75% و90%، وكذلك الفترات الزاوية لعتبات قدرها 9 و12 و15 dB أسفل الذروة، ومسافات ترابط لترابط قدره 50% و90%، بتحليل مفصل للبيانات. وعلاوة على ذلك، من المفيد الإشارة إلى أن تأثيرات الضوضاء والإشارات الهامشية في النظام (من المعالجة من ترددات راديوية إلى بيانات) يمكن أن تكون كبيرة جداً. ومن ثم، فإنه من المهم تحديد عتبة الضوضاء و/أو عتبة الإشارات الهامشية للأنظمة بصورة دقيقة مع فرض هامش أمان فوقهما. ويُوصى بهامش أمان قدره 3 dB ولضمان سلامة النتائج يُوصى باستخدام حد أدنى من نسبة الذروة إلى الإشارة الهامشية قدره 15 dB مثلاً (مع استبعاد هامش الأمان البالغ 3 dB) كمعيار استثنائي يحد من المظاهر الجانبية الزاوية المتضمنة في الإحصائيات. ويبين الشكل 9 مثالاً لتأثير تحديد قيمة الحد الأدنى لنسبة الذروة إلى L_{th} (ΔL). ويُفترض في هذا الشكل أن

المظهر الجانبي للقدرة على شكل توزيع لا بلاس (La place) (توزيع أُسِّي مزدوج). مع انتشار زاوي بمقدار 14 درجة؛ ويتم حساب الانتشار الزاوي والفترة الزاوية كدالتين في النسبة ذروة القدرة إلى L_{th}. ويبين هذا الرقم أن هذه المعلمات تتعرض لتغيرات واضحة حتى بالنسبة للقيم المتماثلة في الأساس. بيد أنه يجب تحديد القيمة المستخدمة لـ (ΔL) في التقييم الإحصائي.

الشـــكل 9

مثال لتأثير الحد الأدنى لنسبة ذروة إلى L_{th} (ΔL)



الملحق 2

1 المقدمة

يوضح هذا الملحق بعض نتائج حساب معاملات الترابط من مظهر جانبي زاوي للقدرة وتأثير معاملات الترابط على سعات القنوات متعددة المدخلات متعددة المخرجات (MIMO).

2 حساب معاملات الترابط المكاني

تم استخدام التعريف الوارد في المعادلة (15) بالملحق 1 لحساب الترابط المكاني. ويقدم هذا الملحق باختصار النتيجة ويوضح كيف يتأثر الترابط بتباعد الهوائي.

ويبين الشكل 10 توزيع نموذجي مشذب على شكل لا بلاس لطيف سمت القدرة (PAS) مثل:

$$PAS_L(\varphi) = \sum_{k=1}^{N_c} \frac{Q_{L,k}}{\sigma_{L,k}\sqrt{2}} \exp\left[-\frac{\sqrt{2}\left|\varphi-\varphi_{0,k}\right|}{\sigma_{L,k}}\right]\left\{\varepsilon\left[\varphi-(\varphi_{0,k}-\Delta\varphi_k)\right]-\varepsilon\left[\varphi-(\varphi_{0,k}+\Delta\varphi_k)\right]\right\} \quad (17)$$

حيث $\varepsilon(\varphi)$ عبارة عن دالة درجية وN_c عدد المجموعات، $\varphi_{0,k}$ زاوية السقوط المتوسطة للمجموعة k-th، $\sigma_{L,K}$ الانتشار الزاوي. ويعرف PAS عبر $[\varphi_0 - \Delta\varphi, \varphi_0 + \Delta\varphi]$. ويفترض شرط تسوية القدرة على النحو التالي:

$$\sum_{k=1}^{N_c} Q_{L,k}\left[1-\exp\left(-\frac{\sqrt{2}\Delta\varphi_k}{\sigma_{L,k}}\right)\right]=1 \quad (18)$$

ويُستنتج معامل ترابط الغلاف من الصيغة:

$$\rho_e(D) = \left| R_{XX}(D) + jR_{XY}(D) \right|^2 \quad (19)$$

حيث:

D $=2\pi d/\lambda$

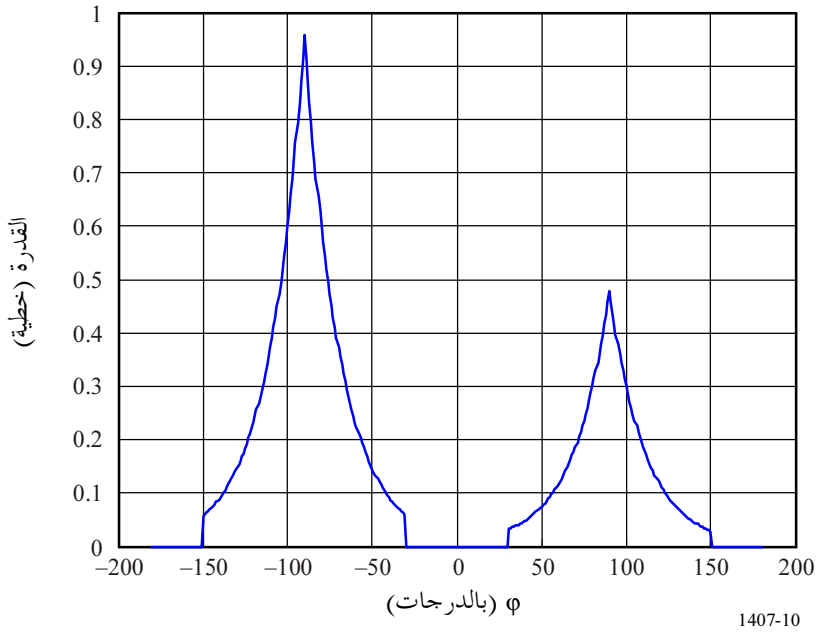
d: مباعدة الهوائي

λ: طول الموجة،

وتعرف دلتا الترابط المتبادل $R_{XX}(D)$ و$R_{XY}(D)$ في المعادلة (16).

الشـــكل 10

توزيع نموذج مشذب على شكل لا بلاس لطيف سمت القدرة

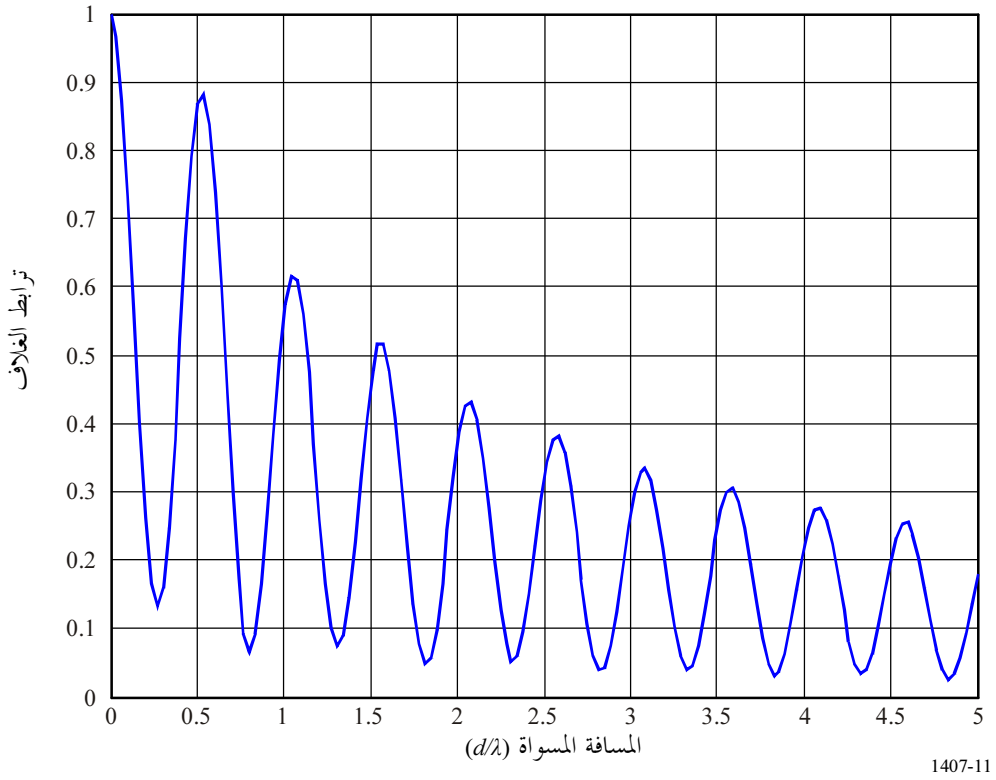


طيف سمت القدرة المسوّى على شكل لا بلاس بالنسبة لحالة المجموعتين $AS = 30°, \varphi_0 \in [-90^\circ, +90^\circ]$
أضف إلى ذلك أن المجموعة ذات +90° لها قدرة تساوي نصف قدرة الحالة ذات الزاوية -90°.

ويوضح الشكل 11 الترابط المكاني الناتج.

الشـــكل 11

الترابط المكاني الناتج



معامل ترابط الغلاف قبالة المسافة المسواة = d/λ بالنسبة لحالة المجموعتين المبينة في الشكل 10.

3 تأثير معاملات الترابط على سعات القنوات متعددة المدخلات متعددة المخرجات (MIMO)

بالنسبة لقنوات خبو رايلي، فإن السعة الطاقية للقنوات متعددة المدخلات متعددة المخرجات بدون معارف القناة عند المرسل تكون:

$$C = \log_2 \det\left(I_{n_R} + \frac{P}{n_T \sigma^2} R_R^{1/2} H_w R_T H_w^H \left(R_R^{1/2}\right)^H \right) = \log_2 \det\left(I_{n_R} + \frac{P}{n_T \sigma^2} H_w R_T H_w^H R_R^H \right) \quad (20)$$

حيث:

n_R و n_T: أعداد هوائيات المستقبِل والمرسِل، على التوالي

P: إجمالي القدرة المرسلة

I_{n_R}: مصفوفة هوية $n_R \times n_R$

$(\cdot)^H$ و $\det(\cdot)$: عمليتا الهرمتة والتحديد، على التوالي

H_w: مصفوفة عناصرها تتكون من متغيرات عشوائية مستقلة موزعة تماثلياً على شكل غوسي معقد متوسط قدره صفر ومعامل تفاوت قدره الوحدة

$(\cdot)^{½}$: الجذر التربيعي الهرميتي لمصفوفة.

وتحدد المصفوفتان R_R وR_T الترابطات المكانية بين المستقبلات والمرسلات، على التوالي، حيث تُعرَّف المصفوفة H بالصيغة التالية $H = R_R^{1/2} H_w R_T^{1/2}$, $R_R^{1/2}$ و $R_T^{1/2}$ عبارة عن مصفوفتين هرميتين محددتين موجبتين. وفي النهاية فإنه يفترض تسويتهما على النحو التالي: $[R_R]_{j,j}$ for $j = 1,K,n_R$ and $[R_T]_{i,i}$ for $i = 1,K,n_T$.

وبفرض أن R_R وR_T لهما الرتبة الكاملة وأن $n_R = n_T = n$، لذا فإنه عند نسبة إشارة إلى ضوضاء عالية يمكن تقريب السعة على النحو التالي:

$$C \approx \log_2 \det\left(\frac{P}{n_T \sigma^2} H_w H_w^H\right) + \log_2 \det(R_R) + \log_2 \det(R_T) \quad (21)$$

فإذا أشرنا إلى القيم الذاتية R_R = λ_i ، $i = 1,K,n$، لذا فإن $\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = n$. ومن علاقة عدم التساوي بين المتوسط الحسابي والمتوسط الهندسي:

$$\prod_{i=1}^{n} \lambda_i \leq 1 \quad (22)$$

وحيث إن: $\det(R_R) = \prod_{i=1}^{n} \lambda_i$ ، فهذا يعني أن $\log_2 \det(R_R) \leq 0$ ويكون صفر فقط إذا كانت كل القيم الذاتية لـ R_R متساوية، بمعنى أن تكون $R_R = I_n$. لذا، فإن الترابط يحدد سعة القنوات متعددة المدخلات متعددة المخرجات ويمكن الحصول على الفقد في السعة الطاقية عند نسبة إشارة إلى ضوضاء عالية بالصيغة $(\log_2 \det(R_R) + \log_2 \det(R_T))$ bit/s/Hz.

ويوضح الشكل 12 تأثير الترابط المكاني على السعة الطاقية لقناة متعددة المدخلات متعددة المخرجات عندما يكون $n_R = n_T = 2$. ويفترض في الشكل أن $R_T = I_2$. ويتم اختيار مصفوفة ترابط المستقبل على أساس الصيغة:

$$R_R = \begin{bmatrix} 1 & \rho_R \\ \rho_R^* & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

حيث ρ_R تشير إلى الترابط المكاني بين الهوائيات المستقبِلة.

الشـــكل 12

السعة الطاقية مع ترابط مستقبِل منخفض وعالي