

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التقرير **ITU-R SM.2355-0**
(2015/06)

تطور مراقبة الطيف

السلسلة **SM**
إدارة الطيف

الاتحاد الدولي للاتصالات



تمهيد

يظطلع 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 الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقدم 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 تقارير قطاع الاتصالات الراديوية

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

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

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

النشر الإلكتروني
جنيف، 2015

© ITU 2015

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).

ITU-R SM.2355-0 التقرير

تطور مراقبة الطيف

(2015)

جدول المحتويات

الصفحة

2	.....	مقدمة	1
2	.....	كشف الإشارة الضعيفة	2
2	.....	المكبر المرکز	1.2
3	.....	التكامل بأخذ عينات	2.2
4	.....	الارتباط	3.2
6	.....	إلغاء الضوضاء التكميني	4.2
6	.....	فصل الإشارات ذات التردد المشترك	3
7	.....	الفصل على قناة واحدة	1.3
10	.....	الفصل على قنوات متعددة	2.3
12	.....	تحديد الموقع متعدد الأساليب (استناداً إلى توليفة من تكنولوجيات تحديد الموقع)	4
12	.....	زاوية الورد	1.4
12	.....	فرق وقت الورد	2.4
12	.....	فرق تردد الورد	3.4
12	.....	قدرة الورد	4.4
13	.....	الاستعانة بمحدد الهوية	5.4
13	.....	نسبة كسب الورد	6.4
13	.....	خلاصة	5
13	.....	الملحق 1 - أمثلة على تطبيق تقنيات المراقبة المتقدمة	
13	.....	1.A1 تطبيق الارتباط في العثور على التداخل الساتلي	
17	.....	2.A1 تطبيق استرجاع إشارة قوية في المراقبة الساتلية	
18	.....	3.A1 تحليل المكون المستقل (ICA) في قناة واحدة لفصل إشارة	
21	.....	4.A1 قبولية الحزمة القائمة على الطيف المكاني في مراقبة الموجات الديكامترية (HF)/الموجات المترية (VHF) ...	
23	.....	5.A1 تطبيق تحليل المكون المستقل (ICA) متعدد القنوات لفصل إشارة	
26	.....	6.A1 تحديد الموقع الجغرافي لمخطة قاعدة النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM)	
27	.....	الملحق 2 - أمثلة على تطبيق تحديد الموقع الجغرافي بالجمع بين أسلوبيين	
27	.....	1.A2 هجين زاوية الورد (AOA)/فرق وقت الورد (TDOA)	
28	.....	2.A2 هجين فرق وقت الورد (TDOA)/نسبة كسب الورد (GROA)	

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 والمحطة الراديوية والبيئة الكهرومغناطيسية من خلال توفير بيانات مراقبة قيّمة، بما في ذلك بيانات عن إشغال الطيف، وخاصة الإشارة، مثل شدة المجال وعرض النطاق ونوع التشكيل وموقع جهاز البث، وما إلى ذلك.

وتمر أنظمة الاتصالات الراديوية في تطور مستمر وسريع. وفي جوانب استخدام الطيف، يبدو هذا التطور أساساً مستخدماً تكنولوجيات استعمال الترددات التكمي، وتعدد إرسال التردد المشترك، والنفذ واسع النطاق، والطيف الممدود (الطيف الممدود بالتتابع المباشر والقفز الترددي)، وما إلى ذلك. وتقدم أنظمة الاتصالات الراديوية المعرفة بالبرمجيات والاتصالات الراديوية الإدراكية أمثلة نمطية على أنظمة الاتصالات الراديوية التطورية. وفي المقابل، ينبغي أن تكون أنظمة مراقبة الطيف في المستقبل قادرة على مراقبة تكنولوجيات وأنظمة الاتصالات الراديوية الجديدة، مثل كشف الإشارة الضعيفة، وفصل الإشارات ذات التردد المشترك، وتحديد الموقع متعدد الأساليب بناء على معالجة الإشارة الرقمية (DSP) والشبكة، وما إلى ذلك.

2 كشف الإشارة الضعيفة

تتزايد ضرورة تحسين حساسية أنظمة المراقبة لكشف الإشارات المنخفضة القدرة الضعيفة الكثافة نظراً لتزايد أنظمة الاتصالات الراديوية الجديدة التي تستخدم قدرة أخذة في التناقص وعرض نطاق أخذ بالاتساع وترددات أخذة في الارتفاع.

وفي بعض الحالات، قد تكون الإشارات أضعف من ضوضاء الخلفية. ونتيجة لذلك، يصعب كشف وتحديد مكان إشارة غير نظامية منخفضة القدرة ضعيفة الكثافة باستخدام أنظمة المراقبة القائمة ذات الحساسية المحدودة. وينبغي لأنظمة مراقبة الطيف في المستقبل استخدام التكنولوجيا المتقدمة لاستخراج إشارات من ضوضاء الخلفية.

وترد في الفقرات التالية عدة أنواع من التكنولوجيات المستخدمة لكشف الإشارات الضعيفة.

1.2 المكبر المرکز

الموجة الجيبية هي الإشارة الأكثر شيوعاً بين إشارات اتصالات البيانات ويمكن تقدير سعتها وطورها بالمكبر المرکز (LIA). ويُفترض أن،

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

حيث:

U_s : اتساع إشارة الموجة الجيبية

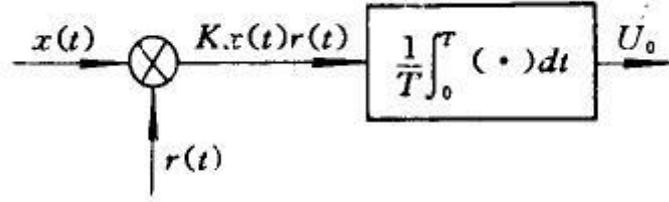
w_0 : التردد الزاوي

$n(t)$: ضوضاء الخلفية.

ويمكن تقدير U_s بحساب الارتباط المتبادل كما في الرسم البياني التالي الذي يظهر في الشكل 1.

الشكل 1

الرسم البياني للمكبر المرکز (LIA)



وهنا، $r(t)$ هي إشارة مرجعية لها نفس تردد الإشارة المكشوفة $x(t)$ ذات الاتساع U_r وفرق الطور φ ، و K هو ثابت. ومن ثم، يمكن وصف الخرج U_0 على النحو التالي:

$$U_0 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T K [U_s \cos \omega_0 t + n(t)] [U_r \cos(\omega_0 t + \varphi)] dt$$

وبما أن ضوضاء الخلفية لا ترتبط بإشارة الموجة الجيبية، تمكن كتابة الصيغة على النحو التالي:

$$U_0 = \frac{K U_s U_r}{2} \cos \varphi$$

ومن الواضح أن الخرج U_0 يبلغ القيمة القصوى وينبغي أن يقاس الاتساع U_s بدقة إذا كان فرق الطور φ صفراً، أي في حال كان للإشارة المرجعية $r(t)$ والإشارة الكاشفة $x(t)$ قيمة الطور نفسها.

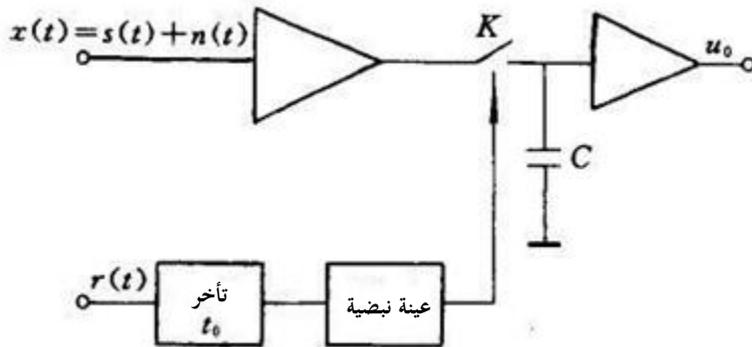
وباختصار، فإن المكبر المرکز (LIA) هو تطبيق لتقنية الارتباط المتبادل إلى حد ما.

2.2 التكامل بأخذ عينات

خلافاً للمكبر المرکز (LIA) المناسب للتعامل مع إشارة موجة جيبية، يمكن تطبيق تقنية التكامل بأخذ عينات لكشف إشارة نبضية دورية قصيرة الأمد. ويظهر رسم بياني لدارة التكامل بأخذ عينات في الشكل 2.

الشكل 2

رسم بياني لدارة التكامل بأخذ عينات



والإشارة المرجعية $r(t)$ لها نفس تردد الإشارة المكشوفة $x(t)$ التي تتألف من الإشارة المطلوبة $s(t)$ والضوضاء $n(t)$. وتتأخر الإشارة المرجعية $r(t)$ بزمن t_0 وتتولد إشارات العينة النبضية لأخذ عينات من الإشارة $x(t)$ بالبدالة K . وبعد التكامل وحساب المتوسط n مرة، يمكن وصف الخرج على النحو التالي:

$$u_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} x(t_0 + kT) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} s(t_0 + kT) + \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} n(t_0 + kT)$$

ونظراً لضعف ارتباط الضوضاء البيضاء في أوقات مختلفة، يمكن الحصول على الصيغ على النحو التالي:

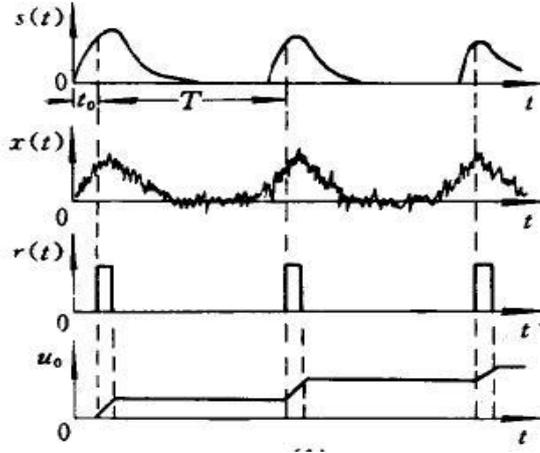
$$\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} n(t_0 + kT) \approx 0$$

$$u_0 \approx \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} s(t_0 + kT) = s(t_0)$$

ويمكن أن تكون الأشكال الموجية على النحو الموضح في الشكل 3.

الشكل 3

الأشكال الموجية للإشارات



3.2 الارتباط

1.3.2 الارتباط المتبادل

الترابط المتبادل هو قياس للتشابه بين شكلي موجتين كدالة لتأخير زمني يطبق على أحدهما. ويُفترض أن،

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

وعندئذ

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= E[y(t)x(t-\tau)] = E\{[s_2(t) + n_2(t)][s_1(t-\tau) + n_1(t-\tau)]\} \\ &= R_{s_1s_2}(\tau) + R_{s_1n_2}(\tau) + R_{n_1s_2}(\tau) + R_{n_1n_2}(\tau) = R_{s_1s_2}(\tau) \end{aligned}$$

وينطبق الارتباط المتبادل على الإشارات الدورية وغير الدورية على السواء. ومن الجدير بالذكر أيضاً أن خوارزمية ارتباط متبادل ثنائي الأبعاد ينبغي أن تطبق في حال وجود تخالف ترددي بين الإشارتين. ويمكن تعديل الإشارة كما يلي:

$$x_1(t) = s_1(t) + n_1(t), \quad x_2(t) = s_2(t)\exp(j2\pi\Delta f_c t) + n_2(t)$$

حيث يمكن أن ترمز Δf إلى التخالف الترددي بين إشارتين. ويمكن حساب تكنولوجيا الارتباط المتبادل ثنائي الأبعاد كما يلي:

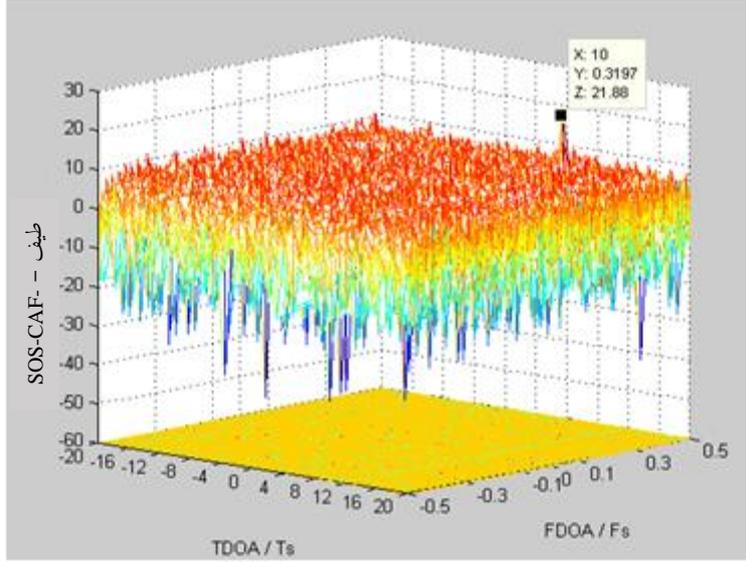
$$R_{xy}(f, \tau) = F\{E[y(t)x(t-\tau)]\}_t = R_{s_1s_2}(f, \tau)$$

حيث $F\{\}$ هو تحويل فورييه فيما يتعلق بالمتغير τ .

وعموماً، يمكن أن يولد الارتباط المتبادل ذروة ارتباط متميزة بارتفاع نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR). ويورد الشكل 4 مثالاً على تقنية الارتباط المتبادل ثنائي الأبعاد. فهو يُستخدم لتقدير فرق وقت الورود (TDOA) وفرق تردد الورود (FDOA). ويمكن أن يرى بوضوح ظهور ذروة واضحة في الشكل. ومن خلال البحث في موضع الذروة في ميدان الوقت والتردد، على التوالي، يمكن الحصول على قيم TDOA و FDOA المقابلة.

الشكل 4

مثال على الارتباط المتبادل ثنائي الأبعاد

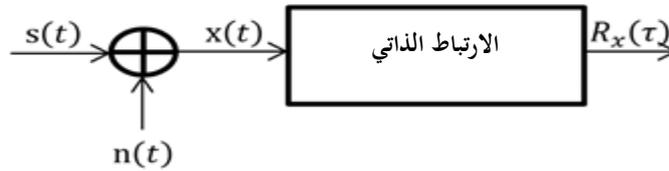


2.3.2 الارتباط الذاتي

الارتباط الذاتي هو ارتباط متبادل لإشارة مع نفسها. وعلى نحو غير رسمي، هو التشابه بين الرصدات كدالة لفواصل الزمن بينها.

الشكل 5

رسم بياني للارتباط الذاتي



في الشكل 5، $x(t) = s(t) + n(t)$ ، هي إشارة دورية، و $n(t)$ هو الضوضاء.

إذن:

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

وفي حال عدم ارتباط $s(t)$ و $n(t)$ ، يكون:

$$R_{sn}(\tau) = R_{ns}(\tau) = 0 \text{ و}$$

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

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

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

وهكذا $R_x(\tau) = R_s(\tau)$.

عند كشف إشارات ذات خصائص إحصائية دورية تقريباً، يمكن أيضاً أن تطبق خوارزمية ارتباط ذاتي معدلة تُعرف باسم "الارتباط الذاتي الدوري". وعلى غرار الصيغة أعلاه، يمكن التعبير عنها على النحو التالي:

$$R_x^\alpha(\tau) = E\{x(t)x(t-\tau)\exp(j2\pi\alpha\tau)\}$$

$$= R_s^\alpha(\tau) + R_n^\alpha(\tau) + R_{sn}^\alpha(\tau) + R_{ns}^\alpha(\tau)$$

حيث تسمى α التردد الدوري. وبالمثل، $R_{ns}^\alpha(\tau)$ و $R_{sn}^\alpha(\tau)$ تساويان 0، و $R_n^\alpha(\tau) = 0$ (حيث، $\tau \neq 0$ أو $\alpha \neq 0$).

$$R_x^\alpha(\tau) = R_s^\alpha(\tau), \text{ إذن}$$

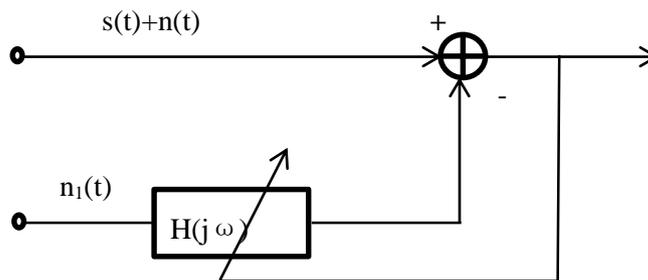
ومن الجدير بالذكر أن خوارزمية الارتباط الذاتي الدوري تصحح للإشارات الدورية وغير الدورية على السواء. فبالنسبة للإشارة الدورية، يمكننا ببساطة أن نجعل $\alpha = 0$ ، فتكون مكافئة حينها لخوارزمية الارتباط الذاتي التقليدية؛ أما بالنسبة للإشارة غير الدورية، يمكننا أن نجعل $\tau = 0$ ، ونكشف الإشارة من خلال البحث عن الذرى في ميدان التردد الدوري.

4.2 إلغاء الضوضاء التكيفي

يُحصل إلغاء الضوضاء التكيفي (ANC) على الإشارة المرغوبة من خلال الطرح التكيفي للضوضاء "المرجعية" المصطفة المترابطة مع الضوضاء المحتواة في الإشارة المكشوفة من الإشارة المكشوفة. ويظهر في الشكل 6 الرسم البياني لإلغاء الضوضاء التكيفي.

الشكل 6

الرسم البياني لإلغاء الضوضاء التكيفي (ANC)



تمكن معالجة الضوضاء المرجعية $n_1(t)$ المرتبطة بالضوضاء $n(t)$ بالمرشاح التكيفي $H(j\omega)$. ويمكن تقييد الضوضاء $n(t)$ ، ويمكن تحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) في الخرج.

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

3 فصل الإشارات ذات التردد المشترك

تتزايد مرسلات أو أنظمة الاتصالات الراديوية الجديدة التي تتشارك في موارد الطيف المحدودة وتعمل على تردد مشترك في ميادين مختلفة، مثل ميدان الزمن وميدان الشفرة والميدان المكاني، وما إلى ذلك. فعلى سبيل المثال، تعمل أنواع كثيرة من أنظمة الاتصالات الراديوية الخلوية وأنظمة الاتصالات بالموجات الديكامترية (HF) في مثل نموذج التردد المشترك هذا. وفي الوقت نفسه، يمكن أن تحدث أكثر حالات التداخل المقصود أو غير المقصود في الترددات المتراكبة.

وتستخدم بعض أنظمة الاتصالات الراديوية المتقدمة عدة تكنولوجيات تعدد إرسال بتعدد مشترك في وقت واحد. وفي مثل هذه الحالات قد تستقبل محطة مراقبة طيف واحدة بعض الإشارات المختلفة من أجهزة إرسال مختلفة تعمل على نفس التردد. ونتيجة لذلك، يصعب على نظام المراقبة القائم ذي الوظيفة المحدودة التفريق بين هذه الإشارات ذات التردد المشترك. وينبغي لأنظمة مراقبة الطيف في المستقبل استخدام التكنولوجيا المتقدمة لفصل الإشارات في ميادين مختلفة.

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

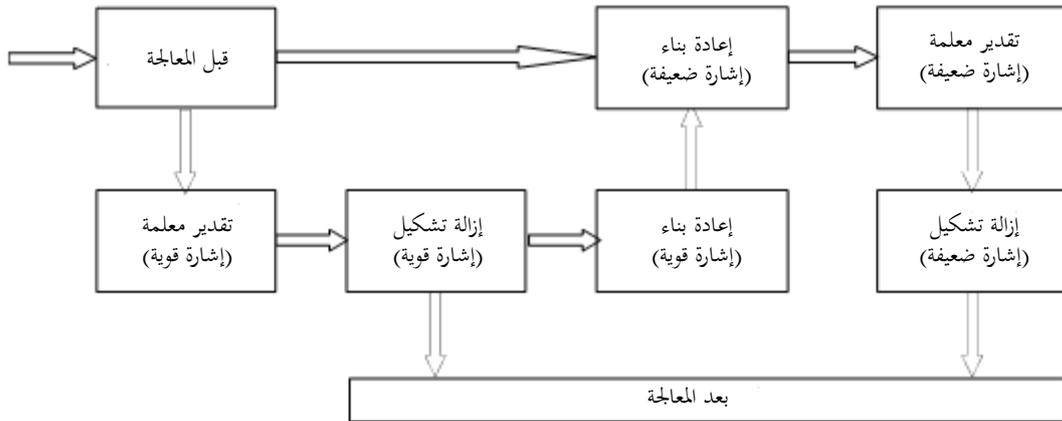
1.3 الفصل على قناة واحدة

1.1.3 استرجاع إشارة قوية

يمكن تطبيق استرجاع إشارة قوية لفصل الإشارة من إشارات مشكَّلة رقمية خطية قوية، مثل الإشارات المشكَّلة بتشكيل الإبراق بزحزحة الطور (PSK) وتشكيل الاتساع المتعامد (QAM). بيد أن هذه الخوارزمية لا يمكنها العمل إلا في إطار حالة إشارتين، وتتطلب نسبة قدرة أكثر من 6 dB. ويظهر الرسم البياني الموجز لهذه الخوارزمية في الشكل 7.

الشكل 7

رسم بياني لاسترجاع إشارة قوية



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 التكييفي الذي يمكنه إزالة إشارة ضعيفة شبيهة مضافة إلى الإشارة القانونية القوية، يمكن تطبيقها على هذه الوحدة بخوارزمية 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. ولا يبقى للتقدير إلا تردد الموجة الحاملة والطور الأولي والاتساع.

ج) إزالة تشكيل الإشارة القوية وإعادة بنائها

يمكن تطبيق 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 التكميني 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.

2.1.3 تحليل المكون المستقل في قناة واحدة

يمكن تطبيق تحليل المكون المستقل (ICA) في قناة واحدة على إشارة منفصلة عن بعض الإشارات الرقمية والتمثيلية المشكّلة، كالإشارات المشكّلة بتشكيل الإبراق بزحزحة الطور (PSK) وتشكيل الاتساع (AM). بيد أن هذه الخوارزمية لا يمكنها العمل إلا في إطار حالة إشارتين، وافترض ثبات معلمات القناة ثابتة خلال دور إرسال الإشارات.

لنأخذ إشارتي إبراق بزحزحة الطور ثنائي الحالة (BPSK) على سبيل المثال. تُرسل إشارتا إبراق بزحزحة الطور ثنائي الحالة بنفس تردد الموجة الحاملة ومعدل الرمز عبر القنوات اللاسلكية، وبعد عبور مذبذب محلي تتخذان الشكل التالي:

$$\beta_1(t) = h_1(t)e^{j(\Delta\omega_1 t + \phi_1)} \sum_{n=0}^M a_n g(t - nT - \tau_1)$$

$$\beta_2(t) = h_2(t)e^{j(\Delta\omega_2 t + \phi_2)} \sum_{n=0}^M b_n g(t - nT - \tau_2)$$

حيث $h_1(t)$ و $h_2(t)$ هما اتساعا إشارة ملوثة بنجوى القنوات، و $\Delta\omega_1$ و $\Delta\omega_2$ هما التخاليفان التردديان للموجة الحاملة، و ϑ_1 و ϑ_2 هما طوراً الموجة الحاملة العشوائيان، و a_n و b_n هما الرمزان المرسلان بالترتيب n والمأخوذان من نفس الأجدية المفصلة $\{-1, 1\}$ ، و M هو عدد الرموز، و $g(t)$ هي مرشحيه جيب التمام المرفوع المتطابقة المستخدمة لمنع التداخل بين الرموز (ISI)، و T هو دور الرمز، و τ_1 و τ_2 هما التأخران الزمنيان اللذان يحققان $(0, T)$ τ_1, τ_2 . ويمكن التعبير عن الإشارة المختلطة المرصودة في المستقبل على النحو التالي:

$$y(t) = \beta_1(t) + \beta_2(t) + n(t)$$

حيث $n(t)$ هي ضوضاء غوسية بيضاء مضافة بكثافة طيف قدرة قيمتها $N_0/2$.

وفي حال افتراض قنوات بطيئة الحبو وكمال تزامن تردد الموجة الحاملة، ينبغي عندئذ أن تثبت قيم كسب القناة خلال دور الإشارات المرسلّة. ونفترض أن قيم كسب القناة تتخذ شكل $h_j(t)e^{j\varphi_j} = h_j e^{j\varphi_j}$ حيث $j = 1, 2$. وإذ تشكل القيم العشوائية لكسب القناة إزعاجاً من حيث كشف الإشارة، فهي تؤدي دوراً هاماً في فصل الإشارات. ويمكن توسيع الإشارة المرصودة $y(t)$ إلى إشارات مزدوجة القناة باستخدام نسخة زحزحة الطور من الإشارة $y(t)$ على النحو التالي:

$$x_2(t) = h_1 \exp[j(\varphi_1 - \theta)] \sum_{n=0}^M a_n g_1(t - nT - \tau_1) + h_2 \exp[j(\Delta\omega t + \varphi_2 - \theta)] \sum_{n=0}^M b_n g_2(t - nT - \tau_2) + n_2(t)$$

و:

$$x_2(t) = h_1 \exp[j(\varphi_1 - \theta)] \sum_{n=0}^M a_n g_1(t - nT - \tau_1) + h_2 \exp[j(\Delta\omega t + \varphi_2 - \theta)] \sum_{n=0}^M b_n g_2(t - nT - \tau_2) + n_2(t)$$

حيث $\Delta\omega$ هو التخاليف الترددي للموجة الحاملة بين الإشارات في نفس القناة، و θ هو الطور المزحج المصطنع، ويُفترض عادةً أن الضوضاء الغوسية تساوي صفراً في المتوسط في كل من $[\pi/4, \pi/2]$ و $[\pi/4, \pi/2]$ θ و $n_1(t)$ و $n_2(t)$ بتغاير σ_1^2 و σ_2^2 على التوالي. وبأخذ الجزء الحقيقي من $x_1(t)$ و $x_2(t)$ معاً، يمكن الحصول على مصفوفة الخلط على النحو التالي:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} h_1 \cos \varphi_1 & h_2 \cos(\Delta\omega t + \varphi_2) \\ h_1 \cos(\varphi_1 - \theta) & h_2 \cos(\Delta\omega t + \varphi_2 - \theta) \end{bmatrix}$$

ويمكن التعبير عن متجه إشارات المصدر على النحو التالي:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=0}^M a_n g(t - nT - \tau_1) \\ \sum_{n=0}^M b_n g(t - nT - \tau_2) \end{bmatrix}$$

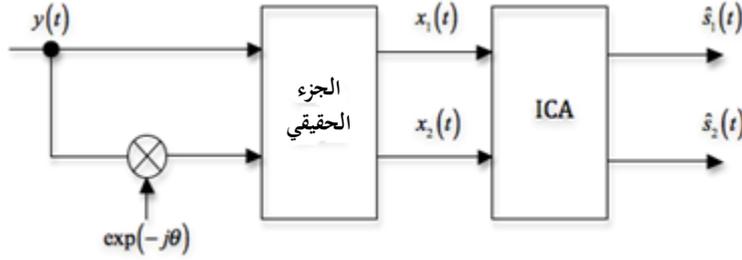
وإذا صغر التخاليف الترددي للموجة الحاملة ولم يُستخدم إلا دور قصير لبيانات الرصد، تمكن إعادة كتابة مصفوفة الخلط على النحو التالي:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} h_1 \cos(\varphi_1) & h_2 \cos(\varphi_2) \\ h_1 \cos(\varphi_1 - \theta) & h_2 \cos(\varphi_2 - \theta) \end{bmatrix}$$

وفي حال $\theta_1 \neq \theta_2$ ، لا يصعب الحصول على رتبة $(\mathbf{A}) = 2$. ويُدَلَّ على $\mathbf{X} = [x_1, x_2]^T$ بمتجه إشارات الخلط والحصول على مصفوفة 2×2 لإزالة الخلط $\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1}$ لاسترجاع مصادر من \mathbf{X} بتحليل المكون المستقل (ICA). ويرد في الشكل 8 هيكل الخوارزمية المقترحة لتحليل المكون المستقل في قناة واحدة.

الشكل 8

هيكل تحليل المكون المستقل (ICA) في قناة واحدة



تمكن نمذجة خوارزمية تحليل المكون المستقل (ICA) على غرار توليفة خطية من إشارات آنية، والهدف الرئيسي من ذلك هو تحقيق الاستقلال الأقصى لإشارات الخرج. ويتحقق إجراء الفصل المستتر ببناء مجموعة متنوعة من مصفوفات مختلفة لإزالة الارتباط. ولا يتطلب تحليل المكون المستقل أي معلومات عن الإشارات المرصودة، لكنه يحتاج إلى الإشارات المرسلّة لتلبية الاستقلال الإحصائي. ويمكن التعبير عن الإشارة المسترجعة $\hat{\mathbf{S}} = [\hat{s}_1, \hat{s}_2]^T$ بصيغة $\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{W}\mathbf{X}$.

2.3 الفصل على قنوات متعددة

1.2.3 تشكيل الحزمة القائم على الطيف المكاني

إن تشكيل الحزمة القائم على الطيف المكاني يمكن تطبيقه على سيناريو الانفصال المستتر لإشارات متعددة، الفعال أيضاً في إطار نمط تشكيل اعباطي، ويمكن تحقيق أداء جيد نسبياً في بيئة تنخفض فيها نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR). ويمكن توضيح النظرية الأساسية كما يلي:

إذا افترض أن الصفائف M استقبلت الإشارات P ، يمكن التعبير عن الإشارات المستقبلة بالمصفوفة $\mathbf{X}(t)$ على النحو التالي:

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

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

ثم بحساب مصفوفة الارتباط:

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

وبتطبيق إجراء تفكيك القيمة الذاتية، يمكن الحصول على سلسلة من القيم الذاتية والمتجهات الذاتية. ويمكن تقسيم مكان القيمة الذاتية إلى المكان الفرعي للبعد P في الإشارة والمكان الفرعي للبعد $M-P$ في الضوضاء، من خلال توزيع القيم الذاتية. ويسهل إثبات المعادلة التالية بتعامد المكان الفرعي للإشارة والضوضاء على النحو التالي:

$$\mathbf{a}(\theta_k)\mathbf{G}\mathbf{G}^H\mathbf{a}^H(\theta_k) = 0$$

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 $M \times (M-P)$. أما تعريف $P(\theta) = 1/[a(\theta_k)G G^H a^H(\theta_k)]$ ، فهو خوارزمية تصنيف الإشارة المتعدد (MUSIC) المعروفة. ويمكن تقدير اتجاه كل إشارة من خلال "حصاد ذرى" سلسلة القيم القصوى المحلية للإشارات.

إذا فُصلت الإشارة عن الاتجاه θ_k ، ستلتزم معاملات كل صيف بالتقييد التالي:

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

وصُممت أصناف متنوعة من الخوارزميات لحل المشكلة. وإحدى الخوارزميات الأكثر شيوعاً واستخداماً هي ما يسمى "تشكيل حزمة كابون (Capon)"، مبدأً بتقليل قدرة الخرج إلى أدنى حد. ويمكن حل المعاملات على النحو التالي:

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

وتلاحظ إمكانية الحصول على نتائج أفضل (من حيث متوسط مربع الأخطاء) في تقدير الترددات في نموذج أسي متراكب غير مَحْمَد باستخدام البيانات العادية والمترافقة معاً مقارنةً بمجرد استخدام البيانات العادية لتسلسل طول بيانات محدود، 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:

$$\bar{R} = R + J E(\bar{X}(t) \bar{X}^H(t)) J$$

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

2.2.3 تحليل المكون المستقل (ICA) على قنوات متعددة

يُستخدم تحليل المكون المستقل (ICA) على قنوات متعددة على نطاق واسع في ميدان فصل الإشارات ذات التردد المشترك. ومقارنة مع خوارزمية تشكيل الحزمة القائم على الطيف المكاني، لا تتحسس خوارزمية تحليل المكون المستقل (ICA) بموضع الهندسة النسبي للصفائف المستقبلية، ولا تحتاج إلى الالتزام بتقيد اتجاه الورد المختلف، وهذا ما يحسّن إمكانية تطبيقها.

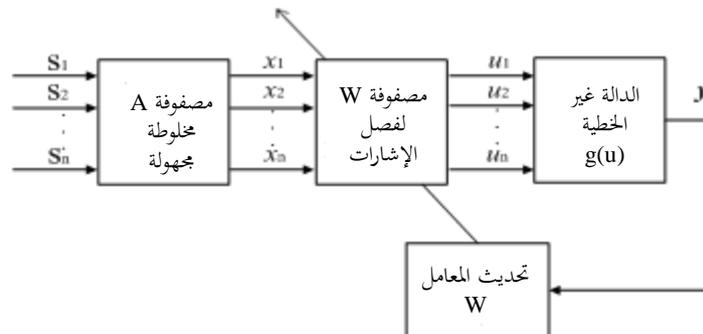
ويمكن التعبير عن الإشارة المختلطة المستقبلية كما يلي:

$$x(t) = A s(t) + n(t)$$

حيث A هي المصفوفة المختلطة ذات البعدين $m \times n$ ، و $s(t) = \{s_1(t), \dots, s_m(t)\}$ هي الإشارات الأصلية، و $x(t) = \{x_1(t), \dots, x_m(t)\}$ هي الإشارة المختلطة. ويمكن تنفيذ إجراء الفصل بتصميم دالة مناسبة غير خطية، $g(u)$ ، وخوارزمية تحديث للمصفوفة W . وتمكن رؤية تدفق العمل الأساسي في الشكل 9.

الشكل 9

هيكل تحليل المكون المستقل (ICA) على قنوات متعددة



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 ذات الصلة المستخدمة في تحديد موقع الإشارة. وتزايد 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 رسائل 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 ترددات راديوية واردة إلى صفيح هوائيات في ظروف عديدة. وهناك العديد من التقنيات لتحديد الاتجاه الزاوي، مثل مقياس تداخل الطور ومقياس التداخل المترابط وقولبة الحزمة والمرشاح المتوائم مكانياً وتقنيات المكان الجزئي، وما إلى ذلك. وفي إطار 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 اثنتين أو أكثر من محطات المراقبة الكاشفة للاتجاه والقائمة على 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، ولا تشكل الهوائيات والكبلات عموماً جزءاً أساسياً من مستقبلات فرق وقت الورود. 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.2211-1 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. وفي بعض الأحيان تتماثل فعالية اختيار إشارات بسرعة من هوائيات مختلفة في صفيح هوائيات مراقبة مستقبلية مع فعالية الحركة النسبية بين المرسل ومحطة المراقبة. وتنتج هذه الحركة النسبية انزياحات دوبلرية مختلفة يمكن استخدامها لحساب موقع المرسل بمعرفة السرعات الموجهة للمتجه. ويُستخدم فرق وقت الورود (TDOA) وفرق تردد الورود معاً أحياناً 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، وتُستخدم خصوصاً لأنظمة الاتصالات اللاسلكية المقيّسة. وعندما تكون قدرة الإرسال غير معروفة، يمكن الحصول عليها لتحديد موقع مرسل عن طريق حساب فرق قدرة الورود (PDOA) في أزواج من مستقبلات تقابل خسارة الانتشار المختلفة من جهاز الإرسال إلى مستقبلات مختلفة. وفي بعض

الظروف يسهل تحديد موقع الإرسال عندما يكون نموذج الانتشار بسيطاً، كتحديد موقع إرسال إذاعة بتشكيل ترددي (FM) عندما يكون في خط البصر بين جهاز إرسال إذاعي بتشكيل ترددي ومحطات مراقبة ثابتة.

5.4 الاستعانة بمحدد الهوية

تتزايد أهمية الاستعانة بمحدد الهوية لتحديد موقع مُرسل 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 لتحديد موقع جهاز الإرسال، بدقة أحياناً، كمعلومات عن خطوط الطول والعرض وعنوان بروتوكول الإنترنت، وما إلى ذلك. ويكمن السبيل الأنجع لتحديد موقع مُرسل في الجمع بين المعلومات المستقاة من محطة المراقبة وقاعدة بيانات مطابقة لشبكة الاتصالات الراديوية عندما يكون المرسل يشغّل للخدمات المتنقلة. والهاتف المتنقل الساتلي ومطراف الإنترنت الساتلي وجهاز الهاتف المتنقل هي مرسلات كلاسيكية يمكن تحديد مواقعها باستخدام أسلوب الاستعانة بمحدد الهوية.

6.4 نسبة كسب الورد

إن أسلوب نسبة كسب الورد (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 الورد (GROA) دائرة بين مستقبلين يمكن أن يقع ضمنها المرسل الراديوي.

5 خلاصة

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 المرکز والتكامل بأخذ عينات والارتباط الذاتي والارتباط المتبادل وإلغاء الضوضاء التكميني واسترجاع إشارة قوية وقولية الحزمة القائمة على الطيف وتحليل المكون المستقل (ICA) في قناة واحدة وفرق تردد الورد (FDOA) وقدرة الورد (POA) والاستعانة بمحدد الهوية ونسبة كسب الورد (GROA)، وهي أساليب يمكن استخدامها في مراقبة الطيف في المستقبل في ظل ظروف مختلفة.

وتبغى 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.

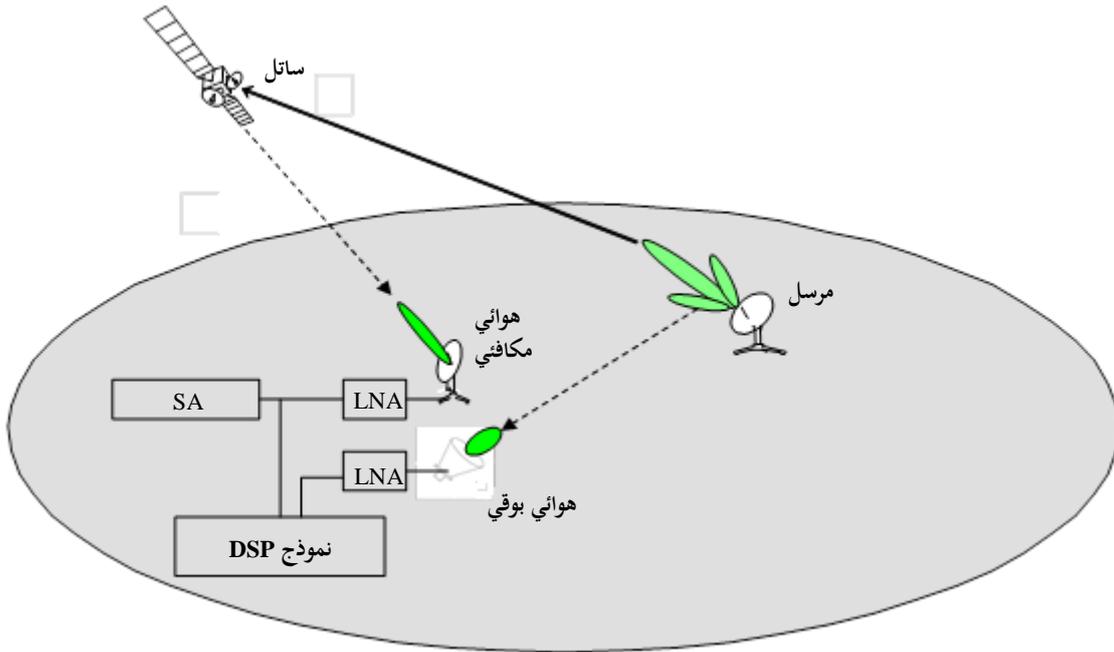
وفي الظرف أعلاه، ترتبط إشارات من الساتل المعرّض للتداخل والساتل المجاور بأنظمة موقع المرسل، ثم يمكن أن تتولد بيانات فرق وقت الورد (TDOA) وفرق تردد الورد (FDOA).

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 يمكننا الاستفادة من تقنية الارتباط المتبادل لتحسين حساسية نظام المراقبة المثبت على السيارة المتحركة. ويظهر رسم بياني موجز لهذا التطبيق في الشكل 1-A1.

الشكل 1-A1

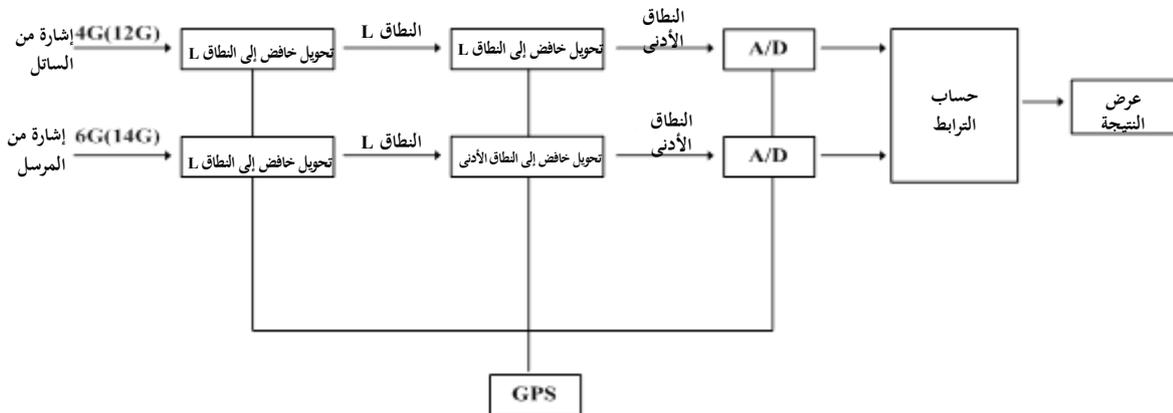
رسم بياني لتطبيق الارتباط المتبادل في العنور على التداخل الساتلي



في هذا النظام، يُستخدم حساب الارتباط المتبادل في وحدة معالجة الإشارة الرقمية لمعالجة الإشارات الواردة من الساتل بواسطة هوائي مكافئ 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)



في حساب الارتباط المتبادل، تُستخدم دالة الغموض المعقدة على أساس خوارزمية إحصاءات الدرجة الثانية (CAF-SOS) لتقدير فرق وقت الورود (TDOA) وفرق تردد الورود (FDOA) في وقت واحد للإشارات الواردة من الساتل وجهاز الإرسال.

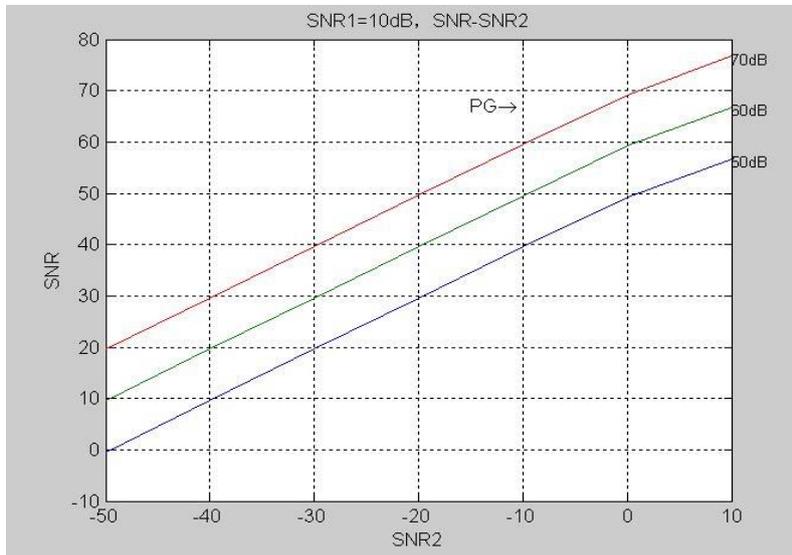
ويمكن وصف نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) للارتباط المتبادل على النحو التالي، وكل نسبة إشارة إلى الضوضاء هي قيمة خطية.

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

حيث $2BT$ هو كسب المعالجة، وإذا أُخذت عينات الإشارات بمعدل نايكويست (Nyquist) وكان N هو رقم نقطة العينة، نحصل 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

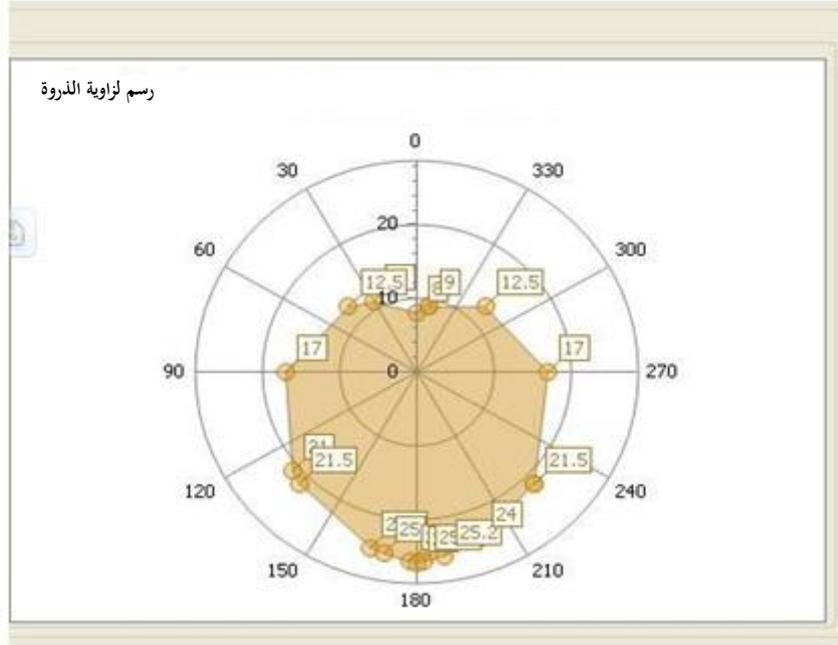
العلاقة بين snr و snr_2 عندما تكون $snr_1 = 10$ dB



وعادةً، يمكن للمعدات التي تستخدم حساب الارتباط المتبادل 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 بوقى اتجاهي بزوايا معينة وتلي ذلك عملية الارتباط المتبادل. وبعد الدوران 360 درجة، يستطيع المشغل العثور على اتجاه الإرسال عندما تبلغ نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) لارتباط كلتا القنوات (من الساتل ومن المحطة الأرضية) قيمتها القصوى، حتى عندما يكون مستوى الإشارة الأرضية أضعف من أن يُرصد بمحلل طيف (انظر الشكل 4-A1).

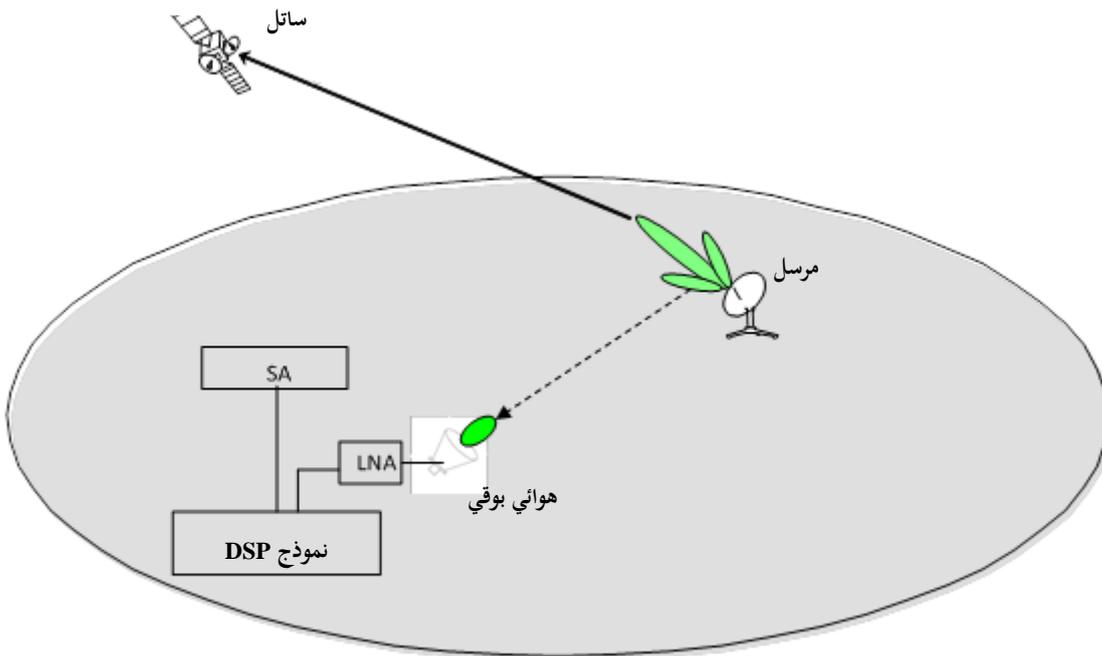
الشكل 4-A1
الرسم البياني لزاوية الذروة



وبدلاً من ذلك، يمكن للمعدات التي تستخدم الحساب القائم على الارتباط 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 الارتباط المتبادل، 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 الارتباط الذاتي الدوري في العثور على التداخل الساتلي



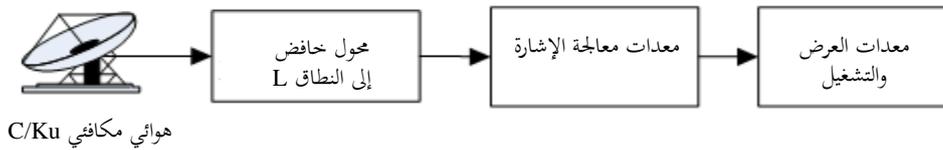
وبالمقارنة، يمكن للمعدات التي تستخدم الحساب القائم على الارتباط الذاتي الدوري كشف إشارات ضعيفة من مرسلات محطة أرضية على بعد عدة كيلومترات، فيما يمكن للمعدات التي تستخدم الحساب القائم على الارتباط المتبادل كشف إشارات ضعيفة من مرسلات محطة أرضية على بعد عشرات الكيلومترات؛ أما المعدات التي تستخدم مستقبِل 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 متزاكية. 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

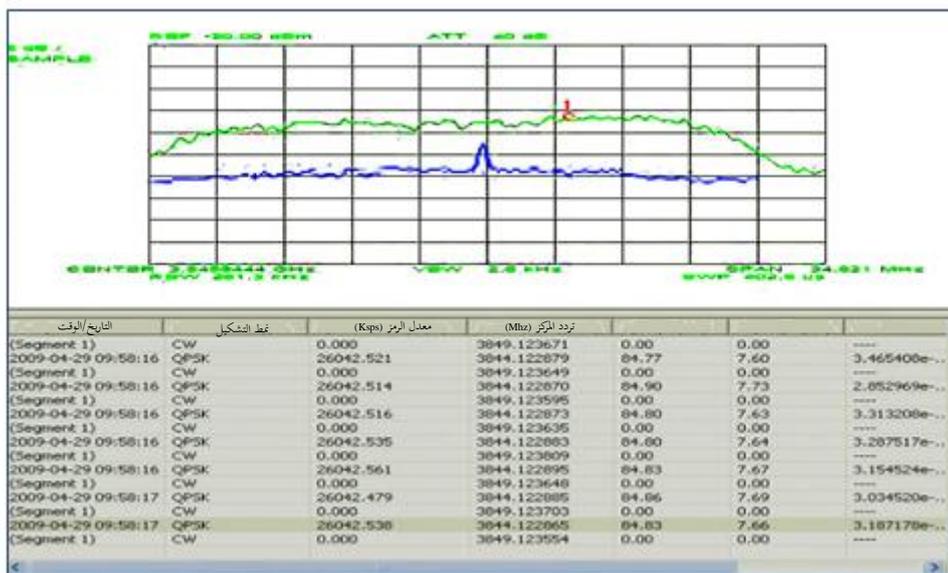


وفيما يلي مثال على تطبيق استرجاع إشارة قوية في فصل تداخل على شبكة ساتلية مستقرة بالنسبة إلى الأرض. والإشارة القانونية هي في تطبيق خدمة الإذاعة الساتلية (BSS) بتشكيل الإبراق بزحزحة الطور المتعامد (QPSK) ومعدل بود قدره 26,042 Mbit/s، والإشارة المسببة للتداخل هي إشارة موجة مستمرة (CW).

وكما يمكن أن يرى في الشكل 7-A1، يمثل الطيف الموضح كخط أخضر الإشارة المستقبلة، 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 7-A1

مثال فصل تداخل في شبكة ساتلية مستقرة بالنسبة إلى الأرض



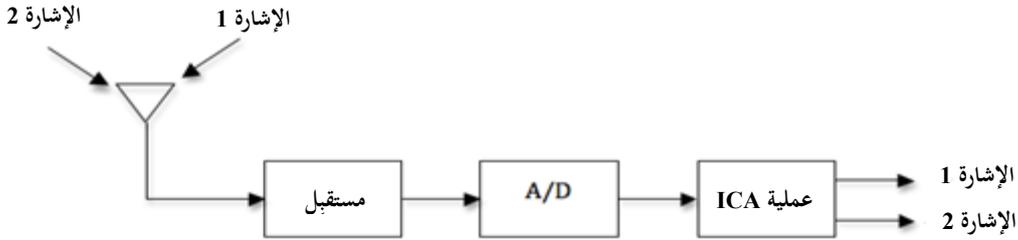
3.A1 تحليل المكون المستقل (ICA) في قناة واحدة لفصل إشارة

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 8-A1. وتتماثل 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 9-A1. 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 10-A1 و 11-A1 نتائج الفصل بدلالة رسم بياني لكوكبة. ويتغير نسبة الإشارة إلى الضوضاء من 4 dB إلى 12 dB، تظهر في الشكل 12-A1 نسب الخطأ في البتات (BER) للإشارتين المفصولتين. ويمكننا أن نرى 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، نعامل الإشارة 1 والإشارة 2 بمثابة الإشارة المطلوبة وإشارة التداخل، على التوالي. وتظهر في الشكل 13-A1 نسب الإشارة إلى الضوضاء (SNR) في الإشارة المطلوبة على اختلاف نسب الإشارة إلى التداخل (SIR) (من -10 dB إلى 10 dB). ويمكننا أن نرى 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.

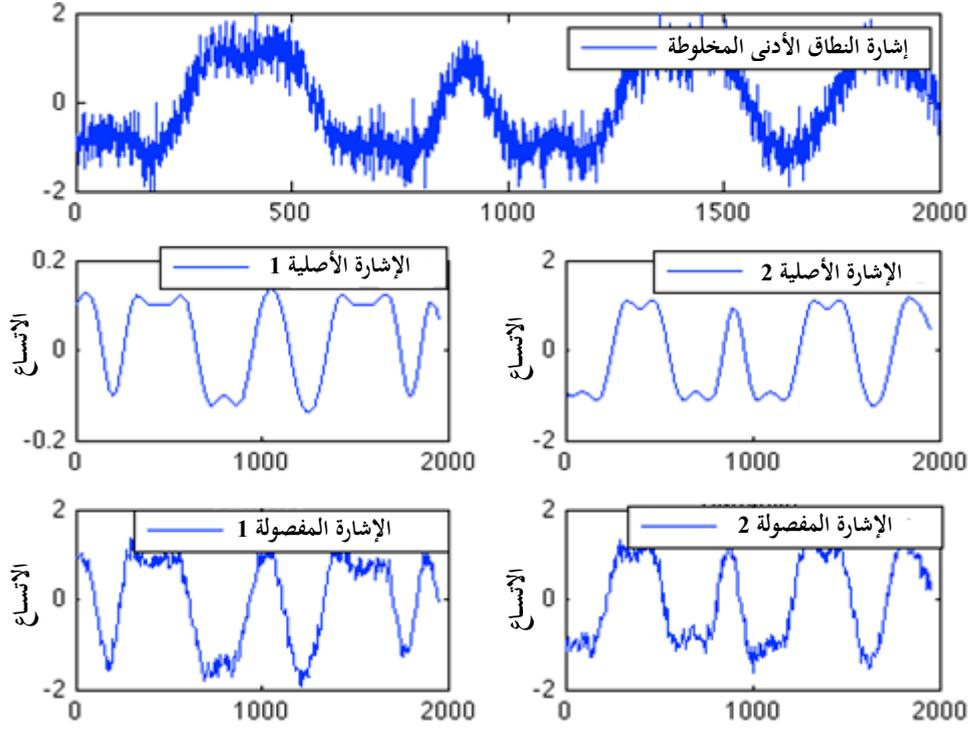
الشكل 8-A1

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



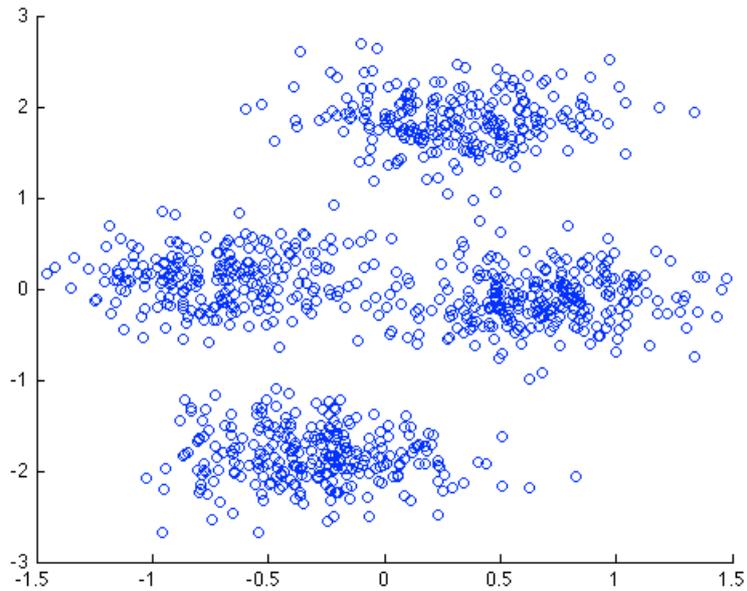
الشكل 9-A1

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



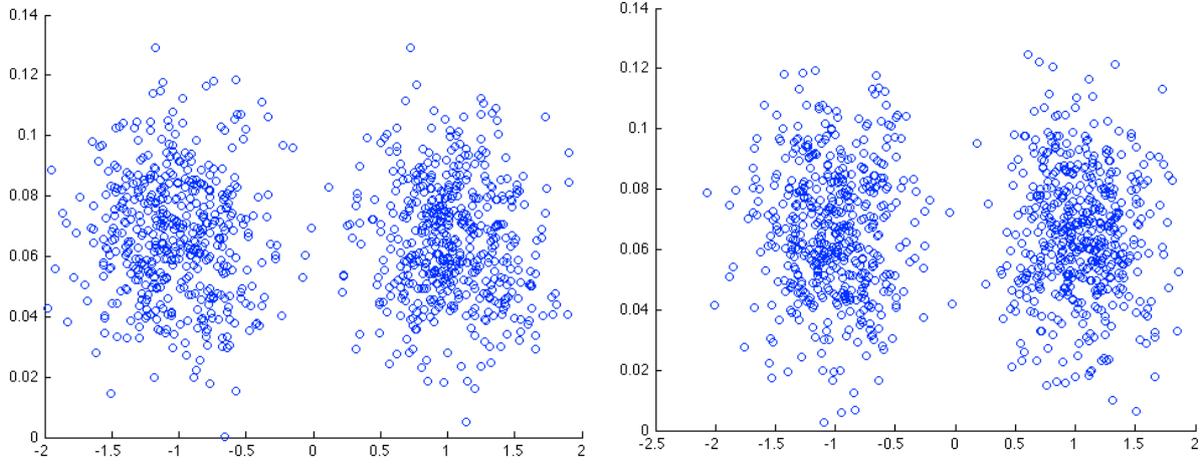
الشكل 10-A1

الرسم البياني لكوكبة الإشارة المختلطة



الشكل 11-A1

الرسم البياني لكوكبة الإشارتين المفصولتين

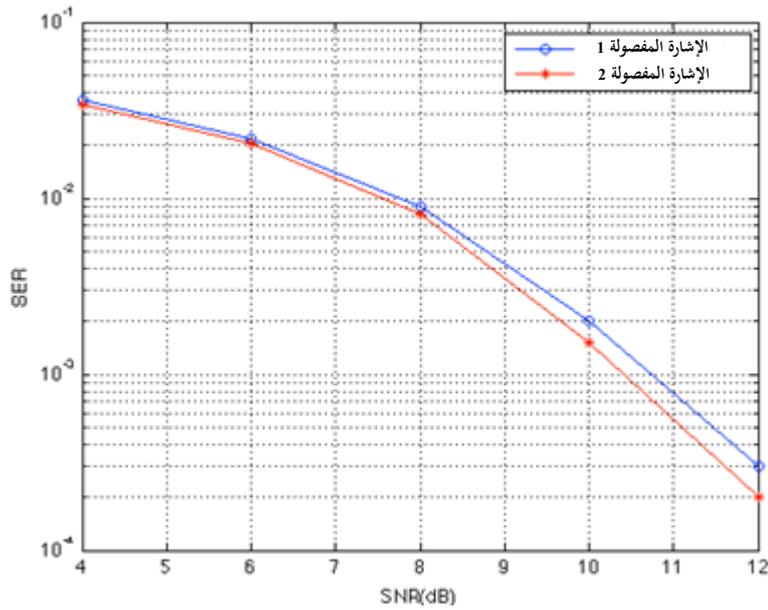


(ب) الإشارة 2 المفصلة

(أ) الإشارة 1 المفصلة

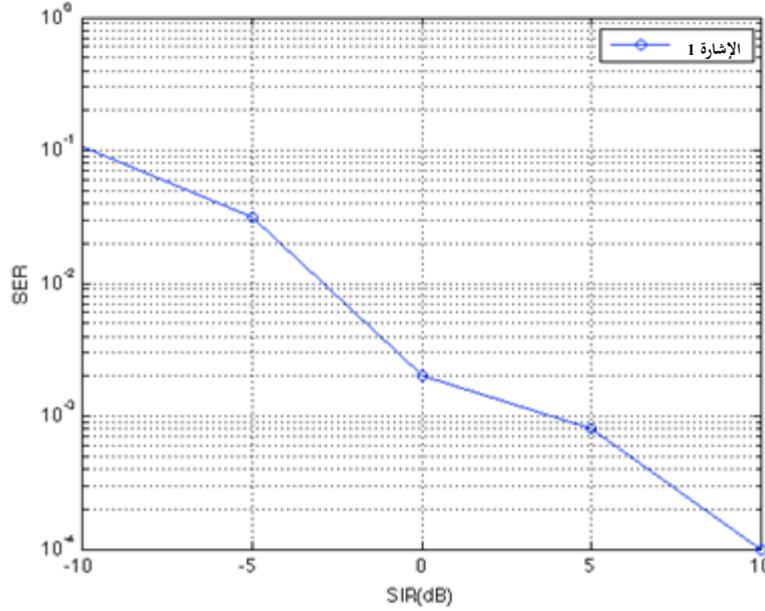
الشكل 12-A1

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



الشكل 13-A1

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

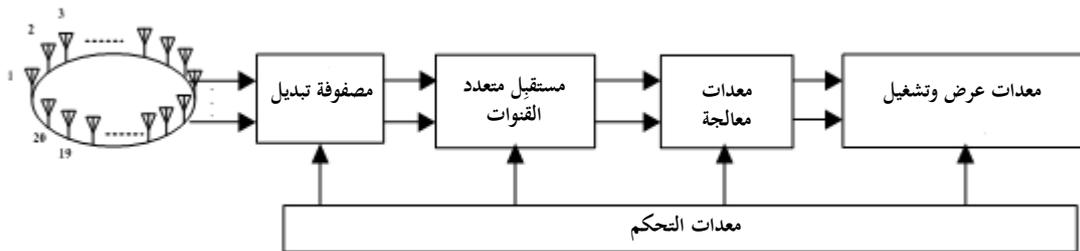


4.A1 قولة الحزمة القائمة على الطيف المكاني في مراقبة الموجات الديكامترية (HF)/الموجات المترية (VHF)

تستخدم تكنولوجيا قولة 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 قولة الحزمة القائمة على الطيف المكاني في مراقبة الموجات الديكامترية (HF)/الموجات المترية (VHF)



إن الشكل الأكثر شيوعاً لصيف هو الصيف الدائري، ومن الأشكال الأخرى الصيف المثلثي والصيف الخطي. وترسل الإشارة المستقبلية إلى جهاز استقبال متعدد القنوات عبر مصنوفة 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 تلي الاتساق في الطور والاتساع، وإلا فإن المعالجة اللاحقة ستكون غير فعالة. وتنفذ معدات المعالجة خوارزميات اكتشاف الاتجاه وقولة الحزمة، وتتفاعل مع شاشة العرض ومعدات التشغيل.

والمحتوى التالي هو مثال عن الفصل المستمر 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

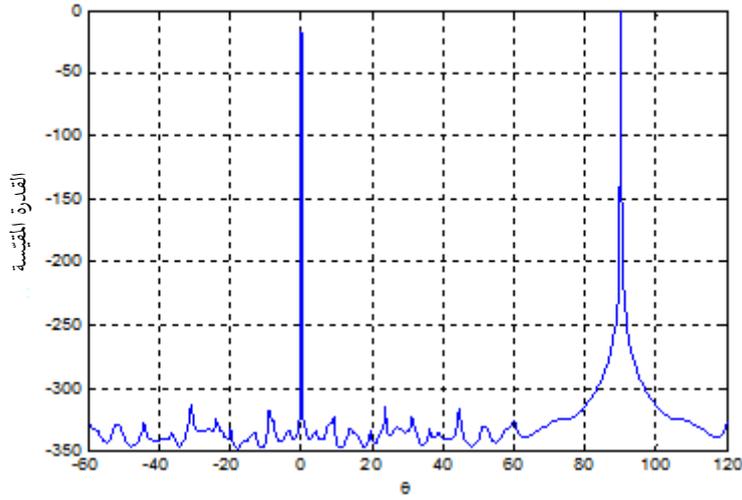
المفصولة وبين الإشارتين المطلوبة وغير المطلوبة. وتظهر النتيجة أن كلتا الإشارتين مفصولتان جيداً. وتُحسب MSE كمعلمة التقييم، التي تعرّف كما يلي:

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

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} .

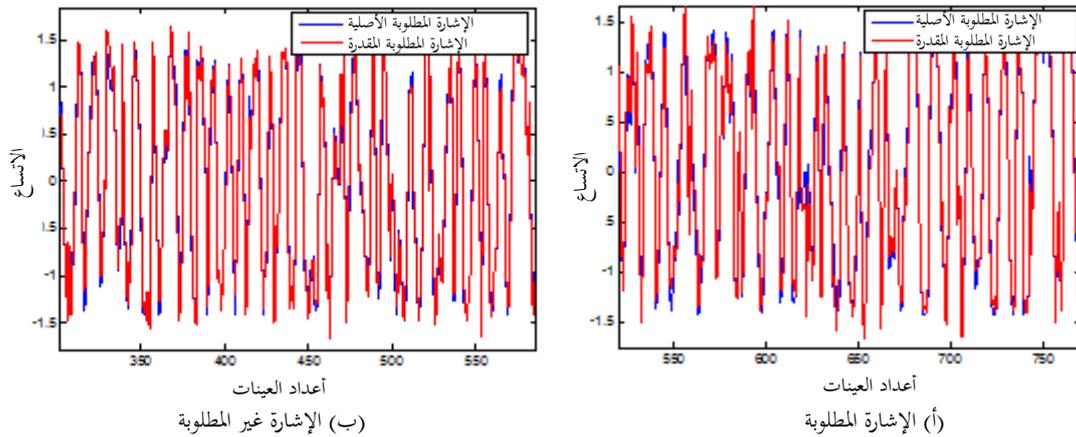
الشكل 15-A1

نتائج تقدير اتجاه الورد



الشكل 16-A1

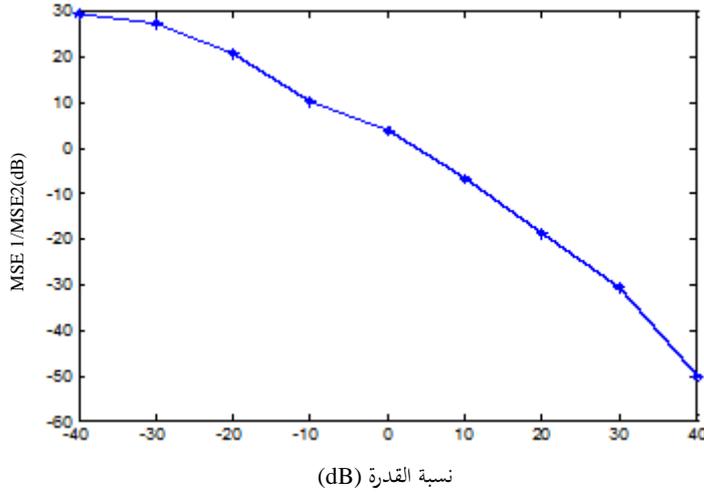
مقارنة بين الإشارة الأصلية والإشارة المفصولة



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



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 بصيف 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})

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

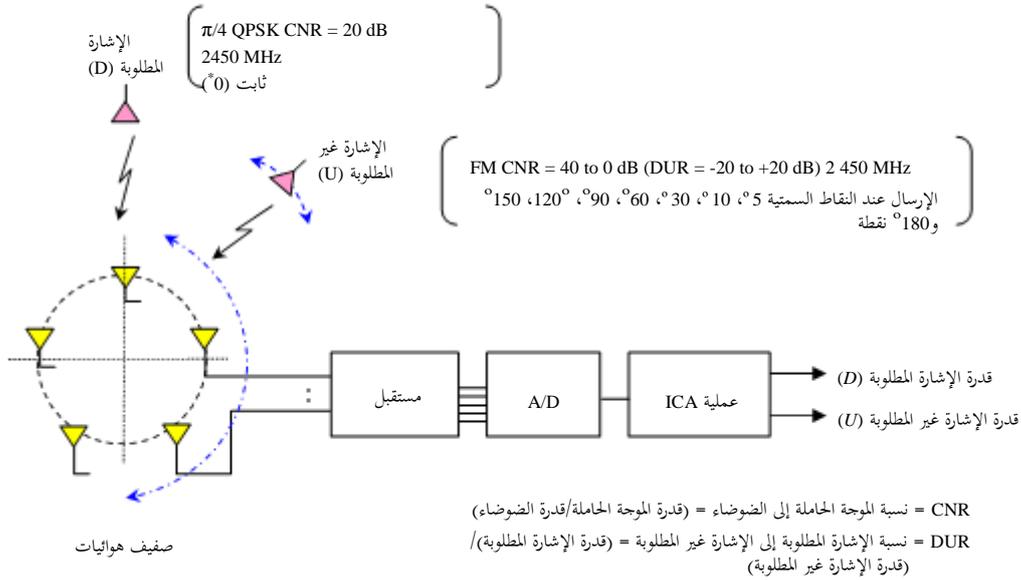
دقة تقدير نسبة القدرة الكهربائية (A) = $DUR_{est} - DUR$

ويثبت اتجاه ورود الموجة المطلوبة، كما يُرى من صيف الهوائيات، ويغير 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



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).

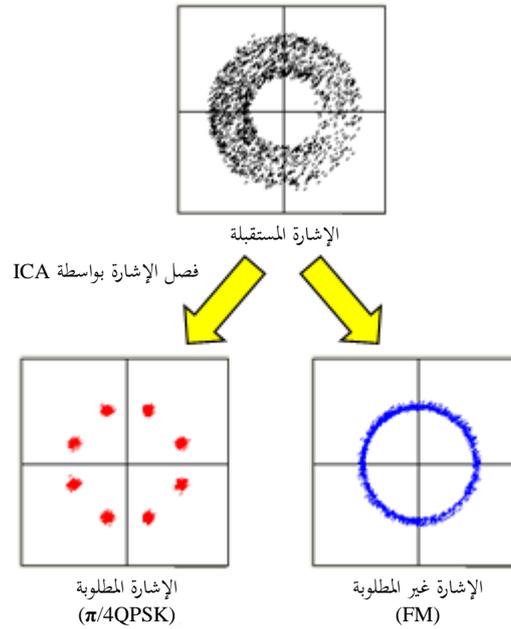
وفي مدى نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) الذي يتراوح بين -15 و +10 dB، تأكدت إمكانية تقدير نسبة القدرة المطلوبة إلى غير المطلوبة (DUR) لإشارة التداخل بدقة تقل عن 2 dB.

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

وباتباع 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 بتزايد طول أقطار الفتحة.

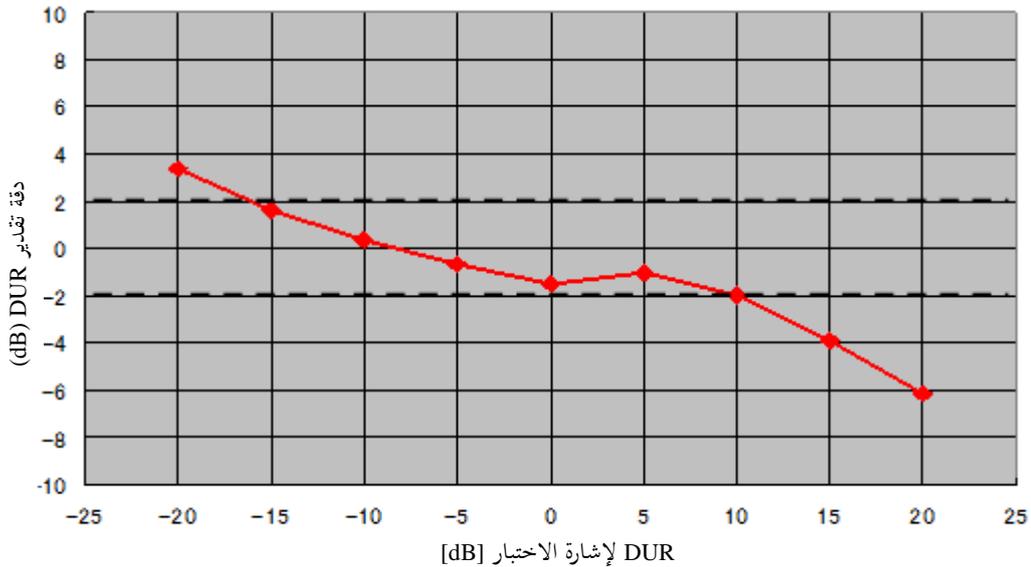
الشكل 19-A1

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 بحدود 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.

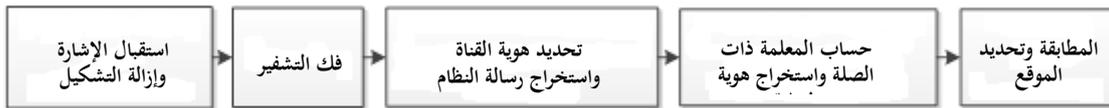
6.A1 تحديد الموقع الجغرافي لمحطة قاعدة النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM)

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 تنفذ 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 23-A1 رسم بياني موجز لاستخراج الهوية العالمية للخلية (CGI).

الشكل 21-A1

رسم بياني لاستخراج الهوية العالمية للخلية (CGI)



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 الورود (AOA)، يمكن لمحطة المراقبة المتنقلة تحديد الموقع الدقيق لمحطات قاعدة النظام العالمي للاتصالات المتنقلة في منطقة واحدة بتخطيط طريق المراقبة المناسب.

الملحق 2

أمثلة على تطبيق تحديد الموقع الجغرافي
بالجمع بين أسلوبين

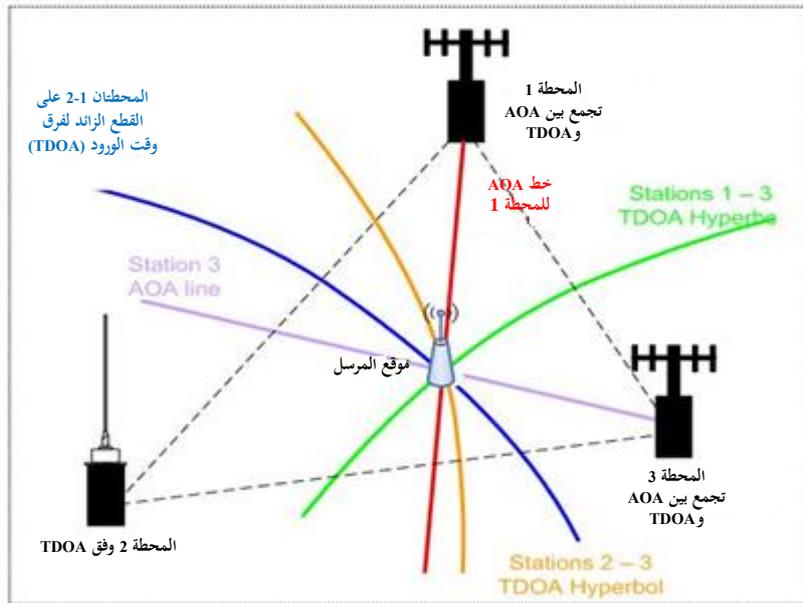
1.A2 هجين زاوية الورد (AOA)/فرق وقت الورد (TDOA)

ليس هنالك، بصفة عامة، طريقة واحدة، كذلك 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 أوفى بشأن أساليب زاوية الورد (AOA)/فرق وقت الورد (TDOA) الهجينة في كتيب الاتحاد بشأن مراقبة الطيف، طبعة عام 2011، الفصل 6.3.7.4.

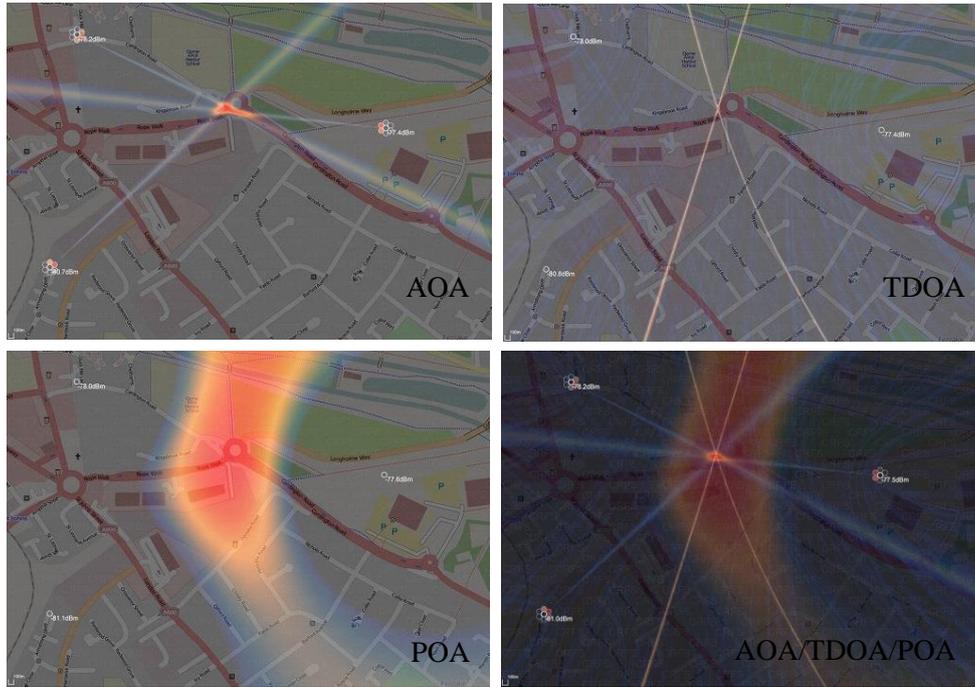
الشكل 1-A2

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 كتقنية 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 أسلوبيين



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

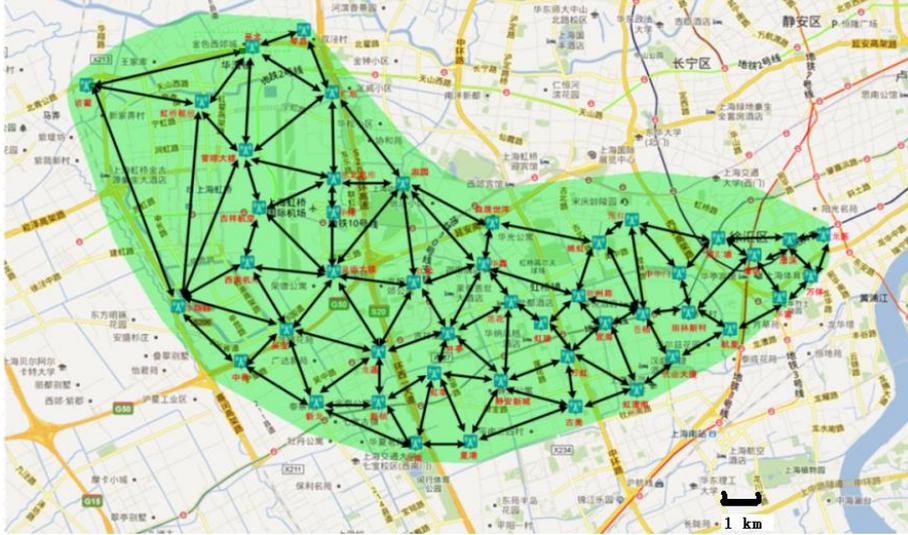
1.2.A2 مقدمة

إن تكنولوجيا شبكة مراقبة الشبكة هي واحدة من التكنولوجيات التي يمكن أن تصف وتعرض مكانياً أجهزة البث الراديوي المجهولة وتقييم 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. ونُفذ 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

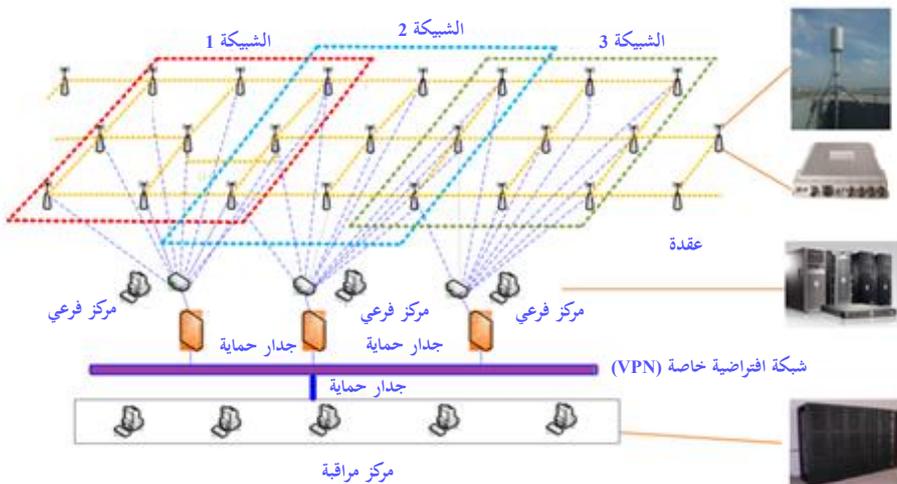


2.2.A2 معمارية شبكة مراقبة الشبكة

- 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 A2-4:
- طبقة الاستشعار: تتضمن العقد كافة القابلة للتوصيل الشبكي وذات التكلفة المجزية (هوائي بمحروطين وجهاز استشعار وهوائي النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS));
 - طبقة الخدمة الوسطى: تتكون من مخدمات 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

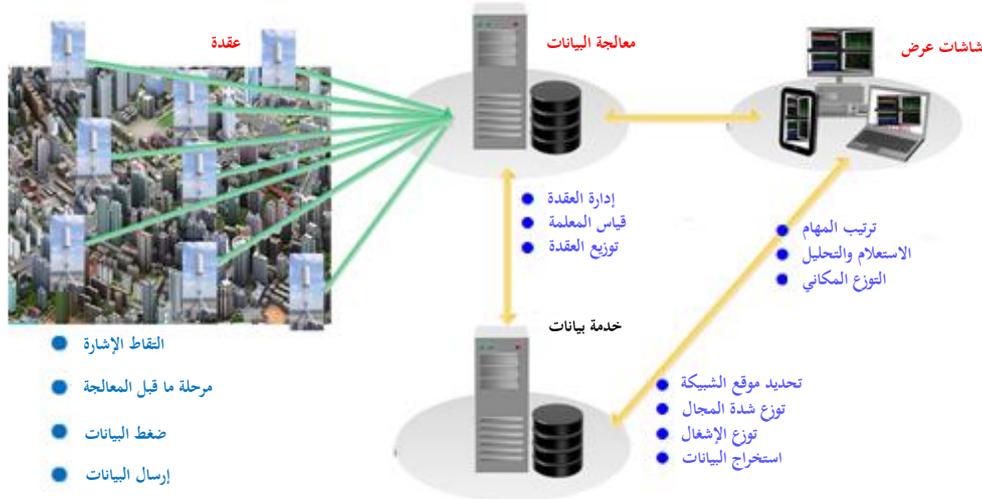
معمارية شبكة مراقبة الشبكة



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

الشكل 5-A2

تدفق عملية شبكة مراقبة الشبكة



إن العقدة القابلة للتوصيل الشبكي ذات التكلفة الجزئية، كتلك 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. ولتحري التكلفة أهمية كبيرة بالنسبة للبلدان النامية ذات الميزانية المحدودة، والمناطق الحضرية التي تكثرت فيها أعداد عقد المراقبة.

الشكل 6-A2

جهاز استشعار بالترددات الراديوية وهوائي بمخروطين بتكلفة مجزية وقابلية التوصيل الشبكي



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) $6 \leq \text{dB}$ في المستقبل لترددات مختلفة (بما فيها 115 MHz و 320 MHz و 575 MHz و 965 MHz و 1300 MHz و 1700 MHz و 2600 MHz) وعروض نطاق مختلفة (بما فيها 12,5 kHz و 25 kHz و 100 kHz و 200 kHz و 1,25 MHz و 8 MHz)، وتظهر النتيجة في الجدول 1-A2.

الجدول 1-A2

احتمال كشف قدرة مختلفة لجهاز البث (131 قياساً)

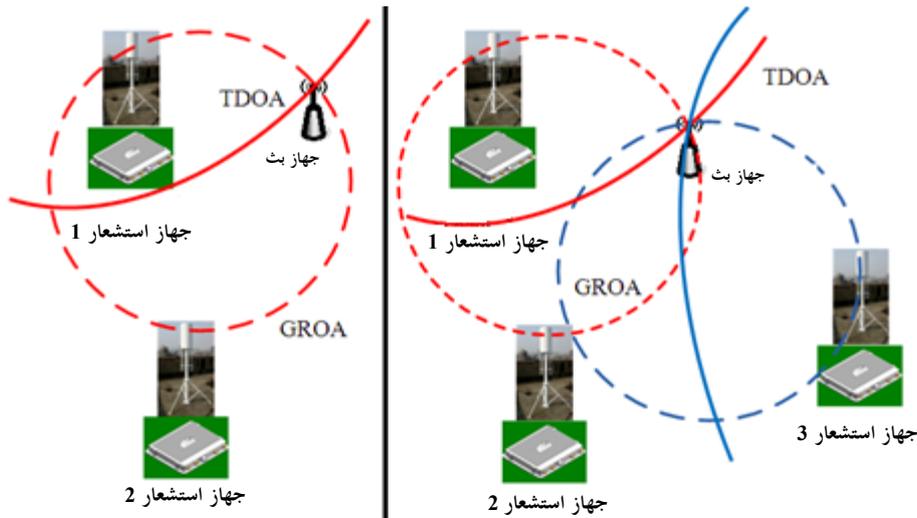
قدرة جهاز البث $W \geq 0,05$	قدرة جهاز البث $W \geq 0,1$	قدرة جهاز البث $W \geq 1$	
92	114	128	قياسات الكشف ($\text{SNR} \geq 6 \text{ dB}$)
%70,2	%87	%97,7	احتمال الكشف ($\text{SNR} \geq 6 \text{ dB}$)

2.3.2.A2 التحديد الهجين للموقع الجغرافي

اختر أداء تحديد الموقع الجغرافي بالشبكة (بتهجين فرق وقت الورد (TDOA) ونسبة كسب الورد (GROA) معاً). وأسلوب نسبة كسب الورد (GROA) هو أسلوب منفصل 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 الورد (GROA) دائرة بين مستقبلين يمكن أن يقع ضمنها المرسل الراديوي. أما تقنية فرق وقت الورد (TDOA) فهي إحدى تقنيات تحديد المواقع الواعدة لأنظمة الاتصالات اللاسلكية. وتستند تقنيات فرق وقت الورد 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 الاستقبال 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)



تبين نتيجة الاختبار أن نسبة الأخطاء النمطية (الانحراف بين الموقع الفعلي والموقع المقدر) التي تقل عن 300 m تناهز 2,3% 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

معلومات اختبار التحديد الهجين للموقع الجغرافي

المعلومات	القيمة
التردد (MHz)	115، 320، 575، 965، 1300، 1700، 2600
عرض النطاق (Hz)	12.5K، 25K، 100K، 200K، 1.25M، 8M
التشكيل	AM، FM، FSK، QPSK، MSK، QAM
القدرة	W 1

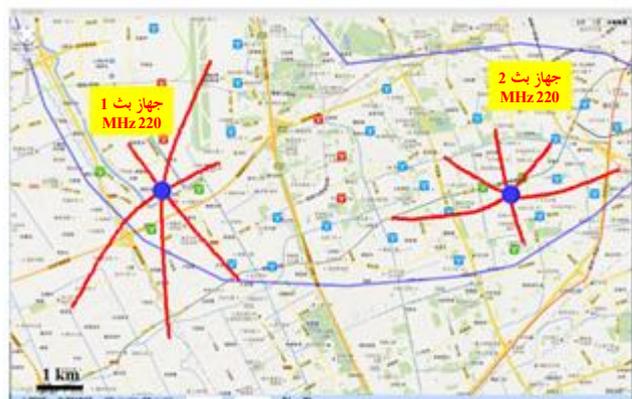
الشكل 9-A2

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



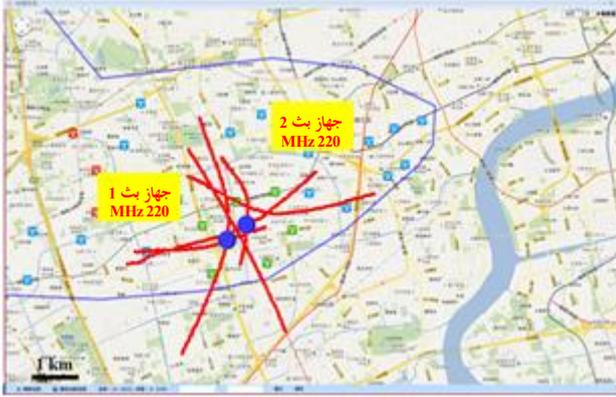
الشكل 8-A2

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



الشكل 11-A2

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



الشكل 10-A2

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



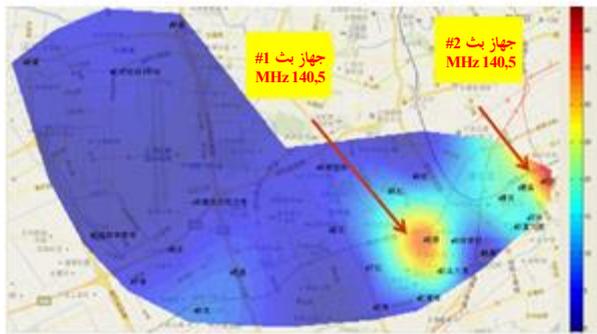
A2.2.3.3 توزيع شدة المجال

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 W 3 وجهاز بث قدرتهما W 3 قيد التشغيل في وقت واحد.

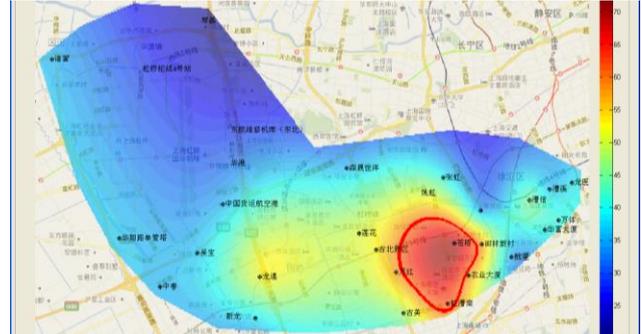
الشكل 12-A2

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

(ب) اختبار بجهاز اتصال لاسلكين



(أ) اختبار بجهاز اتصال لاسلكي واحد



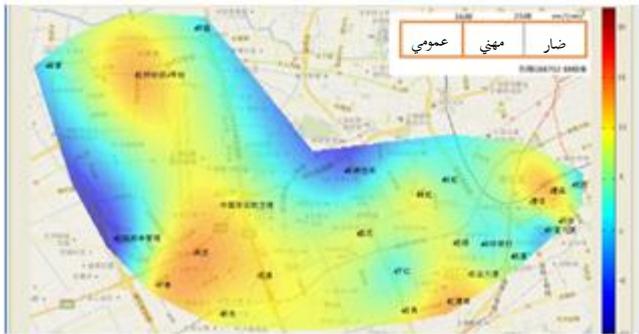
يبين الشكل 12-A2 أن الانتشار الراديوي متباين الخواص على ما يبدو في البيئات الحضرية، وهو يختلف عن نماذج الانتشار النظرية متناحية الخواص. ويمكن تمييز جهازي البث العاملين على نفس التردد مكانياً بوضوح من خلال شبكة مراقبة الشبكة. وهنا تقل المسافة بين جهازي البث عن 3 km. غير أن ذلك يصعب تحقيقه باستخدام نظام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

A2.2.3.4 الإشغال الجغرافي وتوزع الإشعاع الكهرمغناطيسي

تُسنَد إلى إشغال الطيف التقليدي في كثير من الأحيان قيمة واحدة لمكان واحد. ولا يسهل أيضاً إيضاح كيف تُستخدم موارد الطيف. ويمكن لشبكة مراقبة الشبكة 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 الشبكة، يمكن أيضاً أن يوصف التوزع الجغرافي للإشعاع الكهرمغناطيسي في المناطق المغطاة، على النحو المبين في الشكل 14-A2. ويمتد النطاق الترددي من 30 MHz إلى 3 000 MHz، ويعبّر عن الإشعاع الكهرمغناطيسي بكثافة القدرة بوحدة $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

الشكل 14-A2

توزع الإشعاع الكهرمغناطيسي



الشكل 13-A2

التوزع الجغرافي لإشغال الطيف



4.2.A2 خلاصة

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