الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التقرير ITU-R SM.2211-1

(2014/06)

مقارنة بين أسلوب الفارق الزمني في الورود وأسلوب زاوية الورود في تحديد الموقع الجغرافي لمصدر الإشارة

السلسلة SM

إدارة الطيف

الاتحاد الدولي للاتصالات ITU

150 ITU 1865-2015

تمهيـــد

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

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

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

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

سلاسل تقارير قطاع الاتصالات الراديوية

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

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

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).

التقـــرير ITU-R SM.2211-1

مقارنة بين أسلوب الفارق الزمني في الورود وأسلوب زاوية الورود في تحديد الموقع الجغرافي لمصدر الإشارة

(2014-2011)

جدول المحتويات

الصفحة

1 مقدمة 1
2 لمحة عامة عن تكنولوجيا الفارق الزمني في الورود (TDOA) 2
3 نقاط القوة والضعف في أسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA) بالمقارنة مع أسلوب زاوية الورود (AOA) التقليدي 2
4 الأنظمة الهجينة 8
5 الخلاصة 8
6 المراجع 8
الملحق 1 – العوامل التي تؤثر على مدى كشف إشارات التردد الراديوي وعلى منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي في محطات المراقبة 9
الملحق 2 – دراسة دقة تحديد الموقع الجغرافي ومنطقة التغطية في محطات المراقبة الهجينة بالأسلوب الهجين AOA/TDOA 26

1 مقدمة

يقارن هذا التقرير بين نقاط القوة والضعف في أسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA) وأسلوب زاوية الورود (AOA) في تحديد الموقع الجغرافي لمصدر الإشارة. وفي حين أن هذا التقرير يركز على أسلوب الفارق الزمني في الورود، تجدر الإشارة إلى وجود تقنيات أخرى لتحديد الموقع الجغرافي[1]. ويحدد أسلوب زاوية الورود زاوية ورود موجة معينة عند إحدى نقاط القياس. وقد شاع استخدام أساليب زاوية الورود في العديد من تطبيقات تحديد زوايا الاتجاه، فهي وإن كانت تتمتع ببعض المزايا ولكن تشوبها بعض العيوب أيضاً، فيما يتعلق بمتطلبات الهوائي على سبيل المثال. ومن ناحية أخرى، فإن أساليب TDOA تحسب الفارق الزمني في الورود لموجة معينة في نقاط قياس متعددة، وتحسب نقطة المصدر استناداً إلى مقارنات التوقيت والموجات. ومع أنها لم تُستخدم على نطاق واسع في مراقبة الطيف، لكنها أصبحت مفيدة على نحو متزايد نظراً لتوفر القدرة الحاسوبية الرخيصة الثمن والصغيرة الحجم، وتكنولوجيا الاستقبال الراديوي الأكثر تقدماً، والتيسّر الجاهز لروابط البيانات، وتوفر إشارة التوقيت الموزعة الدقيقة. وسوف تقدم هذه الورقة لمحة موجزة عن تكنولوجيا الفارق الزمني في الورود وبعض المقارنة بين نقاط القوة والضعف في هذا الأسلوب قياساً بأساليب زاوية الورود الأكثر تقليدية.

---

[1] يَستخدم أسلوب قدرة الورود (POA) نسبة القدرة المقيسة لإشارة معينة في عدة نقاط قياس لحساب نقطة المصدر. وكثيراً ما تُستخدم قدرة الورود (POA) لتحديد الموقع الجغرافي في الأماكن المغلقة. ويَستخدم أسلوب الفارق الترددي في الورود (FDOA) الانزياح الدوبلري لمصدر متحرك (و/أو مستقبلات متعددة) لحساب نقطة المصدر. وغالباً ما يُستخدم أسلوب الفارق الترددي في الورود بالاقتران مع أسلوب الفارق الزمني في الورود للتطبيقات المحمولة جواً.

2 لمحة عامة عن تكنولوجيا الفارق الزمني في الورود (TDOA)

تقيس تقنية الفارق الزمني في الورود وقت وصول إشارة ذات تردد راديوي في عدة نقاط في الفضاء وتقارن الفارق الزمني بين كل مستقبِل وآخر. ويتمثل النهج التقليدي لتقدير الفارق الزمني في الورود في حساب الارتباط التقاطعي لإشارة واردة إلى مستقبلين. ويتمثل تقدير الفارق الزمني في الورود بالتأخير الذي يحقق القيمة القصوى لدالة الارتباط التقاطعي. ويمكن من خلال معرفة موقع كل مستقبِل استنتاج تقدير لموقع مصدر البث شريطة أن يكون التزامن محققاً بين جميع المستقبلات. ويكون متمم خط الاتجاه الزاوي (LoB) لنظام زاوية الورود (AOA) خطاً زائدياً بفارق زمني ثابت في الورود يشار إليه كخط تساوي التزامن (isochron) أو خط الموضع (LoP). ويرد بحث أوفى لأساليب الفارق الزمني في الورود في الفصل 2.3.7.4 من إصدار عام 2011 لكتيب الاتحاد الدولي للاتصالات بشأن مراقبة الطيف.

وقد استخدمت أساليب الفارق الزمني في الورود في مهام التحديد الراديوي للموقع في بعض التطبيقات العسكرية، ومؤخراً في بعض التطبيقات المحددة مثل تحديد موقع الهواتف الخلوية المتنقلة للاستجابة لحالات الطوارئ (الحريق والإسعاف وغيرها). وفي الماضي، كانت العقبة الرئيسية التي تعترض النشر المدني على نطاق أوسع تتمثل في المزامنة المطلوبة للوقت على مستوى النانو ثانية. وإذ ينتشر الإشعاع الكهرمغنطيسي بسرعة 30 cm/ns، فإن أي ارتعاش ذا شأن في التوقيت بين المستقبلات سيؤدي مباشرةً إلى تمييع دقة تحديد الموقع. واليوم يوفر ظهور أنظمة الملاحة الساتلية (GPS وGalileo وGLONASS) إحدى هذه الوسائل المتاحة وغير المكلفة للحفاظ على مزامنة الوقت. ونتيجة لذلك، تتوفر هذه الأيام أنظمة قائمة على الفارق الزمني في الورود (TDOA) من منافذ بيع عدة في بلدان مختلفة حول العالم.

3 نقاط القوة والضعف في أسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA) بالمقارنة مع أسلوب زاوية الورود (AOA) التقليدي

لتحسين فهم أسلوب الفارق الزمني في الورود، نقدم دراسة استقصائية قصيرة لنقاط القوة والضعف فيه بالمقارنة مع أسلوب زاوية الورود. وتجدر الإشارة إلى أن الأسلوبين هما من التقنيات المكملة لتحديد الموقع الجغرافي. ونظام تحديد الموقع الجغرافي الذي يجمع بينهما قد يتفوق بأدائه على كل منهما بمفرده [1]. كما أن وجود أسلوب بديل ومؤكد لتحديد الموقع الجغرافي قد يكون حاسماً بالنسبة إلى إجراءات إنفاذ الطيف.

ولتبسيط البحث، نفترض أن نظام الفارق الزمني في الورود يستخدم الكشف القائم على الارتباط التقاطعي، وأن مستقبلات القياس ترحّل العينات المأخوذة من الإشارة إلى مخدّم مركزي لمعالجة الفارق الزمني في الورود. وفي معظم تطبيقات مراقبة الطيف، سيحبَّذ هذا الأسلوب لأدائه في تحديد الموقع ومرونته. وإمعاناً في تبسيط البحث، نقارن نظام الفارق الزمني في الورود مع نظام زاوية الورود ذي مقياس التداخل الارتباطي (CI). والقياس الارتباطي للتداخل هو من تقنيات زاوية الورود المنفذة على نطاق واسع في المراقبة الراديوية الحديثة. ويرد تعريف مقياس التداخل الارتباطي وبحثه في الفصل 5.2.2.7.4 من إصدار عام 2011 لكتيب الاتحاد الدولي للاتصالات بشأن مراقبة الطيف.

(الملاحظـــة 1 – تشير الإحالات إلى "الفصول" في الجدولين 3-1 و3-2 إلى إصدار عام 2011 لكتيب الاتحاد الدولي للاتصالات بشأن مراقبة الطيف. أما الأرقام الواردة بين قوسين في الجدولين فهي تشير إلى المراجع المدرجة في الفقرة 6).

الجـــدول 3-1

نقاط القوة في أسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA)

متطلبات أبسط من الهوائي	الهوائي منخفض الكلفة والتعقيد، ويمكن أن يكون صغيراً في مقاسه. ويمكن أن تستخدم مستقبلات TDOA هوائياً واحداً بسيطاً (كأحادي القطب أو ثنائي القطب). وخلافاً لأنظمة AOA، لا يتطلب الهوائي درجة عالية من التفاوتات الميكانيكية والدقة الكهربائية، ولا يتطلب اختباراً تشغيلياً وقياساً من أجل المعايرة. ومن الفوائد الإضافية إمكانية تصغير مقاس الهوائي بحيث لا يلفت النظر. وهذا أمر مهم عند نشر أنظمة مراقبة في أماكن تاريخية أو معمارية مقيدة أو عند التفاوض على اتفاقات بشأن أماكن نصب الهوائيات مع أطراف ثالثة.
متطلبات أبسط من حيث أماكن التركيب والمعايرة	متطلبات أماكن التركيب أقل تقييداً منها في أنظمة AOA وتتطلب قدراً قليلاً أو حتى معدوماً من المعايرة. وهذا يسمح بمزيد من المرونة في اختيار أماكن TDOA. ونتيجة لذلك، يكون نشر منشآت TDOA أسرع. وفي المنشآت في المناطق الحضرية، يمكن وضع مستقبلات TDOA إضافية للتغلب على آثار تظليل الهياكل الشاهقة. وفي المقابل، يجب اختيار أماكن AOA للإقلال إلى أدنى حد من تشوه صدر الموجة جراء معاودة الانبثاق من العوائق المحلية والانعكاسات عن الأرض والتغيرات في إيصالية الأرض. ويجب معايرة بعض صفائف هوائيات AOA بعد تركيبها في أماكنها للإقلال إلى أدنى حد من الأخطاء المرتبطة بالتردد والاتجاه. وتعد معايرة صفيفة الهوائيات من أهم القضايا التي تحد من الأداء في أنظمة AOA [2]، ويرد بحث قضايا تحديد أماكن تركيب AOA بمزيد من التفصيل في الفصلين 2.1.3.2.7.4 و3.1.6.2.
الإشارات عريضة النطاق التي تنخفض فيها نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)، والإشارات قصيرة الأمد	يكون أداء TDOA جيداً للإشارات الجديدة والناشئة ذات التشكيلات المعقدة وعروض النطاق الواسعة والآماد القصيرة. ويكون أداء AOA جيداً عادةً لإشارات النطاق الضيق، ولكن يمكن تطبيق أساليب AOA متقدمة لتحديد موقع مصدر أي إشارات بما فيها الإشارات ذات النطاق العريض والمعقدة وقصيرة الأمد. وإذ يعتمد أداء TDOA كثيراً على عرض نطاق الإشارة، فإن أداء AOA مستقل تقريباً عن عرض نطاق الإشارة، عندما يكون تباعد قناة تحويل فورييه السريع (FFT) مماثلاً لعرض نطاق الإشارة. ويتحسن أداء TDOA عموماً مع تزايد عرض نطاق الإشارة. ويتحسن أداء أسلوب TDOA وAOA كليهما في الإشارات التي تعلو فيها نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) وتطول فيها أزمنة التكامل. ويتيح كسب المعالجة من الارتباط لتقنيات TDOA أن تكشف الإشارات التي تنخفض فيها نسبة الإشارة إلى الضوضاء (وحتى تلك التي تكون قيمة هذه النسبة سلبية فيها)، وأن تحدد موقع مصدرها. وبالإضافة إلى ذلك، يتيح كسب المعالجة من الارتباط مشاركة مستقبلات TDOA إضافية في تحديد الموقع الجغرافي للمصدر رغم الانخفاض الشديد لنسبة الإشارة إلى الضوضاء فيها أو قيمتها السلبية. بينما تعجز تقنيات AOA الأساسية عن كشف وتحديد موقع مصدر الإشارات ذات القيمة السلبية لنسبة الإشارة إلى الضوضاء، وقد تعاني من مشاكل في تحديد موقع مصدر الإشارات التي تنخفض فيها نسبة الإشارة إلى الضوضاء. ويمكن لتقنيات AOA المتقدمة معالجة هذه الإشارات. ومن هذه التقنيات، تقنيات الاستبانة المتقدمة أو تقنيات AOA الارتباطية بمساعدة البيانات (تحديد زاوية الاتجاه المرجعية). ورغم أن تقنيات AOA الأساسية لا تستفيد من كسب المعالجة جراء ارتباط الإشارة، فهي تستفيد إلى حد ما من كسب النظام المتأتي من استخدام عناصر هوائيات وقنوات استقبال متعددة. ويتطلب تحديد الموقع الجغرافي لمصدر الإشارات قصيرة الأمد مستقبلات منسقة ومتزامنة في الوقت بحدود جزء من مقلوب عرض نطاق الإشارة. وتعد هذه القدرة أساسية لأنظمة TDOA. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن لهذه الأنظمة تحديد الموقع الجغرافي باستخدام قياسات قصيرة الأمد جداً على إشارات أطول أمداً. وإذا ما تم تقويم عناصر هوائي AOA، سيُختصر أمد التكامل المطلوب.

الجـــدول 3-1 *(تابع)*

تعقيد النظام	مستقبِل نظام TDOA وهوائيه أقل تعقيداً من صفيف الهوائيات والمستقبِل مزدوج أو متعدد القنوات في نظام AOA النمطي. ويتطلب مستقبل نظام TDOA قناة واحدة على الأقل تعمل بالترددات الراديوية في الوقت الفعلي لتحقيق المعالجة غير المتقطعة وأعلى احتمال لالتقاط الإشارة[1]. وقد يؤدي ذلك إلى مستقبِل أقل تعقيداً في بيئات راديوية بسيطة. وتدعو الضرورة لتقنيات معالجة متقدمة في نظام TDOA عند استخدام مستقبل بسيط في بيئات راديوية معقدة. وتتوفر بسهولة أساليب فعّالة لمزامنة الوقت (GPS) وسطوح بينية لربط البيانات.
نبذ الضوضاء والتداخل غير المرتبطين	يمكن لمعالجة الارتباط المستخدمة في نظام TDOA أن تكبت إشارات الضوضاء والتداخل المتزامنة في القناة المشتركة وغير المرتبطة بين المواقع. وتمكن هذه الخاصية النظام من تحديد الموقع الجغرافي لمصدر الإشارات التي تنخفض فيها نسبة الإشارة إلى التداخل ونسبة الإشارة إلى الضوضاء (SINR). وتجرى قياسات الوقت المنسقة على جميع المستقبلات. وتُكبت الإشارات غير المشتركة بين مستقبلين أو أكثر. وبالمعالجة المتقدمة، يمكن لنظام TDOA أن يحدد الموقع الجغرافي بواسطة الارتباطات فقط مع أفضل رصد لإشارة البث. ويرد في الفصل 5.5.8.4 تطبيق ذو صلة لتقنيات الارتباط التقاطعي في تحليل التداخل. ويمكن لأنظمة AOA المتقدمة التخفيف من آثار التداخل غير المرتبط والمتزامن في القناة المشتركة من خلال استخدام الارتباط مع إشارات مرجعية. ويمكن لتقنيات المعالجة المتقدمة الأخرى مثل MUSIC أن تكون منيعة للضوضاء والتداخل غير المرتبطين. بيد أن هذه التقنيات مكلفة حسابياً ولا تستخدم على نطاق واسع لمراقبة الطيف.
تحديد الموقع الجغرافي في الأماكن المغلقة وفي الملعب الرياضي وفي الحرم الجامعي	يمكن استخدام TDOA بتقنيات المعالجة المتقدمة لتحديد الموقع الجغرافي لإشارات ذات عرض النطاق المرتفع داخل المباني وخارجها على مسافة قصيرة (< 100 متر في جانب واحد) وفي البيئات المكتظة بالمسيرات المتعددة [4]. ولا تقدم أنظمة AOA عادةً أداءً جيداً في ظل هذه الظروف. ويمكن التغلب على التحدي المتمثل في مزامنة توقيت دقيق في الأماكن المغلقة بأجهزة تبديل إثرنت متوافقة مع معيار IEEE-1588 ومستقبلات TDOA. وتجدر الإشارة إلى أن تقنية تحديد الموقع الجغرافي البديلة التي تستخدم قدرة الورود (POA) تتفوق عموماً على TDOA في بيئات قصيرة المدى تكتظ بالمسيرات المتعددة، وخاصة بالنسبة إلى الإشارات ضيقة النطاق.
تخفيف التداخل المتماسك في القناة المشتركة (مسيرات متعددة) في ظروف معينة	إن المسيرات المتعددة التي تُعرف أيضاً بالتداخل المتماسك في القناة المشتركة تتسبب باختلال أسلوبي AOA وTDOA. ويتأثر كل أسلوب على نحو مختلف بموضع جهاز الاستشعار بالنسبة إلى انعكاسات المسيرات المتعددة. وإذ يتوفر عرض نطاق كاف للإشارة، يصبح أسلوب TDOA أقل حساسية لتشوه صدر الموجة من العوائق المحلية (المسيرات المتعددة المحلية). وقد يتطلب أسلوب TDOA معالجة متقدمة للإشارة لتبديد الغموض الذي يكتنف تحديد المواقع والناجم عن العوائق البعيدة (المسيرات المتعددة البعيدة). ويمكن للمعالجة المتقدمة أن تقدم اصطفاءً إضافياً لأزواج الارتباط المستخدمة في تحديد الموقع الجغرافي بأسلوب TDOA لتحسين النتائج في الظروف التي تكتظ فيها المسيرات المتعددة. وبالمعالجة المتقدمة بأسلوب TDOA، يمكن كبت ما يُحل زمنياً من المسيرات المتعددة بين المواقع [5]، مما يؤدي إلى جودة الأداء في بيئات حضرية كثيفة[2].

الجـــدول 3-1 *(تتمة)*

اعتبارات هندسية	يكون أسلوبا TDOA وAOA كلاهما على أعلى درجة من الدقة عندما يكون مصدر الإشارة ممركزاً داخل محيط أماكن القياس. وتتحدد دقة تحديد الموقع الجغرافي في أسلوب TDOA بواسطة التمييع الهندسي للدقة (GDOP)، وجودة تزامن الوقت، وجودة تقدير أسلوب TDOA. ولا يوجد صلة مباشرة للارتياب في تحديد الموقع مع مسافة خط القاعدة بين مستقبلات TDOA [6]. فذلك يمكن أن يكون مفيداً في ظروف معينة. بالمقابل، فإن دقة أساليب AOA على صلة مباشرة بالمسافة بين المصدر وكل مستقبِل AOA. ويكون الارتياب في موضع AOA دالةً في الارتياب في زاوية الاتجاه الزاوي والمسافة بين المستقبِل والموضع المقدر. وعندما يكون المصدر بعيداً خارج محيط القياس، يقرّب أسلوب TDOA خط الموضع على نحو يماثل خط الاتجاه الزاوي في AOA. وفي هذه الحالة، يتنامى الارتياب في الموقع والاتجاه الزاوي مع بُعد المسافة في كلا الأسلوبين.
مناسب تماماً للاستخدام في شبكات أجهزة الاستشعار العاملة بالترددات الراديوية	وفي أسلوبي TDOA وAOA كليهما، تفضي زيادة المستقبلات إلى نتائج أفضل من خلال كسب القرب وتحسين الإحصاءات. وأسلوب TDOA مناسب تماماً لتعدد نشر المستقبلات، نظراً لقلة تعقيده ومقاسه وقدرته وهوائيه الأبسط والمتطلبات المبسطة لتحديد مكان النشر. وإذ تزداد كثافة محطات المراقبة عن بُعد، المشار إليها أعلاه بأجهزة الاستشعار العاملة بالترددات الراديوية، يقترب مستقبِل المراقبة من الإشارة التي تسترعي الاهتمام. ويتحسن أداء الكشف وتحديد الموقع الجغرافي جراء الانخفاض الناتج في خسارة المسير التي يشار إليها أحياناً باسم "كسب القرب" [7]. وبالإضافة إلى ذلك، فإن كسب المعالجة الناجم عن الارتباط في تقنيات TDOA يمكّن من مشاركة المزيد من أجهزة الاستشعار في تحديد الموقع الجغرافي رغم الانخفاض الشديد لنسبة الإشارة إلى الضوضاء فيها أو قيمتها السلبية.
إمكانية إجراء تحليل خارج الشبكة في مخدّم مركزي	يمكن لأنظمة TDOA أن تخزن وتصنف قياسات الإشارة المنسقة زمنياً من جميع المستقبلات، بحيث يمكن إجراء تحليل كامل خارج الشبكة في مخدّم مركزي. ويشمل ذلك التحليل الطيفي لإشارة كل مستقبِل، وإجراء قياسات الارتباط التقاطعي وتحديد الموقع الجغرافي. ويمكن لأنظمة AOA أيضاً أن تخزن وتصنف بعض قياسات الإشارة (مثل نتائج الاتجاه الزاوي والثقة في الاتجاه الزاوي) في مخدم مركزي. وهذه القياسات منسقة زمنياً بالقدر الذي يمكن فيه تحقيق التزامن في الوقت في نظام AOA. وليس من المعتاد إجراء قياسات من قبيل التحليل الطيفي والارتباطات التقاطعية لأنها تقتضي متطلبات مماثلة لمتطلبات أنظمة TDOA من حيث معدل بيانات وصلة الربط.

(1) تستخدم أنظمة قياس التداخل الارتباطي تعدد الإرسال بتقسيم زمني (TDM) للحد من عدد المستقبلات المطلوبة. وتتطلب هذه الأنظمة مستقبلين إلى ثلاثة مستقبلات يجري تبديلها بين 5 أو 7 هوائيات أو أكثر. وهذه الأنظمة أقل تعقيداً من أنظمة تحديد زاوية الاتجاه المتوازية تماماً، لكنها تتطلب أمداً أطول للإشارة بالحد الأدنى من أجل تحديد الموقع.

(2) ذُكر أن أسلوب TDOA يحدد الموقع الجغرافي لمصدر إشارات هاتف خليوي AMPS ضيق النطاق (30 kHz) في بيئات حضرية كثيفة بما يقل عن بضع مئات من الأقدام كقيمة فعّالة (5).

الجـــدول 3-2

نقاط الضعف في أسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA)

إشارات ضيقة النطاق	عند الاستعانة بتقنيات TDOA، قد يصعب أو يستحيل تحديد مصدر الإشارات المتغيرة ببطء التي تشمل الموجات الحاملة المستمرة (CW) غير المشكّلة والإشارات ضيقة النطاق. ويعتمد أداء TDOA إلى حد كبير على عرض نطاق الإشارة ويتردى الأداء بتقلص عرض نطاق الإشارة. وكذلك، فإن تعدد المسيرات يحتمل أن يشكل مشكلة أكبر للإشارات ضيقة النطاق عندما تكون الخصائص الزمنية للإشارة عريضة بالنسبة إلى امتداد التأخر. ففي ظل هذه الظروف، يغدو تمييز تشوه شكل النبضة جراء تعدد المسيرات أكثر صعوبة مما يضيف خطأ إلى تقدير فارق الوقت. وسيختلف الحد الأدنى المطلوب من عرض نطاق الإشارة للحصول على أداء مقبول تبعاً للتطبيق. فقد ذُكر مثلاً أن أسلوب TDOA يحدد الموقع الجغرافي لمصدر إشارات هاتف خليوي AMPS ضيق النطاق (30 kHz) في بيئات حضرية كثيفة بما يقل عن بضع مئات من الأقدام كقيمة فعّالة [5]. ومن شأن ارتفاع نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) وامتداد أوقات المراقبة لفترة أطول أن يحسن تحديد الموقع بأسلوب TDOA لبعض الإشارات ضيقة النطاق. وتؤدى أنظمة AOA أداءً جيداً في الإشارات ضيقة النطاق وغير المشكّلة وكذلك في الإشارات عريضة النطاق.
تعذر التوجيه الذاتي والانزواء بواسطة محطة واحدة	يحتاج أسلوبا التوجيه الذاتي والانزواء إلى محطتي TDOA كحد أدنى، تكون إحداهما على الأقل متنقلة، وإلى وصلة بيانات[1]. ويمكن تحقيق التوجيه الذاتي والانزواء بأساليب AOA لتحديد الموقع الجغرافي بواسطة محطة محمولة واحدة فقط. ويسمح ذلك بتحديد الموقع الجغرافي في البيئات التي لا تكون فيها مستقبلات TDOA المربوطة شبكياً عملية أو فعّالة من حيث التكلفة. ويرد وصف هذه الأساليب في الفصل 3.3.7.4.
وصلات اتصالات ذات معدل بيانات أعلى	إن أنظمة TDOA التي ترسل عينات من أشكال الموجة من مستقبلات إلى مخدم مركزي تتطلب وصلات اتصالات ذات معدل بيانات عال. أما احتياجات الربط الشبكي للمستقبل فهي غير متناظرة مع عرض نطاق رفع البيانات الذي يفوق عرض نطاق تنزيلها. ويمكن للمعالجة المتقدمة، بما فيها ضغط الإشارة، أن تقلل البيانات المرسلة. وتكون المتطلبات من معدل البيانات أكثر تواضعاً لأنظمة TDOA التي تقيم نظام TOA في المستقبِل. ويرد بحث أوفى لمتطلبات وصلة بيانات TDOA في الفصل 4.2.3.7.4 بعنوان "اعتبارات الشبكة". وتتطلب أنظمة AOA معدلات بيانات أدنى لأن بعض خصائص الإشارة مثل زاوية الاتجاه الزاوي والتردد والوقت تُنقل إلى موقع مركزي.
حساسية لمصادر فك ارتباط الإشارة	يجب أن يحرص نظام TDOA على التخفيف من جميع المصادر المحتملة لإشارة فك الارتباط بين المستقبلات. وهي تشمل التخالفات النسبية في التردد المرجعي بين المستقبلات والتخالفات النسبية في تردد الإشارة (انزياح دوبلر) بفعل المصادر المتحركة أو البيئة المحلية. وسيُحد الزمن الأقصى للتكامل المتماسك ليس بأمد الإشارة فحسب، بل أيضاً باستقرار المذبذب المرجعي للمستقبل وبديناميات القناة اللاسلكية. وستشمل أنظمة TDOA عالية الجودة عرى تتبُّع للحفاظ على تماسك التردد والوقت. ويعد التصحيح الدوبلري التلقائي ضرورياً للتعويض عن آثار فك الارتباط من مصادر انزياح دوبلر. وليست أنظمة AOA الأساسية وبعض أنظمة AOA المتقدمة حساسة للاستبانة (باستخدام MUSIC) بإشارة فك الارتباط بين أماكن القياس. فيما تكون أنظمة AOA المتقدمة، التي ترتبط مع إشارات مرجعية، حساسة لإشارة فك الارتباط.
مزامنة أدق للوقت	يتطلب أسلوب TDOA جودة مزامنة عالية للوقت بالنسبة إلى مقلوب عرض نطاق الإشارة التي تسترعي الاهتمام. ويمكن تحقيق مزامنة لوقت المستقبِل بأفضل من 20 ns بالتكنولوجيا الحالية (مثل GPS). أما أنظمة AOA فهي أقل تطلباً في متطلبات مزامنة الوقت. إذ يمكن أن تكون هذه المتطلبات فضفاضة فتبلغ بضع ثوان بين المستقبلات. وفي الواقع العملي، تتطلب بعض الإشارات في دائرة الاهتمام، كالإشارات قصيرة الأمد أو إشارات القفز، مستويات أعلى من مزامنة محطة AOA.

الجـــدول 3-2 *(تتمة)*

الإشارات الحاوية لعناصر دورية	يُستبعد أن تنتج خوارزميات TDOA، في ظل بعض الظروف، إجابات غير صحيحة للإشارات التي تحتوي على عناصر دورية. ومن أمثلة هذه الإشارات متواليات البيانات المتكررة أو نبضات التزامن. ويرد وصف هذه المشكلة وكذلك وسيلة للتقليل منها إلى أدنى حد في الفصل 3.2.3.7.4 بعنوان "العوامل المؤثرة على الدقة". وبما أن أنظمة AOA الأساسية لا تؤدي مهام الترابط المتبادل للإشارة، فهي ليست معرضة لهذه المشكلة.
سرعة الحساب في تحديد الموقع الجغرافي	تحال عادة عينات الإشارات إلى مخدّم تحديد الموقع الجغرافي من أجل الحساب. ويشكل ذلك أعباءً على سعة الربط الشبكي وسرعته. ويمكن لوصلة بطيئة أن تؤخر كثيراً الوقت اللازم لحساب تحديد الموقع الجغرافي. ويمكن أن تبلغ معدلات تحديد الموقع الجغرافي النمطية موضعاً مستخرجاً واحداً في الثانية بأسلوب TDOA (الحالة الأفضل) مقابل 100 موضع مستخرج في الثانية بأسلوب AOA. ويمكن لتوسيع عرض نطاق وصلات بيانات TDOA أن يحسن سرعة تحديد الموقع الجغرافي. ويمكن أيضاً لاستخدام أوقات مراقبة أقصر و/أو تقنيات ضغط متقدمة أن يقلل من متطلبات عرض نطاق البيانات. وبمجرد إرسال القياسات إلى مخدم مركزي، تصبح إعادة حساب عمليات تحديد الموقع الجغرافي بأسلوب TDOA أسرع بشكل ملحوظ نظراً لأنها تعمل على مخزون البيانات المحلية.
غير مناسب تماماً لتحديد الموقع الجغرافي للعديد من المرسلات في آن واحد	تدعم بعض أنظمة AOA تحديد الموقع الجغرافي في آن واحد للعديد من الإشارات المنفصلة عن بعضها البعض ترددياً. وغالباً ما يشار إلى ذلك على أنه التحديد واسع النطاق لزاوية الاتجاه. ولئن كانت هذه القدرة ممكنة فهي ليست مهيأة لأسلوب TDOA، ويعود ذلك أساساً إلى متطلبات أعلى بكثير لإرسال البيانات. ويمكن خفض إرسال البيانات بأسلوب TDOA في حالة البيانات المساعدة من خلال أداء مزامنة الإشارة (إنشاء TOA) في كل مستقبل.
تعذر تحديد موقع مكان واحد (SSL)	يلزم جهازا استشعار بالحد الأدنى لتوليد خط الموضع، و3 أجهزة استشعار بالحد الأدنى للتحديد الجغرافي ثنائي البُعد للموقع، و4 أجهزة استشعار بالحد الأدنى للتحديد الجغرافي ثلاثي الأبعاد للموقع. ويمكن استخدام أسلوب AOA لتحديد موقع مكان واحد.
اعتبارات هندسية	يكون أسلوبا TDOA وAOA كلاهما على أعلى درجة من الدقة (أفضل تمييع هندسي للدقة (GDOP)) عندما يكون مصدر الإشارة داخل محيط يحد مجموعة من أجهزة استشعار متفاعلة و/أو محطات تحديد زاوية الاتجاه (DF). ومباشرة خارج هذا المحيط، تتناقص دقة تحديد الموقع الجغرافي وفعاليته بأسلوب TDOA أسرع منه بأسلوب AOA (انظر الملحق 1 والمرجع [8]). وعندما يكون المصدر بعيداً خارج هذا المحيط، قد يقرّب أسلوب TDOA خط الموضع على نحو يماثل خط الاتجاه الزاوي في أسلوب AOA (انظر الملحق 1 والمرجع [8]). ويحقق أسلوب AOA تحديد الموقع الجغرافي (أي يدل على تقاطع خطّي اتجاه زاوي) داخل المناطق التي تتراكب فيها مناطق تغطية محطتي تحديد الاتجاه. للحصول على معلومات عن مدى كشف الترددات الراديوية ومنطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي في شبكات TDOA وAOA، انظر الملحق 1.
تحليل خارج الشبكة بقياسات مكان واحد	يمكن بأسلوب AOA تحليل خط الاتجاه الزاوي خارج الشبكة باستخدام قياسات من مكان واحد فقط. ويتعذر إجراء تحليلات مستقلة لخطوط الموضع بأسلوب TDOA باستخدام قياسات من مكان واحد.

(1) يمكن استخدام نُهُج قدرة الورود (POA) للتوجيه الذاتي والانزواء بواسطة محطة محمولة واحدة فقط.

4 الأنظمة الهجينة

يمكن الجمع بين نظام الفارق الزمني في الورود (TDOA) وواحدة أو أكثر من تكنولوجيات تحديد الموقع الجغرافي الإضافية للخروج بما يُعرف بالنظام الهجين. ويجوز الجمع بين تكنولوجيا TDOA وتكنولوجيا AOA في محطة واحدة أو أكثر، مما يُسفر عن أنظمة هجينة AOA/TDOA. كما يجوز الجمع بين تكنولوجيا TDOA وتكنولوجيات أخرى لتحديد الموقع الجغرافي، مثل تقنية نسبة سعة قدرة الورود (POA)، التي ينجم عنها نظام هجين TODA/POA[2].

وتتألف الأنظمة الهجينة AOA/TDOA من موقعين كحدٍ أدنى، يكون لواحد منهما على الأقل إمكانات القياس بأسلوبي AOA وTDOA، فيما تتسم المواقع المتبقية بإمكانات القياس بأسلوب TDOA. ويعطي جهازا الاستشعار في الأسلوب TDOA خطأً زائدياً واحداً يمثل قيم الفارق الزمني كما وردت في الفصل 2.3.7.4 من إصدار عام 2011 لكتيب الاتحاد الدولي للاتصالات بشأن مراقبة الطيف. ويعطي نظام AOA خط الاتجاه الزاوي (LoB). ويتحدد موقع المرسل عند تقاطع خط الاتجاه الزاوي مع الخط الزائدي لنظام TDOA. وترد مناقشة هذه الأنظمة بمزيد من التفصيل في الملحق 2.

5 الخلاصة

الفارق الزمني في الورود (TDOA) هو تكنولوجيا تكميلية لتحديد الموقع الجغرافي لا تُستخدم على نطاق واسع في المراقبة الراديوية. وقد أصبح أسلوب الفارق الزمني في الورود مفيداً على نحو متزايد نظراً لتوفر قدرة الحوسبة المدمجة الرخيصة وتكنولوجيا الاستقبال الراديوي الأكثر تقدماً وتوصيلية البيانات في كل مكان والمزامنة الدقيقة للتوقيت الموزع. وهو يتمتع بنقاط قوة معينة بالنسبة إلى أسلوب AOA، وخاصة في كشف الإشارات الحديثة عريضة النطاق وتحديد الموقع الجغرافي لمصدرها، ومتطلباته الأبسط من الهوائي، وقدرته على معالجة الانتشار قريب المدى عبر مسيرات متعددة في البيئات الحضرية، وملاءمته لنشر شبكات الاستشعار منخفضة التكلفة. كما تشوبه نقاط ضعف بالنسبة إلى أسلوب AOA، وخصوصاً في تحديد مصدر الإشارات ضيقة النطاق غير المشكَّلة، وفي المستلزمات الأكثر تطلباً لوصلة ربط البيانات. وهو يتطلب جهازي استقبال على الأقل للحصول على معلومات عن خط الموضع، و3 مستقبلات كحد أدنى للتحديد ثنائي البُعد للموقع. وتواجه المراقبة الحديثة للإشارات اتجاهاً نحو تواصل تزايد عروض نطاق الإشارة وتناقص كثافات القدرة الطيفية. ويمكن استخدام تكنولوجيات تحديد الموقع الجغرافي التكميلية مثل الفارق الزمني في الورود لتحسين احتمال كشف الإشارات الحديثة وتحديد موقع مصدرها في بيئات كثيرة. ويمكن لأنظمة AOA/TDOA الهجينة أن تحيّد بعض نقاط الضعف في كل أسلوب بمفرده وأن تحقق في الوقت نفسه مزايا كل أسلوب بمفرده. ولا تكون محطات TDOA المتنقلة فعّالة إلا في حالة الاستعمال الهجين مع أسلوب AOA.

6 المراجع

[1] BROUMANDAN, ALI *et al*. [2008] *Practical Results of hybrid AOA/TDOA Geolocation Estimation in CDMA Wireless Networks*. Calgary: s.n., 2008. IEEE 68th Vehicular Technology Conference. 978-1-4244-1722-3.

[2] KRIZMAN, KEVIN J., BIEDKA, THOMAS E. and RAPPAPORT, THEODORE S. [1997] *Wireless Position Location: Fundamentals, Implementation Strategies, and Sources of Error*. s.l.: IEEE, 1997. Vehicular Technology Conference. Vol. 2, p. 919-923.

[3] SCHWOLEN-BACKES, ANDREAS. [2010] *A comparison of radiolocation using DOA respective TDOA*. Hamburg: Plath GmbH.

[4] PATWARI, NEAL *et al*. [July 2005] Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*. p. 54-69.

[2] يُلاحظ أنه من المهم التمييز بين الأنظمة الهجينة أو المحطات الهجينة والخوارزميات لتحديد الموقع الجغرافي. فالخوارزميات الهجينة تستفيد من كل من الفارق الزمني في الورود من أجل تقدير موقع المرسل. ولم يتم تضمين هذه الخوارزمية المتقدمة لتحديد الموقع الجغرافي كجزء من هذه الدراسة.

[5] STILP, LOUIS A. [1997] TDOA technology for locating narrowband cellular signals: Cellphone location involves several practical and technical considerations. Time difference-of-arrival (TDOA) technology provides accuracy for locating analog cellphones in urban environments. *Urgent Communications*. [Online] 4 1. http://mrtmag.com/mag/radio_tdoa_technology_locating/index.html.

[6] TORRIERI, DON J. [1984] Statistical Theory of Passive Location Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vols. AES-20, 2.

[7] AGILENT TECHNOLOGIES [2009] *Techniques and Trends in Signal Monitoring, Frequency Management, and Geolocation of Wireless Emitters*. Application Note. 5990-3861EN.

[8] KOZMIN, Vladimir A., PAVLYUK, Alexander P. and TOKAREV, Anton B. [2014] Comparison of spectrum monitoring coverage features of AOA and TDOA geolocation methods – *Electrosviaz*, No. 2, 2014 (see translation into English at the website: http://www.ircos.ru/en/articles.html).

الملحـــق 1

العوامل التي تؤثر على مدى كشف إشارات التردد الراديوي وعلى منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي في محطات المراقبة

1 مقدمة

هنالك عدة اعتبارات لنشر محطات للمراقبة تؤثر في مدى كشف إشارات التردد الراديوي وفي منطقة التغطية المتعلقة بتحديد الموقع الجغرافي. وتتأثر الفعالية الكلية لأي محطة من محطات المراقبة – بغض النظر عن خصائص أدائها – بالقيود أو المزايا التي يوفرها انتقاء المعدات والتركيب والموقع.

ففي عمليات النشر في العالم الحقيقي، من المرجّح أن تتألف أنظمة مراقبة الطيف (SMS) من كل من محطات AOA ومحطات TDOA التي تُنشر ضمن مجموعات مكونة من منصات ثابتة ومتنقلة. وتنطوي عملية انتقاء تكنولوجيا تحديد الموقع الجغرافي المستخدمة في موقع المراقبة على عدد من الاعتبارات، وعادة ما تستند إلى ما يلي:

– نفاذ الموقع إلى الطاقة والشبكة.

– قرب طاقة الإشارة – المرغوبة وغير المرغوبة على السواء. فقد أصبح وضع مواقع المراقبة على مقربة من الخدمات اللاسلكية أو المعدات الكهربائية الصناعية ضرورياً في الكثير من المناطق الحضرية.

– التضاريس وخط الموقع الذي يؤدي إلى المنطقة التي تجري مراقبتها.

– كثافة المرسلات وطبيعة الحركة الطيفية.

– أهمية قاعدة المستعمل في المنطقة التي تجري مراقبتها (أي البنى التحتية البالغة الأهمية أو المنشآت الحكومية ونحو ذلك).

– فترة نشاط المراقبة. فبعض منتجات المراقبة تناسب جيداً أنشطة المراقبة لمدة قصيرة (أقل من 12 ساعة) نظراً لصغر حجمها وتشغيلها بالبطارية وسهولة تجهيزها وتفكيكها.

– العوامل المتعلقة بإقامة الموقع، بما في ذلك حجم المعدات وتوفر القدرة واستعمالها، وتوصيلية الشبكات، وإيجار الموقع، ومعايرة الأجهزة وصيانتها.

وعلاوة على ذلك، قد يتألف نظام مراقبة الطيف (SMS) من مزيج من تكنولوجيا قديمة وتكنولوجيا حديثة (مثلاً، إضافة تجهيزات جديدة إلى المحطات القائمة) إضافة إلى حالة معدات المراقبة القائمة ووظيفتها. ومن غير العملي اختيار تكنولوجيا واحدة لمعالجة جميع السيناريوهات الممكنة. إذ إن لكل تكنولوجيا من تكنولوجيات تحديد الموقع الجغرافي جوانب تعمل بشكل جيد في حالات معينة دون غيرها.

وقد استخدمت هنا عمليات المحاكاة مع مجموعة محددة من الشروط لتوضيح تأثير خيارات التصميم وخصائص المرسل على مدى كشف إشارات التردد الراديوي ومنطقة التغطية في تحديد الموقع الجغرافي. وتستند عمليات المحاكاة التالية إلى نماذج انتشار معيارية في المجال الصناعي وضعت في الفترة من 2004 إلى 2007[3]. وهي لا تأخذ في الحسبان البيانات الفعلية للتضاريس ثلاثية الأبعاد، وبالتالي فإن نمذجة تغطية التردد الراديوي تتم بصورة متسقة من كل موقع من مواقع المراقبة. ويوفر ذلك القدرة على معرفة التأثيرات المختلفة لعرض نطاق المرسل وقدرته وارتفاع الهوائي في ظل ظروف مثالية. وتَستخدم عمليات المحاكاة أداة برمجية عادة ما تُعتمد للإجابة على السؤال التالي: "ما هو العدد التقريبي لمحطات المراقبة التي نحتاج إليها لتغطية المنطقة محط الاهتمام؟"

2 اعتبارات عامة

من المهم أولاً القيام بتعريف مدى كشف إشارات التردد الراديوي (RF) ومنطقة التغطية في تحديد موقع جغرافي:

- يعرّف مدى كشف إشارات التردد الراديوي بأنه أبعد مسافة (بالكيلومترات) عن محطة المراقبة يمكن منها كشف مُرسلٍ ما بقيمة موجبة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR). وقد يختلف مدى الكشف باختلاف الاتجاهات تبعاً للتضاريس الأرضية وخصائص المباني وعوامل أخرى.
- تُعرّف منطقة التغطية في تحديد الموقع الجغرافي بأنها المنطقة الجغرافية التي يمكن فوقها تحديد موقع المرسل بشكل معقول باعتماد الأساليب المتوفرة (أي أسلوب زاوية الورود (AOA)، وأسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA)، والأسلوب الهجين، وأسلوب قدرة الوصول (POA)).

ومن المهم ملاحظة الفرق بين مدى كشف محطة المراقبة لإشارات التردد الراديوي – الذي يتطلب قيمة موجبة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) ومنطقة التغطية في تحديد الموقع الجغرافي التي لا تتطلب قيمة موجبة للنسبة SNR في كل محطة من محطات المراقبة. فأساليب تحديد الموقع الجغرافي باستخدام الفارق الزمني في الورود (TDOA)، التي تربط الإشارات المستقبَلة في مواقع مختلفة، تسمح بتحديد مواقع المرسلات بواسطة إشارات أدنى قيمة من الحد الأدنى للضوضاء. أما قدرة الضوضاء المستقبَلة في المواقع فلا يوجد ارتباط بينها. وللاطلاع على مزيد من المعلومات المتعلقة بعمل أساليب تحديد الموقع الجغرافي باستخدام الفارق الزمني في الورود، يرجى الرجوع إلى القسمين 2.2.3.7.4 و3.2.3.7.4 من كتيب الاتحاد الدولي للاتصالات بشأن مراقبة الطيف.

ويمكن تحليل منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي في مجموعات من المحطات الثابتة لتحديد اتجاه زاوية الورود (AOA DF) وأجهزة استشعار الفارق الزمني في الورود (TDOA) بواسطة شبكات مراقبة بأسلوب AOA وأسلوب TDOA مكونة من ثلاث محطات تتفاعل فيما بينها، لأن هذه الشبكات تؤدي إلى نشوء مناطق تتراكب فيها مناطق تغطية محطتين أو ثلاث محطات إضافة إلى المناطق التي تغطيها محطة واحدة فقط.

وسننظر في عملية تغطية تحديد الموقع الجغرافي بالنسبة لثلاثة أجهزة استشعار ثابتة معرّفة في الشكل 1 بالرموز من S1 إلى S3، وثلاث محطات ثابتة لتحديد الاتجاه (DF) مبينة في الشكل 2 بالرموز من DF1 إلى DF3 ولديها نفس الهندسة لكنها تعمل ضمن شبكات TDOA وشبكات AOA على التوالي. ويُفترض أن تكون الشبكات مجهزة بمحطات مراقبة متنقلة، حددت في الشكلين 1 و2 بالرمز MS، وتستخدم فيها معدات مجهزة بنفس التكنولوجيا التي جهزت بها كل من أجهزة الاستشعار الثابتة ومحطات تحديد الاتجاه. ويعرض الشكلان 1 و2 مدى كشف إشارات التردد الراديوي في كل محطة ثابتة باعتماد خطوط كفافية

3 نماذج أعدت في إطار اتحاد المبادرة العالمية للتطبيقات الراديوية اللاسلكية الجديدة (WINNER I وII) الذي نسقته Nokia Siemens Networks.

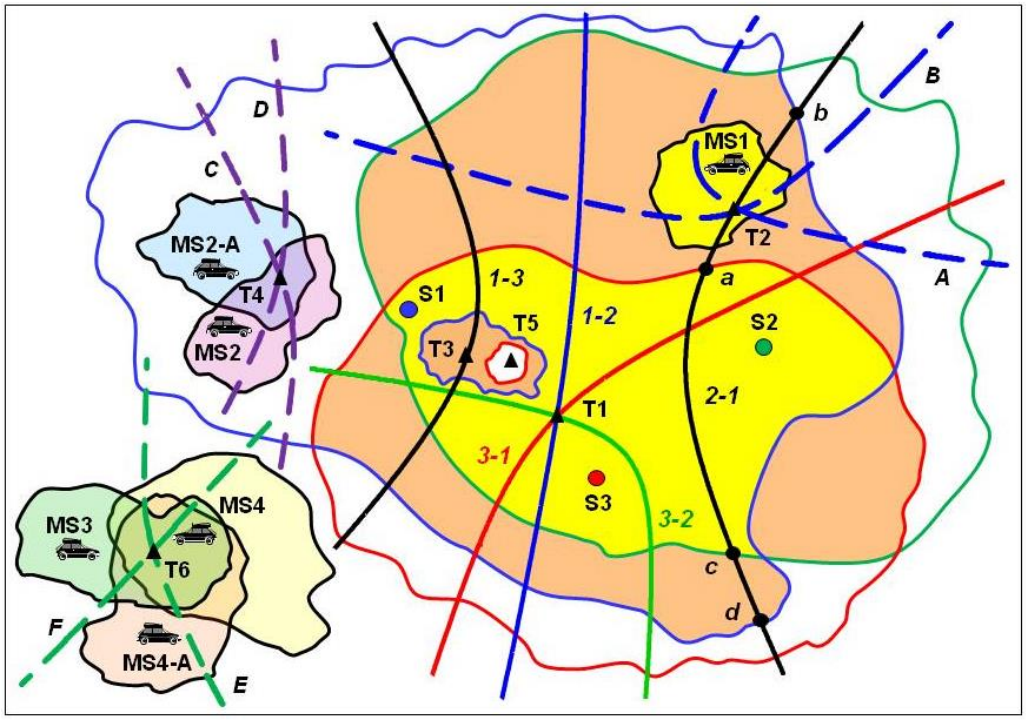
ذات ألوان مختلفة. وتظهر باللون الأصفر منطقة كشف إشارات التردد الراديوي المشتركة بين جميع المحطات الثابتة والتي تكون فيها نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) الخاصة بمصدر الإرسال (الذي يُسمى فيما بعد "المرسل") موجبة. وبما أن أجهزة الاستشعار التي تعمل بأسلوب TDOA تستخدم ارتباطاً تقاطعياً متزامناً، فإن منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي الخاصة بشبكة أجهزة الاستشعار S1 إلى S3 في الشكل 1 تكون أكبر من تلك الخاصة بمحطات تحديد الاتجاه DF1 إلى DF3 الواردة في الشكل 2.

تجدر الإشارة إلى أن إنشاء مدى كشف إشارات التردد الراديوي ومنطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي في كلا الشكلين قد تم بشكل افتراضي استناداً إلى مرسل اختبار معين ذي قدرة محددة وارتفاع هوائي محدد. وإذا طرأ تعديل على هذه المعلمات، فسوف تتغير بالتأكيد الخطوط الكفافية لمناطق التغطية بدرجة معينة. ويرد وصف ذلك بمزيد من التفصيل في القسم 3.

وفيما يتعلق بشبكة TDOA، يتم تحديد إحداثيات المرسل استناداً إلى منطقة تقاطع خطوط الموضع الثلاثة، كما هو مبين في الشكل 1 بالنسبة للمرسل T1، حيث تتقاطع خطوط الموضع 1-2 و1-3 و2-3. أما بالنسبة لشبكة AOA، فإن تحديد الموقع الجغرافي باستخدام محطات ثابتة فقط لتحديد الاتجاه يتم بواسطة محطات تحديد الاتجاه الثلاث جميعها، كما هو مبين في الشكل 2 (حيث تحدد خطوط الاتجاه الزاوي من 1 إلى 3 موقع المرسل T1 بشكل فعّال). وتعتبر شبكة AOA فعّالة أيضاً في المناطق التي لا تغطيها سوى محطتان لتحديد الاتجاه كما هو مبين في الشكل نفسه فيما يتعلق بالمرسل T2 (خطا الاتجاه الزاوي 4 و5).

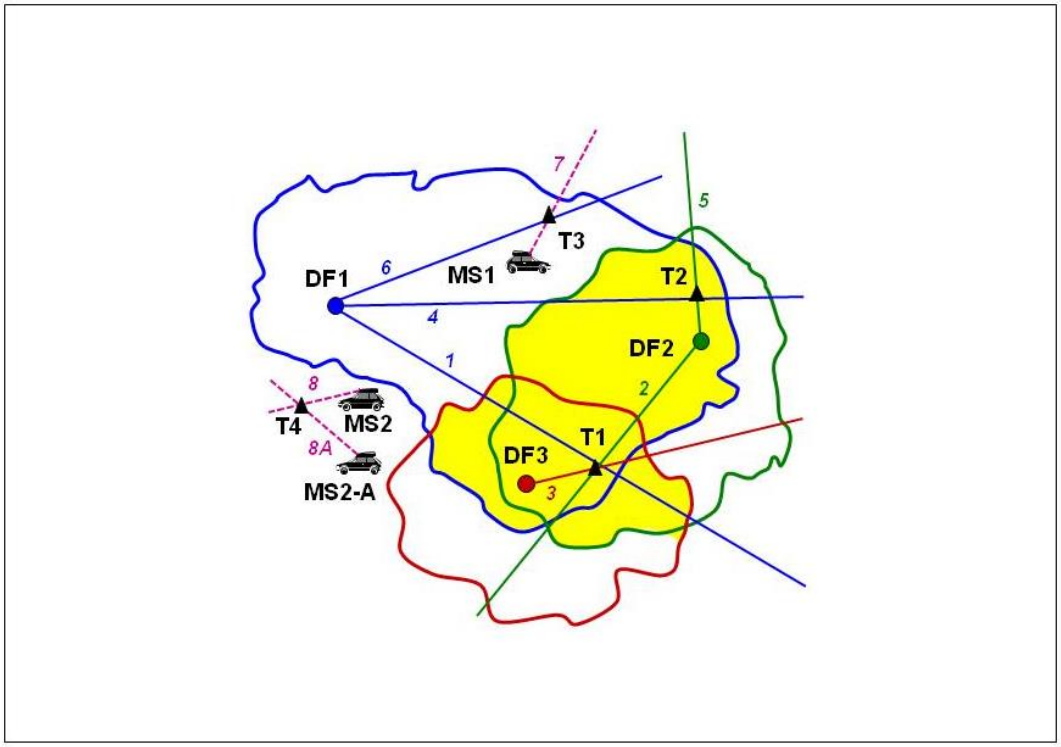
الشـــكل 1

منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي في شبكة الفارق الزمني في الورود (TDOA)



الشـــكل 2

منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي في شبكة زاوية الورود (AOA)



وإذا كان المرسل المعني في شبكة TDOA واقعاً في إحدى المناطق خارج حدود جهاز الاستشعار (اللون البني في الشكل 1)، فقد لا يعطي النظام سوى خط واحد للموضع، كما هو موضح بالخط 2-1 بالنسبة للمرسل T2، أو خط الاتجاه الزاوي للمرسل وفي هذه الحالة، يجب أن تُحدد إحداثيات المرسل بالاستعانة بمحطة متنقلة (MS1 في الشكل 1) تتفاعل مع جهازي استشعار ثابتين. ويظهر ذلك في الشكل 1 ممثلاً بتقاطع خط الموضع 2-1 مع خطين آخرين أنشأهما هذه المحطة المتنقلة (خطي الموضع A وB، المرسومين بشكل متقطع لإبراز قابلية تغيرهما مع تحرك المحطة).

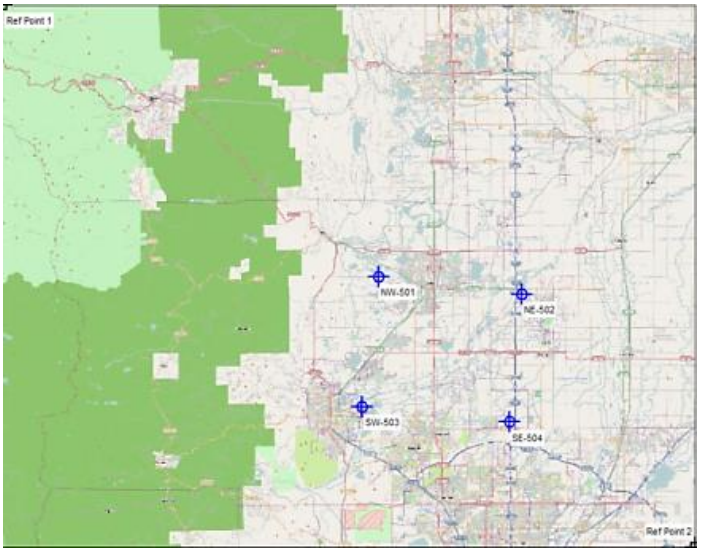
ويجب أن يكون المرسل المعني ضمن مدى كشف إشارات التردد الراديوي لواحدة من محطات TDOA إذا كان الإرسال متقطعاً (مما يتطلب بالتالي قياساً محفزاً بنبضات). أما إذا كان الإرسال متواصلاً، فقد لا يتطلب تقدير الموقع وجود المرسل ضمن مدى كشف إشارات التردد الراديوي لأيّ من أجهزة استشعار محطة TDOA، بل ضمن منطقة التغطية المتعلقة بتحديد الموقع الجغرافي. ومع أن التحديد الدقيق للموقع يمكن أن يتم بالاستعانة بمحطات متنقلة، إلا أنه قد يستغرق مدة طويلة في بعض الحالات. فغالباً ما يكون مدى كشف المحطات المتنقلة لإشارات التردد الراديوي محدوداً جرّاء انخفاض ارتفاع الهوائي. ومع ذلك توجد تقنيات لرفع هوائي المحطة المتنقلة باستخدام أماكن متاحة للجمهور من قبيل مرائب أو باحات وقوف السيارات.

ويرد في المرجع [8] مناقشة لحالات أخرى للتغطية بأسلوب TDOA وأسلوب AOA مستمدة من الشكلين 1 و2 إضافة إلى أمثلة على التفاعل بين المحطات الثابتة والمتنقلة.

3 محاكاة العوامل التي تؤثر في مدى كشف إشارات التردد الراديوي في محطات المراقبة التي تعمل بأسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA) وأسلوب زاوية الورود (AOA)

الشـــكل 3

منطقة المحاكاة في بولدر، كولورادو



استخدمت في الأمثلة الواردة في هذا القسم إحدى المناطق الواقعة في ولاية كولورادو بالولايات المتحدة الأمريكية كما هو مبين في الشكل 3. وهي تتضمن أربع محطات (في المواقع NW-501 وNE-502 وSW-503 وSE-504) تبعد إحداها عن الأخرى مسافة 18 km تقريباً. وتوضح عمليات المحاكاة مدى كشف إشارات التردد الراديوي بالنسبة لمحطات TDOA وAOA التقليدية التي تعمل بمفردها. ولأغراض هذه المحاكاة، يُعرّف مدى الكشف بأنه أبعد مسافة (بالكيلومترات) عن محطة المراقبة يمكن ضمنها الكشف عن مرسل مع قيمة موجبة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR).

وتبين عمليات المحاكاة احتمال الكشف باستخدام الألوان – حيث يشير اللون الأحمر إلى احتمال مرتفع واللون الأزرق إلى احتمال منخفض. وسيسلط هذا الجزء الضوء على العوامل التي قد تؤثر على مدى كشف إشارات التردد الراديوي. وتقع بعض هذه العوامل تحت سيطرة المشغل مثل:

- ارتفاع وكسب هوائي محطة المراقبة.
- نوع وطول كبل خط تغذية التردد الراديوي، وتكييف الإشارة مثل التوهين، والمراشيح ونحو ذلك.
- بيئة ضوضاء التردد الراديوي المحلية بالنسبة للمحطة.
- المحيط المادي (بما في ذلك التضاريس الأرضية المجاورة).

بالمقابل، هناك بعض العوامل التي ليس لها علاقة بمحطة المراقبة لكنها تعتمد بشكل كبير على خصائص المرسل:

- تردد الموجة الحاملة.
- قدرة الخرج.
- عرض نطاق الإشارة.
- ارتفاع هوائي المرسل.

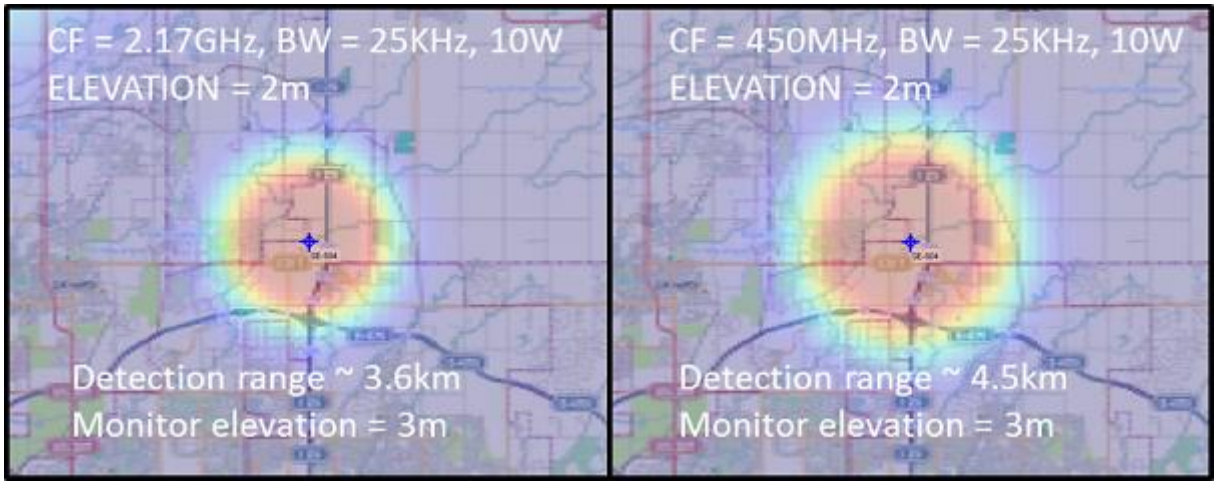
وتسمح أداة المحاكاة المستخدمة في هذا التقرير للمستعمل بأن يعدّل أياً من هذه العوامل أو جميعها لتحديد التأثيرات على مدى كشف إشارات التردد الراديوي وعلى منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي (لقياسات الموقع الجغرافي المرتبطة تقاطعياً في أسلوب TDOA). ولأغراض التبسيط، يُستخدم هنا للمناطق الريفية نموذج التضاريس الأرضية على خط البصر (LoS). وتتوفر في أداة المحاكاة نماذج أخرى للتضاريس الأرضية من أجل سيناريوهات المناطق الحضرية وشبه الحضرية والأمكنة داخل المباني/خارج المباني. كما تتضمن نماذج للانتشار على خط البصر وخارج خط البصر (NLoS).

3(أ) تأثير تردد الموجة الحاملة للمرسل

تظهر المحطة SE-504 في الشكل 4 على رقعة يبلغ طولها 17,2 km من الشمال إلى الجنوب وعرضها 21,8 km من الشرق إلى الغرب (سوف تستخدم هذه الرقعة في جميع عمليات المحاكاة التي تتناول مسألة مدى كشف إشارات التردد الراديوي في هذا القسم). ومن المفترض أن تعمل هذه المحطة بعتبة ضوضاء قدرها –150 dBm/Hz، وهوائي يبلغ كسبه 0 dB وارتفاعه 3 m، وكبل من نوع LMR-400 بطول 2 m يربط هوائي الاستقبال بجهاز استشعار التردد الراديوي. وبالنسبة لعملية المحاكاة لجهة اليسار، يبلغ تردد الموجة الحاملة للمرسل 2,17 GHz وعرض نطاق الإشارة 25 kHz وقدرة الخرج 10 W وارتفاع الهوائي 2 m. وتُظهر عملية المحاكاة لجهة اليمين التأثير الذي يسببه خفض تردد الموجة الحاملة للمرسل إلى 450 MHz في مدى كشف إشارات التردد الراديوي[4].

الشـــكل 4

نموذج الانتشار على خط البصر في المناطق الريفية، تكون فيه محطة المراقبة والمرسل قريبين من مستوى سطح الأرض



وقد بدأ استخدام نطاقات التردد الأعلى (فوق 3 GHz) في المهاتفة الخلوية وغيرها من الخدمات المرخصة. غير أن مراقبة هذه الخدمات من مواقع ثابتة ستزداد صعوبةً نظراً لعدد مواقع المراقبة اللازم لتأمين التغطية. ولهذا السبب، قد تتزايد أهمية التكنولوجيات القائمة على شبكات محطات المراقبة الثابتة والمتنقلة والقابلة للنقل.

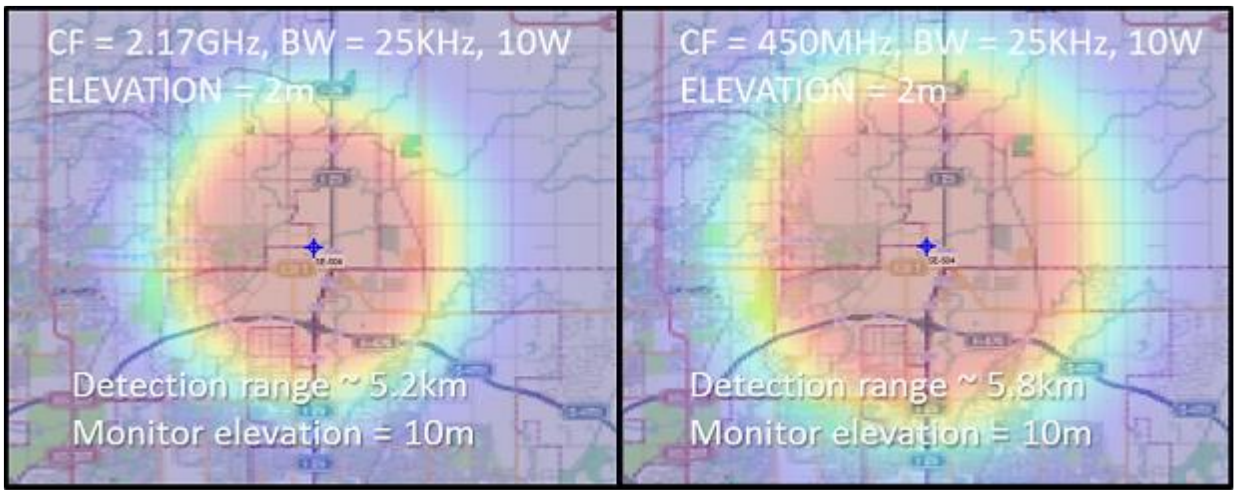
4 تنخفض خسارة الانتشار عند الترددات المنخفضة، مما ينجم عنه مدى أكبر لكشف إشارات التردد الراديوي.

3(ب) تأثير ارتفاع هوائي محطة المراقبة

في الشكل 5، ازداد ارتفاع هوائي محطة المراقبة إلى 10 m فيما بقيت جميع العوامل الأخرى على ما هي عليه. ويلاحظ أن هناك زيادة ملحوظة في المدى المتوقع لكشف إشارات التردد الراديوي نتيجة تحسن فرص خط البصر في استهداف المرسلات. ولارتفاع هوائي المرسل تأثير مماثل.

الشـــكل 5

نموذج الانتشار على خط البصر في المناطق الريفية، يكون فيه المرسل قريباً من الأرض ومحطة المراقبة مرتفعة

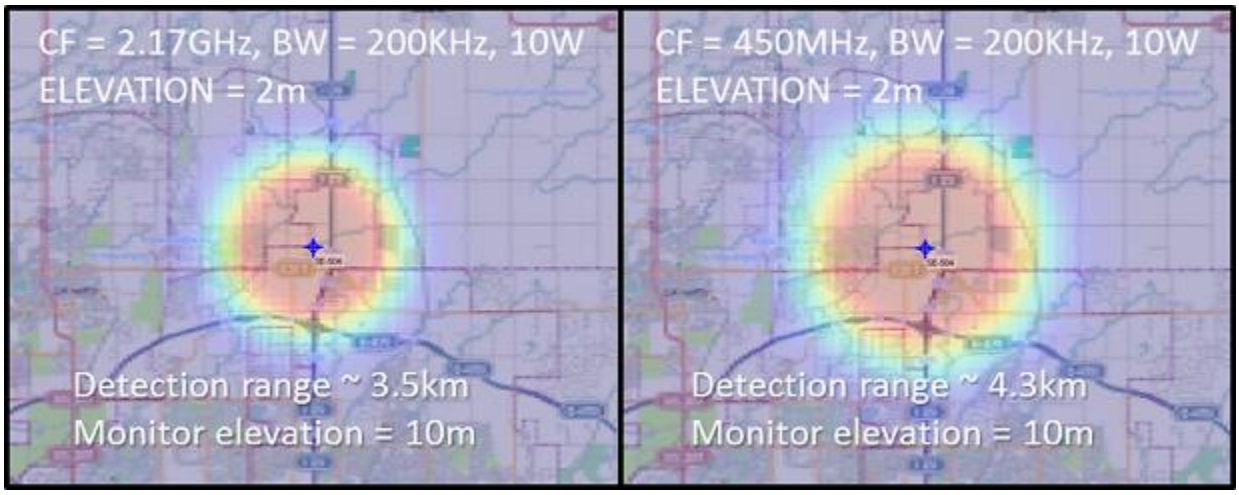


3(ج) تأثير عرض نطاق الإشارة

في الشكل 6، بقيت جميع العناصر على ما هي عليه في الشكل 5، باستثناء عرض نطاق الإشارة الذي ارتفع من 25 kHz إلى 200 kHz. ويلاحظ انخفاض في مدى الكشف جرّاء انخفاض قدرة الكثافة الطيفية.

الشـــكل 6

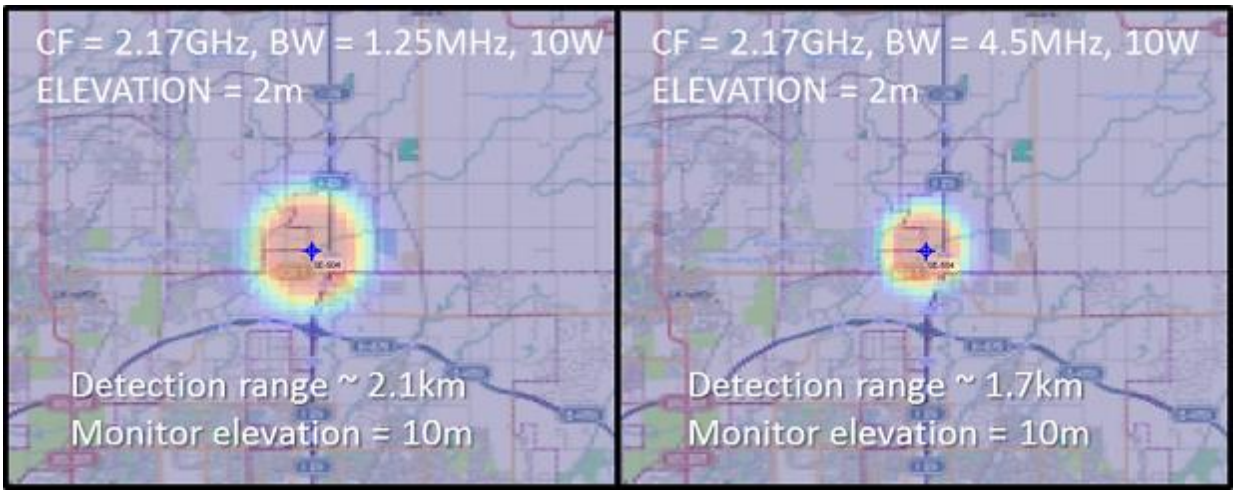
مماثل للشكل 5 باستثناء تغير عرض نطاق الإشارة
من 25 kHz إلى 200 kHz



ويُظهر الشكل 7 نتائج عمليات المحاكاة المبنية على المثال GHz 2,17 وزيادة عرض نطاق الإشارة إلى MHz 1,25 وMHz 4,5 على التوالي. وقد بقيت جميع المتغيرات الأخرى على ما هي عليه في الشكل 5 (يسار). ومن الواضح جداً كيف أن عرض نطاق الإشارة يؤثر في قدرة المرسل على الانتشار مع المسافة وما يقابل ذلك من انخفاض في مدى كشف إشارات التردد الراديوي لمحطة المراقبة.

الشـــكل 7

تغير عرض نطاق الإشارة من MHz 1,25 إلى MHz 4,5 وبقيت قدرة المرسل وارتفاع الهوائي
وتردد الموجة الحاملة على ما هي عليه



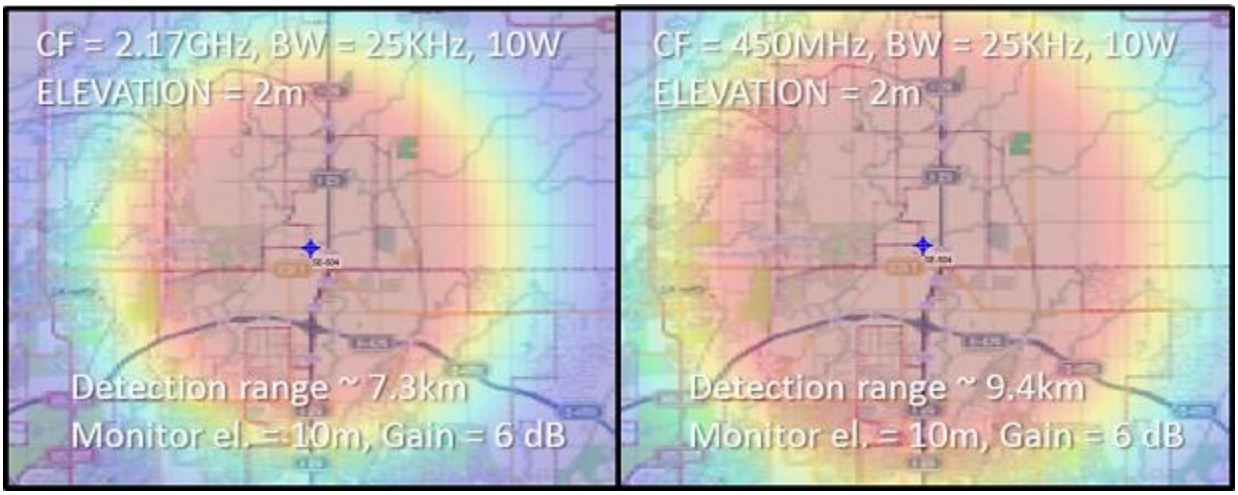
3(د) تأثير كسب الهوائي

يظهر الشكل 8 نتائج عملية المحاكاة التي أُضيفت فيها القيمة dB 6 إلى كسب الهوائي لتوضيح استخدام الهوائي الاتجاهي، وأعيدت قيمة عرض نطاق الإشارة إلى kHz 25. وتقدم هذه النتائج دلالة على مدى التغطية المتوقع لبعض محطات AOA

التقليدية التي يرتبط كسبها بنظام الهوائي الخاص بها، أو لمحطة TDOA المجهزة بهوائي اتجاهي. وقد بقي مقياس رسم الخرائط على حاله بالنسبة لجميع عمليات المحاكاة حتى الآن.

الشـــكل 8

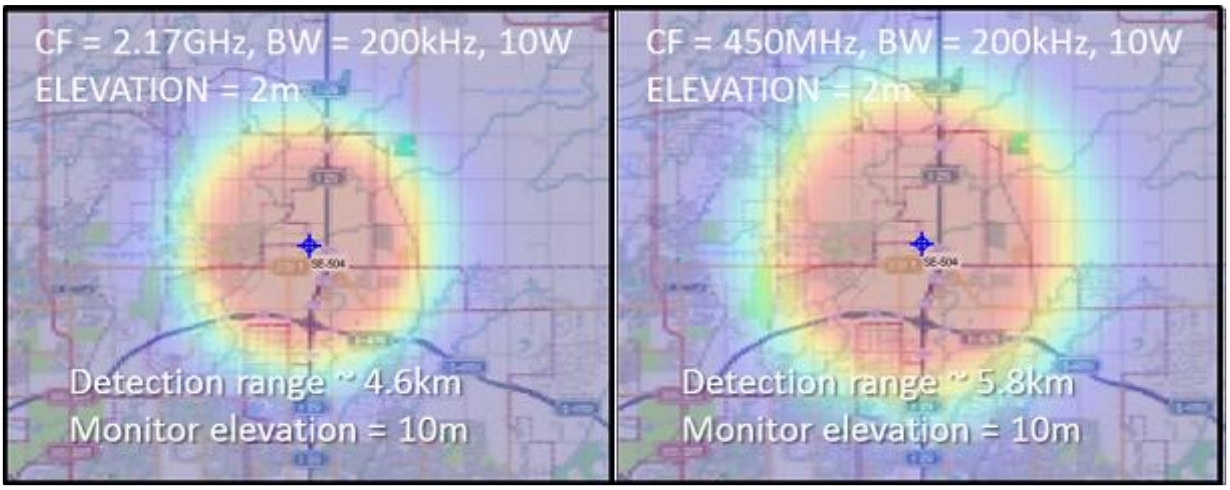
ازداد كسب الهوائي بقيمة 6 dB وخفّض عرض نطاق المُرسل إلى 25 kHz
مع تردد للموجة الحاملة قدره 2,17 GHz و450 MHz على التوالي



ويُظهر الشكل 9 نتائج عملية المحاكاة نفسها الواردة في الشكل 8، باستثناء أن عرض نطاق المرسل قد ارتفع إلى 200 kHz.

الشـــكل 9

مماثل للشكل 8 باستثناء أن عرض نطاق المرسل قد ارتفع إلى 200 kHz

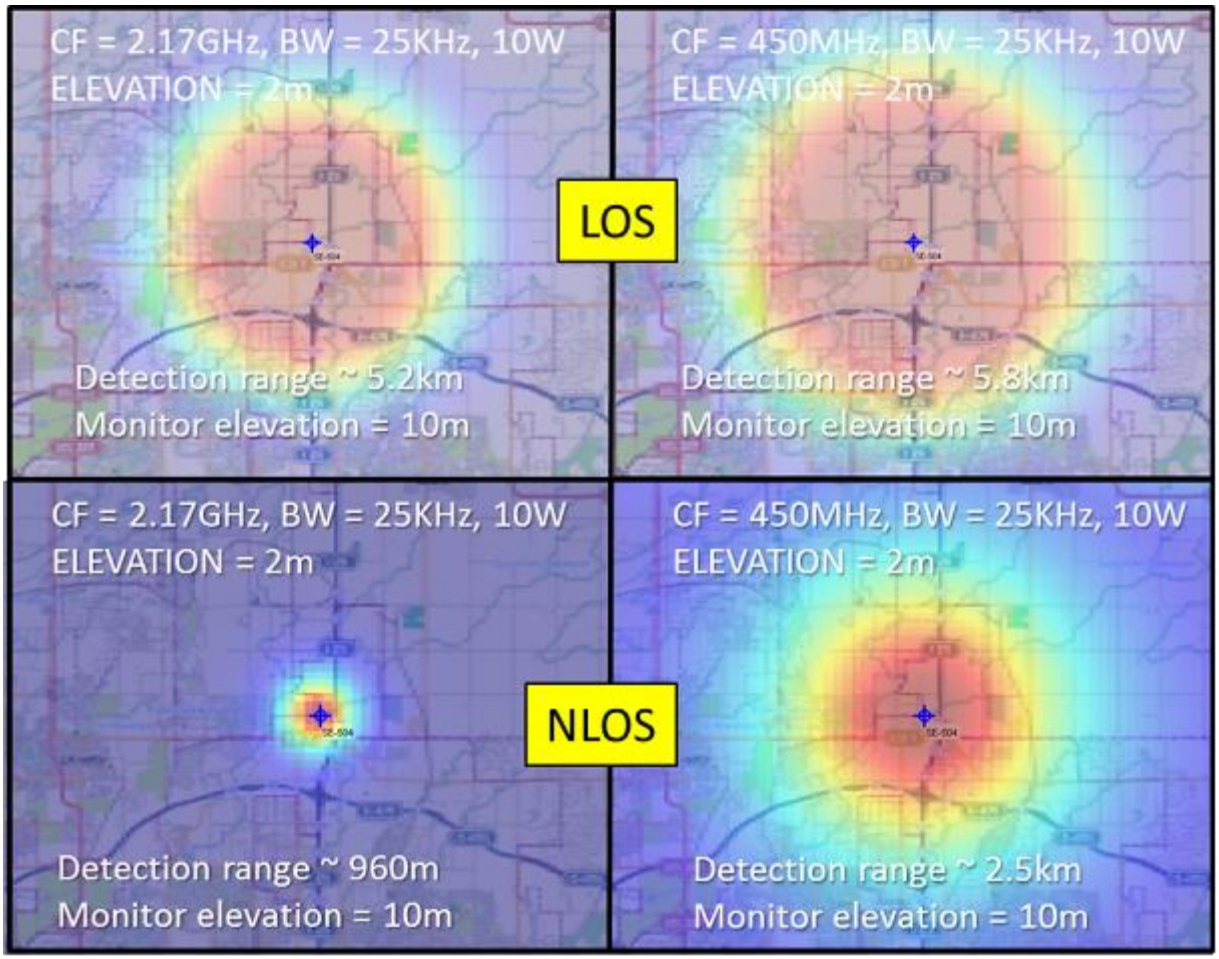


3(هـ) تأثيرات التضاريس الأرضية وخط البصر

تُظهر الأشكال من 4 إلى 9 نتائج عمليات المحاكاة التي يقصد بها توضيح تأثير عوامل التصميم المختلفة وخصائص المرسل على مدى كشف إشارات التردد الراديوي لمحطة مراقبة وحيدة تعمل بمفردها. ولم تظهر في عمليات المحاكاة الواردة أعلاه تأثيرات الحجب الناجمة عن المباني والتضاريس الأرضية. ولإثبات هذا التأثير على مدى الكشف، يُظهر الشكل 10 نماذج الانتشار على خط البصر في المناطق الريفية مقابل نماذج الانتشار خارج خط البصر. ويتم هنا تكرار السيناريو الوارد في الشكل 5 في عمليات المحاكاة العليا مقارنة بنماذج الانتشار خارج خط البصر في عمليات المحاكاة السفلى. ويُظهر ذلك بشكل بياني التأثيرات التي قد يخلفها خط البصر على كشف إشارات التردد الراديوي. كما يفيد في إبراز الدور الهام الذي تضطلع به المحطات المتنقلة والقابلة للنقل بالنسبة لأنظمة مراقبة الطيف الحديثة. ويجب أن تؤخذ هذه العوامل في الاعتبار لدى اختيار الموقع وتصميم محطة المراقبة التي ستستخدم في قياسات موقع المرسل.

الشـــكل 10

تأثير نماذج الانتشار على خط البصر على مدى كشف إشارات التردد الراديوي مقابل نماذج الانتشار خارج خط البصر



4 محاكاة العوامل التي تؤثر على منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي في محطات المراقبة بأسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA) وأسلوب زاوية الورود (AOA)

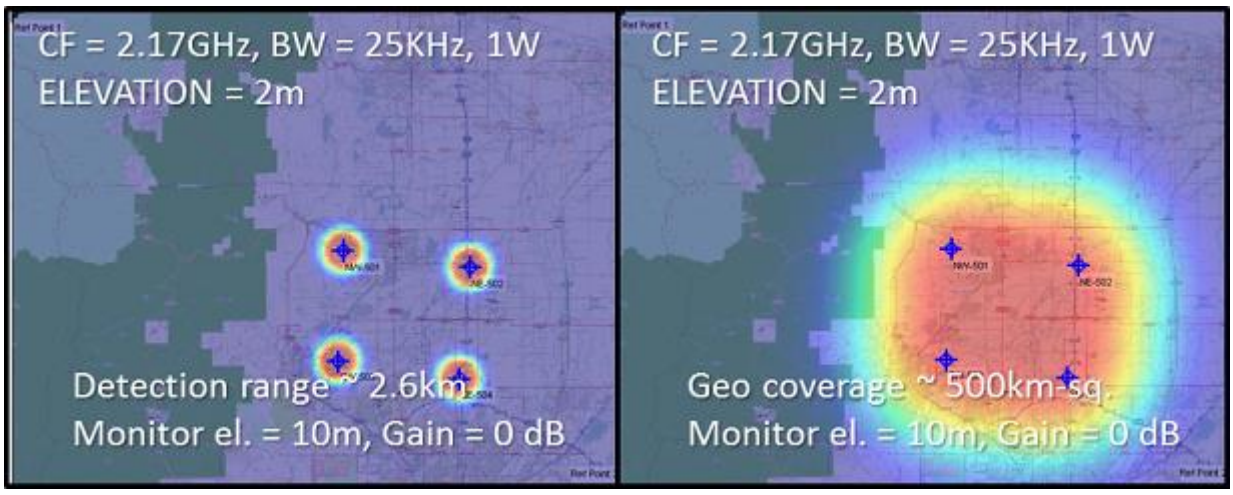
يرد في هذا القسم رسم لمنطقة جغرافية واسعة وإظهار لأربع محطات للمراقبة. وتبين عمليات المحاكاة لجهة اليسار مدى كشف إشارات التردد الراديوي في محطات مراقبة إفرادية تعمل بمفردها. وتبين عمليات المحاكاة لجهة اليمين منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي المتعلقة بقياسات مترابطة تقاطعياً بأسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA).

وتعرَّف منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي على أنها المنطقة الجغرافية التي يمكن فيها تحديد موقع مرسل ما بطريقة معقولة باستخدام الأساليب المتاحة (أي أسلوب زاوية الورود (AOA)، وأسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA)، والأساليب الهجينة، وأسلوب قدرة الوصول (POA)). ومن المهم ملاحظة الفرق بين مدى كشف إشارات التردد الراديوي – الذي يتطلب قيمة موجبة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) في محطة المراقبة ومنطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي التي لا تتطلب قيمة موجبة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء في كل محطة من محطات المراقبة.

ويُظهر الشكل 11 نتائج عملية محاكاة ضُبط فيها تردد المرسل على القيمة GHz 2,17 بينما جرى تخفيض مستوى القدرة إلى القيمة W 1. وبما أن المرسل يقع على ارتفاع m 2 (ويستمر باستخدام نموذج الانتشار على خط البصر في المناطق الريفية من دون البيانات المتعلقة بالتضاريس الأرضية)، فإن مدى كشف إشارات التردد الراديوي لمحطة المراقبة يبلغ نحو km 2,6 – وهذا أمر يبعث على التفاؤل بالنظر إلى إمكانية تسبب المباني أو التضاريس الأرضية بحجب الإشارة عملياً. ويُقدر أن تكون منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي بأسلوب TDOA، المبينة إلى اليمين، أكبر بكثير لأنها تستخدم قياسات مترابطة تقاطعياً مع شبكة محطات المراقبة بأكملها[5]. وتفترض عملية المحاكاة وجود ارتباط بين الأزواج الأربعة لمحطات المراقبة.

الشـــكل 11

مدى كشف إشارات التردد الراديوي في أربع محطات مراقبة إفرادية (إلى اليسار) مقابل منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي باستخدام أسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA) (إلى اليمين)

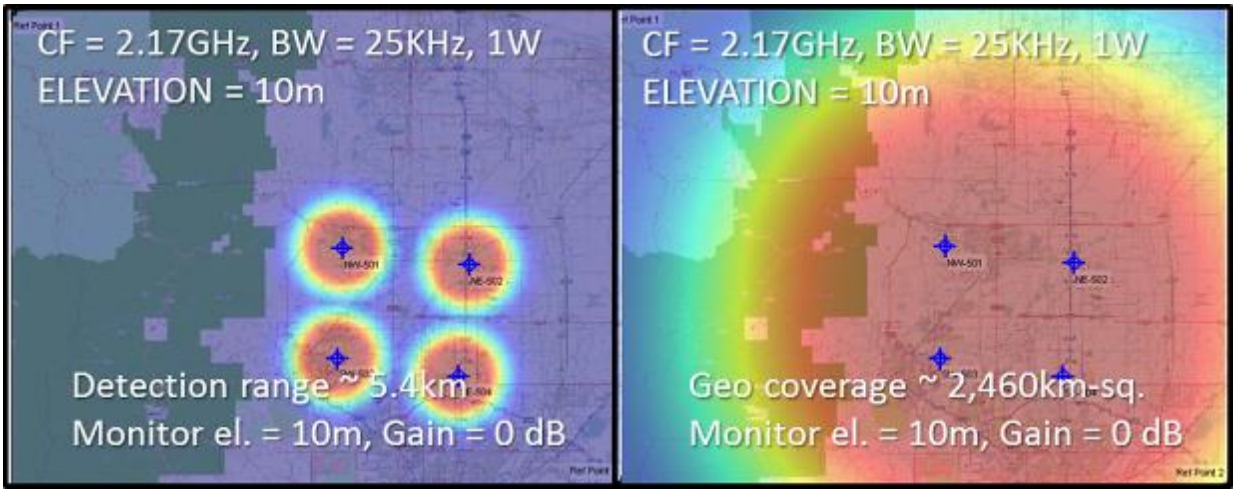


[5] في الحالة المتعلقة بقياسات الفارق الزمني في الورود (TDOA)، تكون الإشارة نفسها المرسلة من جهازي استشعار منفصلين مترابطة تقاطعياً، مما ينجم عنه كبت خصائص الضوضاء المستقلة. وفي الحدود النظرية لأزمنة الارتباط التقاطعي الطويلة، لا تعتبر ضوضاء المستقبل وضوضاء البيئة من العوامل المؤثرة ويصبح أداء الكشف للنظام أقل تقيداً بأداء المستقبل الإفرادي، بما في ذلك معامل الضوضاء.

ويظهر الشكل 12 نتائج عملية محاكاة يبلغ فيها ارتفاع المرسل 10 m. ويُظهر ذلك تحسّناً في مدى كشف إشارات التردد الراديوي بالنسبة لنظامي TDOA وAOA. كما تحسنت أيضاً منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي بأسلوب TDOA (إلى اليمين). ومن الأمور التي تؤخذ في الاعتبار في هذه المحاكاة التمييع الهندسي للدقة (GDOP) المرتبط بالشكل الهندسي للمحطة بالنسبة لموقع المرسل. يُستخدم التمييع الهندسي للدقة في تبيان كيفية تأثير الأخطاء في بيانات القياسات على التقدير النهائي للموقع (يظهر ذلك بشكل بياني في القسم 5، الشكل 14). ويزداد التمييع الهندسي للدقة في شبكات TDOA مع تحرك موقع المرسل خارج المنطقة التي تحيط بها محطات المراقبة. وبناءً على ذلك، يتوقع أن تتناقص دقة نظام TDOA خارج شبكة أجهزة الاستشعار. ومع أن عملية المحاكاة تُظهر مساحة واسعة يمكن فيها إجراء قياسات تحديد الموقع الجغرافي، لكنها لا تُظهر تأثير التمييع الهندسي للدقة (GDOP) على الدقة المتوقعة.

الشـــكل 12

تصور مماثل للتصور الوارد في الشكل 11 باستثناء وضع المرسل على ارتفاع 10 m



ويمكن لقيم كسب المعالجة المحققة بواسطة الخوارزميات المتقدمة لأسلوب TDOA أن توفر إمكانات لتحديد موقع المرسل فوق منطقة أكبر من مدى كشف إشارات التردد الراديوي في المحطات الإفرادية.

5 مقارنة القياسات المحاكاة لتحديد الموقع الجغرافي لإشارات التردد الراديوي بالقياسات الفعلية

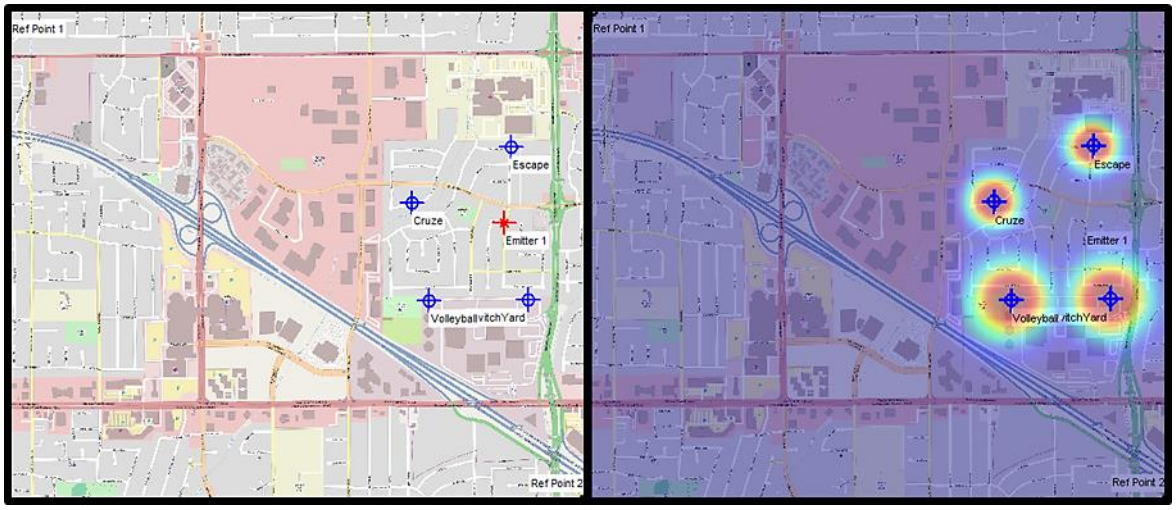
أجريت التجربة الوارد وصفها أدناه من أجل غرض محدد يتمثل في تحديد مواقع المرسلات المنخفضة القدرة التي هي من نفس طبيعة الهواتف المتنقلة. وعليه فقد بلغت المسافة الفاصلة بين محطات المراقبة أقل من 1 km. ومع أن هذا التصور قد لا ينطبق مباشرة على المهام التي يتسم بها تنظيم الطيف، بيد أنه يفيد كمثال جيد لمقارنة القياسات المحاكاة بالقياسات الميدانية الفعلية.

وأجريت التجربة في منطقة سانتا كلارا بكاليفورنيا، حيث تكون التضاريس عادة شبه حضرية مع وجود بعض المناطق الصناعية غير المكتظة المحيطة بها (مبانٍ للمكاتب مؤلفة من خمسة إلى ستة طوابق، ومستشفى، ومرائب للسيارات، ومرافق بيع بالتجزئة وما إلى ذلك). وقد استخدمنا في نموذج المحاكاة النموذج الخاص بالتضاريس "شبه الحضرية خارج خط البصر". وكانت محطتا "ملعب كرة الطائرة" و"تحويل الطاقة" مؤقتتين – لكنهما ثابتتان ومجهزتان بهوائيين أحدهما شامل الاتجاهات والثاني رقعي اتجاهي. وكان الهوائيان منصوبين على حاملين ثلاثيي القوائم بعلو 2,5 m ويعملان ببطاريات أيونات الليثيوم. أما محطتا "Escape" و"Cruze" فكانتا متنقلتين – أي موضوعتين على مركبتين مجهزتين بهوائيين مثبّتين مغنطيسياً وتعملان كلاهما بالبطاريات. وقد تم تحريك المرسل داخل المنطقة المحاطة بمحطات المراقبة.

ويُظهر الشكل 13 (إلى اليسار) ترتيب محطات المراقبة وموقعاً واحداً لمرسل الاختبار. والمرسل في هذه الأمثلة هو عبارة عن هاتف متنقل يرسل من إحدى المركبات وصلة صاعدة للنظام العالمي للاتصالات المتنقلة (UMTS) بقدرة 2 W على التردد 831 MHz (يبلغ عرض نطاق الإشارة حوالي 4,5 MHz). ويبين الشكل لجهة اليمين المدى المتوقع لكشف إشارات التردد الراديوي في محطات المراقبة. وكما يمكن ملاحظته، فإن المرسل يقع خارج مدى كشف إشارات التردد الراديوي لكل محطة بمفردها إذا افترضنا أن النموذج المعتمد للمناطق شبه الحضرية هو نموذج التضاريس الأرضية خارج خط البصر.

الشـــكل 13

تركيبة الاختبار المستعملة في تحديد موقع المرسل في سانتا كلارا
والمدى المتوقع لكشف إشارات التردد الراديوي



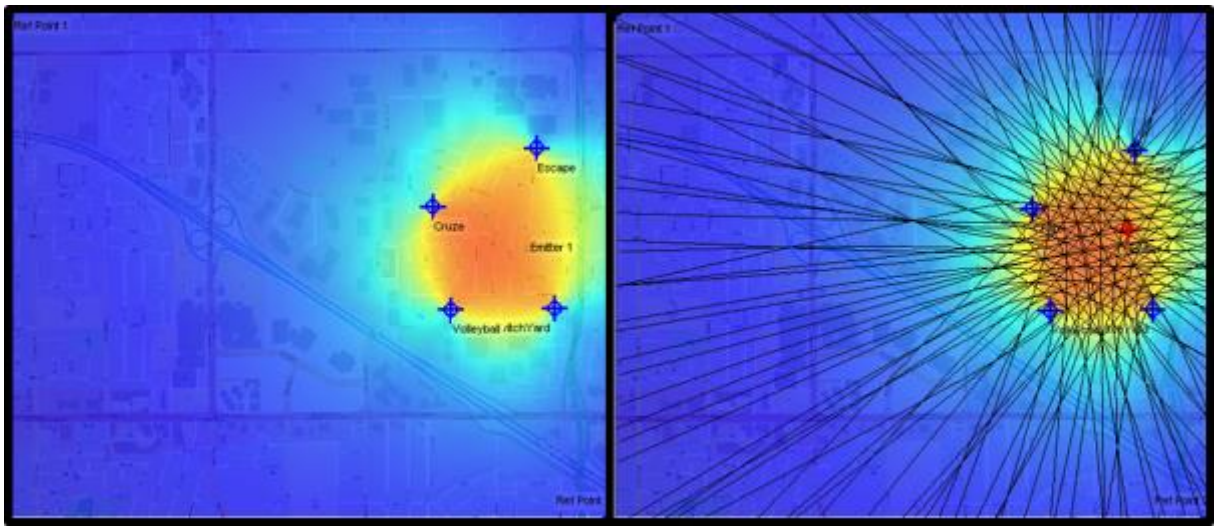
ويلاحظ أن مدى الكشف في محطتي المراقبة الواقعتين في أقصى الجنوب قد ازداد بسبب الزيادة الطفيفة في الارتفاع وتوجيه الهوائيات الاتجاهية نحو الشمال. وقد استخدمت أجهزة مودم خليوية لوصل جميع محطات المراقبة بمخدّم لتحديد الموقع الجغرافي موجود داخل مبنى إداري في سانتا كلارا ومزود بعنوان IP قابل للتسيير. وتم التحكم بشبكة أجهزة الاستشعار بواسطة حاسوب محمول مركّب في العربة التي تحمل المرسل.

ويظهر الشكل 14 (إلى اليسار) تمثيلاً تقديرياً للتمييع الهندسي للدقة (GDOP) في محطات المراقبة المنشورة هذه. ويلاحظ كيف أن القيمة المنخفضة (الجيدة) للتمييع الهندسي للدقة تمتد خارج حدود الشبكة في بعض الاتجاهات دون غيرها. ومن الناحية العملية، فإن قدرة شبكة TDOA على تحديد خط الموضع/اتجاه المرسل قد تمتد كثيراً خارج محيط محطات المراقبة[6]. ويبين الشكل لجهة اليمين الخطوط الزائدية المتوقعة ذات الفارق الزمني الثابت بين أزواج أجهزة الاستشعار. ومن المتوقع أن تتحسن دقة تحديد الموقع الجغرافي في المناطق التي ينخفض فيها التمييع الهندسي للدقة (المبينة باللون الأحمر) والتي تتقاطع عمودياً مع الخطوط الزائدية.

6 يكون "خط الموضع" الناتج عن مجموعة من عدة محطات TDOA مماثلاً لخط اتجاه زاوي واحد في أسلوب AOA من موقع واحد لزاوية الورود، لكنه لا يعطي نتيجة لتحديد الموقع الجغرافي. فهو يوفر فقط اتجاه المرسل (حين يكون المرسل خارج المنطقة المحاطة بمحطات TDOA).

الشـــكل 14

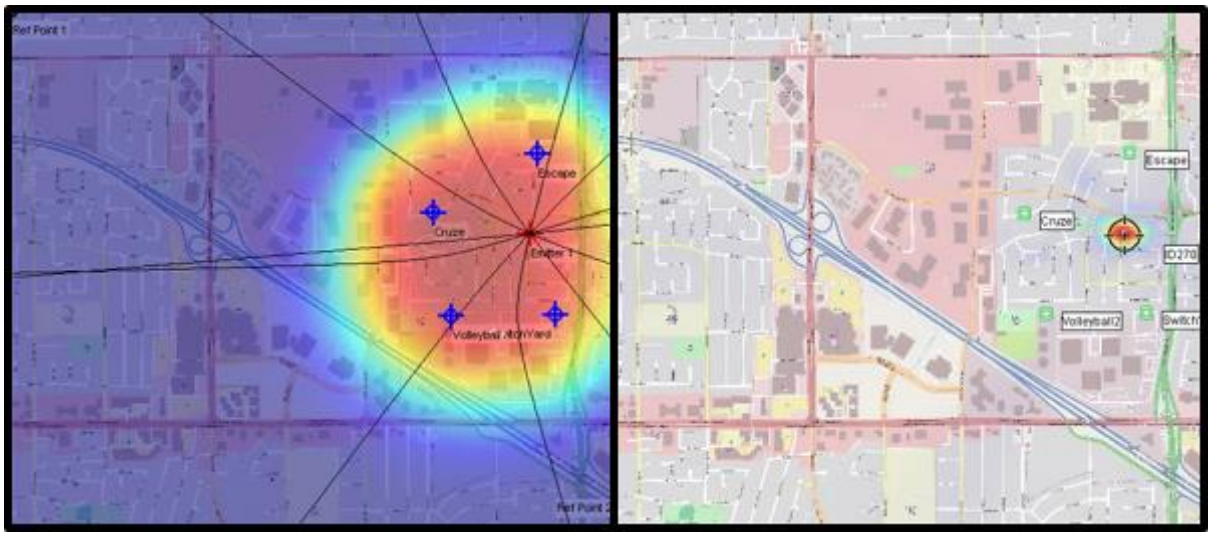
التمييع الهندسي للدقة (GDOP) في موقع سانتا كلارا وعرض الخطوط الزائدية في أسلوب TDOA



ويُظهر الشكل 15 (إلى اليسار) منطقة التغطية المتوقعة لتحديد الموقع الجغرافي (بافتراض وجود ارتباط بين عدد من أزواج أجهزة الاستشعار يصل إلى أربعة) والخطوط الزائدية التي تقود إلى موقع المرسل. ويُظهر الشكل لجهة اليمين قياساً فعلياً لموقع المرسل. وقد أجريت قياسات عدة في هذا الموقع بخطأ في أسلوب TDOA يقل عن 50 متراً.

الشـــكل 15

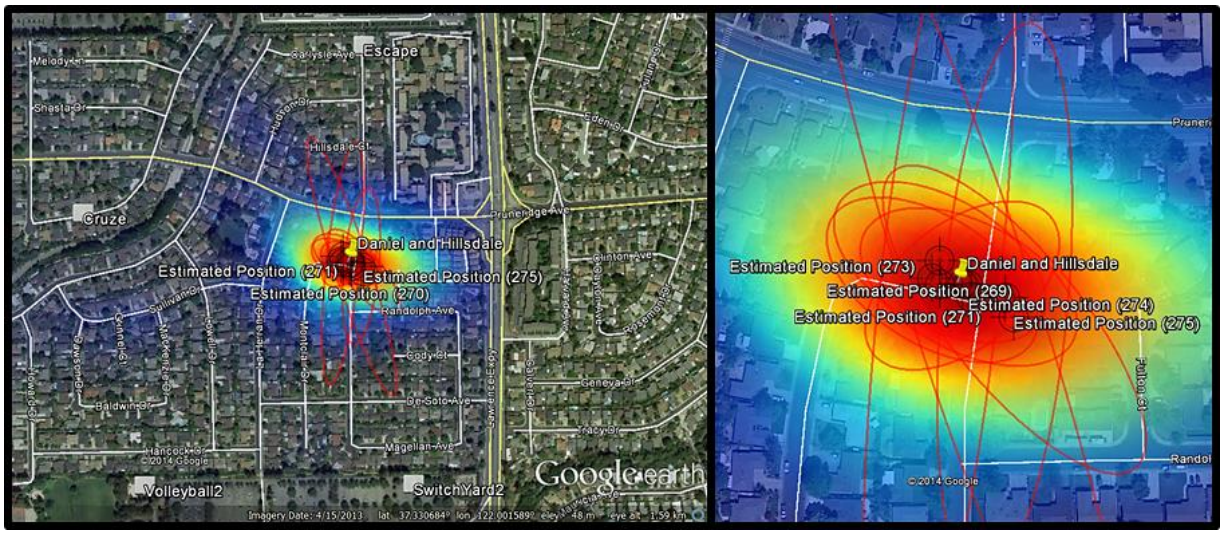
تقدير منطقة التغطية الهندسية والقياس الفعلي لموقع المرسل



ويعرض الشكل 16 العديد من نتائج تحديد الموقع الجغرافي المعروضة في موقع Google Earth ® مع الألوان المقترنة بأكثر النتائج أرجحية، واحتمال الخطأ الإهليليجي (EEP)، وتقدير موقع المرسل (EP). ويشير الدبوس الأصفر إلى الموقع الفعلي للمرسل.

الشـــكل 16

قياسات الموقع الجغرافي المعروضة في Google Earth وتظهر صورة مكبرة للمشهد إلى اليمين

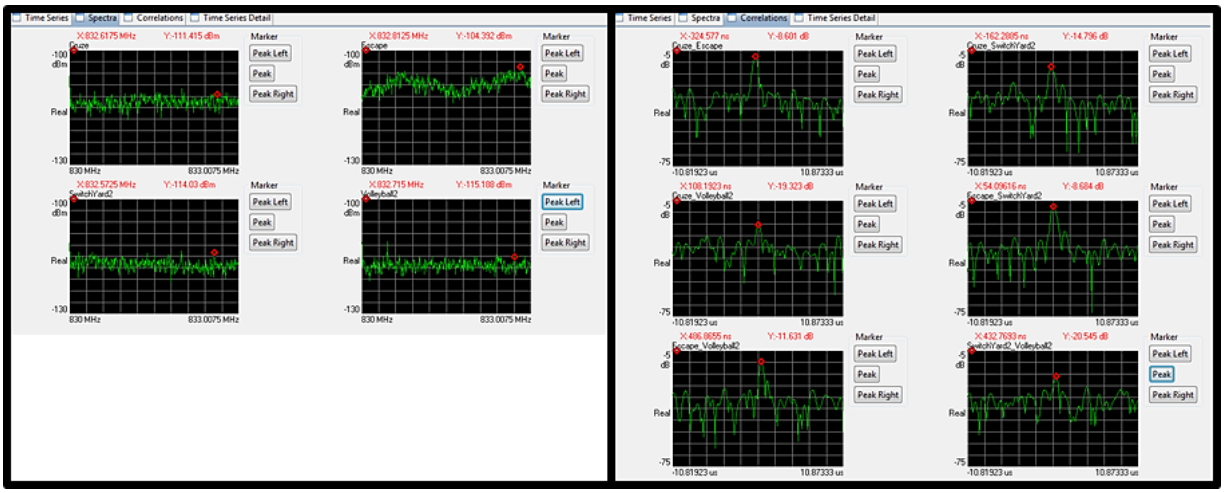


في هذه الحالة تتوافق عمليات المحاكاة مع القياسات.

ويُبين الشكل 17 (إلى اليسار) أن المرسل قد بلغ موقعاً واحداً للمراقبة بقيمة موجبة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء (escape). ومع ذلك، فإن أسلوب TDOA يتمتع بقدرة كبيرة على تحديد الموقع الجغرافي للمرسل كما تثبت ذلك الارتباطات التقاطعية الجيدة بين أزواج أجهزة الاستشعار كما هو مبين في الشكل 17 (إلى اليمين).

الشـــكل 17

المخططات الطيفية النمطية ومخططات الارتباط لجهاز النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (UMTS) في تجربة ميدانية جرت في عام 2013



تهدف عمليات المحاكاة والقياسات هذه إلى توضيح الاختلاف بين مدى كشف إشارات التردد الراديوي ومنطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي من جهة والأحوال التي تؤثر فيها من جهة ثانية. ويخضع مدى كشف إشارات التردد الراديوي لعوامل كثيرة مختلفة ويتأثر بخيارات التصميم والقيود المتعلقة بتحديد الموقع. ومع أن منطقة تغطية تحديد الموقع الجغرافي تتأثر بالقيود التي يفرضها مدى كشف إشارات التردد الراديوي، لكنها تتغير وفقاً لأسلوب تحديد الموقع الجغرافي (أي أسلوب زاوية الورود (AOA)، وأسلوب الفارق الزمني في الورود (TDOA)، وأسلوب قدرة الوصول (POA) وما إلى ذلك). وتعتبر هذه جميعها بمثابة أمور هامة ينبغي أخذها في الاعتبار لدى اختيار أسلوب تحديد الموقع الجغرافي وموقع محطة المراقبة.

6 الاستنتاجات

قد تكون شبكات TDOA أكثر فعالية في خدمة المدن الكبرى والمراكز الصناعية، حيث يمكن تركيب عدد كبير من أجهزة الاستشعار بما يمكّن من أتمتة عملية المراقبة، بما في ذلك وظيفة تحديد الموقع الجغرافي للمرسل.

بالمقابل، قد تحظى المدن الصغيرة نسبياً والضواحي المحيطة بها وكذلك المراكز الصناعية المعزولة بخدمة أكثر فعالية بواسطة عدد قليل من محطات تحديد الاتجاه أو المحطات الهجينة AOA/TDOA التي تفصلها عن بعضها مسافات كبيرة نسبياً. وفي هذه الحالة، يكون استخدام محطتين فقط فعّالاً لأداء مهمة تحديد الموقع الجغرافي للمرسلات.

ولا يمكن تحقيق كشف النشاط الكامل لإشارات التردد الراديوي فوق منطقة حضرية بأكملها بصورة واقعية باعتماد أيٍّ من التكنولوجيات الثابتة لتحديد الموقع الجغرافي أو للمراقبة. ويوجد لدى الجهات المنظّمة عادة أولويات فيما يتعلق بمراقبة أجزاء من الطيف في مناطق محددة وأثناء أوقات/أحداث محددة تتسم بالأهمية. ويعتبر القيام بنشر نظام يلبي غالبية الاحتياجات وبمرونة تمكنه من إعادة تحديد الموقع وإعادة التشكيل عند الاقتضاء أمراً جوهرياً في البيئة الحالية للطيف.

ومن شأن نشر النوع المناسب من محطات المراقبة استناداً إلى ظروف المنطقة أن يقلل إلى الحد الأدنى من عدد المحطات ويعمل في الوقت نفسه على زيادة التغطية والفعالية إلى حدها الأقصى. ففي المناطق الريفية المكشوفة مثلاً، التي لا توجد فيها هوائيات عاكسة كبيرة، تكون محطة AOA أو محطات AOA/TDOA (الهجينة) فعّالة جداً. أما في البيئات الحضرية المكتظة أو البيئات المختلطة المزدحمة، حيث تكون الهوائيات العاكسة متقاربة ومتراصة في أحياء المدن، قد يكون من الأجدى استخدام شبكة TDOA مع إمكانية استخدام أسلوب قدرة الوصول (POA) والخوارزميات الهجينة لتحديد الموقع الجغرافي.

الملحـــق 2

دراسة دقة تحديد الموقع الجغرافي ومنطقة التغطية في محطات المراقبة بالأسلوب الهجين AOA/TDOA

1 مقدمة

يتضمن هذا الملحق مقارنة دقة تحديد الموقع الجغرافي في محطات المراقبة الراديوية الهجينة AOA/TDOA بنظام AOA ونظام TDOA كل على حدة، وذلك استناداً إلى النتائج التي تم الحصول عليها في عملية محاكاة حاسوبية واقعية.

وتستخدم الدراسة عمليات محاكاة حاسوبية لنمذجة الدقة ومنطقة التغطية اللتين تم الحصول عليهما في محطات المراقبة الراديوية القادرة على تنفيذ تقنيات AOA/TDOA الهجينة. وقياساً بالمحطات القائمة على تقنيات زاوية الورود (AOA) وحدها أو تقنيات الفارق الزمني في الورود (TDOA) وحدها، تشير عمليات المحاكاة هذه إلى أن النظام الهجين AOA/TDOA قد يوفر تغطية لمنطقة أكبر باعتماد عدد أقل من المحطات، إلى جانب زيادة الدقة في تحديد الموقع الجغرافي داخل وخارج المنطقة المحاطة بمحطات المراقبة.

2 أساليب تحديد الموقع الجغرافي

تجمع المعالجة النمطية لتحديد الموقع الجغرافي بين قياسات من عدة مواقع للخروج بتقديرات لموقع المرسل. وتتحدد جودة تقدير الموقع بدلالة مسافة الخطأ (بالأمتار). ويُلاحظ أن القيم الصغيرة لمسافة الخطأ تدل على تقدير أفضل للموقع.

ومع تزايد كثافة المرسلات، تصبح إمكانات نظام مراقبة الطيف/تحديد الاتجاه من أجل تحديد الموقع الجغرافي للمُرسلات بشكل دقيق خاصية تتسم بالأهمية ولا سيما لدى معالجة مشكلات التداخل.

ويتوفر الكثير من الأساليب المختلفة لمعالجة تحديد الموقع الجغرافي. ويجري هنا بحث ثلاثة أساليب من بينها. يجمع الأسلوب الأول بين قياسات زاوية الورود من مواقع متعددة تستخدم صفائف هوائيات تحديد الاتجاه من أجل تحديد زاوية الورود. ويجمع الأسلوب الثاني بين قياسات الفارق الزمني في الورود من ثلاثة مواقع كحد أدنى (يلزم ثلاثة أزواج من قياسات الفارق الزمني في الورود لتحديد الموقع الجغرافي). ويجمع الأسلوب الثالث بين قياسات هجينة لكل من زاوية الورود والفارق الزمني في الورود من أجل معالجة تحديد الموقع الجغرافي (يلزم موقعان كحد أدنى: موقع قادر على قياس كلّ من زاوية الورود والفارق الزمني في الورود، وموقع آخر قادر على قياس الفارق الزمني في الورود). وتوخياً للتبسيط، يُشار إلى هذه الأساليب الثلاثة بوصفها أسلوب AOA، وأسلوب TDOA، والأسلوب الهجين AOA/TDOA.

تجدر الإشارة إلى أن موقع المراقبة الذي يستطيع قياس زاوية الورود يعرف بالموقع AOA، وموقع المراقبة الذي يستطيع قياس الفارق الزمني في الورود يعرف بالموقع TDOA، وموقع المراقبة الذي يستطيع قياس كل من زاوية الورود والفارق الزمني في الورود يُعرف بالموقع الهجين AOA/TDOA.

وترد في الجدول 1 أدناه الخصائص الرئيسية لأساليب تحديد الموقع الجغرافي الثلاثة.

(انظر التقرير ITU-R SM.2211 للحصول على نقاش مفصل لمزايا وتقييدات أنظمة TDOA).

خصائص نظام تحديد الموقع الجغرافي	نظام AOA فقط	نظام TDOA فقط	النظام الهجين AOA/TDOA
العدد الأدنى المطلوب لمواقع تحديد الموقع الجغرافي	محطتان	3 محطات	محطتان، نظام هجين AOA/TDOA. محطة واحدة يمكن أن تكون TDOA فقط
دقة تحديد الموقع الجغرافي	التناقص الخطي مع تزايد المسافة إلى محطة المراقبة	تكون ثابتة تقريباً بين مواقع TDOA تتردى بسرعة في المنطقة الموجودة خارج مواقع TDOA	نظام مماثل لنظام TDOA في المنطقة الواقعة بين لمواقع الهجينة نظام مماثل لنظام AOA في المنطقة الواقعة خارج المواقع
تتناقص الدقة مع تزايد المسافة إلى المرسل	نعم	فقط للمرسلات في المنطقة الموجودة خارج مواقع نظام TDOA	فقط للمرسلات البعيدة جداً عن المواقع الهجينة
مستقل عن أسلوب تشكيل الإشارة	نعم	لا يعمل نظام TDOA مقابل الإشارات غير المشكلة صعوبة بالنسبة للإشارات ضيقة النطاق	نعم، في حال وجود موقعين هجينين على الأقل
متطلبات اتصالات البيانات	منخفضة، 10-30 kbit/s	متوسطة إلى مرتفعة، 2-120 kbit/s Mbit/s	قد تكون منخفضة مثل نظام AOA في حالة استخدام نظام AOA وحده، أو أعلى من نظام TDOA بقليل في حالة استخدام نظام AOA وTDOA بصورة متزامنة
تقييدات تحديد الموقع (انظر القسم 3)	قد يكون من الصعب إقامة هوائيات أكبر، مما قد يحد من توفر المواقع	هوائي بسيط شامل الاتجاهات، إقامته أكثر سهولة	مماثل لنظام AOA بالنسبة للمواقع الهجينة
تعقيدات الهوائي	هوائي متعدد العناصر	هوائي وحيد العنصر	هوائي متعدد العناصر و/أو هوائي وحيد العنصر
متطلبات المعايرة	أحياناً (يعتمد على نظام AOA)[7]	لا	أحياناً (يعتمد على نظام AOA)

وكما يبين الجدول، يتسم كل أسلوب بعدد من المزايا والقيود. وفي تطبيق محدد، (حضري/شبه حضري، دائم/مؤقت، تضاريس منبسطة/تضاريس جبلية، ونحو ذلك)، فإن مقتضيات النشر هي التي تحدد التشكيلة المثلى.

3 محاكاة دقة تحديد الموقع الجغرافي باستخدام مثال محدد

أجريت في مدينة بيلو هوريزونتي في البرازيل وحواليها عملية محاكاة حاسوبية مفصّلة لدقة تحديد الموقع الجغرافي. وتمت محاكاة تشكيلات مختلفة من أنظمة مراقبة الطيف (SMS) بما في ذلك نظام AOA ونظام TDOA والنظام الهجين AOA/TDOA، وقورنت النتائج من حيث الأداء المتوقع لدقة تحديد الموقع الجغرافي.

[7] تقوم بعض أنظمة AOA بالمعايرة الذاتية ولا تتطلب المزيد من تعديلات المعايرة إلا عند حدوث تغييرات.

وقد نُفّذت عملية المحاكاة بواسطة أداة برمجية تجمع بين حساب تحديد الموقع الجغرافي وقدرة التقاط الإشارة المستهدفة في المحطات المختلفة قيد الدراسة، وذلك بالاستناد إلى قدرة المرسل وتأثيرات انتشار الإشارة باستخدام تضاريس أرضية ثلاثية الأبعاد. وتقتضي عملية المحاكاة وضع افتراضات محددة بشأن عدد المواقع وارتفاع هوائي الاستقبال وارتفاع هوائي الإرسال وغير ذلك من المعلمات كما هو وارد في الجدول 2.

الجـــدول 1

المعلمات المستخدمة في نتائج عملية المحاكاة الحاسوبية المعروضة

التردد المركزي:	MHz 450
عرض نطاق الإشارة:	kHz 25
قدرة خرج المرسل:	W 10 أو W 1 (قدرة مشعة فعّالة (e.r.p.)) (انظر النص)
ارتفاع هوائي المرسل:	m 10 (فوق تضاريس أرضية متوسطة)
ارتفاع هوائي المستقبل:	m 30 (فوق تضاريس أرضية متوسطة)
كسب هوائي المستقبل:	dB 0
معامل ضوضاء المستقبل:	dB 12
نسبة الإشارة إلى الضوضاء عند المستقبل:	dB 10+
العدد الأدنى للمحطات المستقبِلة عند نسبة محددة للإشارة إلى الضوضاء:	محطتان لنظام AOA والنظام الهجين، 3 محطات لنظام TDOA

ملاحظـــة – لقد استخدمت المعلمات نفسها لجميع تقنيات تحديد الموقع الجغرافي: تقنية AOA وتقنية TDOA والتقنية الهجينة، ما لم يذكر في الجدول خلاف ذلك.

وقد جرى تقييم دقة تحديد الموقع الجغرافي على أساس مسافة الخطأ.

4 أداة التحليل البرمجية المخصّصة

بالنسبة لهذا المثال، تتضمن الأداة البرمجية الكاملة عمليات المحاكاة التالية:

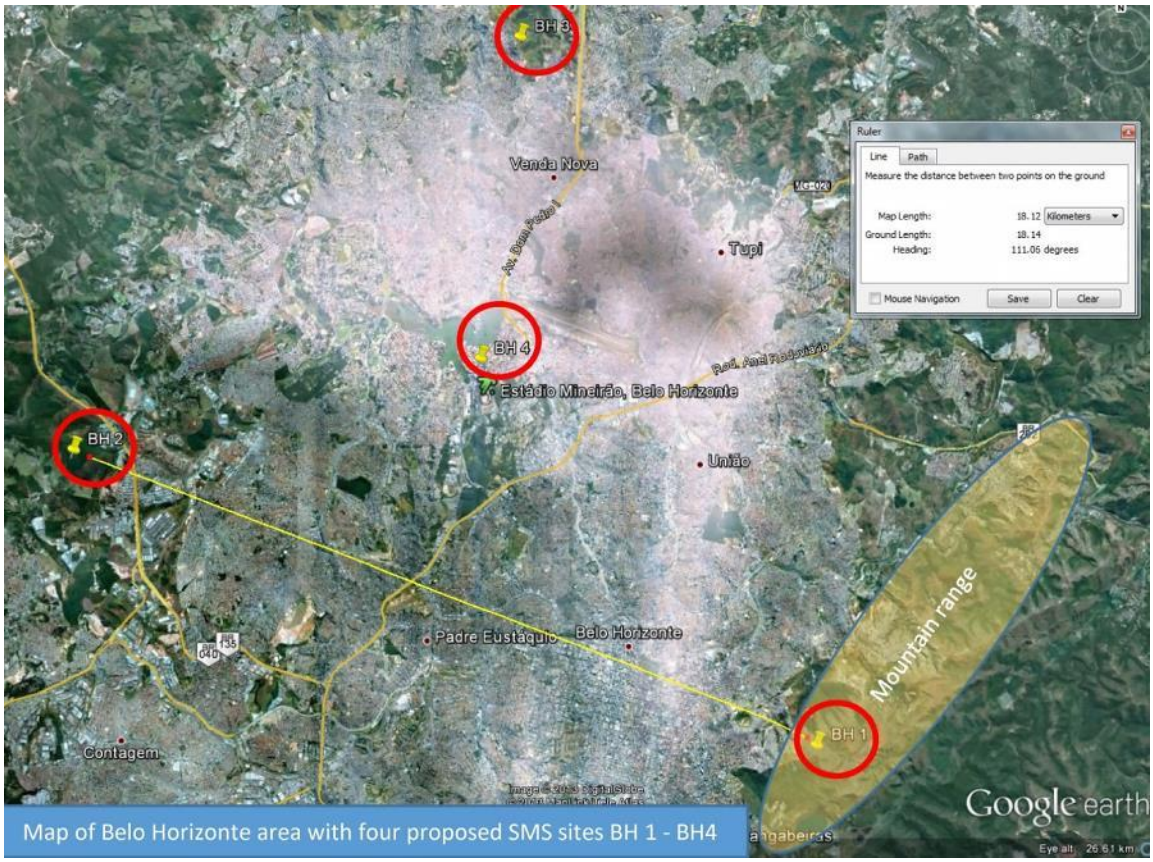
التغطية – يُظهر تحليل التغطية عدد المواقع التي يمكنها استقبال ('التقاط') مرسل يبث من موقع معين على مستويات مختلفة من القدرة.

دقة تحديد الموقع الجغرافي – يُظهر تحليل دقة تحديد الموقع الجغرافي بأسلوب AOA وأسلوب TDOA والأسلوب الهجين AOA/TDOA أداء مختلف لأساليب تحديد الموقع الجغرافي.

استمثال تشكيلة النظام – يُظهر هذا التحليل عدد المواقع اللازمة لمختلف لأساليب تحديد الموقع الجغرافي من أجل تحقيق دقة متشابهة في تحديد الموقع الجغرافي.

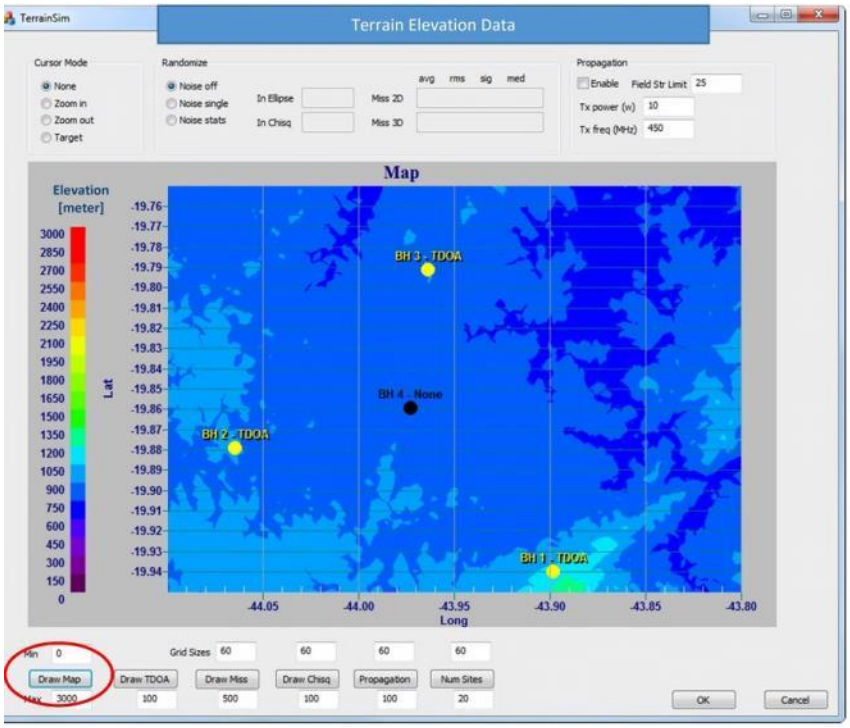
4(أ) مثال على تحديد الموقع الجغرافي

يُظهر الشكل أدناه أماكن المواقع الأربعة المختارة للتحليل في مدينة بيلو هوريزونتي وحواليها على موقع Google maps والمعرّفة بالرموز BH1 وBH2 وBH3 وBH4 وتبلغ المسافة الفاصلة بين المواقع حوالي km 18 وتكون التضاريس مسطحة نسبياً باستثناء سلسلة الجبال الواقعة قرب الموقع BH1.



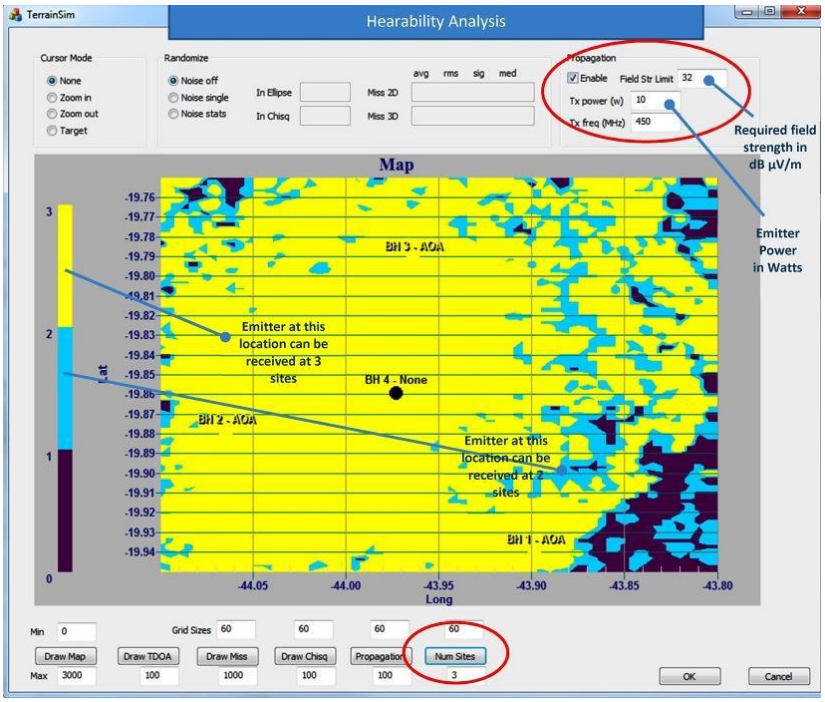
4(ب) مثال على بيانات ارتفاع التضاريس الأرضية

يمثل العرض المبين أدناه بيانات ارتفاع التضاريس الأرضية. كما يعرض أماكن المواقع الأربعة مع أسمائها ومقدرتها على تحديد الموقع الجغرافي. وفي هذا العرض نفسه، تتمتع جميع المواقع التي تم اختيارها بقدرات نظام TDOA. وتُستخدم بيانات التضاريس الأرضية في كل من حساب الانتشار وحساب تحديد الموقع الجغرافي.



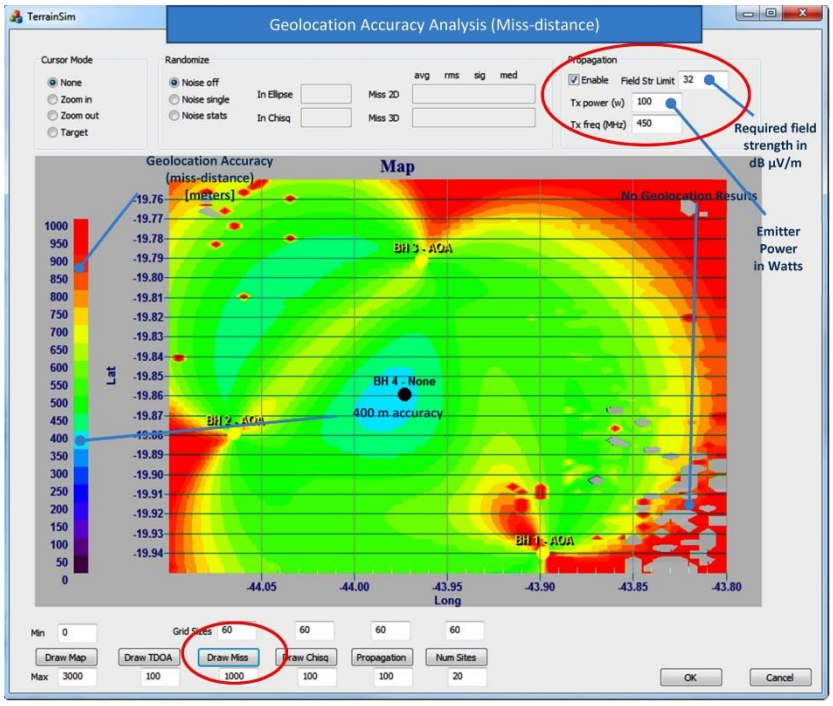
4(ج) مثال على تحليل إمكانية الالتقاط

يُظهر العرض التالي منحنيات إمكانية 'الالتقاط'. وتشير الرموز اللونية في العرض إلى عدد المحطات التي يمكنها استقبال إشارات المرسل عند شدة المجال المطلوبة. ويتضمن العرض تأثيرات كلّ من التغيرات في ارتفاع التضاريس الأرضية ومستوى قدرة المرسل. وفي هذا العرض، تتمتع جميع المواقع التي تم اختيارها بقدرات نظام AOA.



4(د) مثال على مخطط مسافة الخطأ

يُظهر العرض التالي منحنيات دقة تحديد الموقع الجغرافي بدلالة مسافة الخطأ (بالأمتار). ومرة أخرى، حُسبت مسافة الخطأ بالنسبة لشدة المجال المحددة المطلوبة. وفي هذه العينة، تتمتع جميع المواقع التي تم اختيارها بقدرات نظام AOA.

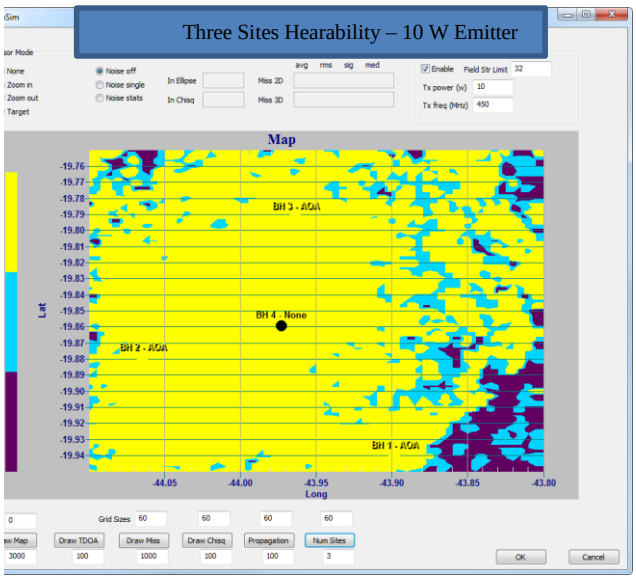


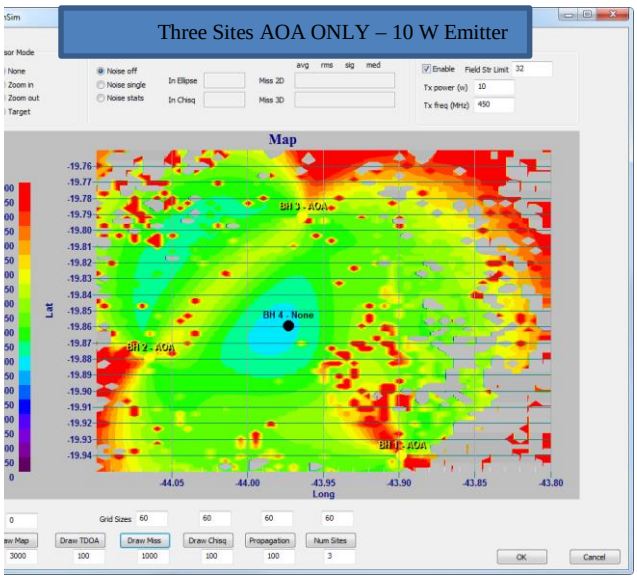
5 نتائج عمليات المحاكاة

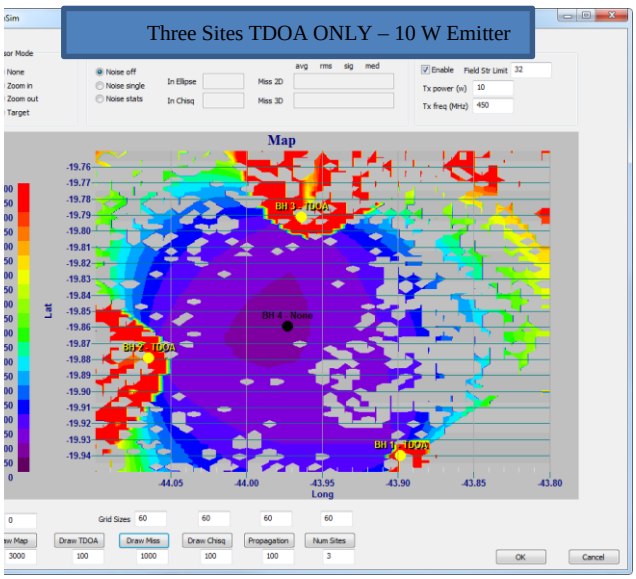
أجريت دراسة الحالة هذه في ظل مجموعة منوعة من الظروف مثل عدد المحطات المشاركة في شبكة مراقبة الطيف، وتفاوتت فيها قدرة المرسل بين 1 W و100 W في ظل أوضاع انتشار مختلفة وتقنيات مختلفة لتحديد الموقع الجغرافي. وتقدم الفقرات التالية ملخصاً للنتائج الرئيسية المستمدة من هذه الدراسة باستخدام سيناريوهين للقدرة بقيمة 10 W و1 W.

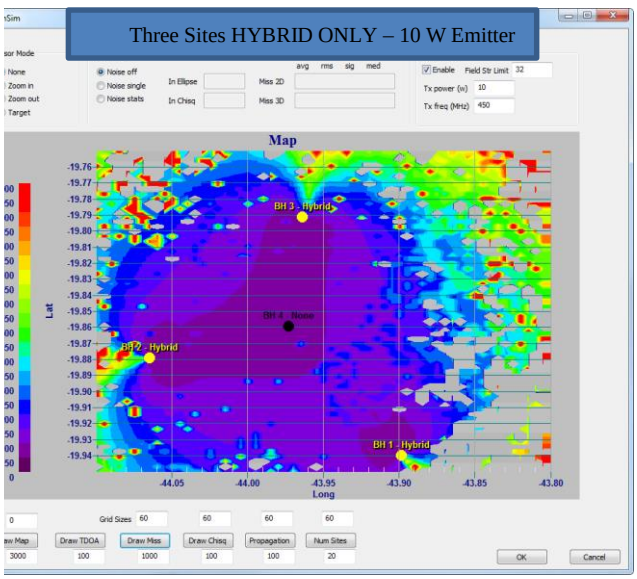
5(أ) شبكة من ثلاث محطات للمراقبة

تعرض الأشكال التالية مقارنة بين أنظمة تحديد الموقع الجغرافي AOA وTDOA والنظام الهجين AOA/TDOA في حالة مرسل تبلغ قدرته 10 W. ويظهر المخطط الأول إمكانية التقاط كل محطة من المحطات الثلاث لمرسل تبلغ قدرته 10 W ويقع فوق كامل المنطقة محط الاهتمام.









5(ب) ملخص نتائج المحاكاة (3 محطات)

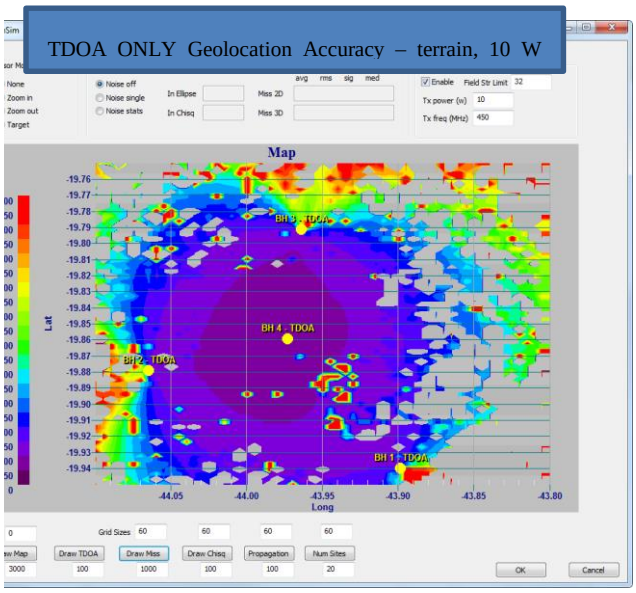
مع أن النظام المؤلف من ثلاث محطات AOA يغطي كامل المنطقة محط الاهتمام، إلا أن دقة تحديد الموقع الجغرافي تعتبر ضئيلة بالنسبة للمرسلات البعيدة. ومع ذلك يمكن لمحطات AOA أن تعطي خط الاتجاه الزاوي حتى ولو اعترضت المرسل محطة واحدة فقط.

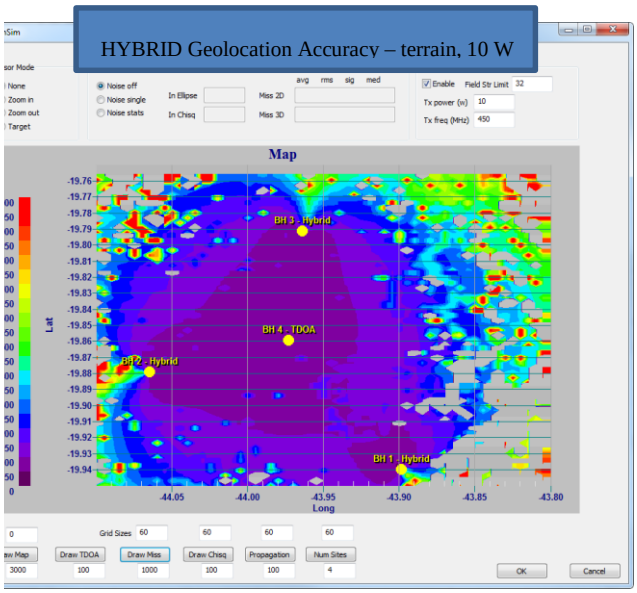
ويعطي النظام المؤلف من ثلاث محطات TDOA دقة جيدة في المنطقة المحاطة بالمحطات. ومع ذلك، وكما هو متوقع، فإن دقة تحديد الموقع الجغرافي تتردى خارج هذه المنطقة. وتشتمل عملية المحاكاة هذه على ثغرات كبيرة (مناطق رمادية) لا يتوقع الحصول فيها على نتيجة لتحديد الموقع الجغرافي، وذلك لأن تغطية تحديد الموقع الجغرافي بأسلوب TDOA تعتمد جزئياً على الشكل الهندسي للموقع فضلاً عن المسافة الفاصلة بين المواقع. وتتناقص تغطية المرسلات التي لا تزيد قدرتها على 1 W كما هو متوقع إذا ما تم استخدام ثلاث محطات TDOA فقط على هذه المسافة الفاصلة (18 km) أو إذا لم يكن المرسل قريباً بشكل كافٍ من محطة واحدة على الأقل. وتقتضي عملية المحاكاة هذه وجود ثلاثة مواقع كحد أدنى تكون نسبة الإشارة إلى الضوضاء فيها موجبة. ولا يوجد مبرر لأي إمكانية للارتباط داخل عتبة الضوضاء (يمكن للأسلوبين AOA وTDOA كليهما أن يسفرا عن نتيجة باستخدام تقنيات الارتباط على أن يكون لإحدى المحطات فقط قيمة موجبة لنسبة الإشارة إلى الضوضاء).

وبالنسبة لهذا المثال، من المتوقع أن يتسم نظام هجين يستخدم كلا من زاوية الورود والفارق الزمني في الورود بدقة أفضل في تحديد الموقع الجغرافي فوق منطقة تغطية أكبر.

5(ج) شبكة من أربع محطات للمراقبة

تعرض الأشكال التالية مقارنة بين نتائج تحديد الموقع الجغرافي لأنظمة تقوم على محطات TDOA ومحطات هجينة AOA/TDOA، وذلك في حالة مرسل تبلغ قدرته 10 W.





5(د) ملخص نتائج المحاكاة (4 محطات)

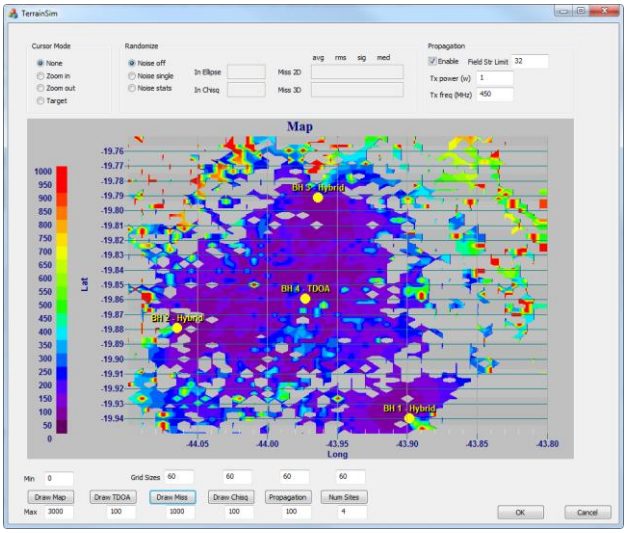
تتوافق النتائج التي تعطيها شبكة مؤلفة من أربع محطات مع النتائج التي تم الحصول عليها في شبكة مؤلفة من ثلاث محطات، مع تحسن في نتائج التغطية. فاستخدام محطات TDOA وحدها يوفر دقة جيدة في المنطقة المحاطة بأربع محطات، علماً بأن دقة تحديد الموقع الجغرافي تتردى خارج هذه المنطقة. وهناك أيضاً بعض الثغرات (مناطق رمادية) التي لا تتوفر فيها أي نتيجة من نتائج تحديد الموقع الجغرافي. وباستخدام أربع محطات TDOA، تتناقص تغطية المرسلات التي لا تزيد قدرتها على 1 W (للأسباب نفسها التي ذكرت في حالة المحطات الثلاث).

وكما ورد في مثال الشبكة المكونة من ثلاث محطات، تبين هذه المحاكاة أن النظام الهجين الذي يستخدم كلاً من تقنيات AOA وTDOA قد يوفر دقة أفضل في تحديد الموقع الجغرافي فوق منطقة تغطية أكبر.

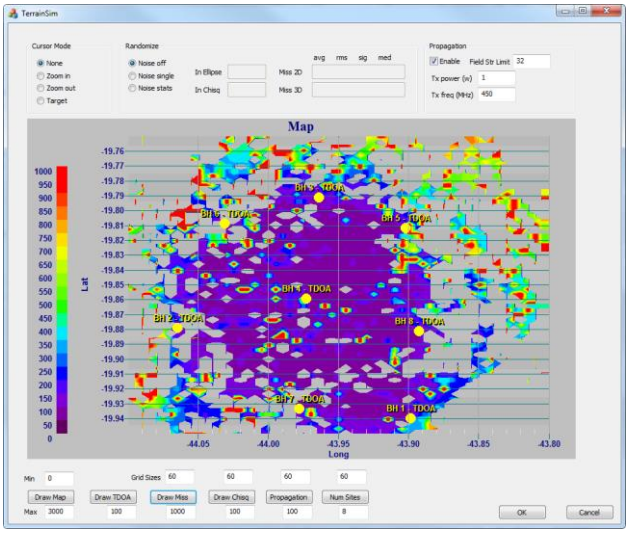
5(هـ) مقارنة عدد المحطات في الشبكة

تبين المناقشة التي وردت في الفقرات السابقة أن منطقة التغطية في نظام هجين يستخدم التقنيتين AOA وTDOA كليهما يمكن أن تكون أكبر من منطقة التغطية التي يوفرها عدد مساو من محطات TDOA وحدها. ومن أجل تحديد حجم المنافع الناجمة عن تنفيذ نظام هجين AOA/TDOA، تم وضع نموذج مؤلف من عدد من محطات TDOA وحدها اللازم لتوفير تغطية مكافئة لتغطية شبكة مؤلفة من ثلاث محطات هجينة AOA/TDOA إضافة إلى محطة TDOA واحدة، وذلك في حالة مرسل تبلغ قدرته 1 W.

وقد تمت في الأشكال التالية محاكاة أربع محطات هجينة TDOA/AOA إلى اليسار، وثماني محطات TDOA وحدها إلى اليمين.



Four Sites HYBRID (3xHYBRID + 1xTDOA)



Four Sites HYBRID (3xHYBRID + 1xTDOA)

واستناداً إلى عملية المحاكاة الحاسوبية هذه، يتوقع أن يكون عدد المحطات التي يتطلبه الحل الذي يقدمه الأسلوب الهجين AOA/TDOA لتحديد الموقع الجغرافي أقل بقليل من العدد الذي يتطلبه الحل بتقنية TDOA وحدها لتحقيق نفس التغطية ونفس الدقة أو تغطية أفضل ودقة أفضل. وعلى أساس هذه الافتراضات الواردة في عملية المحاكاة هذه، يمكن لنظام هجين يستخدم كلا التقنيتين AOA وTDOA أن ينطوي على قدر أقل من تكاليف التركيب والتكاليف المتكررة. ونظراً لاختلاف كل وضع عن الآخر، لا بد من أجل تحديد الترتيب الأمثل لتطبيق معين من النظر بتمعن في متطلبات التغطية، والتضاريس الأرضية، والقيود المتعلقة بالموقع وغير ذلك من العوامل التي وردت في الجدول في الجدول 1.

6 الاستنتاج

استناداً إلى عمليات المحاكاة الحاسوبية، يمكن للحل الذي يقدمه الأسلوب الهجين AOA/TDOA لتحديد الموقع الجغرافي أن يوفر مزايا عدة بالمقارنة مع المزايا التي يوفرها النظامين TDOA وAOA. وفي المثال المقدم، يوفر الحل الذي يجمع بين الأسلوبين AOA/TDOA تغطية أفضل بعدد أقل من مواقع المراقبة.