

التقرير ITU-R SM.2355-2

(2023/06)

السلسلة SM: إدارة الطيف

تطور مراقبة الطيف

تمهيد

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 مدى 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 الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <https://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 تقارير قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <https://www.itu.int/publ/R-REP/ar>)

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

ملاحظة: تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذا التقرير الصادر عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني

جنيف، 2025

التقرير ITU-R SM.2355-2

تطور مراقبة الطيف

(2023-2019-2015)

جدول المحتويات

الصفحة

| | | | |
|----|-------|---|-----|
| ii | ..... | سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR) | |
| 2 | ..... | مقدمة | 1 |
| 2 | ..... | كشف الإشارات الضعيفة | 2 |
| 2 | ..... | المكبر المركز | 1.2 |
| 3 | ..... | الارتباط | 2.2 |
| 4 | ..... | إحصاءات ذات رتبة عالية (HOS) | 3.2 |
| 6 | ..... | السكون الدوري | 4.2 |
| 6 | ..... | إلغاء الضوضاء التكيفي | 5.2 |
| 7 | ..... | ملخص | 6.2 |
| 7 | ..... | فصل الإشارات ذات التردد المشترك | 3 |
| 7 | ..... | الفصل على قناة واحدة (استرجاع إشارة قوية) | 1.3 |
| 9 | ..... | الفصل على قنوات متعددة (تشكيل الحزمة القائم على الطيف المكاني) | 2.3 |
| 10 | ..... | ملخص | 3.3 |
| 10 | ..... | تحديد الموقع متعدد الأساليب (استناداً إلى توليفة من تكنولوجيات تحديد الموقع) | 4 |
| 10 | ..... | زاوية الورود | 1.4 |
| 10 | ..... | فرق وقت الورود | 2.4 |
| 11 | ..... | فرق تردد الورود | 3.4 |
| 11 | ..... | قدرة الورود | 4.4 |
| 11 | ..... | الاستعانة بمحدد الهوية | 5.4 |
| 11 | ..... | ملخص | 6.4 |
| 11 | ..... | الخلاصة | 5 |
| 12 | ..... | الملحق 1 - أمثلة على تطبيق تقنيات المراقبة المتقدمة | |
| 12 | ..... | 1.A1 تطبيق الارتباط في العثور على التداخل الساتلي | |
| 15 | ..... | 2.A1 تطبيق استرجاع إشارة قوية في المراقبة الساتلية | |
| 16 | ..... | 3.A1 تحليل المكون المستقل (ICA) في قناة واحدة لفصل إشارة | |
|  | ..... | 4.A1 قولة الحزمة القائمة على الطيف المكاني في مراقبة الموجات الديكامترية (HF)/الموجات المترية (VHF) | |
| 20 | ..... |  |  |

| | |
|----|---|
| 22 | تطبيق تحليل المكون المستقل (ICA) متعدد القنوات لفصل إشارة |
| 25 | تحديد الموقع الجغرافي لمحطة قاعدة النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM) |
| 25 | استخدام السواتل الصغيرة لمراقبة الطيف |
| 29 | الملحق 2 - أمثلة على تطبيق تحديد الموقع الجغرافي بالجمع بين أسلوبيين |
| 29 | 1.A2 هجين زاوية الورود (AOA)/فرق وقت الورود (TDOA) |
| 30 | 2.A2 هجين فرق وقت الورود (TDOA)/نسبة كسب الورود (GROA) |
| 37 | قائمة المختصرات |

1 مقدمة

تهدف إدارة الطيف إلى تحقيق الكفاءة القصوى في استخدام الطيف، وتقليل التداخل إلى أدنى حد، وإنهاء الاستخدام غير المصرح به وغير المناسب للطيف. وبوصفها عيون وآذان عملية إدارة الطيف، تُعتبر مراقبة الطيف ضرورية جداً ومهمة في إدارة موارد الطيف ومختلف أنواع المحطات الراديوية، والبيئة الكهرومغناطيسية من خلال توفير بيانات مراقبة قيّمة، بما في ذلك بيانات عن إشغال الطيف، وخصائص الإشارات، مثل شدة المجال وعرض النطاق ونوع التشكيل ومواقع أجهزة الإرسال، وما إلى ذلك.

وأنظمة الاتصالات الراديوية في تطور مستمر وسريع. وفيما يتعلق باستخدام الطيف، يمكن أن تشمل التكنولوجيات الجديدة في أنظمة الاتصالات الراديوية استعمال الترددات التكيفي، وتعدد إرسال التردد المشترك، والنفاذ واسع النطاق، والطيف الممدود (الطيف الممدود بالتتابع المباشر والقفز الترددي)، وما إلى ذلك. وتقدم الاتصالات الراديوية المعرفة بالبرمجيات والاتصالات الراديوية الإدراكية أمثلة نمطية على أنظمة الاتصالات الراديوية الجديدة. وفي المقابل، ينبغي أن تكون أنظمة مراقبة الطيف في المستقبل قادرة على مراقبة تكنولوجيات وأنظمة الاتصالات الراديوية الجديدة، مثل كشف الإشارات الضعيفة، وفصل الإشارات ذات التردد المشترك، وتحديد الموقع متعدد الأساليب بناءً على معالجة الإشارة الرقمية (DSP) وشبكات الاستشعار RF، وتكنولوجيات أخرى.

2 كشف الإشارات الضعيفة

من الضروري تحسين حساسية أنظمة المراقبة لكشف الإشارات الضعيفة ذات كثافة القدرة المنخفضة نظراً لأن العديد من أنظمة الاتصالات الراديوية الجديدة تعمل بقدرة منخفضة وعروض نطاق واسعة وترددات عالية.

وفي بعض الحالات، قد تكون الإشارات أضعف من ضوضاء الخلفية. ونتيجة لذلك، يصعب كشف وتحديد مكان الإشارات الضعيفة غير النظامية ذات كثافة القدرة المنخفضة باستخدام أنظمة المراقبة القائمة ذات الحساسية المنخفضة. وينبغي لأنظمة مراقبة الطيف في المستقبل استخدام التكنولوجيات المتقدمة لاستخراج إشارات من ضوضاء الخلفية. ويمكن استخدام عدة تكنولوجيات لكشف الإشارات الضعيفة وهي مبينة في الفقرات التالية.

1.2 المكبر المركزي

يستخدم مكبر مركز (LIA) إشارة مرجعية لاستخلاص إشارة ذات معلمات داخلية معروفة أو متوقعة من بيئة ضوضائية. الموجة الجيبية هي الإشارة الأكثر شيوعاً بين إشارات اتصالات البيانات ويمكن تقدير سعتها وطورها بالمكبر المركزي (LIA). ويُفترض أن الإشارة المستقبلة هي:

$$(1) \quad x(t) = U_s \cos w_0 t + n(t)$$

حيث:

U_s : اتساع إشارة الموجة الجيبية

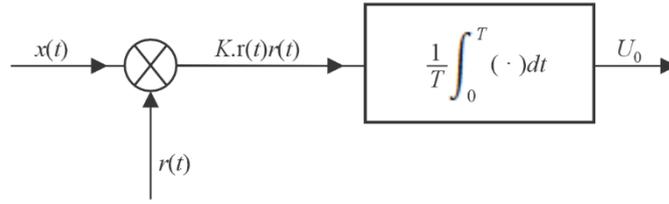
w_0 : التردد الزاوي

$n(t)$: ضوضاء الخلفية.

ويمكن تقدير U_s بحساب الترابط المتقاطع للإشارة المستقبلية والإشارة المرجعية المحلية على النحو المبين في الشكل 1.

الشكل 1

الرسم البياني للمكبر المركز (LIA)



Report SM.2355-01

وفي الشكل 1، $r(t)$ هي إشارة مرجعية ذات الاتساع U_r والطور φ . وتردد الإشارة المرجعية $r(t)$ هو نفس تردد الإشارة $x(t)$. K هو ثابت مرتبط بالمكبر. ويمكن وصف الخرج على النحو التالي:

$$(2) \quad U_o = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T K [U_s \cos w_0 t + n(t)] [U_r \cos(w_0 t + \varphi)] dt$$

وبما أن ضوضاء الخلفية غير ذات صلة بإشارة الموجة الجيبية، يتم تجاهل الضوضاء المضافة في (2) ويمكن كتابتها على النحو التالي:

$$(3) \quad U_0 = \frac{K U_s U_r}{2} \cos \varphi$$

ومن الواضح أن الخرج U_0 يبلغ القيمة القصوى عندما يساوي الطور φ صفراً ومن ثم يمكن الحصول على الاتساع U_s بدقة. وفي هذه الحالة، يكون للإشارة المرجعية $r(t)$ والإشارة المستقبلية $x(t)$ قيمة الطور نفسها.

وفي ضوء ما ذكر أعلاه، فإن المكبر المركز هو أساساً تطبيق لتقنية الترابط المتقاطع بين الإشارة المستقبلية والإشارة المرجعية المحلية. وتتمثل المشكلة الرئيسية للمكبر المركز في استعادة تردد وطور الإشارة المرجعية التي يمكن تحقيقها من خلال دارات العروة محكمة الطور.

2.2 الارتباط

1.2.2 الترابط المتقاطع

الترابط المتقاطع هو قياس للتشابه بين شكلي موجتين كدالة لتأخير زمني يطبق على أحدهما. ويفترض أن

$$(4) \quad x(t) = s_1(t) + n_1(t), \quad y(t) = s_2(t) + n_2(t)$$

وعندئذ

$$(5) \quad \begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= E[y(t)x(t-\tau)] = E\{[s_2(t) + n_2(t)][s_1(t-\tau) + n_1(t-\tau)]\} \\ &= R_{s_1 s_2}(\tau) + R_{s_1 n_2}(\tau) + R_{n_1 s_2}(\tau) + R_{n_1 n_2}(\tau) = R_{s_1 s_2}(\tau) \end{aligned}$$

هو مشغل إجمالي المتوسط الذي يشمل المتوسط على عدة عينات من البيانات.

إذا تم افتراض أن $x(t)$ تتابع محدد مسبقاً في المستقبل، عندئذ، يمكن استعمال الترابط المتقاطع للكشف عن الإشارة المستقبلية $y(t)$ حتى ولو كانت $y(t)$ أضعف من ضوضاء الخلفية. وذلك لأن الغرض من الترابط المتقاطع في هذه الحالة هو العثور على نمط محدد مسبقاً في التابع المستلم الذي عادةً ما يكون تتابع ضوضاء شبه عشوائية. ولا يمكن ملاحظة ذروة إلا عندما تكون الإشارة المرغوبة في الإشارة المستقبلية مترافقة مع التابع المحدد مسبقاً. وقد استُخدم هذا المبدأ للكشف عن الإشارة الضعيفة في النظام DSSS (تمديد الطيف بالتتابع المباشر).

2.2.2 الترابط الذاتي

الترابط الذاتي هو ارتباط متبادل لإشارة مع نفسها. إذا افترضنا أن $x(t) = s(t) + n(t)$ ، حيث $s(t)$ إشارة دورية و $n(t)$ ضوضاء، عندئذ يمكن تحديد الترابط الذاتي على النحو التالي:

$$\begin{aligned} R_x(\tau) &= E[x(t)x(t-\tau)] = E\{[s(t)+n(t)][s(t-\tau)+n(t-\tau)]\} \\ &= E[s(t)s(t-\tau)] + E[n(t)n(t-\tau)] + E[s(t)n(t-\tau)] + E[n(t)s(t-\tau)] \\ &= R_s(\tau) + R_n(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{ns}(\tau) \end{aligned} \quad (6)$$

وفي حال عدم ارتباط $s(t)$ و $n(t)$:

$$R_{sn}(\tau) = R_{ns}(\tau) = 0 \quad R_x(\tau) = R_s(\tau) + R_n(\tau) \quad (7)$$

وإذا كانت إشارة الضوضاء $n(t)$ غير دورية وكانت قيمتها المتوسطة صفراً، عندئذ:

$$R_n(\tau) = 0 \quad (\text{where } \tau \neq 0) \quad (8)$$

وهكذا:

$$R_x(\tau) = R_s(\tau)$$

الترابط الذاتي مفيد للكشف عن الإشارة الضعيفة. ومن الممكن اعتبار، بشكل غير رسمي، أن الترابط الذاتي هو بمثابة البحث عن التشابه بين الملاحظات المختلفة لنفس الإشارة. ولا يمكن أن يحدث هذا التشابه، على ما يبدو، إلا للإشارة المرغوبة التي لديها تنسيق مصمم مسبقاً بما في ذلك ميزة دورية. ويمكن بالكاد للضوضاء المضافة أن تولد مثل هذا التشابه بين الملاحظات المختلفة. وبهذه الطريقة، يمكن التخفيف من التأثير الناجم عن الضوضاء القوية المضافة بشكل فعال.

3.2 إحصاءات ذات رتبة عالية (HOS)

في التحليل الإحصائي للإشارات، يُعرف الارتباط (الذاتي والمتقاطع) للإشارات باللحظتين الأولى والثانية على التوالي. وتستند تقنيات مراقبة الطيف المشار إليها في وقت سابق في هذه الدراسة إما إلى لحظة الرتبة الأولى أو لحظة الرتبة الثانية (مكبر مركز، الفقرة 1.2). ومع ذلك، توجد معلومات أكثر في الاتصالات أو في إشارات الرادار مما تنقله اللحظتان الأولى والثانية والقيم الطيفية المرتبطة بهما. ومن بين هذه المعلومات، طور الإشارة، واللاخطية، والضوضاء غير الغوسية، والتناظر. وقد استُخدمت الإحصاءات ذات الترتيب العالي على نطاق واسع لإزالة الضوضاء الغوسية والكشف عن الإشارات غير الغوسية، والكشف عن لاخطية الإشارات، والكشف عن الإشارات العابرة وغير ذلك.

وكما ذكر أعلاه، تستند الإحصاءات ذات الترتيب العالي إلى المتغيرات التالية:

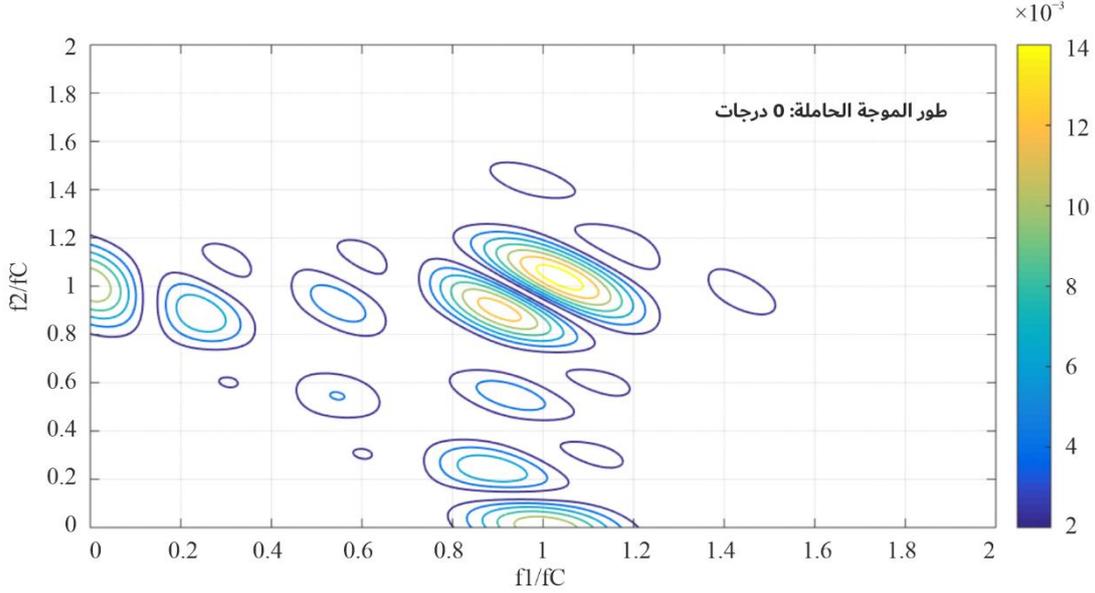
- الطيف المتعدد
- اللحظات ذات الترتيب العالي
- المراكيمات.

ومن بين هذه المتغيرات الأكثر استخداماً اللحظة الثالثة واللحظة الرابعة والطيف الثنائي والطيف الثلاثي.

يوضح الشكلان 2 و 3 أدناه الطريقة التي تتيح بها متغيرات الإحصاءات ذات الترتيب العالي الحفاظ على معلومات الطور. ويبين كلا الشكلين الطيف الثنائي لنبضة مستطيلة مشكلة بواسطة موجة حاملة بدالة جيب التمام $(\cos(2\pi f_c + \varphi_0))$ ، حيث هو التردد الحامل، و φ_0 هو طور الموجة الحاملة. وفي الشكل 2، يُؤخذ طور الموجة الحاملة على أنه يساوي 0° ، وفي الشكل 3، يُؤخذ طور الموجة الحاملة على أنه يساوي 45° . وتُظهر المقارنة بين الشكلين 2 و 3 أن قيم الطور φ_0 لها تأثير على كل من مستوى الطيف الثنائي وتوجهه. وبناءً على ذلك، يمكن استغلال بيانات الطيف الثنائي في استخراج قيم طور الإشارة.

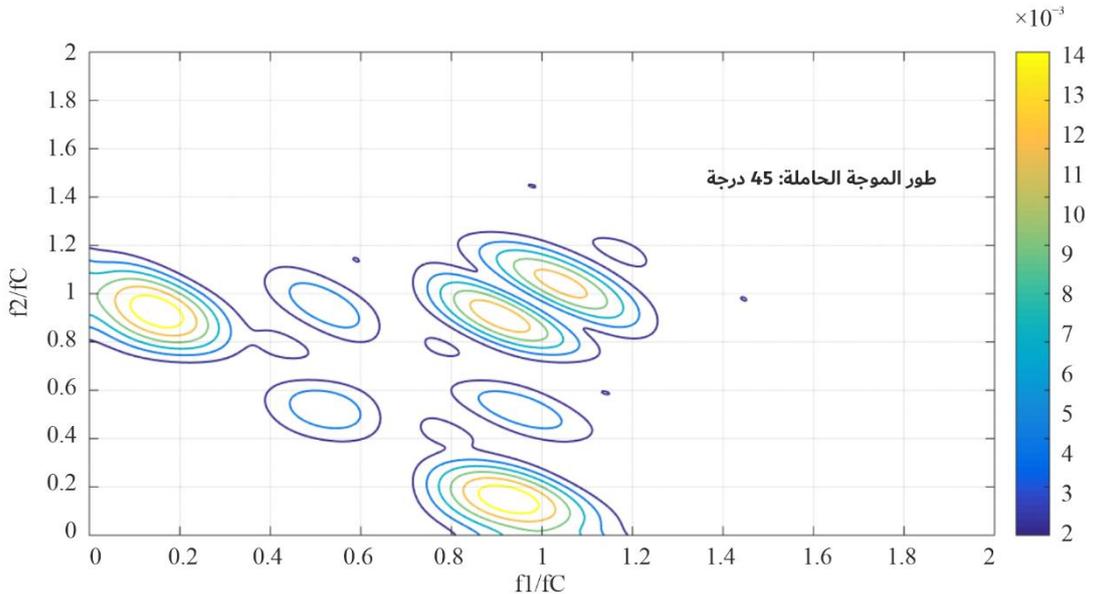
الشكل 2

طيف ثنائي لنبضة مستطيلة مشكلة بموجة حاملة بدالة جيب التمام ($\varphi_0 = 0^\circ$ و $f_c = 2$)



الشكل 3

طيف ثنائي لنبضة مستطيلة مشكلة بموجة حاملة بدالة جيب التمام ($\varphi_0 = 45^\circ$ و $f_c = 2$)



وجدير بالإشارة إلى أنه على غرار الترابط المتقاطع، يمكن أيضاً الحصول على اللحظات ذات الترتيب العالي على إشارتين مختلفتين أو أكثر. وفي هذه الحالة، يسمى الطيف والطيْف الثنائي والطيْف الثلاثي الطيف المتقاطع والطيْف الثنائي المتقاطع والطيْف الثلاثي المتقاطع على التوالي.

وختاماً لهذا القسم، إن الإحصاءات ذات الترتيب العالي مفيدة للكشف عن الإشارات الضعيفة لأن الطيف الثنائي والطيْف الثلاثي للضوضاء المضافة، التي عادة ما تكون موزعة بشكل غوسي، يمكن أن تكون صفرية. وبما أن الإحصاءات ذات الترتيب العالي للإشارة المرغوبة ليست صفرية بشكل عام، يمكن إلغاء الضوضاء المضافة في الإشارة المستقبلية تماماً إذا ما أخذت الإحصاءات ذات الترتيب العالي للإشارة المستقبلية. وبهذه الطريقة، تُلغى الضوضاء المضافة ويمكن الكشف عن الإشارة الأضعف من ضوضاء الخلفية.

4.2 السكون الدوري

يستفيد مبدأ السكون الدوري من الإشارات ذات الخصائص الإحصائية التي تختلف دورياً مع مرور الوقت. ويمكن نمذجة العديد من إشارات الاتصالات المستخدمة اليوم في شكل إشارات ثابتة دورية بسبب وجود دورة واحدة أو أكثر من الدورات الأساسية التي تنشأ بسبب اقتران إشارات الرسائل الثابتة مع الموجات الحاملة الجيبية الدورية وقطارات النبضات أو الشفرات المتكررة. وقد تحدث هذه الدورات الأساسية نتيجة عمليات أخرى تُستخدم في اعتيان وتعدد إرسال الإشارات.

وبسبب الدورات الأساسية، يمكن تمثيل دالة الترابط الذاتي بسلسلة فورييه التي يُبنى عليها توقيع السكون الدوري للإشارات على النحو التالي. وبالنسبة إلى دورة أساسية ذات الفترة، يمكن توسيع دالة الترابط الذاتي إلى سلسلة فورييه فيما يتعلق بالترددات الدورية α ($\alpha = m/T, m = 0,1,2,\dots$)

$$(9) \quad R_{xx}(t, t - \tau) = \sum_{\alpha} R_{xx}^{\alpha}(\tau) \exp(j2\pi\alpha t/T_0)$$

تعطي معاملات فورييه للترابط الذاتي (9) دالة الترابط الذاتي الدوري $R_{xx}^{\alpha}(\tau)$.

تولد متحولة فورييه لدالة الترابط الذاتي الدوري (9) كثافة الترابط الطيفية $S_{xx}^{\alpha}(f)$:

$$(10) \quad S_{xx}^{\alpha}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}^{\alpha}(f) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau$$

يمكن اعتبار الكثافة الطيفية للترابط أعلاه كتعميم للكثافة الطيفية للقدرة التقليدية. وينبع هذا التعميم من جعل الكثافة الطيفية للترابط دالة لترددين: التردد الطيفي f والتردد الدوري α/T_0 في حين أن الكثافة الطيفية للقدرة هي دالة التردد الطيفي f فقط.

وختاماً لهذا القسم، جدير بالإشارة إلى أن الكشف القائم على السكون الدوري ينطبق على مجموعة واسعة من المعايير اللاسلكية بما فيها الإشارات CDMA و OFDMA. وعلاوةً على ذلك، هناك إمكانية لتعزيز أداء طريقة الكشف عن الإشارات الضعيفة من خلال استعمال خصائص السكون الدوري. وذلك لأن الضوضاء المضافة ليس لها أي خاصية سكونية دورية ومن ثم، فإن الكثافة الطيفية للترابط من أجل تردد دوري غير صفري هي صفر. وهذا يعني أنه يمكن إزالة الضوضاء المضافة في الإشارة المستقبلية باستخدام المعادلة (9) من أجل الإشارة المستقبلية. وبهذه الطريقة، يمكن إلغاء الضوضاء المضافة والكشف عن الإشارة الأضعف من ضوضاء الخلفية.

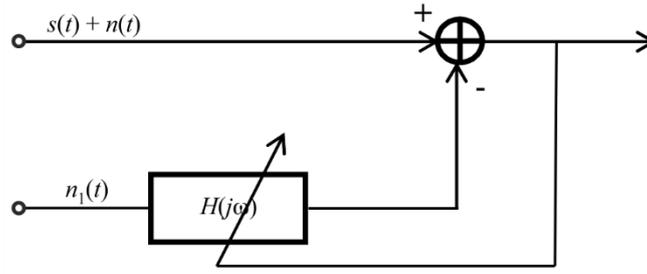
5.2 إلغاء الضوضاء التكيفي

يحصل إلغاء الضوضاء التكيفي (ANC) على الإشارة المرغوبة من خلال طرح التكيفي للضوضاء "المرجعية" المصطفة المترابطة مع الضوضاء المحتواة في الإشارة المكشوفة من الإشارة المكشوفة.

ويظهر في الشكل 4 الرسم البياني لإلغاء الضوضاء التكيفي.

الشكل 4

الرسم البياني لإلغاء الضوضاء التكيفي (ANC)



Report SM.2355-04

تمكن معالجة الضوضاء المرجعية $n_1(t)$ المرتبطة بالضوضاء $n(t)$ بالمرشح التكيفي $H(jw)$. ويمكن إلغاء الضوضاء $n(t)$ ، ويمكن تحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) في الخرج.

ويسهل تصميم مرشح إلغاء الضوضاء التكيفي (ANC) دون معرفة أو خبرة بالضوضاء $n(t)$ والإشارة $s(t)$ ، وتأثير الاصطفاء مكافئ لمرشح وينر (Wiener). وبفضل مزاياه، استُخدم مرشح إلغاء الضوضاء التكيفي على نطاق واسع لإلغاء التداخل المدمج مع الإشارات، ومثاله المرشح التلمي التكيفي.

6.2 ملخص

لتحسين أداء الكشف عن الإشارات الضعيفة، تُقدم عدة أنواع من خوارزميات الكشف في القسم أعلاه. وتنطوي جميعها على معالجة الإشارات ولكن، كما هو مبين أعلاه، فإن بعضها أكثر كثافة حسابياً وفي بعض الحالات الأخرى، هناك توافق بين وقت الحساب ومدة الإشارة ومستويات الضوضاء. وإن بعض التقنيات فعالة على بعض أنواع الإشارات في حين أنه يمكن استخدام تقنيات أخرى لأنواع كثيرة من الإشارات.

3 فصل الإشارات ذات التردد المشترك

بغية تقاسم موارد الطيف المحدودة، يجري تشغيل عدد متزايد من أنظمة الاتصالات الراديوية على نفس التردد. فعلى سبيل المثال، تستخدم أنواع كثيرة من أنظمة الاتصالات الخلوية وأنظمة الاتصالات بالموجات الديكامترية (HF) ترددات مشتركة. وفي الوقت نفسه، يمكن أن تحدث تداخلات مقصودة أو غير مقصودة في الترددات المتراكبة.

تعتمد العديد من أنظمة الاتصالات الراديوية تقنيات تعدد إرسال بتردد مشترك. وفي مثل هذه الحالات قد تستقبل محطة مراقبة طيف واحدة العديد من الإشارات من أجهزة إرسال مختلفة تعمل على نفس التردد. ونتيجة لذلك، يصعب التفريق بين هذه الإشارات ذات التردد المشترك باستخدام أنظمة المراقبة الحالية. وبالتالي، ينبغي لأنظمة مراقبة الطيف في المستقبل استخدام التكنولوجيا المتقدمة لفصل الإشارات.

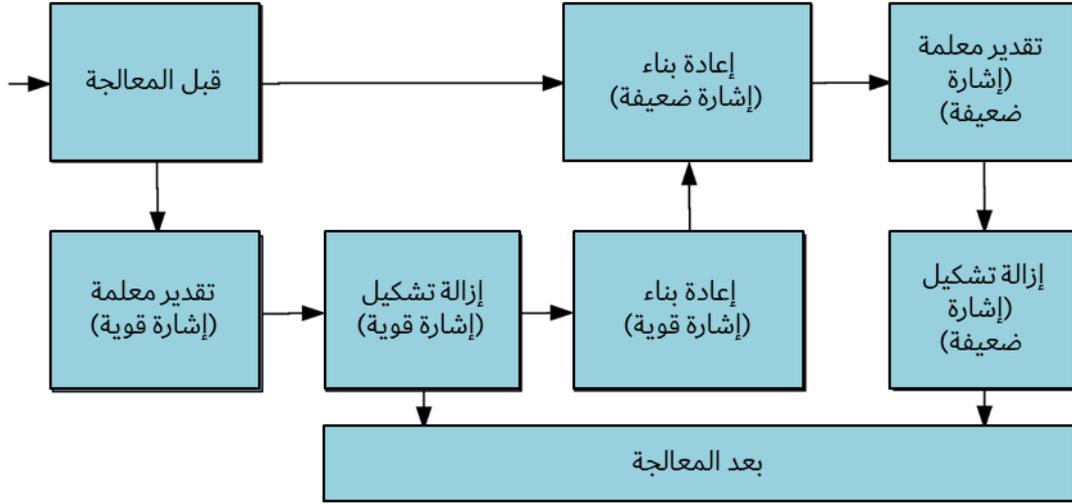
ويمكن تقسيم تقنيات فصل الإشارات ذات التردد المشترك إلى فئتين: الفصل على قناة واحدة والفصل على قنوات متعددة، ويأتي بحثهما في الفقرات التالية.

1.3 الفصل على قناة واحدة (استرجاع إشارة قوية)

عندما تكون هناك قناة استقبال واحدة، يمكن استعمال استرجاع إشارة قوية لاستعادة الإشارة من إشارات مشكّلة رقمية خطية، مثل الإشارات المشكّلة بتشكيل الإبراق بزحزحة الطور (PSK) وتشكيل الاتساع المتعامد (QAM). بيد أن هذه الخوارزمية لا يمكنها العمل إلا في حالة إشارتين، وتتطلب نسبة قدرة أكثر من 6 dB. ويظهر رسم بياني لهذه الخوارزمية في الشكل 5.

الشكل 5

رسم بياني لاسترجاع إشارة قوية



Report SM.2355-05

أ) ما قبل المعالجة

تشمل الوظيفة الرئيسية لهذه الوحدة العديد من الخطوات اللازمة لمعالجة الاستقبال، مثل الاصطفاء، والتحويل الخافض للترددات، وتحويل معدل أخذ العينات. وفي الوقت نفسه، فإن بعض خوارزميات إلغاء التداخل ضيقة النطاق، مثل الاصطفاء التلمي التكيفي (الذي يمكنه إزالة إشارة ضعيفة شبيهة مضافة إلى الإشارة القانونية القوية) يمكن تطبيقها على هذه الوحدة باستعمال خوارزميات تستند إلى ميدان التردد.

ب) تقدير المعلمة لإشارة قوية

ينبغي تقدير العديد من المعلمات لإزالة تشكيل إشارات قوية في هذه الوحدة. وتشمل هذه المعلمات الاتساع وتردد الموجة الحاملة والطور الأولي، ومعدل التشكيل ونمطه. ولكن الإشارة القوية قانونية في معظم الحالات. وهكذا فإن بعض المعلمات الكامنة، مثل معدل التشكيل ونمطه معروفة للمستقبل. لذلك لا حاجة لتقدير هذه المعلمات. ويلزم فقط تقدير تردد الموجة الحاملة والطور الأولي والاتساع.

ج) إزالة تشكيل الإشارة القوية وإعادة بنائها

يمكن استخدام إجراء إزالة التشكيل التقليدي لإزالة تشكيل الإشارات القوية من أجل استرجاع تسلسل تدفق بتات. ثم يمكن تنفيذ إجراء إعادة بناء إشارة قوية مع معرفة مسبقة بتردد الموجة الحاملة والطور الأولي ومعدل البود ونمط التشكيل.

د) إعادة بناء الإشارة الضعيفة

بعد استرجاع إشارة قوية، تمكن إعادة بناء إشارة ضعيفة بتقنيات إلغاء الإشارة التكيفي مثل متوسط التربيع الأدنى (LMS) ومتوسط التربيع التكراري (RLS) لإزالة إشارة قوية من الإشارة المختلطة الأصلية.

هـ) تقدير معلمات الإشارة الضعيفة

المعلمات المطلوبة تشابه تلك المذكورة في الفقرة ب). غير أن خصائص إشارة التداخل غير معروفة للمستقبل، وبالتالي ينبغي تقدير المعلمات الضرورية مثل معدل البود ونمط التشكيل. ويُقترح تطبيق خوارزمية ما عالية الأداء لتقدير المعلمات من أجل إزالة أثر عدم الدقة في إعادة البناء.

فعلى سبيل المثال، يمكن تطبيق خوارزمية قائمة على الطيف الدوري لتقدير معدل البود، ويمكن استخدام بعض الخوارزميات القائمة على الإحصاءات ذات الترتيب العالي لتصميم خوارزمية تحديد التشكيل.

(و) إزالة تشكيل إشارة ضعيفة

كما جاء في الفقرة (ب) السابقة، يمكن استخدام أسلوب إزالة التشكيل التقليدي للإشارة ضعيفة. وفي الوقت نفسه، تُقترح إمكانية إدخال خطوة معادلة مستترة للتغلب على التداخل بين الرموز المتولد من عدم دقة تقدير المعلمة.

2.3 الفصل على قنوات متعددة (تشكيل الحزمة القائم على الطيف المكاني)

إن تشكيل الحزمة القائم على الطيف المكاني يمكن استعماله عندما تكون هناك قنوات متعددة. وهو مناسب بشكل خاص لتطبيقه في سيناريو الفصل المستتر لإشارات متعددة، وهو فعال أيضاً في إطار أنماط تشكيل اعتباطي، وبإمكانه تحقيق أداء جيد نسبياً في بيئات تنخفض فيها نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR). ويمكن توضيح النظرية الأساسية كما يلي:

إذا افترضنا أن الصفائف M استقبلت الإشارات P ، يمكن التعبير عن الإشارات المستقبلية بالمصفوفة $X(t)$ على النحو التالي:

$$(11) \quad X(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{j2\pi d \sin \theta_1 / \gamma} & e^{j2\pi d \sin \theta_2 / \gamma} & \dots & e^{j2\pi d \sin \theta_P / \gamma} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi d (M-1) \sin \theta_1 / \gamma} & e^{j2\pi d (M-1) \sin \theta_2 / \gamma} & \dots & e^{j2\pi d (M-1) \sin \theta_P / \gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_P(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix}$$

حيث $\{\theta_1, \dots, \theta_P\}$ هو اتجاه كل إشارة على التوالي، ويمثل $s_i(t) \{i = 1, 2, \dots, P\}$ إشارات الدخل P ، و $n_i(t) \{i = 1, 2, \dots, M\}$ هي الضوضاء الغوسية البيضاء المضافة (AWGN) المقابلة، و γ هو الطول الموجي للإشارة.

ثم بحساب مصفوفة الترابط، يمكن الحصول على الآتي:

$$(12) \quad R = E\{X(t)X^H(t)\}$$

وبتطبيق إجراء تفكيك القيمة الذاتية على المعادلة (12)، يمكن الحصول على القيم الذاتية والمتجهات الذاتية. ويمكن تقسيم مكان الإشارة إلى المكان الفرعي للبعد P في الإشارة والمكان الفرعي للبعد $M-P$ في الضوضاء. وبما أن المكان الفرعي للإشارة والمكان الفرعي للضوضاء متعامدان، يمكن الحصول على الآتي:

$$(13) \quad a(\theta_k)GG^H a^H(\theta_k) = 0$$

حيث $(\theta_k) = [e^{j2\pi d \sin \theta_k / \gamma} \dots e^{j2\pi d (M-1) \sin \theta_k / \gamma}]^T$ ، ويتكوّن المتحول G من المتجهات الذاتية في مكان فرعي للضوضاء بعده $M \times (M-P)$. وتعرّف $P(\theta) = 1/[a(\theta_k)GG^H a^H(\theta_k)]$ ، يمكن الحصول على اتجاه كل إشارة من خلال "اختيار ذروات" على $P(\theta)$. وهذه هي خوارزمية تصنيف الإشارة المتعدد (MUSIC) المعروفة.

إذا فُصلت الإشارة عن الاتجاه θ_k ، ينبغي لمعاملات كل صفييف التقييد بما يلي:

$$(14) \quad \omega^H a(\theta_d) = 1, \quad \omega^H a(\theta_i) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, M, i \neq d)$$

ويمكن استعمال عدة خوارزميات لحل المشكلة أعلاه. وإحدى الخوارزميات الأكثر شيوعاً واستخداماً هي ما يسمى "تشكيل حزمة كابون (Capon)"، التي يُقصد بها تقليل قدرة الخرج إلى أدنى حد. ويمكن حل المعاملات على النحو التالي:

$$(15) \quad \omega_{opt} = [R^{-1}a(\theta_k)] / [a^H(\theta_k)R^{-1}a(\theta_k)]$$

ولتقدير الترددات في نموذج أسي متراكب غير مخدّد، يمكن الحصول على نتائج أفضل باستخدام البيانات العادية والمترافقة معاً مقارنةً بمجرد استخدام البيانات العادية، على الرغم من تكافئها من حيث خط التقارب. ولذلك تُقترح خوارزمية MUSIC معدّلة (MMUSIC) باستخدام البيانات العادية والمترافقة معاً لتقدير فرق ورود (DOA) الإشارات. ومقارنة مع خوارزمية MUSIC، يعبر عن مصفوفة الارتباط لخوارزمية MMUSIC كما يلي:

$$\bar{R} = R + JE(\bar{X}(t)\bar{X}^H(t))J \quad (16)$$

حيث $\bar{X}(t)$ هي البيانات المترافقة مع $X(t)$ و J هي مصفوفة التبادل $P \times P$ ذات مدخلات كلها صفرية باستثناء تلك في المدخل ذي الترتيب $(i, P - i + 1)$ حيث $i = 1, 2, \dots, P$.

3.3 ملخص

بغية فصل الإشارات على نفس نطاق التردد، يتناول هذا القسم نهجين لفصل الإشارات على نفس التردد، يتمثلان في نهج لقناة واحدة ونهج لقنوات متعددة. ويتطلب نهج القناة الواحدة تشكيل الإشارة القوية ومن ثم زيادة العبء الحسابي، في حين أن نهج القنوات المتعددة لا يتطلب تشكيل الإشارة وإنما يحتاج إلى عدد أكبر من القنوات والهوائيات المقابلة لفصل الإشارات.

4 تحديد الموقع متعدد الأساليب (استناداً إلى توليفة من تكنولوجيات تحديد الموقع)

تحمل الإشارات في ميادين مختلفة معلومات الموقع ذات الصلة. وفي المقابل، يمكن استخراج معلومات الموقع هذه بالتكنولوجيا أو خوارزميات المعالجة الحاسوبية المقابلة. وتترايد قدرات معالجة الإشارة الرقمية (DSP) والتوصيل الشبكي. وما برحت الأجهزة القائمة على معالجة الإشارة الرقمية والتوصيل الشبكي تتاح بتكلفة أيسر. ويمكن لأنظمة مراقبة الطيف القائمة على خوارزميات معالجة الإشارة الرقمية وتكنولوجيا الشبكة أن تسهّل التعرف على مرسلات ذات خصائص مختلفة تعمل في ميادين مختلفة، بما فيها ميدان الاتساع وميدان التردد والميدان الزمني والميدان المكاني وميدان الشفرة، وغيرها. ونتيجة لذلك، يمكن أن تستخدم تكنولوجيا تحديد الموقع متعدد الأساليب لتحديد موقع أجهزة البث في ظروف مختلفة على أساس الجمع بين تكنولوجيات مختلفة لتحديد الموقع، مثل زاوية الورود (AOA) وفرق وقت الورود (TDOA) وفرق تردد الورود (FDOA) وقدرة الورود (POA) والتقنيات المستعينة ببيانات تحديد الهوية.

1.4 زاوية الورود

زاوية الورود (AOA) هي الطريقة التقليدية الرائجة لتحديد موقع مرسل عن طريق تحديد اتجاه انتشار موجة واردة إلى صفيح هوائيات في ظروف عديدة. وهناك العديد من التقنيات لتحديد الاتجاه الزاوي، مثل مقياس تداخل الطور ومقياس التداخل المترابط والتقنيات أحادية النبضة وقولبة الحزمة والمرشاح المتوائم مكانياً وتقنيات المكان الجزئي، وما إلى ذلك. وبالنسبة إلى بعض التطبيقات، يمكن دمج بعض التقنيات في محطة مراقبة واحدة كاشفة للاتجاه (DF) تستخدم لأغراض مختلفة. ومن أجل تحديد موقع مرسل، تقتضي الضرورة الجمع بين نتائج محطتين على الأقل من محطات المراقبة الكاشفة للاتجاه من أجل الحصول على موقع خطوط الاتجاه الزاوي باستخدام تكنولوجيا زاوية الورود.

2.4 فرق وقت الورود

فرق وقت الورود (TDOA) هو أحد الأساليب الواعدة لتحديد موقع مرسل بتقدير الفرق في أوقات ورود الإشارة من مصدر في أجهزة استقبال متعددة. وتوفر أنظمة فرق وقت الورود مرونة في اختيار الهوائي ومكان نصبه لأن دقة هذه الأنظمة تتأثر بالحد الأدنى بالعاكسات المجاورة. ومن أجل تحديد موقع مرسل، تقتضي الضرورة الجمع بين ثلاثة أو أكثر من أنظمة فرق وقت الورود المنشورة في مواقع مختلفة. واستناداً إلى قيم فرق وقت الورود في أزواج مختلفة من أجهزة الاستقبال، يمكن تحديد موضع مرسل

باستخدام بعض الخوارزميات، مثل الخوارزميات غير التكرارية والتكرارية. ويرد في التقرير ITU-R SM.2211 بحث أوفى عن أساليب فرق وقت الورود.

3.4 فرق تردد الورود

فرق تردد الورود (FDOA) هو أحد الأساليب الفعالة لتحديد موقع مرسل أثناء الحركة أو تحديد موقع مرسل بمحطة مراقبة متنقلة، وخصوصاً بمحطة مراقبة متنقلة محمولة جواً. ويحدث التبديل السريع بين هوائيات الاستقبال لصفيف هوائيات مراقبة تأثيراً ماثلاً للتأثير الذي تحدثه الحركة النسبية بين المرسل ومستقبل مراقبة الإرسال. وبما أنه يمكن استخدام الحركة النسبية للحصول على موقع المرسل بواسطة تقدير دوبلر، يمكن استخدام فرق وقت الورود (TDOA) وفرق تردد الورود (FDOA) معاً لتحسين دقة تحديد الموقع، وتكون التقديرات الناتجة مستقلة إلى حد ما. وبالجمع بين قياسات فرق وقت الورود وفرق تردد الورود، يمكن تحديد الموقع الجغرافي لحظياً في بعدين.

4.4 قدرة الورود

قدرة الورود (POA) هي أحد الأساليب الاقتصادية لتحديد موقع مرسل لأن قدرة الورود لا تتطلب عتاداً إضافياً لمستقبل المراقبة. ويمكن تقدير قدرة إشارة راديوية وفقاً لنماذج الانتشار بمعرفة قدرة الإرسال ومسير الانتشار، الذي يُستخدم خصوصاً لأنظمة الاتصالات اللاسلكية المقيّسة. بيد أنه لا يمكن استخدامه لتحديد موقع جهاز إرسال عندما تكون قدرة الإرسال غير معروفة. وفي بعض الظروف يسهل تحديد موقع جهاز الإرسال عندما يكون نموذج الانتشار بسيطاً، كتحديد موقع إرسال إذاعة بتشكيل ترددي (FM) عند وجود الانتشار في خط البصر بين جهاز إرسال إذاعي بتشكيل ترددي ومحطات مراقبة ثابتة.

5.4 الاستعانة بمحدد الهوية

تتزايد أهمية الاستعانة بمحدد الهوية لتحديد موقع مرسل يُستخدم كجهاز استشعار في هذه الحقبة الجديدة من التوصيل البيئي العالمي، وخصوصاً لشبكات الاتصالات الراديوية العمومية. ويتضمن نظام الاتصالات الراديوية المرقمن معلومات إضافية عن هوية المستخدم يمكن استخدامها للحصول على معلومات جهاز الإرسال كمعلومات عن خطوط الطول والعرض وعنوان بروتوكول الإنترنت، وما إلى ذلك. ومن الأنجع تحديد موقع جهاز إرسال باستخدام معلومات مجمعة مستقاة من محطة المراقبة وقاعدة بيانات مطابقة لشبكة الاتصالات الراديوية عندما يكون المرسل يشغل للخدمات المتنقلة. والهاتف المتنقل الساتلي ومطراف الإنترنت الساتلي وجهاز الهاتف المتنقل هي مرسلات كلاسيكية يمكن تحديد مواقعها باستخدام أسلوب الاستعانة بمحدد الهوية.

6.4 ملخص

تحديد الموقع متعدد الأساليب هو في الأساس مزيج من نُهج مختلفة لتحديد الموقع. ويبحث هذا القسم مُجماً مختلفاً لتحديد الموقع تشمل التقنيات AOA وTDOA وFDOA وPOA وتقنيات التحديد القائم على البيانات. ولا تحتاج بعض التقنيات إلى المعلومات التي تحملها الإشارة في حين تحتاج أساليب أخرى إلى استعادة المعلومات التي تحملها الإشارة من أجل تحديد الموقع مما سيزيد من العبء الحسابي.

5 الخلاصة

يرد في هذا التقرير وصف موجز لتقنيات وتطبيقات كشف إشارة ضعيفة وفصل الإشارات ذات التردد المشترك وتحديد الموقع بأساليب متعددة بناء على معالجة الإشارة الرقمية والشبكة، بما في ذلك المكبر المركز والترابط والإحصاءات ذات الترتيب العالي، والسكون الدوري، وإلغاء الضوضاء التكيفي واسترجاع إشارة قوية وقولبة الحزمة القائمة على الطيف، وفرق تردد الورود (FDOA) وقدرة الورود (POA) والاستعانة بمحدد الهوية وهي أساليب يمكن استخدامها في مراقبة الطيف في المستقبل في ظل ظروف مختلفة. وتتبعي دراسة تقنيات وتطبيقات مراقبة الطيف المتقدمة للتنفيذ من أجل مواكبة التطور السريع في أنظمة الاتصالات الراديوية الجديدة. وترد في الملحقين 1 و2 أمثلة على بعض تقنيات المراقبة المتقدمة.

الملحق 1

أمثلة على تطبيق تقنيات المراقبة المتقدمة

1.A1 تطبيق الارتباط في العثور على التداخل الساتلي

في كثير من الحالات، يمكن تحديد موقع التداخل الساتلي المستقر بالنسبة إلى الأرض ضمن مساحة إهليلجية يبعد مركزها عشرات الكيلومترات أو أكثر عن موقع الإرسال.

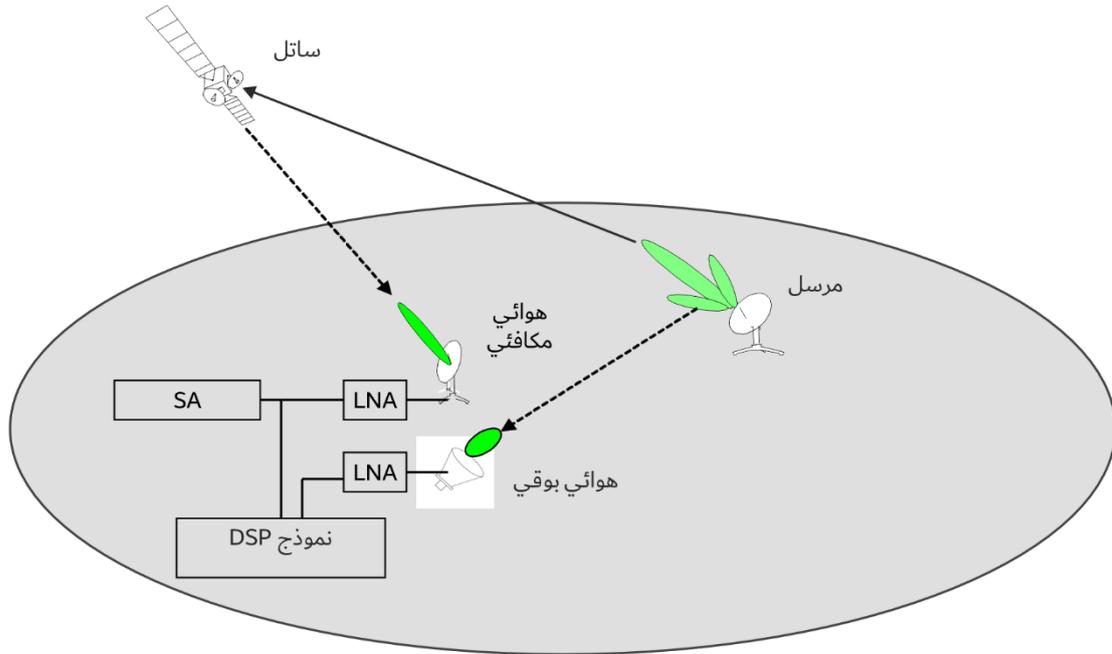
وفي الطرف أعلاه، ترتبط إشارات من الساتل المعرض للتداخل والساتل المجاور بأنظمة موقع المرسل، ثم يمكن أن تتولد بيانات فرق وقت الورود (TDOA) وفرق تردد الورود (FDOA).

وتحديد موقع المرسل وهويته على الأرض بسرعة مسألة أساسية بالنسبة إلى محطات مراقبة الطيف في العديد من البلدان أو الإدارات.

وينبغي للمعدات أن تكشف الإشارة الضعيفة المرسلّة من الفصوص الجانبية لهوائي، المصوبة نحو الساتل المستقر بالنسبة إلى الأرض. ثم يمكن الاستفادة من تقنية الترابط المتقاطع لتحسين حساسية نظام المراقبة المثبت على السيارة المتنقلة. ويظهر رسم بياني موجز لهذا التطبيق في الشكل 1-A1.

الشكل 1-A1

رسم بياني لتطبيق الترابط المتقاطع في العثور على التداخل الساتلي



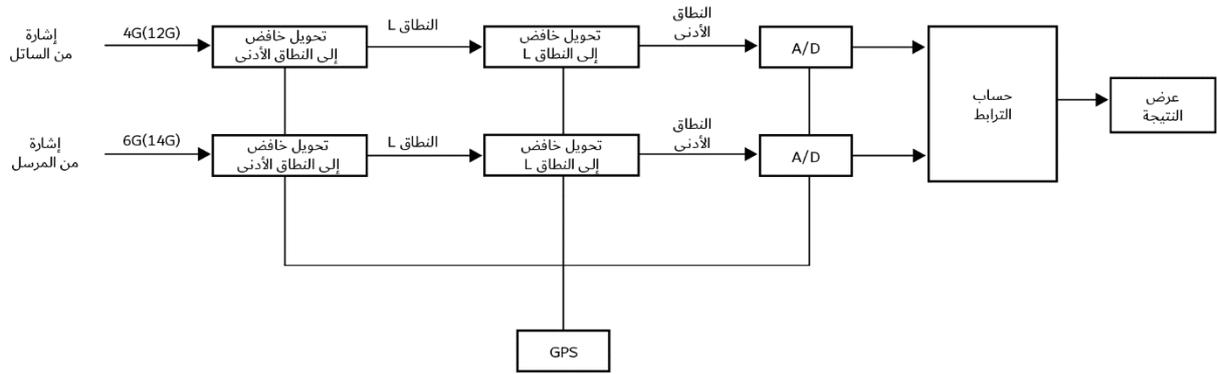
Report SM.2355-A1-01

في هذا النظام، يُستخدم حساب الترابط المتقاطع في وحدة معالجة الإشارة الرقمية لمعالجة الإشارات الواردة من الساتل بواسطة هوائي مكافئي ومن الفص الجانبي لهوائي المحطة الأرضية بواسطة هوائي بوقي أو هوائي متناح مباشرةً.

ويرد في الشكل 2-A1 وصف الرسم البياني للعملية في وحدة معالجة الإشارة الرقمية.

الشكل 2-A1

الرسم البياني للعملية في وحدة معالجة الإشارة الرقمية (DSP)



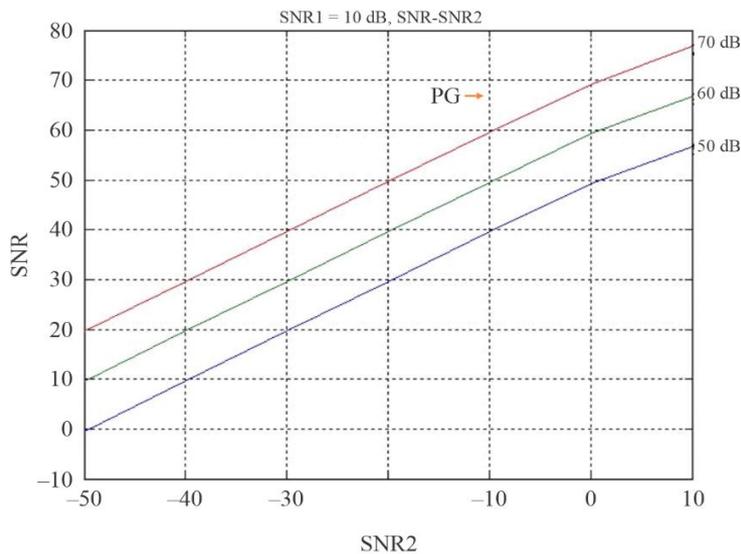
Report SM.2355-A1-02

في حساب الترابط المتقاطع، تُستخدم دالة الغموض المعقدة على أساس خوارزمية إحصاءات الدرجة الثانية (CAF-SOS) لتقدير فرق وقت الورد (TDOA) وفرق تردد الورد (FDOA) في وقت واحد للإشارات الواردة من الساتل وجهاز الإرسال. ويمكن وصف نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) للارتباط المتقاطع على النحو التالي، وكل نسبة إشارة إلى الضوضاء هي قيمة خطية.

$$snr = 2BT * \frac{snr_1 * snr_2}{1 + snr_1 + snr_2}$$

حيث $2BT$ هو كسب المعالجة، وإذا أُخذت عينات الإشارات بمعدل نايكويست (Nyquist) وكان N هو رقم نقطة العينة، يُحصل على $N = 2BT$. وتمثل نسبة snr_1 نسبة الإشارة إلى الضوضاء (snr) لإشارة من الساتل، فيما تمثل نسبة snr_2 نسبة الإشارة إلى الضوضاء لإشارة من جهاز الإرسال. وفي الحالات الشائعة، لا تقل نسبة الإشارة إلى الضوضاء عن 20 dB. وإذا نسبة الإشارة إلى الضوضاء تساوي 10 dB، يمكن وصف العلاقة بين snr_2 و snr كما في الشكل 3-A1.

الشكل 3-A1

العلاقة بين snr و snr_2 عندما تكون $snr_1 = 10$ dB

Report SM.2355-A1-03

وعادةً، يمكن للمعدات التي تستخدم حساب الترابط المتقاطع أن تكشف إشارات ضعيفة تقارب قيمة نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) فيها -40 dB إذا كان كسب المعالجة 60 dB. أي يمكنها التقاط إشارة ضعيفة تقل كثافة طيف قدرتها بنسبة 40 dB عن ضوضاء الخلفية.

وفي الممارسة العملية، يدور هوائي بوقي اتجاهي بزوايا معينة وتلي ذلك عملية الترابط المتقاطع. وبعد الدوران 360 درجة، يستطيع المشغل العثور على اتجاه الإرسال عندما تبلغ نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) لارتباط كلتا القناتين (من الساتل ومن المحطة الأرضية) قيمتها القصوى، حتى عندما يكون مستوى الإشارة الأرضية أضعف من أن يُرصد بمحلل طيف (انظر الشكل 4-A1).

الشكل 4-A1

الرسم البياني لزوايا الذروة

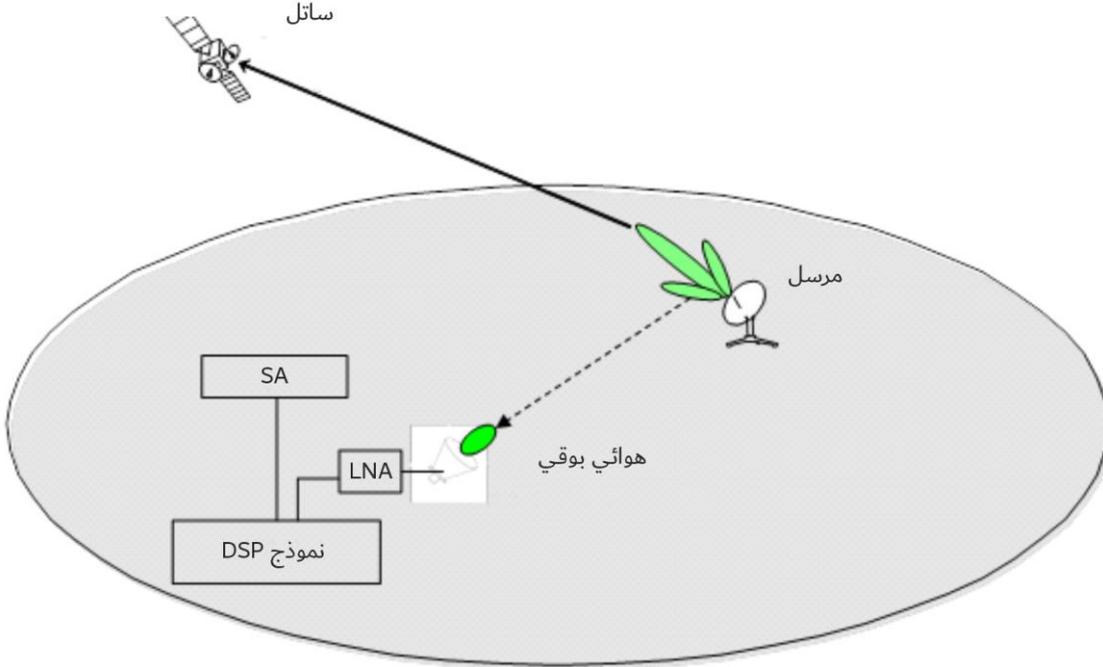


Report SM.2355-A1-04

وبدلاً من ذلك، يمكن للمعدات التي تستخدم الحساب القائم على الترابط الذاتي الدوري كشف إشارات ضعيفة تقارب قيم نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) فيها -20 dB، على نحو مترابط. وعلى الرغم من كون الأداء أسوأ من الحساب القائم على الترابط المتقاطع، فإنه يظل يتميز بحساسية أفضل من خوارزمية الكشف التقليدية القائمة على تحويل فورييه السريع (FFT). ويظهر الرسم البياني في الشكل 5-A1.

الشكل 5-A1

رسم بياني لتطبيق الترابط الذاتي الدوري في العثور على التداخل الساتلي



Report SM.2355-A1-05

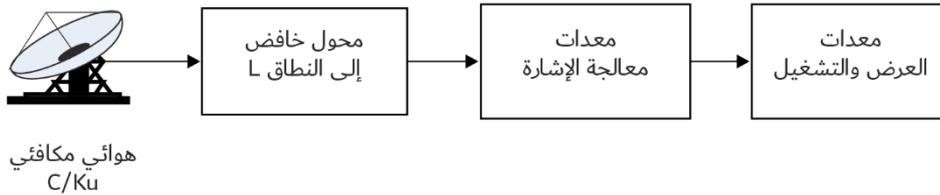
وبالمقارنة، يمكن للمعدات التي تستخدم الحساب القائم على الترابط الذاتي الدوري كشف إشارات ضعيفة من مرسلات محطة أرضية على بعد عدة كيلومترات، فيما يمكن للمعدات التي تستخدم الحساب القائم على الترابط المتقاطع كشف إشارات ضعيفة من مرسلات محطة أرضية على بعد عشرات الكيلومترات؛ أما المعدات التي تستخدم مستقبيل المراقبة التقليدي أو محلل الطيف فلا يمكنها إلا كشف إشارات ضعيفة من مرسلات محطة أرضية على بعد عدة مئات من الامتار في حالات معينة.

2.A1 تطبيق استرجاع إشارة قوية في المراقبة الساتلية

يقع تداخل على شبكة ساتلية مستقرة بالنسبة إلى الأرض أحياناً بسبب تعطل المعدات وسوء تشغيلها. وكقاعدة عامة، هناك إشارتان تعملان على ترددات متراكبة. وفي هذا الوقت يمكن تطبيق استرجاع إشارة قوية لمراقبة التداخل والإنذار بوقوعه. ويظهر رسم بياني موجز لهذا التطبيق في الشكل 6-A1.

الشكل 6-A1

رسم بياني لتطبيق استرجاع إشارة قوية في المراقبة الساتلية



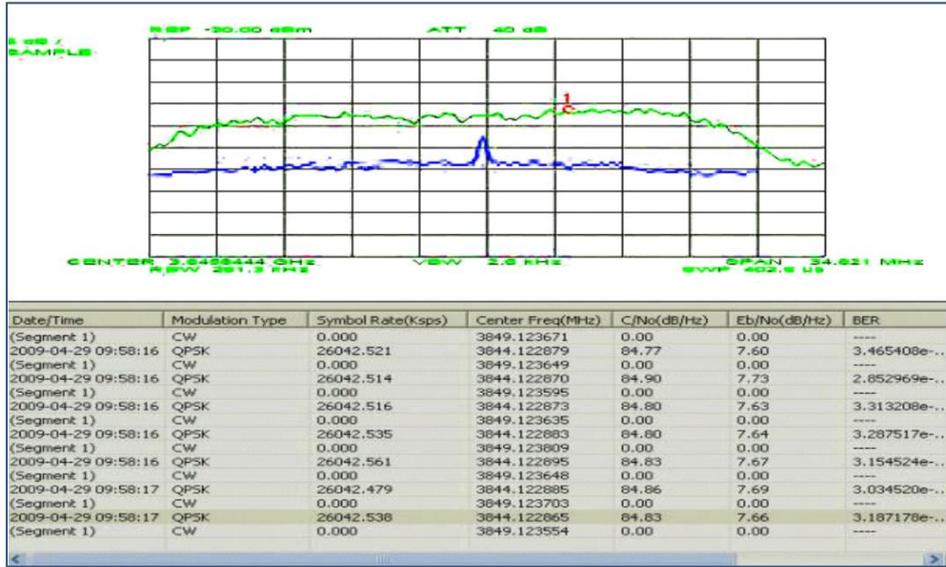
Report SM.2355-A1-06

وفيما يلي مثال على تطبيق استرجاع إشارة قوية في فصل تداخل على شبكة ساتلية مستقرة بالنسبة إلى الأرض. والإشارة القانونية هي في تطبيق خدمة الإذاعة الساتلية (BSS) بتشكيل الإبراق بزحزحة الطور المتعامد (QPSK) ومعدل بود قدره 26,042 Mbit/s، والإشارة المسببة للتداخل هي إشارة موجة مستمرة (CW).

وكما يمكن أن يرى في الشكل A1-7، يمثل الطيف الموضح كخط أخضر الإشارة المستقبلية، ويمكن أن يُعرف كطيف الإشارة المختلطة، في حين يمثل الطيف باللون الأزرق الإشارة المفصولة المسببة للتداخل. ويرد نمط التشكيل ومعلومات التشكيل المقابلة في الشكل أدناه.

الشكل A1-7

مثال فصل تداخل في شبكة ساتلية مستقرة بالنسبة إلى الأرض



Report SM.2355-A1-07

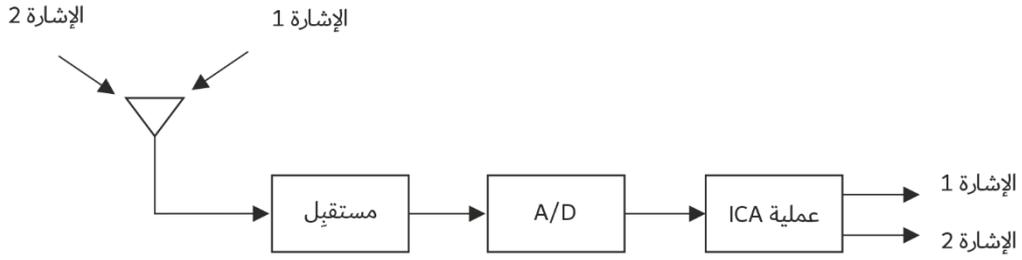
3.A1 تحليل المكون المستقل (ICA) في قناة واحدة لفصل إشارة

فيما يلي مثال على الفصل بين إشارتي إبراق بزحزحة الطور ثنائي الحالة (BPSK) في قناة مشتركة على أساس خوارزمية تحليل المكون المستقل (ICA). ويظهر الرسم البياني للنظام في الشكل A1-8. وتتمثل الإشارتان في معدل البود ولا تتخالفان إلا قليلاً في تردد الموجة الحاملة. وبناء على خوارزمية تحليل المكون المستقل، تُفصل الإشارتان عن الإشارة المختلطة، على النحو مبين في الشكل A1-9. وإذا كانت نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) 10 dB ونسبة الإشارة إلى التداخل (SIR) 0 dB، يمكن تحقيق معامل ارتباط يزيد عن 0,93 بين الإشارة الأصلية والمفصولة. ويمكن أن يرى بوضوح الفصل التام للإشارتين في القناة المشتركة. ويورد الشكلان A1-10 و A1-11 نتائج الفصل بدلالة رسم بياني لكوكبة. وتغيير نسبة الإشارة إلى الضوضاء من 4 dB إلى 12 dB، تظهر في الشكل A1-12 نسب الخطأ في البتات (BER) للإشارتين المفصولتين. ويمكن رؤية أن نسب الخطأ في البتات تقل عن 10^{-3} عندما تزيد نسبة الإشارة إلى الضوضاء عن 10 dB، وهو أمر شائع جداً في بيئة الاتصالات الساتلية.

وفي محاكاة أخرى، تُعامل الإشارة 1 والإشارة 2 بمثابة الإشارة المطلوبة وإشارة التداخل، على التوالي. وتظهر في الشكل A1-13 نسب الإشارة إلى الضوضاء (SNR) في الإشارة المطلوبة على اختلاف نسب الإشارة إلى التداخل (SIR) (من -10 dB إلى 10 dB). ويمكن رؤية أن الإشارة المطلوبة يمكن أن تستخرج بشكل صحيح من الإشارة المختلطة عندما تزيد نسب الإشارة إلى التداخل عن 0 dB. وعند انخفاض نسب الإشارة إلى التداخل (أقل من 0 dB)، يمكن أن تُستخرج الإشارة المسببة للتداخل أولاً وتلغى من الإشارة المختلطة، وبعد ذلك يمكن الحصول على الإشارة المطلوبة. وفي الوقت الحاضر، لا يمكن لخوارزمية تحليل المكون المستقل (ICA) هذه في قناة مشتركة أن تفصل إلا بين إشارتين بتشكيل رقمي ثنائي الحالة. وتنبغي دراسة خوارزمية أقوى للفصل بين إشارات بتشكيل متعدد الحالات.

الشكل 8-A1

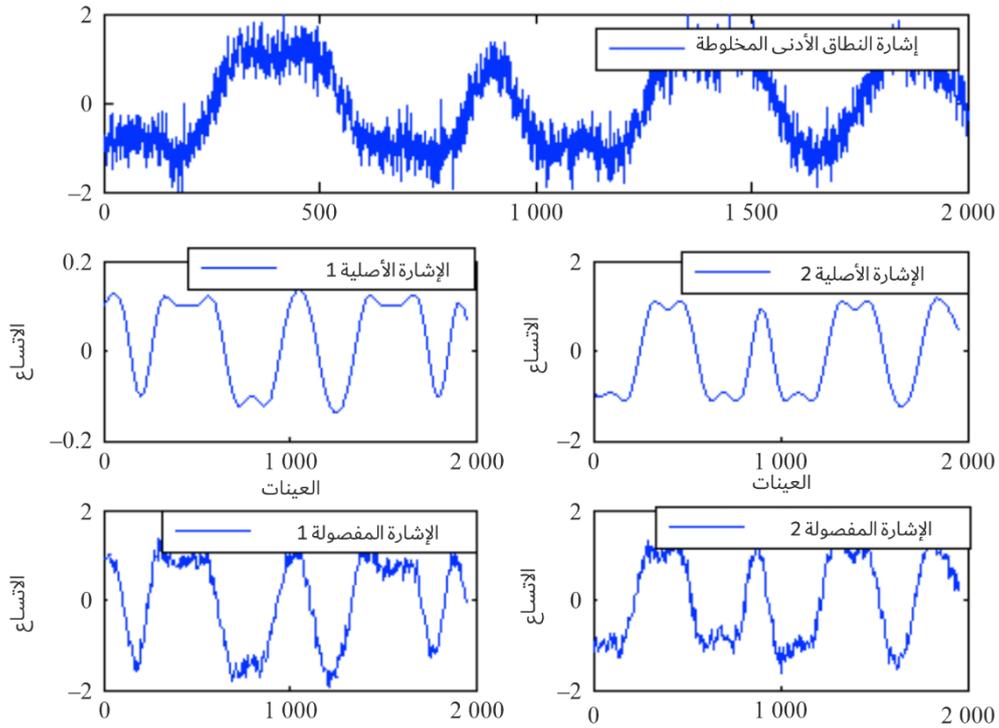
الرسم البياني لتطبيق تحليل المكون المستقل (ICA) في قناة واحدة لفصل إشارة



Report SM.2355-A1-08

الشكل 9-A1

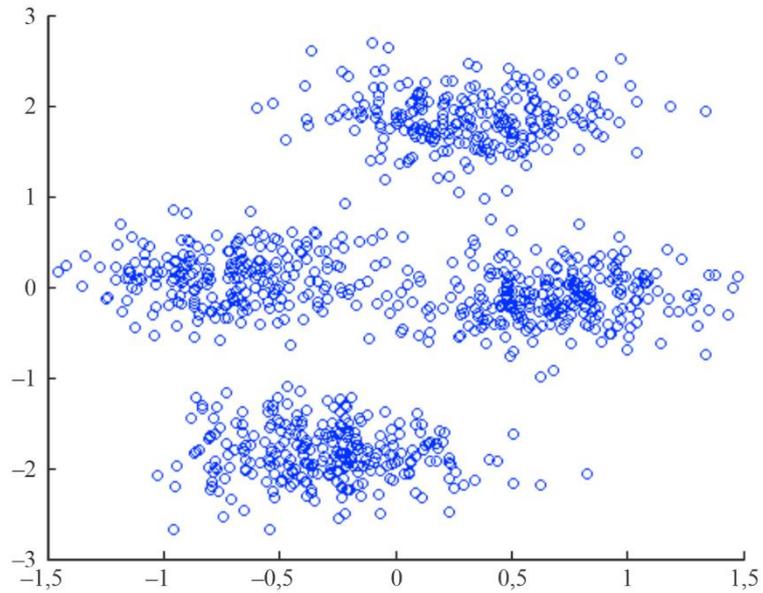
نتائج الفصل بين إشارتي إبراق بزحزة الطور ثنائي الحالة (BPSK)



Report SM.2355-A1-09

الشكل 10-A1

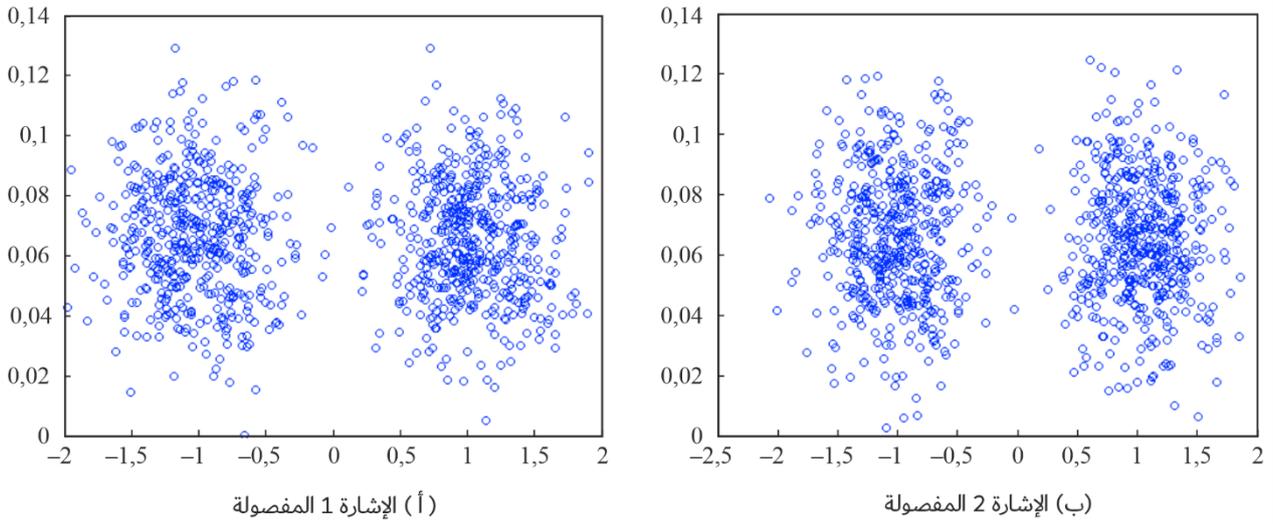
الرسم البياني لكوكبة الإشارة المختلطة



Report SM.2355-A1-10

الشكل 11-A1

الرسم البياني لكوكبة الإشارتين المفصولتين



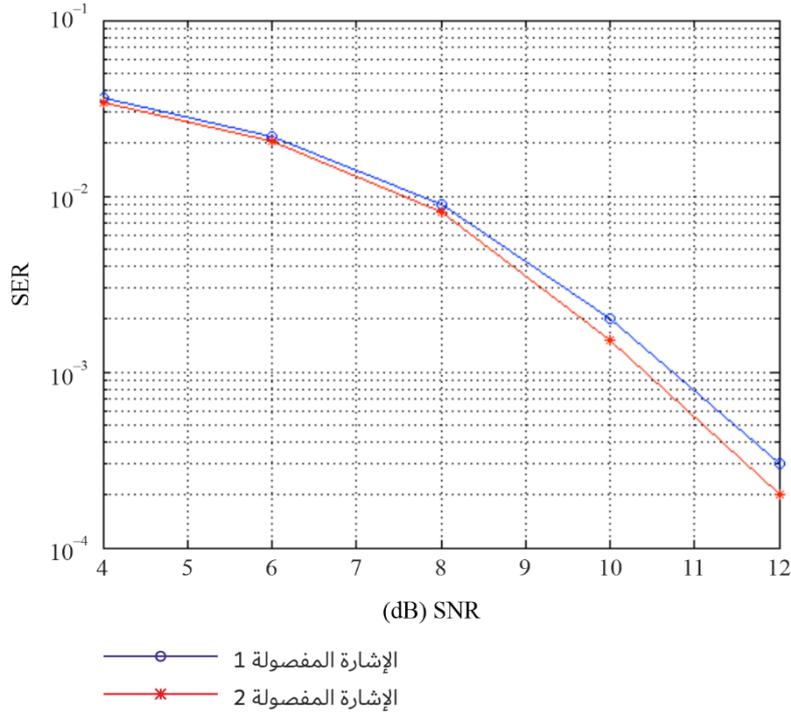
(أ) الإشارة 1 المفصولة

(ب) الإشارة 2 المفصولة

Report SM.2355-A1-11

الشكل 12-A1

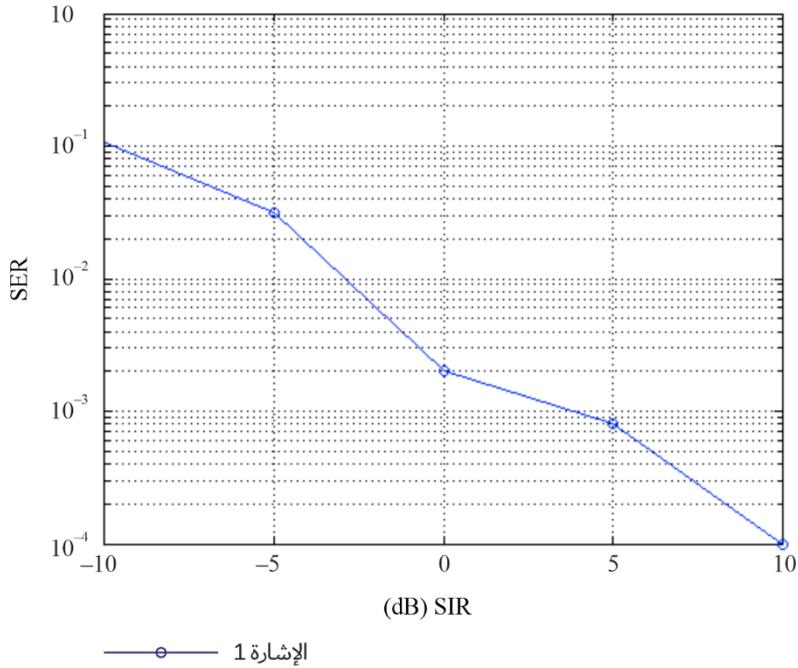
نسب الخطأ في البتات (BER) لإشارتين مفصولتين بنسبتي إشارة إلى ضوضاء (SNR) مختلفتين



Report SM.2355-A1-12

الشكل 13-A1

نسب الخطأ في البتات (BER) للإشارة 1 المفصولة على اختلاف نسب الإشارة إلى التداخل (SIR)



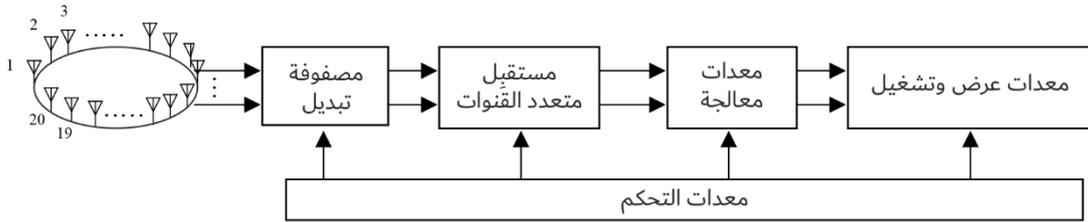
Report SM.2355-A1-13

4.A1 قوالب الحزمة القائمة على الطيف المكاني في مراقبة الموجات الديكامترية (HF)/الموجات المترية (VHF)

تستخدم تكنولوجيا قوالب الحزمة القائمة على الطيف المكاني على نطاق واسع في نظام مراقبة الموجات الديكامترية (HF)/الموجات المترية (VHF)، عندما تقتضي الضرورة الاستماع إلى، وتحديد مواقع، إشارات الموجات الديكامترية (HF)/الموجات المترية (VHF) العاملة على ترددات متراكبة. ويظهر في الشكل 14-A1 هيكل موجز.

الشكل 14-A1

رسم بياني لتطبيق قوالب الحزمة القائمة على الطيف المكاني في مراقبة الموجات الديكامترية (HF)/الموجات المترية (VHF)



Report SM.2355-A1-14

إن الشكل الأكثر شيوعاً لصفيف هو الصفيف الدائري، ومن الأشكال الأخرى الصفيف المثلثي والصفيف الخطي. وترسل الإشارة المستقبلية إلى جهاز استقبال متعدد القنوات عبر مصفوفة تبديل. وبشكل عام، فإن عدد القنوات المستقبلية يساوي عدد صفائف الهوائي. ويستكمل جهاز الاستقبال عادة بعض خطوات المعالجة، مثل التحويل الخافض والاصطفاء والرقمنة. ومن الجدير بالذكر أن كل قناة مستقبلية ينبغي أن تلبي الاتساق في الطور والاتساع، وإلا فإن المعالجة اللاحقة ستكون غير فعالة. وتنفذ معدات المعالجة خوارزميات اكتشاف الاتجاه وقوالب الحزمة، وتتفاعل مع شاشة العرض ومعدات التشغيل.

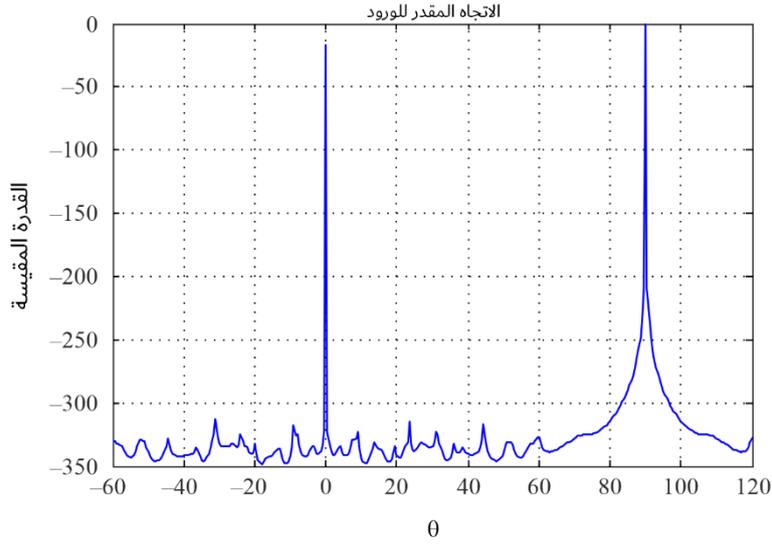
والمحتوى التالي هو مثال عن الفصل المستتر لإشارتين. وتؤخذ كلتا الإشارتين من تطبيقات الهاتف البيني للتشكيل الترددي (FM) بنفس القدرة. ويبين الشكل 15-A1 النتيجة المقدرة لاتجاه الورد المستقاة من خوارزمية MUSIC. ويمكن أن يرى بوضوح أن الاتجاهين 0° و 90° مقدران بدقة. وتظهر في الشكلين 16-A1 (أ) و 16-A1 (ب) على التوالي المقارنة بين الإشارة الأصلية والإشارة المفصولة وبين الإشارتين المطلوبتين وغير المطلوبتين. وتظهر النتيجة أن كلتا الإشارتين مفصولتان جيداً. وتُحسب MSE كمعلمة التقييم، التي تعرف كما يلي:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_N (S(n) - S_e(n))^2}{N}}$$

حيث $S(n)$ و $S_e(n)$ هما الإشارة الأصلية والإشارة المفصولة على التوالي، و N هو رقم الإشارة، ويبلغ مطال MSE حوالي 10^{-3} .

الشكل 15-A1

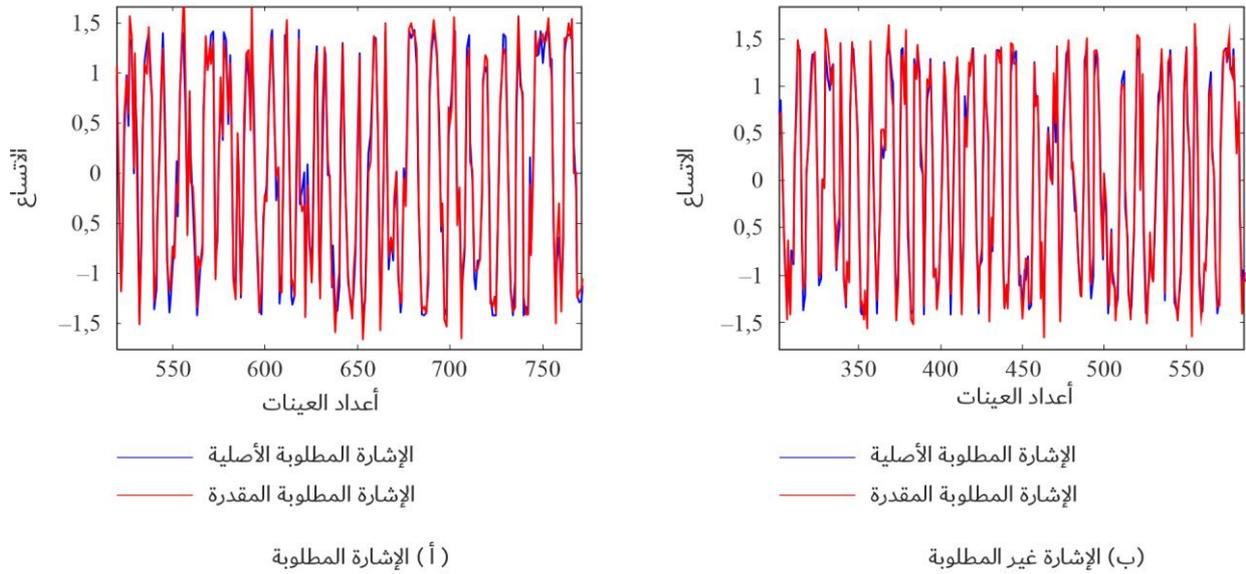
نتائج تقدير اتجاه الورد



Report SM.2355-A1-15

الشكل 16-A1

مقارنة بين الإشارة الأصلية والإشارة المفصولة

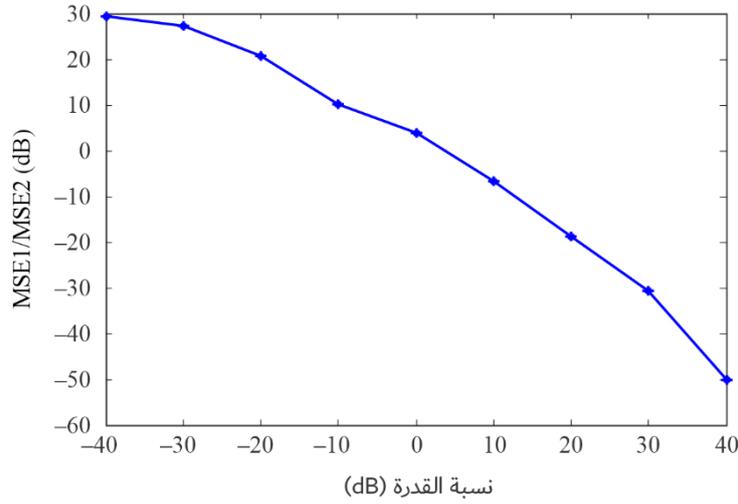


Report SM.2355-A1-16

يظهر الشكل 17-A1 نتيجة التقييم لنسبة MSE في إطار نسبة قدرة مختلفة بين الإشارتين المطلوبة وغير المطلوبة. ويمكن ملاحظة أن نسبة القدرة تؤثر تأثيراً كبيراً على مؤثر نتيجة الفصل. وبصفة عامة، تنتج الإشارة القوية معلمة MSE أصغر مقارنةً بإشارة ضعيفة، وتظهر أداء فصل أفضل. وكحالة خاصة، تتشابه معلمات MSE عندما تتماثل قدرة إشارتين.

الشكل 17-A1

معلومات *MSE* في إطار نسب قدرة مختلفة بين الإشارتين المطلوبة وغير المطلوبة



Report SM.2355-A1-17

5.A1 تطبيق تحليل المكون المستقل (ICA) متعدد القنوات لفصل إشارة

يقدم هذا الجزء نتائج تطبيق تحليل المكون المستقل (ICA) متعدد القنوات لفصل إشارة التداخل باستخدام قاعدة اختبار تجريبية.

1.5.A1 تفاصيل الاختبارات

أُرسلت إشارة تتألف من موجة تداخل متراكبة على إشارة مطلوبة كإشارة الاختبار التي استُقبلت بعدئذ بصفيف هوائيات. وحُولت الإشارة المستقبلة أولاً من تماثلية إلى رقمية (A/D) ثم أُجريت معالجة تحليل المكون المستقل (ICA).

وبالحصول على الفرق بين نسبة القدرة المقدرة للموجة المطلوبة وموجة التداخل (DUR_{est}) اللتين فُصلتا بمعالجة تحليل المكون المستقل (ICA) ونسبة القدرة الكهربائية المضبوطة لإشارة الاختبار، جرى تقييم دقة تقدير نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة.

نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة في إشارة الاختبار (DUR) = (قدرة الإشارة المطلوبة)/(قدرة الإشارة غير المطلوبة)

نسبة القدرة المقدرة بعد معالجة تحليل المكون المستقل (DUR_{est})

$$= \frac{\text{(قدرة الإشارة المطلوبة)}}{\text{(قدرة الإشارة غير المطلوبة)}}$$

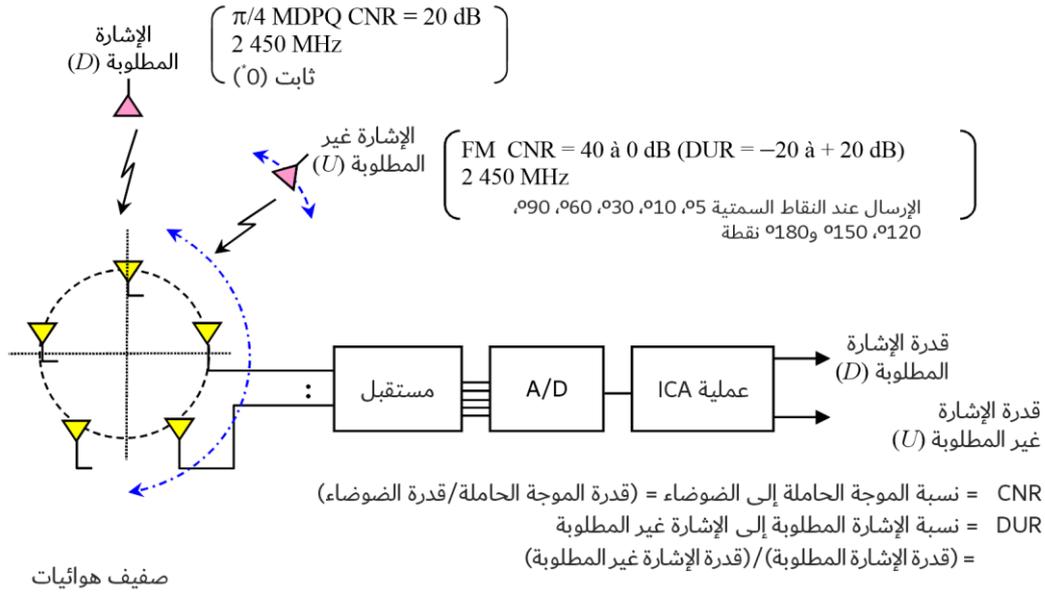
دقة تقدير نسبة القدرة الكهربائية (A) = $DUR_{est} - DUR$

ويثبت اتجاه ورود الموجة المطلوبة، كما يُرى من صفيف الهوائيات، ويغيّر اتجاه ورود موجة التداخل من 5° إلى 180°، ويجري تقييم التغير في دقة تقدير نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) نتيجة للتغيرات في القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة في كل زاوية ورود.

ويبين الشكل 18-A1 رسم بياني لنظام اختبار التقييم.

الشكل 18-A1

رسم بياني لنظام اختبار التقييم



Rapport SM.2355-A1-18

2.5.A1 نتائج الاختبار

يظهر في الشكل 19-A1 رسم بياني لكوكبة الإشارة المستقبلية قبل معالجة تحليل المكون المستقل (ICA) وفصل الموجة المطلوب عن موجة التداخل بهذه المعالجة. وعلاوة على ذلك، تُعرض في الشكل 20-A1 نتائج قياس دقة تقدير نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) في حالة كون الموجة المطلوبة $\pi/4$ QPSK وموجة التداخل مشكّلة بالتشكيل الترددي (FM).

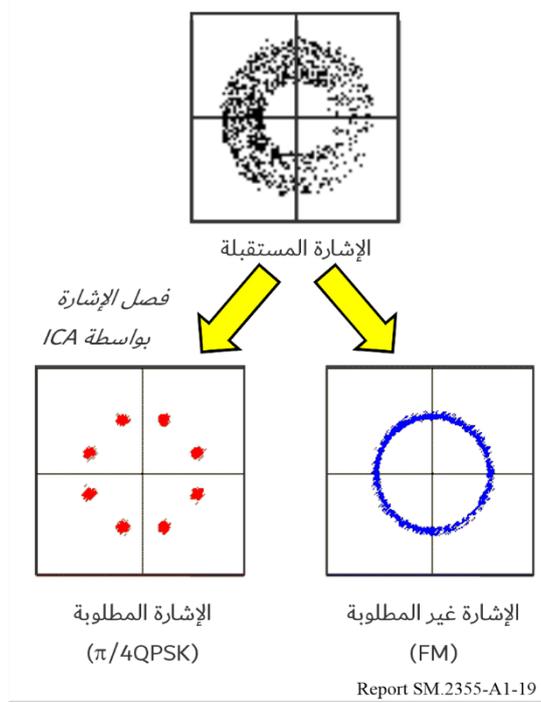
وفي مدى نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) الذي يتراوح بين -15 و +10 dB، تأكدت إمكانية تقدير نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) لإشارة التداخل بدقة تقل عن 2 dB.

وباتّباع إجراء هذا الاختبار نفسه، أُجري اختبار في حالة إشارة اختبار مؤلفة من الموجة المطلوبة المشكّلة بتشكيل الاتساع (AM) وموجة التداخل المشكّلة بالتشكيل الترددي (FM). وأظهرت النتائج في مجملها اتجاهاً مماثلاً ونتائج مماثلة وإن كان هناك بعض الاختلاف الطفيف في النتائج.

وباتّباع إجراء هذا الاختبار نفسه، أظهرت نتائج تنفيذ اختبارات لأقطار فتحة هوائي اتجاهياً يفيد بأن مدى نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) التي يمكن قياسها يصبح أوسع بزيادة طول أقطار الفتحة.

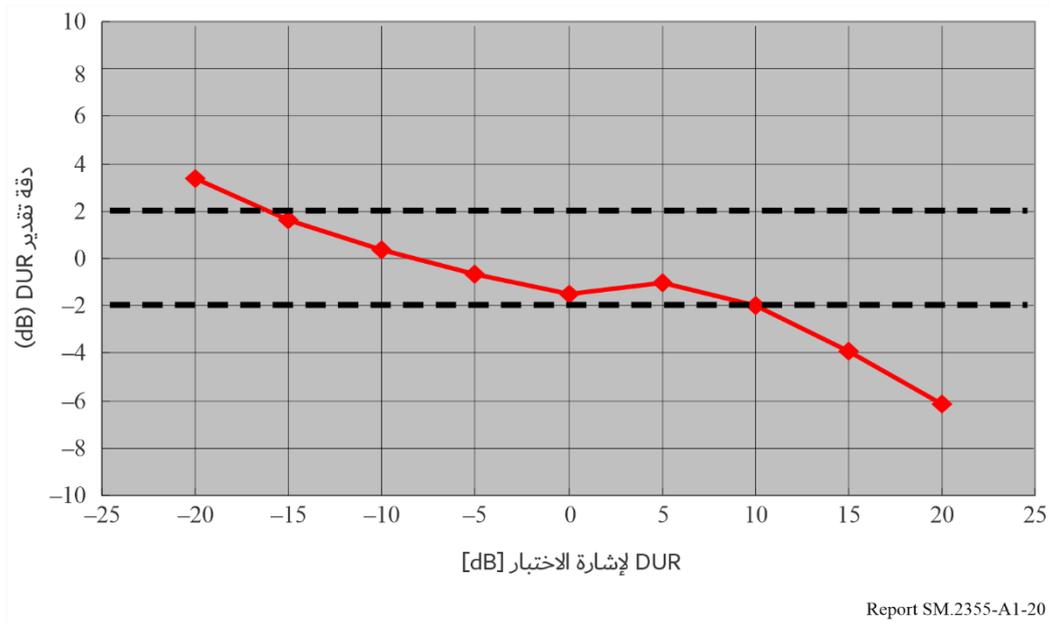
الشكل 19-A1

رسم بياني لكوكبة الإشارتين المفصولتين بتحليل المكونات المستقل (ICA)



الشكل 20-A1

دقة تقدير نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR)



3.5.A1 معالجة كشف التداخل

كما يتضح من نتائج تقييم أسلوب تحليل المكونات المستقل (ICA)، يمكن لهذا الأسلوب أن يقدر نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) بدقة عالية من نسبة قدرة الإشارة بعد الفصل. ولذلك، تتضح إمكانية المراقبة الكمية لمستويات تداخل ضعيفة بالتوقيت المناسب في الحالات الفعلية التي لا يوجد فيها تردد كبير في جودة الاتصالات، وفي حالات فعلية للتداخل قلما تحدث.

وبعبارة أدق، في نظام لاسلكي رقمي عام، حتى عندما لا يكون هناك تداخل بمحدود 10 dB لنسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR)، لا يلاحظ المستخدم أن تداخلاً قد حدث، بفضل شفرات تصحيح الخطأ. وبفضل التقدير الكمي لنسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) باستخدام أسلوب تحليل المكون المستقل (ICA)، يتسنى اتخاذ تدابير مضادة قبل حدوث ترد كبير في جودة الاتصالات.

وعلى النحو المبين في الشكل 21-A1، تُتوقع إمكانية كشف وجود تداخل بدقة جيدة بهذا الأسلوب، في مدى نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) الذي يتراوح بين -15 و +10 dB، بفضل إمكانية قياس مستوى الإشارة بدقة ± 2 dB. وبتحديد قيمة عتبة كشف وجود تداخل حسب مرجعية نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N) (= DUR) التي يستلزمها نظام الاتصالات للموجة المطلوبة، يمكن إطلاق إنذار أو إدراج سجل تلقائياً بالتزامن مع توقيت كشف التداخل.

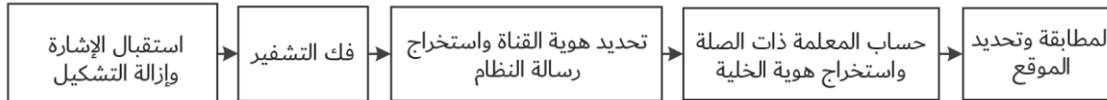
6.A1 تحديد الموقع الجغرافي لمحة قاعدة النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM)

تقتضي الضرورة تحديد موقع محطات النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM) عندما يقع تداخل بين مختلف مشغلي شبكات هذا النظام أو يُطلب تنسيق شبكة النظام في المناطق الحدودية. ويمكن أن تُستخدم محطات المراقبة لتمييز محطات قاعدة النظام العائدة لمختلف مشغلي شبكات النظام بالاستفادة من الأسلوب التقليدي لكشف الاتجاه (DF) وتحديد الموقع الجغرافي. بيد أن من الأسهل أن تنفَّذ هذه المهمة بفك شفرة إشارات النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM) واستخراج معلومات منها، مثل مشغل شبكة النظام والهوية العالمية للخلية (CGI)، وما إلى ذلك.

والهوية العالمية للخلية (CGI) هي رقم فريد يُستخدم لتحديد هوية محطة قاعدة النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM) التي توصل بها معدات المستخدم. وتتألف الهوية العالمية للخلية من سلسلة تضم هوية منطقة الموقع وهوية الخلية. ويظهر في الشكل 21-A1 رسم بياني موجز لاستخراج الهوية العالمية للخلية (CGI).

الشكل 21-A1

رسم بياني لاستخراج الهوية العالمية للخلية (CGI)



Report SM.2355-A1-21

تنبغي إزالة تشكيل إشارة النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM) وفك تشفيرها أولاً بعد أن يستقبلها جهاز استقبال محطة المراقبة. ثم ينبغي التعرف على القناة الخاصة، وينبغي أن تُستخرج رسالة النظام منها. ويمكن أن يُعرف موضع محطة قاعدة النظام العالمي للاتصالات المتنقلة بعد مطابقة المعلمة ذات الصلة وهوية الخلية مع قاعدة البيانات. وفي توليفة مع أسلوب زاوية الورد (AOA)، يمكن لمحطة المراقبة المتنقلة تحديد الموقع الدقيق لمحطات قاعدة النظام العالمي للاتصالات المتنقلة في منطقة واحدة بتخطيط طريق المراقبة المناسب.

7.A1 استخدام السواتل الصغيرة لمراقبة الطيف

1.7.A1 مقدمة

تعتمد مراقبة الطيف التقليدية أساساً على أنظمة مراقبة الطيف للأرض، مثل محطات المراقبة الثابتة ومركبات المراقبة المتنقلة. بيد أن مرافق مراقبة الطيف هذه محدودة بتغطية العديد من النطاقات الترددية. فالإشارات الراديوية ذات الترددات العالية تمنعها بسهولة العوائق الأرضية، مثل المباني والتلال. وبالتالي، تكون مراقبة الطيف على الأرض صعبة عند مراقبة الطيف في منطقة واسعة. وبالإضافة

إلى ذلك، عندما يتعذر على نظام المراقبة الأرضية ضمان مراقبة الإشارات عند خط البصر (LOS)، تكون قدرات تحديد موقع المرسل محدودة.

ومن أجل حل مشكلة مراقبة الطيف على نطاق واسع، يمكن النظر في مراقبة الطيف باستخدام السواتل الصغيرة في مدار أرضي منخفض. وتتسم المراقبة الساتلية بتغطية واسعة ويمكنها أداء مراقبة الطيف بصورة مستمرة وعلى مستوى عالمي. وقد تمكن الهيئات التنظيمية الراديوية من فهم استخدام الطيف بشكل تام في مناطق واسعة من العالم وتحديد موقع التداخل الضار.

2.7.A1 معمارية المراقبة الساتلية

يمكن للمراقبة الساتلية أن تستخدم سواتل صغيرة أو كوكبات ساتلية لمراقبة الطيف الراديوي باستمرار على نطاق عالمي. عندما يتحرك الساتل في مداره، يستقبل إشارات من مناطق أرضية مختلفة. ويتمثل جوهر المراقبة الساتلية في تحويل المراقبة الأرضية الحالية ثنائية الأبعاد إلى المراقبة الفضائية ثلاثية الأبعاد. ونتيجة لذلك، يمكن التغلب على الحواجز الجغرافية وتحقيق المراقبة العالمية للطيف. ويمكن للمستعملين الاستفادة من بيانات الطيف الكافية التي يجمعها الساتل لتسهيل التنسيق الدولي للترددات وتنفيذ تحديد الموقع الجغرافي للإشارة على الصعيد العالمي. ويمكن للهيئات التنظيمية الوطنية للطيف استعمال المراقبة الساتلية لتحديد أنماط استعمال الطيف، بحيث تستطيع فهم بيئة الطيف بشكل أفضل وتحسين كفاءة إدارة الطيف.

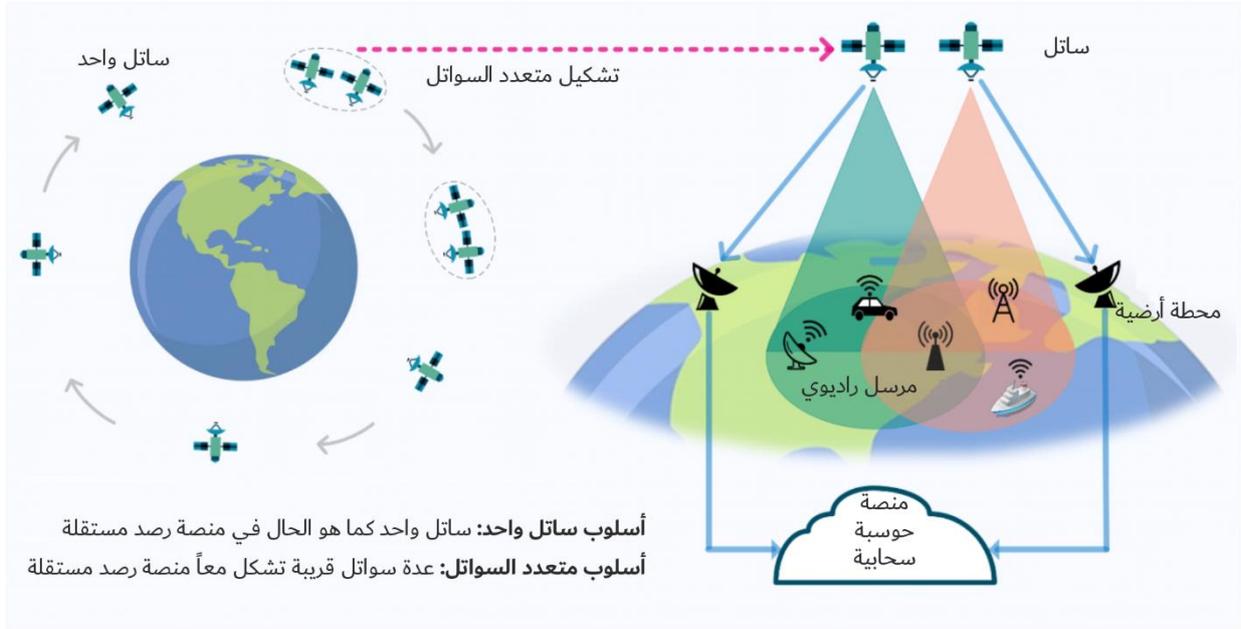
وبالإضافة إلى توفير تغطية عالمية، يمكن لهذه المنصات أن تحقق معدلات تكرار عالية في جميع المواقع الجغرافية. ومن الممكن، عن طريق وضع منصات المراقبة الساتلية المتنقلة هذه في مدار أرضي شديد الميل، الحفاظ على مراقبة الطيف على الصعيد العالمي بعدد قليل نسبياً من الأصول، على خلاف منصات المراقبة القائمة على الأرض أو الجو التي تكون محدودة للغاية بالتنقلية واتساع نطاق التغطية. وبشكل عام، يمكن لنظام ساتلي لمراقبة الطيف في مدار أرضي منخفض متزامن مع الشمس (SSO)، على سبيل المثال، أن يغطي عموماً كامل الأرض مرتين في اليوم. ويمكن، من خلال زيادة عدد السواتل في الكوكبة، زيادة معدلات إعادة الزيارة للنظام بشكل كبير، فعلى سبيل المثال، يمكن لاثني عشر من هذه الأنظمة المتباعدة بالتساوي إعادة زيارة كل موقع كل ساعة. ومن خلال اعتماد مدارات ساتلية مائلة، يمكن تحسين معدل إعادة زيارة مناطق معينة.

ويبين الشكل A1-22 معمارية مراقبة الطيف الساتلية [1]. يحمل كل ساتل صغير حمولة مراقبة راديوية تقوم باستقبال الإشارات الراديوية المرسله من الأرض وكشفها ومعالجتها. وعندئذ، يمكن إرسال بيانات الطيف هذه إلى المحطات الأرضية المناسبة. وتوزع هذه المحطات الأرضية في جميع أنحاء العالم. ونظراً لأن نافذة الوقت التي يمر فيها الساتل فوق محطة الاستقبال لا تتجاوز بضع دقائق، يلزم أن يكون معدل إرسال البيانات من الساتل إلى الأرض مرتفعاً. وأخيراً، تُستخدم منصة الحوسبة السحابية لتخزين بيانات الطيف وتحليلها، حيث يمكنها حساب شغل الترددات وأداء تحديد الموقع الجغرافي للإشارة. ويمكن للنظام أن يعمل بأسلوب ساتل واحد وأسلوب متعدد السواتل وفقاً لعدد سواتل الرصد المستقلة. ففي الحالة الأولى، يستعمل ساتل واحد لمراقبة الإشارات وأداء تحديد الموقع الجغرافي. وفي معمارية التشكيل الساتلي المتعدد، يعمل ساتلان متجاوران على الأقل معاً لتكوين منصة رصد لتحسين قدرات تحديد الموقع الجغرافي.

ويلاحظ أن جميع أنواع الإشارات التي تشعها الأرض مناسبة للمراقبة الساتلية. ومعظم الإشارات التي تصل إلى الساتل ضعيفة جداً بسبب خسارة الانتشار الكبيرة كما أن الهوائي الموجود على الساتل الصغير يوفر حساسية محدودة. ويتمثل مفتاح تحديد جدوى المراقبة في كشف الإشارات من الضوضاء، والذي يعتمد أساساً على قدرة الإشارة وخسارة الانتشار. وبصورة عامة، يتطلب الأمر أن تتجاوز نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء لإشارة الاستقبال عتبة معينة. والمراقبة الساتلية ممكنة بالنسبة إلى الإشارات التي تشمل البث الإذاعي FM، وأنظمة الراديو UHF بضغط الأزرار للتكلم، والإذاعة والاتصالات على نطاقات الموجات المترية (VHF)/الديسيمترية (UHF)، والأبراج الخلوية، وأجهزة التشويش على النظام العالمي للملاحة الساتلية (GNSS)، ومنارات نظام التعرف الأوتوماتي وببعض الأجهزة المتنقلة الساتلية^[1]. وبالإضافة إلى ذلك، يصعب التقاط الإشارات ذات الحزم الضيقة بالسواتل المتحركة في مدار أرضي منخفض، وهي غير مناسبة للمراقبة الساتلية. وتُستخدم الترددات فوق النطاق Ku عادة للخدمات الراديوية الاتجاهية ضيقة الحزمة. ولذلك، تكون نطاقات التردد المناسبة للمراقبة الساتلية عموماً من نطاق التردد VHF إلى نطاق التردد Ku.

الشكل 22-A1

معمارية مراقبة الطيف الساتلية



Report SM.2355-A1-22

وجدير بالإشارة إلى أن نظام مراقبة الطيف الساتلية سيصمم ويستهدف أنشطة مراقبة الطيف وتحديد الموقع الجغرافي، مثل تقييم تردد الإشارة وقياس عرض النطاق والقدرة وتحديد موقع المرسلات الراديوية.

3.7.A1 سيناريو التطبيق

واليوم، لا تقتصر مراقبة الطيف الساتلية على الجانب النظري فقط، بل يتم تطبيقها عملياً. وتقوم بعض شركات السواتل التجارية بنشر كوكبات صغيرة من السواتل في مدار أرضي منخفض لجمع ومراقبة الإشارات الراديوية من الأرض على نطاق عالمي، وتحديد الموقع الجغرافي للإشارات الراديوية بالإضافة إلى التداخل في نطاقات تردد محددة، مثل أجهزة التشويش على أنظمة الملاحة العالمية (GNSS).

1.3.7.A1 مراقبة الطيف

بما أن المراقبة الساتلية لها منطقة تغطية واسعة ومعدلات إعادة زيارة مرتفعة، فإنها مناسبة لمراقبة الطيف على نطاق واسع. وتمكن منصة مراقبة ساتلية من الحصول على بيانات الطيف بصورة مستمرة في جميع أنحاء العالم، ثم تستخدم هذه البيانات لتوليد معلومات عن استخدام الطيف مثل شغل الترددات وخرائط الطيف عبر الزمان والمكان. وبالتالي يمكن لإدارة الطيف أن تفهم أنماط استعمال الطيف بدقة وأن تحسن كفاءة استعمال الطيف.

وعلاوة على ذلك، وكنظام موحد للمراقبة، يمكن لهذا النظام أيضاً أن يسد فجوات مراقبة الطيف في جميع أنحاء العالم. ونظراً للتغطية الواسعة للسواتل، فإن تكلفة الساتل لا تتأثر بحجم منطقة التغطية. ويمكن لطريقة مراقبة الطيف هذه أن تعمل بفعالية في المناطق النائية التي قد يصعب فيها رصد الأصول التقليدية على أساس منتظم – بحيث تشمل الصحاري والمناطق الجبلية والمناطق القطبية والمحيطات. ويمكن لبيانات المراقبة المجمعة أن تساعد الإدارات في إدارة الطيف وأن تعزز كفاءة استخدام طيف الترددات الراديوية لصالح المستعملين في البلدان النامية والمتقدمة على السواء.

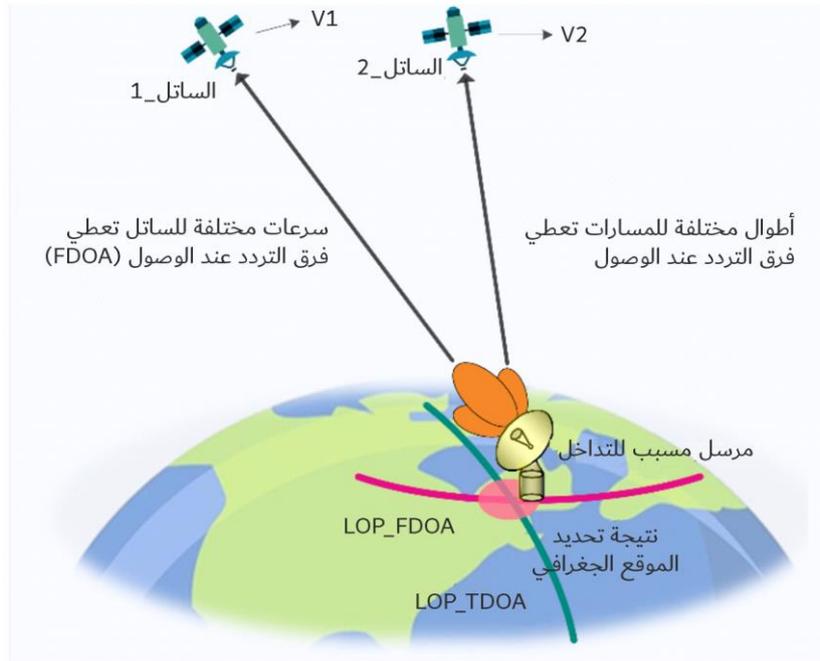
2.3.7.A1 تحديد الموقع الجغرافي للمرسل

يمثل تحديد الموقع الجغرافي من خلال منصة ساتلية طريقة واعدة لحل المشاكل ذات الصلة، مثل الحاجة إلى رسم خرائط استخدام الطيف وتحديد مواقع التداخل الراديوي مع الإشارات العامة مثل النظام العالمي للملاحة الساتلية. وتتمثل الميزة الرئيسية في قدرة السواتل على استقبال الإشارات عند خط البصر مباشرة دون أن تتأثر بالعوائق الأرضية. وبالتالي، يمكن تنفيذ تقنيات تحديد الموقع الجغرافي بسهولة. وإحدى التقنيات المناسبة لتحديد الموقع الجغرافي المستخدمة في المراقبة القائمة على السواتل هي تحديد الموقع الجغرافي باستخدام قياسات TDOA/FDOA [1].

ويوضح الشكل 23-A1 مبدأ تحديد الموقع الجغرافي. وبسبب خصائص إشعاع هوائي المرسل، يمكن استقبال الإشارة بمجموعة من ساتلين أو أكثر تحلق في تشكيل قريب. ويمكن لتزامن الميقاتيات الساتلية التي توفرها إشارة النظام العالمي للملاحة الساتلية مثل النظام العالمي لتحديد الموقع (GPS) أن يسمح بقياسات دقيقة لوصول إشارات الترددات الراديوية في نظام المراقبة الساتلية. وبما أن طول مسير انتشار الإشارة مختلف، سيؤدي إلى تأخر زمني وينتج بالتالي قياس TDOA. وإضافة إلى ذلك، تُحدث حركات السواتل بالنسبة إلى المرسل زحزحة دوبلر للإشارة، مما يؤدي إلى قياس تردد مختلف من كل ساتل ينتج عنه قياس FDOA. ويمكن استخدام كل قياس TDOA أو FDOA لحساب خط الموضع (LOP) على سطح الأرض الذي سيمر عبر المرسل. ويمكن لتقاطع خطوط الموضع أن يوفر موقعاً تقديرياً للمرسل. وتكون عمليات الرصد لتحديد الموقع الجغرافي لهذه الإشارات دقيقة عموماً في حدود بضعة كيلومترات من مصدر المرسل.

الشكل 23-A1

تحديد الموقع الجغرافي باستخدام قياسات TDOA/FDOA



Report SM.2355-A1-23

المراجع

- [1] Caiyong Hao *et al.*, "Satellite-Based Radio Spectrum Monitoring: Architecture, Applications, and Challenges," *IEEE Network*, vol. 35, no. 4, pp. 20-27, July/August 2021.

الملحق 2

أمثلة على تطبيق تحديد الموقع الجغرافي بالجمع بين أسلوبين

1.A2 هجين زاوية الورد (AOA)/فرق وقت الورد (TDOA)

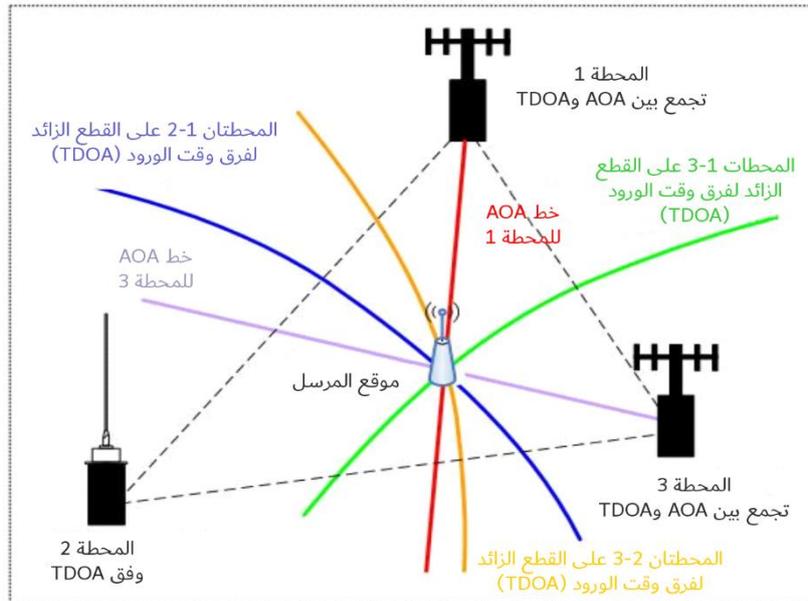
ليس هنالك، بصفة عامة، طريقة واحدة، كنتلك القائمة على قياس فرق وقت الورد (TDOA) وزاوية الورد (AOA)، من شأنها أن توفر تقديراً دقيقاً للموقع في جميع الظروف. ولكل طريقة ما تنفرد به من محاسن ومآخذ من حيث دقة تحديد الموقع.

وتوفر طرائق TDOA عموماً دقة أفضل في تحديد الموقع للإشارات عريضة النطاق مما توفره طريقة تحديد الموقع القائمة على زاوية الورد (AOA). ومع ذلك، تتطلب الطرائق القائمة على TDOA عدداً أكبر نسبياً من المحطات مما تتطلبه الطرائق القائمة على AOA للتمكن من تحديد موقع المرسلات. إذ تتطلب الطرائق القائمة على TDOA مثلاً ما لا يقل عن ثلاث محطات موزعة على نحو ملائم لتحديد الموقع. أما طرائق AOA فتتطلب محطتين من أجل تحديد الموقع. ومع ذلك فإن خطأ صغيراً في قياسات الزوايا يؤدي إلى خطأ كبير في تحديد الموقع إذا كانت المحطة بعيدة جداً عن المرسل. ولذلك، ولتحقيق درجة أفضل من الدقة، ينبغي النظر في توليف مخططين أو أكثر من مخططات تحديد الموقع لكي يكمل كل منها الآخر.

وتجري عملية تحديد الموقع بمعالجة المعلومات المتاحة من كل محطة، بما في ذلك قياسات AOA وقياسات TDOA ومعلومات موقع المحطة. ومن شأن توليف طريقة AOA مع طريقة TDOA (يدعى هجين زاوية الورد (AOA)/فرق وقت الورد (TDOA)) أن يساعد في إزالة غموض الموقع المرتبط بطريقة TDOA لوحدها وأن يعزز دقة تحديد الموقع. وهذا موضح في الشكل 1-A2. ويرد بحث أوفي بشأن أساليب زاوية الورد (AOA)/فرق وقت الورد (TDOA) الهجينة في كتيب الاتحاد بشأن مراقبة الطيف، طبعة عام 2011، الفقرة 6.3.7.4.

الشكل 1-A2

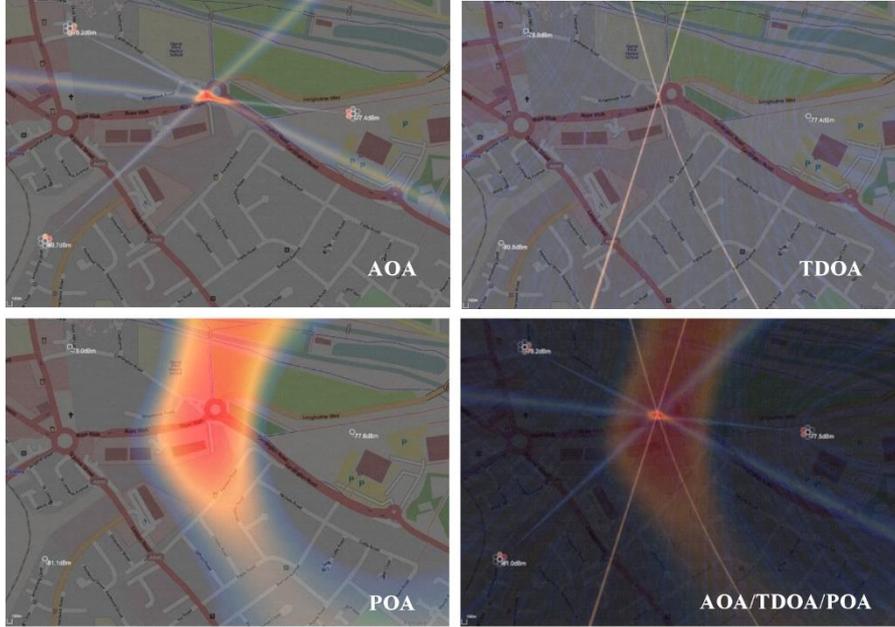
النتائج المحسنة على أساس الجمع بين تقنيتي زاوية الورد (AOA)/
فرق وقت الورد (TDOA)



ويفلح استخدام تقنيات قدرة الورد (POA) على أفضل وجه عموماً على مسافات محددة من المرسل حسب القدرة وماهية الجلبة واضطرابات الإشارة الأخرى (مثل عوامل الامتصاص) الموجودة في المنطقة. ويتميز ذلك بأهمية خاصة لأن هذه التقنيات تستخدم عادة نماذج الانتشار على خط البصر، وتعمل كتنقية لتحديد الموقع الجغرافي تجمع بين زاوية الورد (AOA) وفرق وقت الورد (TDOA). ويتضح ذلك في الشكل 2-A2.

الشكل 2-A2

تحديد الموقع الجغرافي بالجمع بين أسلوبين



Report SM.2355-A2-02

2.A2 هجين فرق وقت الورد (TDOA)/نسبة كسب الورد (GROA)

1.2.A2 مقدمة

إن تكنولوجيا شبكة مراقبة الشبكة هي واحدة من التكنولوجيات التي يمكن أن تصف وتعرض مكانياً أجهزة البث الراديوي المجهولة وتقيّم موارد الطيف باستخدام عقد مراقبة عن بعد للترددات الراديوية ذكية وموزعة. وتتصدى تكنولوجيا شبكة مراقبة الشبكة لتحديات الاستخدام الحديث للطيف ومتطلبات كفاءة إدارة موارد الطيف للبيئة الحضرية. ومكونات معمارية هذا النوع من الأنظمة تميزه عن غيره من الأنظمة ذات نظم كشف اتجاه (DF) زاوية الورد الأكثر تقليدية، والتي يمكن أن تكون أكثر تعقيداً ومكلفة، ويغلب استخدامها في سيناريوهات واسعة النطاق.

وقد أوعزت الصين بإجراء دراسة بشأن تصميم شبكة مراقبة الشبكة يمكن نشرها بأعداد كبيرة لكشف مصدر إشارات راديوية مسببة للتداخل تلقائياً، وتحديد هويته وموقعه في جزء كبير من منطقة حضرية في الصين. وفي يونيو 2012، أُطلق برنامج تجريبي يغطي أكثر من 75 كيلومتراً مربعاً في منطقة وسط شنغهاي بواسطة 46 عقدة قابلة للتوصيل الشبكي، على النحو المبين في الشكل 3-A2. وانضم أكثر من 50 باحثاً ومهندساً إلى هذا البرنامج الذي يشكل أول ميدان تجريبي لاستكشاف أساليب المراقبة الراديوية في منطقة حضرية بواسطة عدد كبير من العقد ذات التكلفة المنخفضة في الصين. ونفذ البرنامج التجريبي في يونيو 2013. وأجرى الاختبار الميداني 16 مشاركاً في الاختبار من أطراف ثالثة في أغسطس 2013. وبحلول عام 2014، كانت الشبكة التجريبية مشغلة في طور الاختبار لمدة سنة تقريباً.

الشكل 3-A2

شبكة مراقبة الشبكة بواسطة 46 عقدة



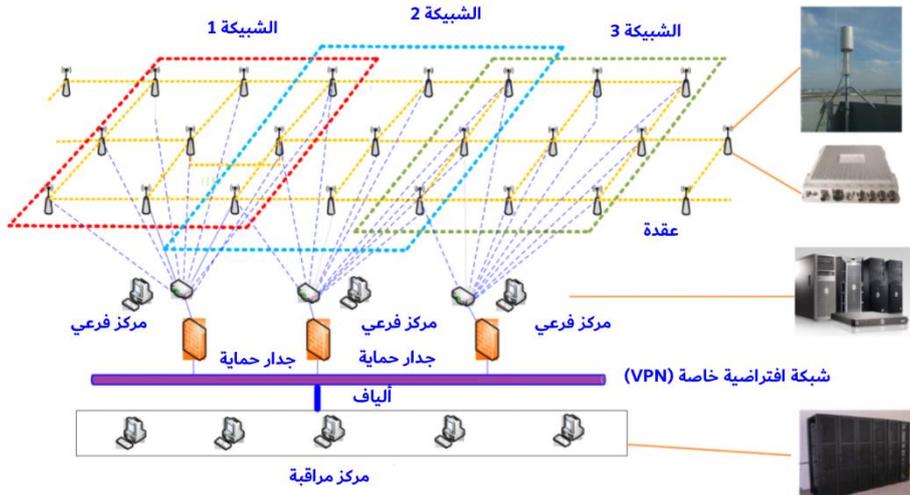
Report SM.2355-A2-03

2.2.A2 معمارية شبكة مراقبة الشبكة

- إن شبكة مراقبة الشبكة هي شبكة تشابك نمطية تدعم الشبكات الدينامية وهيكلًا ذا سعة استيعابية. ويتكون هيكل شبكة مراقبة الشبكة في البرنامج من ثلاث طبقات، على النحو المبين في الشكل 4-A2:
- طبقة الاستشعار: تتضمن العقد كافة القابلة للتوصيل الشبكي وذات التكلفة المجزية (هوائي بمخروطين وجهاز استشعار وهوائي النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS));
 - طبقة الخدمة الوسطى: تتكون من مخدّمات المركز الفرعي بعدة شبكات، لتنظيم مهام المراقبة وتوزيعها على أجهزة الاستشعار؛
 - طبقة مركز المراقبة: تتضمن جميع التطبيقات البرمجية كتطبيقات مراقبة الطيف وتحديد المواقع واستخراج البيانات.

الشكل 4-A2

معمارية شبكة مراقبة الشبكة

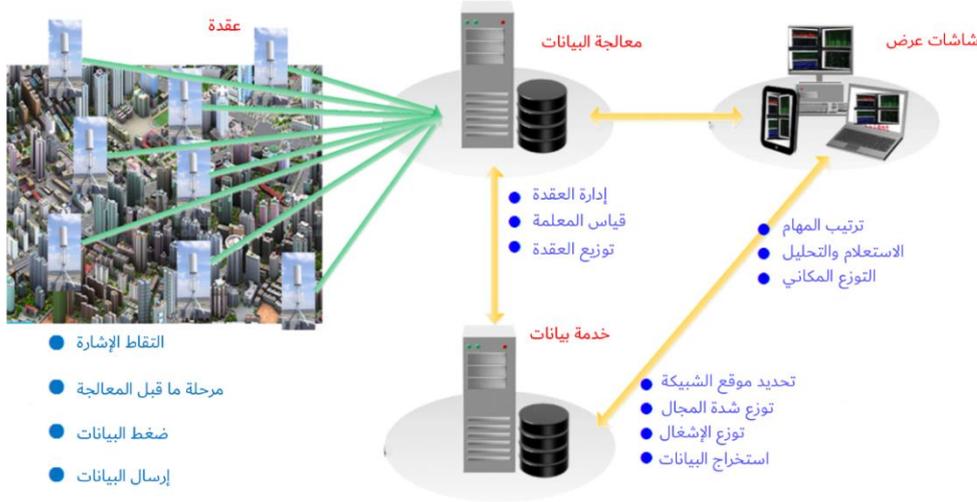


Report SM.2355-A2-04

ويظهر في الشكل 5-A2 تدفق عملية شبكة مراقبة الشبكة.

الشكل 5-A2

تدفق عملية شبكة مراقبة الشبكة



Report SM.2355-A2-05

إن العقدة القابلة للتوصيل الشبكي ذات التكلفة المجزية، كذلك التي تظهر في الشكل 6-A2، هي العنصر الأساسي في شبكة مراقبة الشبكة. وهي تختلف كثيراً عن عقدة كشف الاتجاه التي غالباً ما تكون متعددة القنوات ومكلفة للغاية. لذلك، يمكن أن تكون تكاليف شبكة مراقبة الشبكة أقل بكثير من خلال استخدام أساليب ارتباط الإشارة، حسب مساحة المنطقة المراقبة وبالتالي عدد العقد المطلوبة. ولتجزي التكلفة أهمية كبيرة بالنسبة للبلدان النامية ذات الميزانية المحدودة، والمناطق الحضرية التي تكثر فيها أعداد عقد المراقبة.

الشكل 6-A2

جهاز استشعار بالترددات الراديوية وهوائي بمخروطين بتكلفة مجزية وقابلية التوصيل الشبكي



Report SM.2355-A2-06

3.2.A2 الخواص الوظيفية للنظام

1.3.2.A2 اعتراض إشارة ضعيفة

اختُبر أداء المراقبة استناداً إلى أجهزة الاستشعار المنصوبة في شبكة مراقبة الشبكة. ونُفذ الاختبار الميداني طيلة 19 يوماً في مناطق التغطية بواسطة 16 جهة اختبار من أطراف ثالثة.

ويعرّف أدنى مستوى لقدرة بث جهاز البث "المستهدف" (جهاز البث الذي يتعين كشفه) بأنه نسبة إشارة إلى الضوضاء (SNR) ≤ 6 dB في المستقبل لترددات مختلفة (بما فيها MHz 115 و MHz 320 و MHz 575 و MHz 965 و MHz 1300 و MHz 1700 و MHz 2600) وعروض نطاق مختلفة (بما فيها kHz 12,5 و kHz 25 و kHz 100 و kHz 200 و MHz 1,25 و MHz 8)، وتظهر النتيجة في الجدول 1-A2.

الجدول 1-A2

احتمال كشف قدرة مختلفة لجهاز البث (131 قياساً)

| قدرة جهاز البث $W \leq 0,05$ | قدرة جهاز البث $W \leq 0,1$ | قدرة جهاز البث $W \leq 1$ | |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 92 | 114 | 128 | قياسات الكشف (SNR ≥ 6 dB) |
| %70,2 | %87 | %97,7 | احتمال الكشف (SNR ≥ 6 dB) |

2.3.2.A2 التحديد المهجين للموقع الجغرافي

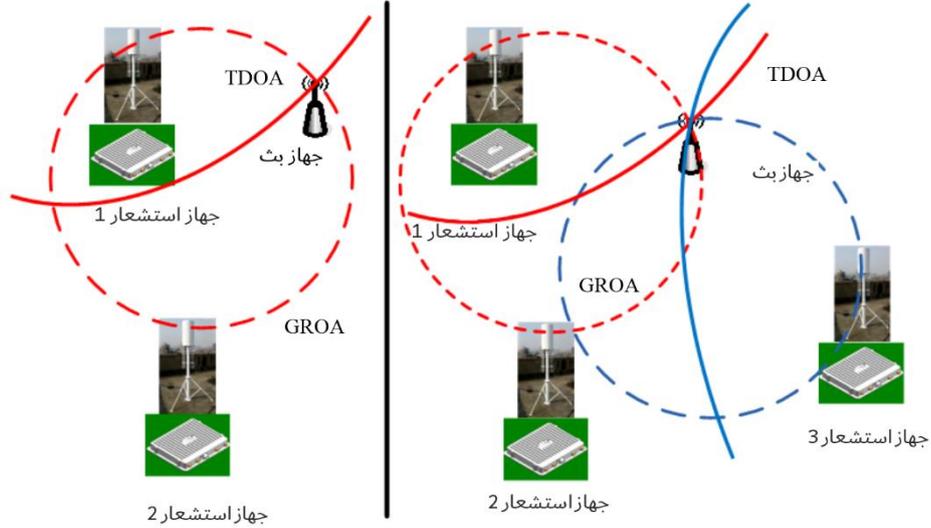
اختُبر أداء تحديد الموقع الجغرافي بالشبيكة (بتهجين فرق وقت الورود (TDOA) ونسبة كسب الورود (GROA) معاً).

وأسلوب نسبة كسب الورود (GROA) هو أسلوب منفعل قائم على الطاقة يمكن استخدامه لتقدير مواضع المصدر من أجهزة استشعار متعددة. ولا يتطلب هذا الأسلوب مزامنة دقيقة بين أجهزة الاستشعار. وتحدد قيمة معينة لتقدير نسبة كسب الورود (GROA) دائرة بين مستقبلين يمكن أن يقع ضمنها المرسل الراديوي.

أما تقنية فرق وقت الورود (TDOA) فهي إحدى تقنيات تحديد المواقع الواعدة لأنظمة الاتصالات اللاسلكية. وتستند تقنيات فرق وقت الورود إلى تقدير الاختلاف في أوقات ورود إشارة من مصدر في أجهزة استقبال متعددة. وتحدد قيمة معينة لتقدير فرق الوقت القطع الزائد بين جهازي استقبال الذي يمكن أن يوجد المرسل الراديوي ضمنه، على افتراض وقوع المصدر وجهاز استقبال في مستو واحد، على النحو الموضح الشكل 7-A2.

الشكل 7-A2

رسم بياني لتقنيات التحديد الهجين للموقع الجغرافي بالجمع بين فرق وقت الورد (TDOA) ونسبة كسب الورد (GROA)



Report SM.2355-A2-07

تبين نتيجة الاختبار أن نسبة الأخطاء النمطية (الانحراف بين الموقع الفعلي والموقع المقدّر) التي تقل عن 300 m تناهز 82,3% في 402 قياس. أما نسبة القيمة النمطية لانحرافات تحديد الموقع بالشبكة التي تقل عن 100 m فهي تناهز 24,9%. ويُظهر الجدول 2-A2 معلمات مرسل الاختبار.

وعلى وجه التحديد، يمكن لشبكة مراقبة الشبكة تمييز وتحديد الموقع الجغرافي لإشارتين تعملان على نفس التردد في نفس الوقت بفضل استبانة الشبكة. وكمثال على اختبار جهازي بث بالمعلومات التالية: التردد 220 MHz وعرض النطاق 50 kHz والقدرة 1 W والتشكيل هو الإبراق بزحزحة الطور المتعامد (QPSK)، تعطي شبكة مراقبة الشبكة استبانة مكانية عالية لأجهزة بث متزامنة تعمل على مسافات مختلفة عن بعضها البعض (في الأشكال 8-A2 و 9-A2 و 10-A2)، إلا في الحالة التي يكون فيها جهازا البث ضمن الشبكة نفسها (في الشكل 11-A2).

الجدول 2-A2

معلمات اختبار التحديد الهجين للموقع الجغرافي

| المعلومات | القيمة |
|-----------------|---|
| التردد (MHz) | 2 600 ، 1 700 ، 1 300 ، 965 ، 575 ، 320 ، 115 |
| عرض النطاق (Hz) | 8M ، 1.25M ، 200K ، 100K ، 25K ، 12.5K |
| التشكيل | QAM ، MSK ، QPSK ، FSK ، FM ، AM |
| القدرة | W 1 |

الشكل 9-A2

الفصل المكاني لإشارتين لهما تردد مشترك
(المسافة الفاصلة بين جهازي البث هي 5,7 km)



Report SM.2355-A2-09

الشكل 8-A2

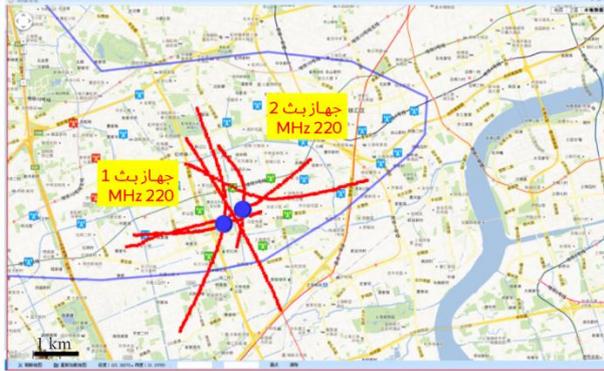
الفصل المكاني لإشارتين لهما تردد مشترك
(المسافة الفاصلة بين جهازي البث هي 7,2 km)



Report SM.2355-A2-08

الشكل 11-A2

الفصل المكاني لإشارتين لهما تردد مشترك
(المسافة الفاصلة بين جهازي البث هي 0,6 km)



Report SM.2355-A2-11

الشكل 10-A2

الفصل المكاني لإشارتين لهما تردد مشترك
(المسافة الفاصلة بين جهازي البث هي 4,1 km)



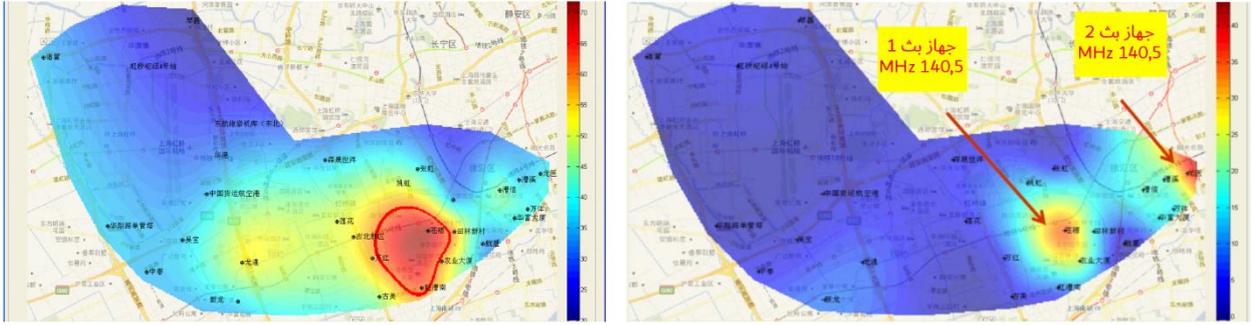
Report SM.2355-A2-10

A2.2.3.3 توزيع شدة المجال

يمكن لجميع العقد قياس شدة المجال في وقت واحد، ويمكن لشبكة مراقبة الشبكة كشف وحساب توزيع القناة في منطقة التغطية عن طريق الاستكمال الداخلي للبيانات في الوقت الفعلي. ويُحسب التوزيع حسب شدة المجال التي تكشفها كل أجهزة الاستشعار، وتُدمج بيانات المراقبة في الوقت الفعلي. ويُعرض مثالان أدناه لحالة جهاز بث قدرته 3 W وجهاز بث قدرتهما 3 W قيد التشغيل في وقت واحد.

الشكل 12-A2

توزيع شدة المجال (التردد 140,5 MHz، عرض النطاق 12,5 kHz، تشكيل FM، القدرة 3 W)



(أ) اختبار بجهاز اتصال لاسلكي واحد

(ب) اختبار بجهازين اتصال لاسلكيين

Report SM.2355-A2-12

يبين الشكل 12-A2 أن الانتشار الراديوي متباين الخواص على ما يبدو في البيئات الحضرية، وهو يختلف عن نماذج الانتشار النظرية متناحية الخواص. ويمكن تمييز جهازي البث العاملين على نفس التردد مكانياً بوضوح من خلال شبكة مراقبة الشبيكة. وهنا تقل المسافة بين جهازي البث عن 3 km. غير أن ذلك يصعب تحقيقه باستخدام نظام شبكة كشف الاتجاه الأكثر شيوعاً في البيئة الحضرية.

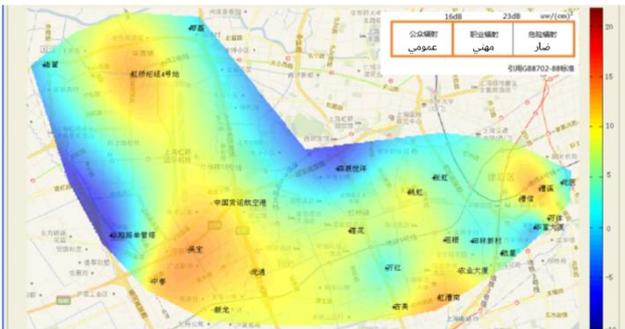
A2.2.3.4 الإشغال الجغرافي وتوزيع الإشعاع الكهرومغناطيسي

تُسند إلى إشغال الطيف التقليدي في كثير من الأحيان قيمة واحدة لمكان واحد. ولا يسهل أيضاً إيضاح كيف تُستخدم موارد الطيف. ويمكن لشبكة مراقبة الشبيكة أن تقدم تفاصيل عن إشغال الطيف مكانياً. وفي الشكل 13-A2، يمكن لجميع العقد قياس إشغال الطيف في وقت واحد (التردد = 400,5 MHz، عرض النطاق (BW) = 12,5 kHz، التشكيل FM، القدرة = 3 W).

وبالبيانات الخام عن الطيف داخل شبكة مراقبة الشبيكة، يمكن أيضاً أن يوصف التوزيع الجغرافي للإشعاع الكهرومغناطيسي في المناطق المغطاة، على النحو المبين في الشكل 14-A2. ويمتد النطاق الترددي من 30 MHz إلى 3 000 MHz، ويعبر عن الإشعاع الكهرومغناطيسي بكثافة القدرة بوحدة $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

الشكل 14-A2
توزيع الإشعاع الكهرومغناطيسي

الشكل 13-A2
التوزيع الجغرافي لإشغال الطيف



Report SM.2355-A2-14

Report SM.2355-A2-13

4.2.A2 الخلاصة

يمكن لشبكة مراقبة الشبكة ذات العقد مجزية التكلفة أن تلتقط الإشارات الضعيفة، لتقدم تفاصيل المراقبة الراديوية وتصف التوزيع المكاني للطيف في البيئة الحضرية، لذلك فهي ذات مغزى وفعالة في التحديد السريع للتوزيع المكاني للطيف وموقع مصادر التداخل.

قائمة المختصرات

| | |
|---|-------|
| إلغاء الضوضاء التكيفي (<i>Adaptive noise cancelling</i>) | ANC |
| زاوية الورد (<i>Angle of arrival</i>) | AOA |
| ضوضاء غوسية بيضاء إضافية (<i>Additive white Gaussian noise</i>) | AWGN |
| نفاذ متعدد بتقسيم الشفرة (<i>Code division multiple access</i>) | CDMA |
| معالجة رقمية للإشارات (<i>Digital signal processing</i>) | DSP |
| فرق تردد الورد (<i>Frequency difference of arrival</i>) | FDOA |
| الإحصاءات ذات الترتيب العالي (<i>Higher order statistics</i>) | HOS |
| المكبر المرکز (<i>Locked-in amplifier</i>) | LIA |
| متوسط تربيع أدنى (<i>Least mean square</i>) | LMS |
| تصنيف الإشارة المتعدد (<i>MUtiple Signal Classification</i>) | MUSIC |
| تعدد الإرسال بتقسيم تعامدي للتردد (<i>Orthogonal frequency division multiplexing</i>) | OFDM |
| قدرة الورد (<i>Power of arrival</i>) | POA |
| إبراق بزحزة الطور (<i>Phase shift keying</i>) | PSK |
| تشكيل الاتساع التربيعي (<i>Quadrature amplitude modulation</i>) | QAM |
| تربيع أدنى تكراري (<i>Recursive lease square</i>) | RLS |
| كثافة طيفية للترابط (<i>Spectral correlation density</i>) | SCD |
| فرق وقت الورد (<i>Time difference of arrival</i>) | TDOA |