



Отчет МСЭ-R SM.2211-2
(06/2018)

**Сравнение методов определения
географического местоположения
источника сигнала, основанных
на разнице во времени прихода
и угле прихода сигнала**

Серия SM
Управление использованием спектра

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Отчетов МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REP/en>.)

Серия	Название
VO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра

Примечание. – Настоящий Отчет МСЭ-R утвержден на английском языке Исследовательской комиссией в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2018 г.

© ITU 2018

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

ОТЧЕТ МСЭ-R SM.2211-2

Сравнение методов определения географического местоположения источника сигнала, основанных на разнице во времени прихода и угле прихода сигнала

(2011-2014-2018)

Содержание

	<i>Стр.</i>
1 Введение.....	1
2 Обзор технологии TDOA.....	2
3 Сильные и слабые стороны метода TDOA по сравнению с традиционным методом AOA	2
4 Гибридные системы	8
5 Резюме.....	8
6 Справочные документы.....	8
Приложение 1. Факторы, влияющие на дальность обнаружения РЧ-сигнала и зону охвата определением географического местоположения применительно к станциям контроля.....	9
Приложение 2. Проведенное методом моделирования исследование точности определения географического положения и зоны его охвата для гибридных станций контроля AOA/TDOA	23
Приложение 3. Практическое исследование использования системы TDOA вместе с существующей системой AOA.....	31

1 Введение

В настоящем Отчете сравниваются сильные и слабые стороны методов определения географического местоположения источника сигнала, основанных на разнице во времени прихода (TDOA) и угле прихода (AOA) сигнала. Несмотря на то, что основное внимание в настоящем отчете уделяется методу TDOA, следует отметить, что существуют и другие методы определения географического местоположения¹. В методе AOA определяется угол прихода волны в пункт измерения. Методы AOA широко используются во многих радиопеленгационных приложениях. Они обладают рядом преимуществ, однако имеются и некоторые недостатки, связанные, например, с требованиями к антенне. В отличие от этого, в методах TDOA вычисляется разность во времени прихода волны во много пунктов измерения и на основе сравнения временных и волновых характеристик определяется пункт расположения источника. Методы TDOA не получили широкого применения при осуществлении контроля за использованием спектра, однако они приобретают все большее значение в связи с появлением недорогих компактных вычислительных ресурсов и усовершенствованных технологий радиоприема, доступностью каналов передачи данных, а также наличием точных распределяемых сигналов хронирования. В этом документе представлен краткий обзор технологии TDOA, а также некоторые сильные и слабые стороны метода TDOA по сравнению с более традиционными методами AOA.

¹ В методе, основанном на мощности приходящего сигнала (POA), для вычисления пункта расположения источника используется измеренное во многих пунктах измерения отношение мощности сигнала. Метод POA нередко используется для определения географического местоположения внутри помещения. В методе, основанном на разности частоты прихода (FDOA), для вычисления пункта расположения источника используется доплеровский сдвиг частот движущегося источника (и/или многих приемников). Метод FDOA нередко используется в сочетании с методом TDOA в приложениях воздушного базирования.

2 Обзор технологии TDOA

В этом методе измеряется время прихода РЧ-сигнала в несколько точек пространства, и для каждого приемника сравнивается разность во времени прихода. Традиционный подход к оценке TDOA заключается в вычислении взаимной корреляции одного сигнала, поступающего в два приемника. Оценка TDOA является задержкой, которая соответствует максимуму функции взаимной корреляции. Зная местоположение каждого приемника, можно найти оценку местоположения источника излучения при условии, что все приемники синхронизированы по времени. В качестве дополнения к линии пеленга (LoB), используемой в системе AOA, служит линия постоянной разницы во времени прихода, называемая изохроной или линией положения (LoP). Более подробно методы TDOA рассматриваются в главе 4.7.3.2 Справочника МСЭ по контролю за использованием спектра, издание 2011 года.

Методы TDOA используются в некоторых применениях оборонного значения для выполнения радиолокационных задач. С недавнего времени они стали использоваться в некоторых особых применениях, таких как определение местоположения мобильных сотовых телефонов для экстренного реагирования (в пожарной службе, скорой медицинской помощи и т. д.). В прошлом главным препятствием на пути более масштабного применения в гражданских целях являлась требуемая временная синхронизация с точностью до наносекунды. Поскольку электромагнитное излучение распространяется со скоростью приблизительно 30 см/нс, любое существенное дрожание фазы при хронировании приемников непосредственно приводит к уменьшению точности определения местоположения. В настоящее время с появлением систем спутниковой навигации (GPS, Galileo и ГЛОНАСС) в нашем распоряжении оказались доступные и недорогие средства обеспечения временной синхронизации. В результате этого сегодня несколько поставщиков в разных странах мира предлагают системы, основанные на методе TDOA.

3 Сильные и слабые стороны метода TDOA по сравнению с традиционным методом AOA

Для лучшего понимания TDOA дадим краткий сравнительный обзор сильных и слабых сторон этого метода по сравнению с методом AOA. Следует отметить, что методы TDOA и AOA являются взаимодополняющими методами определения географического местоположения. Системы определения географического местоположения, в которых используются оба метода, могут превосходить по эффективности любые системы, в которых используется только один из этих методов [1]. Кроме того, наличие дополняющего и уточняющего метода определения географического местоположения может иметь важнейшее значение в части мер по обеспечению исполнения обязательств в области использования спектра.

Для упрощения описания предположим, что в системе TDOA используется обнаружение, основанное на взаимной корреляции сигнала, и что измерительные приемники ретранслируют записанные сигналы на центральный сервер, осуществляющий обработку методом TDOA. В большинстве применений для контроля за использованием спектра этот метод является предпочтительным с точки зрения степени эффективности и гибкости определения местоположения. В целях дальнейшего упрощения сравним систему TDOA с системой AOA на основе корреляционного интерферометра (CI). Корреляционная интерферометрия – это метод AOA, повсеместно распространенный в современных системах контроля за использованием радиочастот. Корреляционный интерферометр представлен и рассмотрен в главе 4.7.2.2.5 Справочника по контролю за использованием спектра, издание 2011 года.

(ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Ссылки на "главу" в таблицах 3-1 и 3-2 означают главу Справочника МСЭ по контролю за использованием спектра, издание 2011 года. Цифры в квадратных скобках, указанные в этих таблицах, означают справочные документы, которые перечислены в п. б.)

ТАБЛИЦА 3-1

Сильные стороны метода TDOA

Более простые требования к антенне	<p>Антенна является дешевой, несложной и может иметь небольшой размер.</p> <p>Приемники TDOA могут использовать одну простую антенну (например, несимметричный или симметричный вибратор). В отличие от систем AOA антенна не требует высоких механических допусков и точности электрических параметров, а также эксплуатационных испытаний и калибровочных измерений. Дополнительным преимуществом является то, что можно изготовить малозаметную антенну небольшого размера. Данная возможность имеет большое значение при развертывании систем контроля в исторических местах, или на площадках, имеющих архитектурные ограничения, или при согласовании условий размещения со сторонними организациями.</p>
Более простые требования к выбору места и калибровке	<p>Требования к выбору места являются менее жесткими, чем для AOA, и калибровка практически не требуется.</p> <p>За счет этого обеспечивается большая гибкость при выборе места расположения системы TDOA. В результате этого развертывание оборудования TDOA осуществляется быстрее. При развертывании в городских условиях можно установить дополнительные приемники TDOA, для того чтобы преодолеть влияние затенения от высоких строений.</p> <p>В отличие от этого, места расположения системы AOA должны выбираться таким образом, чтобы свести к минимуму искажение фронта волны, обусловленное вторичными излученными локальными препятствиями, отражениями от земли и изменением проводимости почвы. Некоторые антенные решетки системы AOA должны быть калиброваны после установки на площадке, для того чтобы свести к минимуму результирующие ошибки, зависящие от частоты и направления. Калибровка антенной решетки является одной из наиболее важных проблем, ограничивающих степень эффективности AOA [2]. Проблемы выбора места расположения системы AOA подробно рассматриваются в главах 4.7.2.3.1.2 и 2.6.1.3.</p>
Широкополосные сигналы, сигналы с низким ОСШ, а также сигналы малой длительности	<p>Метод TDOA эффективно работает с новыми и появляющимися сигналами, характеризующимися сложными методами модуляции, широкой полосой и малой длительностью.</p> <p>Метод AOA, как правило, эффективно работает с узкополосными сигналами, однако усовершенствованные методы AOA могут применяться для определения местоположения любых сигналов, в том числе широкополосных, сложных и коротких.</p> <p>Степень эффективности TDOA сильно зависит от ширины полосы сигнала. Степень эффективности AOA, в приближении, не зависит от ширины полосы сигнала, при условии, что разнос каналов, подвергающихся быстрому преобразованию Фурье (БПФ), равен ширине полосы сигнала. С увеличением ширины полосы сигнала степень эффективности TDOA, как правило, возрастает.</p> <p>Оба метода, TDOA и AOA, эффективнее работают с сигналами, имеющими более высокие ОСШ, и при большем времени интегрирования. Выигрыш за счет корреляционной обработки позволяет с помощью методов TDOA обнаруживать и определять местоположение сигналов с низким (и даже отрицательным) ОСШ. Кроме того, выигрыш за счет корреляционной обработки позволяет задействовать при определении географического местоположения дополнительные приемники TDOA, несмотря на то что у них может быть очень низкое или отрицательное ОСШ. При использовании базовых методов AOA невозможно обнаружить и определить местоположение сигналов с отрицательными ОСШ, и могут возникнуть проблемы при определении местоположения сигналов с низким ОСШ. Эти сигналы могут обрабатываться с помощью усовершенствованных методов AOA, например корреляционных методов AOA с повышенной разрешающей способностью или со вспомогательными данными (опорная радиопеленгация).</p> <p>Несмотря на то что в базовом методе AOA отсутствует выигрыш от обработки за счет корреляции сигнала, он обладает некоторым системным выигрышем, обусловленным использованием многих элементов антенны и каналов приема.</p> <p>Определение географического местоположения источников сигналов малой длительности требует координированной работы приемников, синхронизированных по времени до доли величины, обратно пропорциональной ширине полосы сигнала. Обеспечение такой возможности является непременным условием работы систем TDOA. Кроме того, методом TDOA можно определить географическое местоположение на основе измерений очень малой длительности, проводимых в отношении сигналов большей длительности. Если элементы антенны AOA коммутированы, то необходимое время интегрирования будет меньше.</p>

ТАБЛИЦА 3-1 (продолжение)

Сложность системы	<p>Приемник и антенна системы TDOA являются более простыми, чем типовая антенная решетка и двух- или многоканальный приемник системы AOA.</p> <p>Приемнику системы TDOA требуется как минимум один РЧ-канал в реальном времени для обработки без задержки и с максимальной вероятностью перехвата сигнала⁽¹⁾. Благодаря этому в условиях простой радиосреды может потребоваться менее сложный приемник. При использовании одного приемника в условиях сложной радиосреды могут потребоваться усовершенствованные методы обработки TDOA. Доступны эффективные методы временной синхронизации (GPS) и интерфейсы передачи данных.</p>
Подавление некоррелированных шумов и помех	<p>С помощью корреляционной обработки, используемой в TDOA, можно подавлять сигналы на совпадающей частоте, совпадающий по времени шум и сигналы помех, которые некоррелированы между площадками. Это свойство позволяет системе определять географическое местоположение источников сигналов с низкими отношениями сигнала к помехе и шуму (низкое отношение SINR).</p> <p>Скоординированные во времени измерения осуществляются всеми приемниками. Сигналы, которые не являются общими для двух или более приемников, исключаются. При усовершенствованной обработке система TDOA может определить местоположение, используя корреляции только с лучшим результатом наблюдения излучаемого сигнала. Соответствующее применение методов взаимной корреляции при анализе помех рассматривается в главе 4.8.5.5.</p> <p>Усовершенствованные системы AOA могут ослаблять влияние некоррелированных и совпадающих по времени помех на совпадающей частоте путем использования корреляции с опорными сигналами. Другие усовершенствованные методы обработки, например MUSIC могут быть устойчивыми к некоррелированным шумам и помехам. Однако такие методы требуют дорогостоящих вычислений и не получили широкого применения при осуществлении контроля за использованием спектра.</p>
Определение географического местоположения внутри помещения, на стадионе или на территории учебного заведения	<p>Усовершенствованные методы обработки TDOA могут использоваться для определения географического местоположения источников широкополосных сигналов, расположенных внутри и вне помещения, на коротком расстоянии (со стороны менее 100 м) и в условиях повышенной многолучевости [4].</p> <p>В таких условиях системы AOA, как правило, не слишком эффективны. Проблему точной временной синхронизации внутри помещения можно преодолеть с помощью коммутаторов Ethernet, совместимых с протоколом IEEE-1588, и приемников TDOA. Следует отметить, что еще один возможный метод определения местоположения на основе (POA), как правило, превосходит метод TDOA в условиях повышенной многолучевости и короткого расстояния, в особенности для узкополосных сигналов.</p>
Ослабление влияния когерентных помех на совпадающей частоте (многолучевости) при определенных условиях	<p>Степень эффективности обоих методов, AOA и TDOA, снижается в условиях многолучевости, которая называется также когерентными помехами на совпадающей частоте. Воздействие на каждый метод различается в зависимости от положения датчика по отношению к многолучевым отражениям.</p> <p>При достаточной ширине полосы сигнала метод TDOA менее чувствителен к искажению фронта волны за счет локальных препятствий (локальной многолучевости). Методу TDOA может потребоваться усовершенствованная обработка сигнала для устранения неопределенностей при определении местоположения, вызванных удаленными препятствиями (дистанционная многолучевость). С помощью усовершенствованной обработки можно дополнительно отфильтровать корреляционные пары, используемые при определении местоположения методом TDOA, и улучшить результаты, получаемые в условиях повышенной многолучевости.</p> <p>При усовершенствованной обработке методом TDOA можно исключить временные задержки при многолучевом распространении между площадками [5], что обеспечивает высокую эффективность в условиях густонаселенных городских районов⁽²⁾.</p>

ТАБЛИЦА 3-1 (окончание)

<p>Соображения относительно конфигурации</p>	<p>Оба метода, TDOA и AOA, обеспечивают наибольшую точность, если источник сигнала расположен в центре периметра, образованного площадками.</p> <p>Точность определения географического местоположения методом TDOA определяется геометрическим показателем снижения точности (GDOP), качеством временной синхронизации и качеством оценки TDOA. Неопределенность местоположения непосредственно не связана с базовым расстоянием между приемниками TDOA [6]. При определенных условиях данное свойство может являться преимуществом.</p> <p>В отличие от этого точность методов AOA напрямую зависит от расстояния между источником и каждым приемником AOA. В методе AOA неопределенность положения является функцией от неопределенности угла пеленга и расстояния от приемника до оцениваемого положения. Если источник находится далеко за пределами периметра, метод TDOA аппроксимирует линию положения, аналогичную линии пеленга при AOA. В этой ситуации неопределенность местоположения и пеленга увеличивается с расстоянием одинаково в обоих методах.</p>
<p>Высокая степень пригодности к использованию в сетях РЧ-датчиков</p>	<p>В обоих методах, TDOA и AOA, увеличение числа приемников ведет к улучшению результатов вследствие выигрыша от близости и усовершенствованных статистических данных.</p> <p>Метод TDOA хорошо подходит для развертывания многих приемников, поскольку они являются менее сложными, имеют меньший размер и энергопотребление, у них более простая антенна, и к местам их развертывания предъявляются менее жесткие требования. При высокой плотности удаленных станций контроля, названных выше РЧ-датчиками, приемник контроля оказывается ближе расположенным к интересующему нас сигналу. Результирующее снижение потерь на трассе, которое иногда называют "выигрышем от близости", улучшает степень эффективности обнаружения и определения географического местоположения [7]. Кроме того, выигрыш от корреляционной обработки в методе TDOA позволяет задействовать при определении географического местоположения дополнительные датчики, несмотря на то что у них может быть очень низкое или отрицательное ОСШ.</p>
<p>Возможность анализа в полностью автономном режиме на центральном сервере</p>	<p>В системах TDOA могут храниться и регистрироваться скоординированные во времени измерения сигналов от всех приемников, поэтому на центральном сервере можно осуществлять анализ в полностью автономном режиме. Сюда входит спектральный анализ сигнала каждого приемника, кросскорреляционные измерения и определение географического местоположения.</p> <p>В системах AOA на центральном сервере также могут храниться и регистрироваться некоторые измерения сигналов (например, результаты пеленгации и точность пеленгации). Эти измерения скоординированы во времени до той степени временной синхронизации, которая достижима в системе AOA. Такие измерения, как результаты спектрального анализа и взаимной корреляции, не являются типовыми, поскольку для них требуется такая же скорость передачи данных по соединительным линиям, как и в TDOA.</p>

(1) В типовых корреляционных системах интерферометрии используется временное разделение (TDM) для уменьшения числа необходимых приемников. Этим системам требуется два-три приемника, подключенных к пяти, семи или более антеннам. Эти системы являются менее сложными, чем полностью параллельные системы радиопеленгации, однако для определения местоположения им необходима большая минимальная длительность сигнала.

(2) Согласно имеющимся сведениям, с помощью TDOA определялось местоположение узкополосных (30 кГц) сигналов сотовых телефонов AMPS в условиях густонаселенных городских районов со среднеквадратической ошибкой около сотни метров (5).

ТАБЛИЦА 3-2

Слабые стороны метода TDOA

<p>Узкополосные сигналы</p>	<p>С использованием методов TDOA может оказаться трудным или невозможным определить источник медленно изменяющихся сигналов, которые включают немодулированные несущие (CW) и узкополосные сигналы.</p> <p>Степень эффективности TDOA сильно зависит от ширины полосы сигнала и ухудшается по мере ее уменьшения. Кроме того, для узкополосных сигналов многолучевость теоретически представляет собой большую проблему, в случае если временные характеристики сигнала широко связаны с разбросом задержки. В этих условиях труднее выделить искажение формы импульса, возникающее из-за многолучевости, что приводит к дополнительной ошибке в оценке разницы во времени. Минимальная ширина полосы сигнала, необходимая для обеспечения приемлемой эффективности, различается в зависимости от применения. Например, согласно имеющимся сведениям, с помощью TDOA определялось местоположение узкополосных (30 кГц) сигналов сотовых телефонов AMPS в условиях густонаселенных городских районов со среднеквадратической ошибкой около сотни метров [5]. Более высокое ОСШ и большее время наблюдения может улучшить определение местоположения источников некоторых узкополосных сигналов методом TDOA.</p> <p>Системы АОА эффективно работают с узкополосными и немодулированными сигналами, а также широкополосными сигналами.</p>
<p>Нет возможности допосиска и центрирования при помощи одной станции</p>	<p>Для методов допосиска и центрирования требуется как минимум две станции TDOA, из которых хотя бы одна является мобильной, а также канал передачи данных⁽¹⁾.</p> <p>В АОА определение географического местоположения методами допосиска и центрирования возможно при использовании лишь одной переносной станции. Это обеспечивает возможность определения местоположения в условиях, когда использование сетевых приемников TDOA нецелесообразно или экономически неэффективно. Эти методы описаны в главе 4.7.3.3.</p>
<p>Более высокоскоростные каналы передачи данных</p>	<p>Системам TDOA, передающим записанные сигналы от приемников центральному серверу, требуются высокоскоростные каналы передачи данных. Сетевые потребности приемника являются несимметричными: ширина полосы для загрузки данных превышает ширину полосы для загрузки данных. Поток передаваемых данных можно сократить за счет усовершенствованной обработки, включающей сжатие сигнала. Системы TDOA, в которых время прихода сигнала (TOA) устанавливается в приемнике, предъявляют более скромные требования к скорости передачи данных. Более подробно требования к каналу передачи данных рассматриваются в главе 4.7.3.2.4 "Соображения в отношении сети".</p> <p>Системам АОА требуются более низкие скорости передачи данных, поскольку на центральную станцию передаются только некоторые характеристики сигнала, такие как пеленг, частота и время.</p>
<p>Чувствительность к источникам декорреляции сигнала</p>	<p>В системе TDOA должно самым тщательным образом ослабляться влияние всех потенциальных источников декорреляции сигнала между приемниками. Сюда входят относительные сдвиги опорных частот приемников и относительные сдвиги частот сигнала (доплеровский сдвиг), вызванные движением источников или местной средой. Максимальное время когерентного интегрирования будет ограничиваться не только длительностью сигнала, но и стабильностью опорного генератора приемника, а также динамическими характеристиками беспроводной связи.</p> <p>Высококачественные системы TDOA включают контуры слежения для обеспечения частотной и временной когерентности. Большое значение для компенсации эффектов декорреляции источников, испытывающих доплеровский сдвиг, имеет автоматическая коррекция доплеровского сдвига.</p> <p>Базовые системы АОА и некоторые усовершенствованные системы АОА (использующие метод MUSIC) нечувствительны к декорреляции сигнала между площадками. Усовершенствованные системы АОА, в которых используется корреляция с опорными сигналами, чувствительны к декорреляции сигнала.</p>

ТАБЛИЦА 3-2 (окончание)

Более точная временная синхронизация	<p>Метод TDOA требует высококачественной временной синхронизации по отношению к величине, обратно пропорциональной ширине полосы рассматриваемого сигнала. Современные технологии (например, GPS) позволяют обеспечить временную синхронизацию приемника TDOA с точностью, превышающей 20 нс.</p> <p>Системы AOA менее требовательны к временной синхронизации приемников, точность которой может составлять несколько секунд. На практике некоторые представляющие интерес сигналы, например сигналы малой длительности или сигналы со скачкообразной перестройкой частоты требуют более высоких уровней синхронизации станций AOA.</p>
Сигналы, содержащие повторяющиеся элементы	<p>Несмотря на малую вероятность, при некоторых условиях алгоритмы TDOA могут приводить к неверным решениям в отношении сигналов, содержащих повторяющиеся элементы. К примерам таких сигналов относятся повторяющиеся последовательности данных или синхроимпульсы. Эта проблема, а также пути ее уменьшения подробно рассматриваются в главе 4.7.3.2.3 "Факторы, влияющие на точность".</p> <p>В связи с тем, что в системах AOA не осуществляется взаимная корреляция сигнала, они не подвержены этой проблеме.</p>
Скорость вычисления при определении географического местоположения	<p>Записанные сигналы, как правило, передаются на сервер определения местоположения для проведения вычислений. В связи с этим к пропускной способности сети и скорости передачи предъявляются высокие требования. Низкоскоростной канал может существенно замедлить время вычисления при определении географического местоположения.</p> <p>Типовые скорости определения географического местоположения могут составлять порядка не более 1 фиксации в секунду методом TDOA (наилучший случай) по сравнению со 100 фиксациями в секунду методом AOA. Использование более высокоскоростных каналов передачи данных может улучшить скорость определения географического местоположения методом TDOA. Использование более короткого времени наблюдения и/или усовершенствованных методов сжатия также может снизить требуемую ширину полосы для передачи данных. После того как результаты измерений переданы на центральный сервер, пересчет географических местоположений методом TDOA осуществляется существенно быстрее, поскольку он выполняется на основе сохраненных локальных данных.</p>
Малая пригодность для одновременного определения географического местоположения многих источников излучения	<p>Некоторые системы AOA поддерживают одновременное определение географического местоположения источников многих сигналов, разнесенных по частоте. Такая функция часто называется широкополосной радиопеленгацией. Теоретически она возможна в методе TDOA, но практически не доступна, главным образом, в связи с гораздо более высокими требованиями к скорости передачи данных.</p> <p>Скорость передачи данных в TDOA может быть снижена в случае обеспечения вспомогательных данных путем синхронизации сигнала (установления TOA) в каждом приемнике.</p>
Нет возможности определения местоположения из одной точки (SSL)	<p>Для построения LoP требуется минимум два датчика, для определения географического местоположения в двумерном пространстве необходимо как минимум три датчика, а для определения географического местоположения в трехмерном пространстве необходимо как минимум четыре датчика.</p> <p>Метод AOA может использоваться при определении местоположения из одной точки.</p>
Соображения относительно конфигурации	<p>Оба метода, TDOA и AOA, обеспечивают наибольшую точность (наилучший показатель GDOP), если источник сигнала расположен внутри периметра, ограничивающего группу взаимодействующих датчиков и/или станций радиопеленгации (РП).</p> <p>Непосредственно за пределами этого периметра точность и эффективность определения местоположения убывает быстрее в методе TDOA, чем в методе AOA (см. Приложение 1 и [8]).</p> <p>Если источник находится далеко за пределами этого периметра, метод TDOA может аппроксимировать линию положения, аналогичную линии пеленга при AOA (см. Приложение 1 и [8]). Метод AOA обеспечивает определение местоположения (то есть указывает пересечение двух линий пеленга) в пределах территорий, где перекрываются зоны охвата двух станций РП.</p> <p>Информацию о дальности обнаружения РЧ-сигнала и зоне охвата сетей TDOA и AOA для определения географического местоположения см. в Приложении 1.</p>
Автономный анализ с помощью измерений от одной станции	<p>В методе AOA анализ линии пеленга может осуществляться автономно с использованием результатов измерений, полученных лишь из одной точки. Автономный анализ линии положения в TDOA невозможен при наличии измерений только из одной точки.</p>

⁽¹⁾ Для допоиска и центрирования при помощи лишь одной переносной станции могут использоваться подходы на основе POA.

4 Гибридные системы

Технологию TDOA можно объединить с одной или несколькими дополнительными технологиями определения географического местоположения и создать систему, которую можно назвать гибридной. Технологии TDOA и AOA можно объединить в рамках одной или нескольких станций и получить гибридные системы AOA/TDOA. Технологию TDOA можно также объединить с другими технологиями определения географического местоположения, например, методом амплитудного коэффициента POA и получить гибридную систему TDOA/POA.

Гибридные системы AOA/TDOA состоят минимум из двух площадок, из которых не менее чем в одном месте есть возможность измерения как AOA, так и TDOA, а на остальных площадках есть возможность измерения TDOA. Два датчика TDOA создают одну гиперболическую линию, представляющую значения разности времени, как это описано в главе 4.7.3.2 Справочника МСЭ по контролю за использованием спектра, издание 2011 года. Система AOA создает LoB. Пересечение линии пеленга и гиперболической линии TDOA определяет местоположение источника сигнала. Более подробно эти системы обсуждаются в Приложении 2 и Приложении 3.

5 Резюме

Технология TDOA является дополнительной технологией определения географического местоположения, которая не получила широкого применения при осуществлении контроля за использованием спектра. Использование TDOA становится все более целесообразным в связи с появлением недорогих компактных вычислительных ресурсов, усовершенствованных технологий радиоприема, повсеместной доступностью каналов передачи данных, а также наличием точных распределяемых сигналов временной синхронизации. Он обладает определенными сильными сторонами по сравнению с методом AOA, в частности при обнаружении и определении географического местоположения источников современных широкополосных сигналов. Характеризуется более простыми требованиями к антенне, способностью обрабатывать сигнал, распространяющийся на короткое расстояние в условиях многолучевости в городской среде, а также доступностью развертывания сетей недорогих датчиков. Этот метод обладает также слабыми сторонами по сравнению с методом AOA, в особенности при определении местоположения источников узкополосных и немодулированных сигналов. Как правило, он предъявляет более высокие требования к соединительным линиям для передачи данных. При его использовании необходимо как минимум два приемника для получения информации о линии положения и не менее трех приемников для определения местоположения в двумерном пространстве. Для современных методов контроля за сигналами характерна работа со все более широкополосными сигналами и все более низкими уровнями спектральной плотности мощности. Использование дополнительных методов определения географического местоположения, таких как TDOA, способно улучшить вероятность обнаружения и определения географического местоположения источников современных сигналов во многих средах. Гибридные системы AOA/TDOA способны компенсировать некоторые слабые стороны каждого метода по отдельности и при этом реализовать преимущества каждого из них. Мобильные станции TDOA эффективны только в случае гибридного использования со станциями AOA.

6 Справочные документы

- [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.
- [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] В. А. КОЗЬМИН, А. П. ПАВЛЮК, А. Б. ТОКАРЕВ. Сравнение угломерного и разностно-дальномерного методов местоопределения по критерию охвата территории при радиоконтроле. – Электросвязь, № 2, 2014 (перевод на английский язык представлен на веб-сайте <http://www.ircos.ru/en/articles.html>).

Приложение 1

Факторы, влияющие на дальность обнаружения РЧ-сигнала и зону охвата определением географического местоположения применительно к станциям контроля

1 Введение

Существует ряд аспектов развертывания станций контроля, которые влияют на их дальность обнаружения РЧ-сигнала и зону охвата определением географического местоположения. На общую эффективность любой станции контроля, независимо от рабочих характеристик, будут оказывать воздействие ограничения или преимущества, обусловленные выбором оборудования, установкой и площадкой.

Представляется, что при развертывании в реальных условиях системы контроля за использованием спектра (СКС) будут включать станции АОА и станции TDOA, развернутые вместе на фиксированных и мобильных платформах. Выбор технологии определения географического местоположения, используемой в месте осуществления контроля, связан с рядом аспектов и, как правило, основан на следующем:

- доступ к электроэнергии и сети на площадке;
- доступность энергии сигнала – как полезного, так и нежелательного. Во многих городских районах возникает необходимость в том, чтобы места осуществления контроля располагались поблизости от беспроводных служб или промышленного электрооборудования;
- рельеф местности и прямая видимость контролируемой зоны;
- плотность источников излучения и характер спектральной нагрузки;
- важность пользовательской базы в контролируемой зоне (то есть важнейшая инфраструктура или правительственные объекты и т. д.);
- продолжительность проведения операций контроля. Некоторые предназначенные для контроля изделия рассчитаны на краткосрочные операции контроля (менее 12 часов) благодаря малым размерам, работе от батареи и простоте установки и свертывания;
- факторы установки на площадке, включая размер оборудования, доступность и потребление электроэнергии, соединение с сетью, аренда площадки, калибровка и техническое обслуживание оборудования.

Кроме того, СКС могут включать более старую и более новую технологию (например, расширение существующей станции за счет более нового оборудования), а также условия и функции существующего оборудования контроля. Нецелесообразно выбирать одну технологию для учета всех возможных сценариев. Каждой технологии определения географического местоположения присущи аспекты, которые оправдывают себя на практике в определенных случаях, но не во всех.

В настоящем Отчете для иллюстрации воздействия, которое выбор конструкции и характеристики источников излучения оказывают на дальность обнаружения РЧ-сигнала и зону охвата определением географического местоположения, использованы расчеты по модели с конкретным набором условий. Приведенные ниже расчеты основаны на стандартных моделях распространения, используемых

в отрасли, которые разработаны в период 2004–2007 годов². В них не учитываются реальные трехмерные данные о рельефе местности, и поэтому охват РЧ-сигнала моделируется равномерно от каждого места осуществления контроля. Это позволяет проследить различные воздействия ширины полосы и мощности источника излучения, а также высоты антенны в идеальных условиях. В расчетах по модели применяется программное средство, которое обычно используется, чтобы понять, сколько ориентировочно станций контроля потребуется для охвата требуемой зоны.

2 Общие соображения

Важно в первую очередь определить дальность обнаружения радиочастотного (РЧ) сигнала и зону охвата определением географического местоположения:

- дальность обнаружения РЧ-сигнала определяется как самое дальнее расстояние (в км) от станции контроля, на котором можно обнаружить источник излучения при положительном ОСШ. Дальность обнаружения может быть разной в разных направлениях в зависимости от рельефа, свойств зданий и других факторов;
- зона охвата определением географического местоположения определяется как географическая зона, в пределах которой местоположение источника излучения может быть достаточно точно определено с помощью доступных методов (то есть АОА, TDOA, гибридный метод, POA).

Важно отметить разницу между дальностью обнаружения РЧ-сигнала, которой требуется положительное ОСШ на входе станции контроля, и зоной охвата определением географического местоположения, которой не требуется положительное ОСШ на входе каждой станции контроля. Методы определения географического местоположения TDOA, в которых коррелируются сигналы, полученные на разных площадках, позволяют определять местоположение источников с уровнями сигнала ниже минимального уровня шума. Мощность шума, принимаемого в местах расположения станций, не коррелируется. Более подробная информация об использовании методов определения географического местоположения TDOA представлена в пп. 4.7.3.2.2 и 4.7.3.2.3 Справочника МСЭ по контролю за использованием спектра.

Анализ зоны охвата определением географического местоположения для групп фиксированных станций РП АОА и датчиков TDOA можно провести путем рассмотрения сетей контроля АОА и TDOA, состоящих не более чем из трех взаимодействующих станций, поскольку они формируют области, в которых происходит перекрытие зон охвата трех и двух станций, а также зон, охватываемых только одной станцией.

Рассмотрим зону охвата определением географического местоположения для трех фиксированных датчиков, обозначенных на рисунке 1 как S1–S3, и трех фиксированных станций РП, обозначенных на рисунке 2 как DF1–DF3, которые имеют одну и ту же конфигурацию, но работают в сетях TDOA и АОА, соответственно. Пусть сети также оснащены мобильными станциями контроля, обозначенными на рисунках 1 и 2 как MS, с оборудованием той же самой технологии, что и фиксированные датчики и станции РП. Индивидуальная дальность обнаружения РЧ-сигнала каждой фиксированной станции условно обозначена на рисунках 1 и 2 контурами различных цветов. Желтым цветом указана общая для всех фиксированных станций зона обнаружения РЧ-сигнала, в пределах которой источник излучения (именуемый в дальнейшем "передатчиком") имеет положительное ОСШ. В связи с тем, что в датчиках TDOA используется синхронная взаимная корреляция, соответствующая зона охвата определением географического местоположения сети датчиков S1–S3 на рис. 1 больше, чем зона станций РП DF1–DF3 на рис. 2.

Необходимо отметить, что дальность обнаружения РЧ-сигнала и зоны охвата определением географического местоположения на обоих рисунках построены чисто условно, исходя из некоего испытательного передатчика, имеющего определенную мощность и высоту антенны. При изменении этих параметров контуры зон охвата неизбежно изменятся в той или иной степени. Более подробное описание приводится в п. 3.

Для сети TDOA координаты передатчика определяются по области пересечения трех линий положения, как показано на рисунке 1 применительно к передатчику T1, где пересекаются линии положения 1-2, 3-1 и 3-2. Для сети АОА определение географического местоположения с помощью только фиксированных станций РП осуществляется всеми тремя станциями РП, как показано на рисунке 2 (линии пеленгов 1–3 эффективно определяют местоположение передатчика T1). Сеть АОА также эффективна в зонах, охваченных только двумя станциями РП, как показано на том же рисунке по отношению к передатчику T2 (линии пеленгов 4 и 5).

² Эти модели разработаны в рамках консорциума Wireless World Initiative New Radio (Новый радиointерфейс для всемирной инициативы в области беспроводной связи, WINNER I и II) при координации со стороны Nokia Siemens Networks.

РИСУНОК 1

Зона охвата определением географического местоположения в сети TDOA

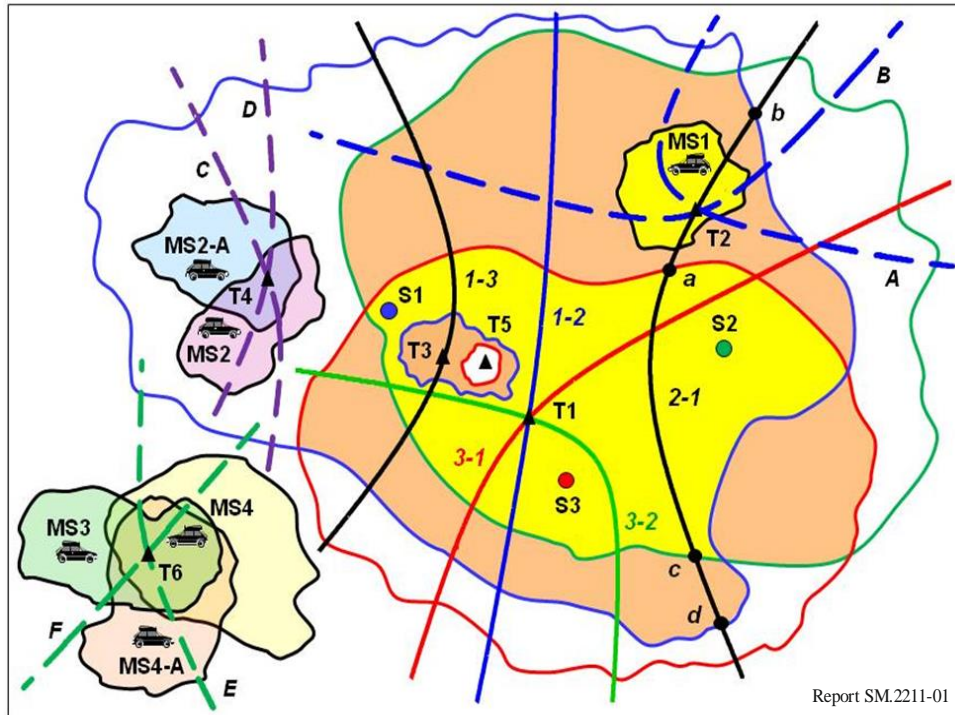
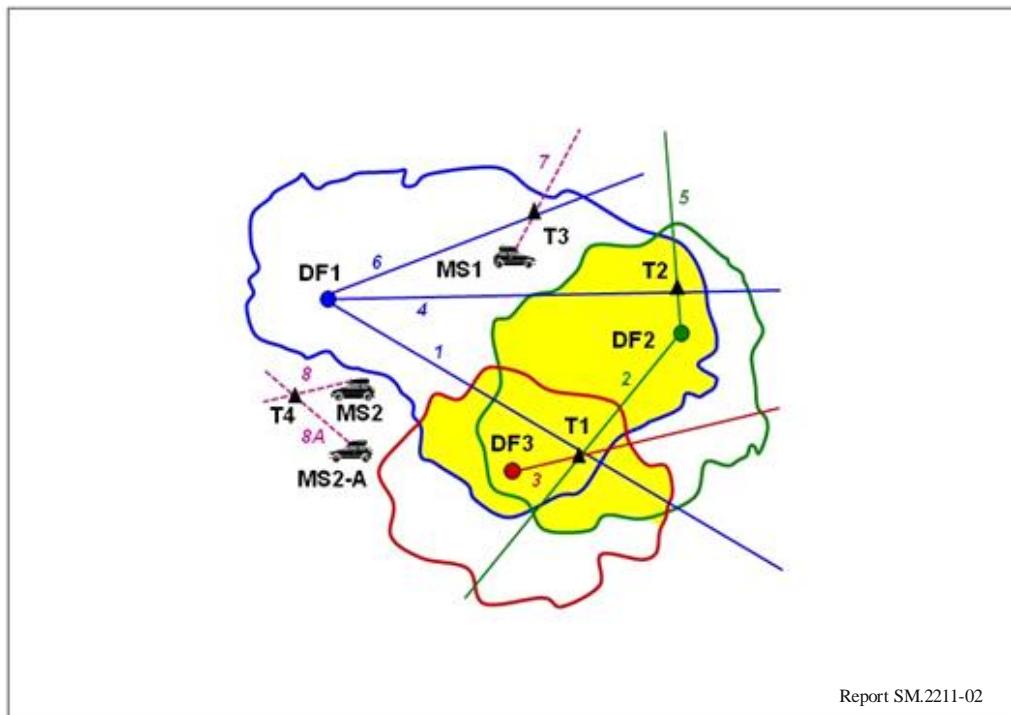


РИСУНОК 2

Зона охвата определением географического местоположения в сети AOA



Если в сети TDOA искомый передатчик расположен в одной из зон за пределами дальности действия датчика (обозначено коричневым цветом на рис. 1), система может воспроизводить только одну LoP, как это показано линией 2-1 по отношению к передатчику T2, или линию пеленга к передатчику. Поэтому определение координат передатчика в данном случае должно осуществляться с помощью

мобильной станции (MS1 на рисунке 1), которая взаимодействует с двумя фиксированными датчиками. Это показано на рисунке 1 пересечением линии положения 2-1 с двумя другими линиями, обеспечиваемыми этой мобильной станцией (линии положения А и В на рисунке 1, представленные пунктирами, чтобы подчеркнуть их изменчивость в процессе перемещения станции).

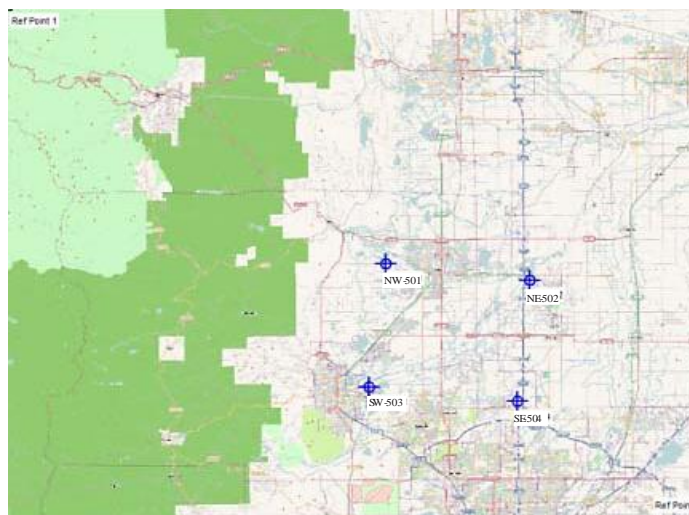
Искомый передатчик должен находиться в пределах дальности обнаружения РЧ-сигнала одной из станций TDOA, если он ведет прерывистую передачу (таким образом, требуется измерение в ждущем режиме). Если передатчик ведет непрерывную передачу, то для получения оценки местоположения может и не требоваться, чтобы он находился в пределах дальности обнаружения РЧ-сигнала какого-либо из датчиков TDOA, а требуется, чтобы он находился в пределах зоны охвата определением географического местоположения. Точное местоположение можно определить с помощью мобильных станций, однако в некоторых случаях это может занять значительное время. Мобильные станции нередко имеют ограниченную дальность обнаружения РЧ-сигнала из-за малой высоты антенн. Вместе с тем существуют методы подъема антенны мобильной станции с использованием общедоступных структур, таких как гаражи или рельеф местности.

Другие случаи охвата с использованием TDOA и AOA, вытекающие из рисунках 1 и 2, а также примеры взаимодействия между фиксированными и мобильными станциями обсуждаются в [8].

3 Моделирование факторов, влияющих на дальность обнаружения РЧ-сигнала, на станциях контроля TDOA и AOA

РИСУНОК 3

Область моделирования в Боулдере, штат Колорадо



Report SM.2211-03

Для приведенных в этом разделе примеров использован регион в штате Колорадо, США, как показано на рисунке 3. Четыре станции (NW-501, NE-502, SW-503 и SE-504) расположены на расстоянии примерно 18 км. В этих расчетах по модели будет показана дальность обнаружения РЧ-сигнала применительно к традиционными станциям AOA и TDOA, работающим по отдельности. Для целей этого моделирования дальность обнаружения определяется как самое дальнее расстояние (в км) от станции контроля, на котором можно обнаружить источник излучения при положительном ОСШ.

В расчетах по модели вероятность обнаружения показана цветом: красный – высокая вероятность, синий – низкая вероятность. Данный раздел посвящен факторам, который могут воздействовать на дальность обнаружения РЧ-сигнала. Некоторые из этих факторов находятся под контролем оператора, а именно:

- высота и коэффициент усиления антенны станции контроля;
- тип и длина РЧ фидерной линии, обработка сигнала, например, затухание, фильтрация и т. д.;
- шумовая обстановка (РЧ-шум) рядом со станцией;

– физическое окружение (в том числе близлежащий рельеф).

И наоборот, некоторые факторы не имеют отношения к станции контроля, а сильно зависят от характеристик источника излучения:

- несущая частота;
- выходная мощность;
- ширина полосы сигнала;
- высота подъема антенны источника излучения.

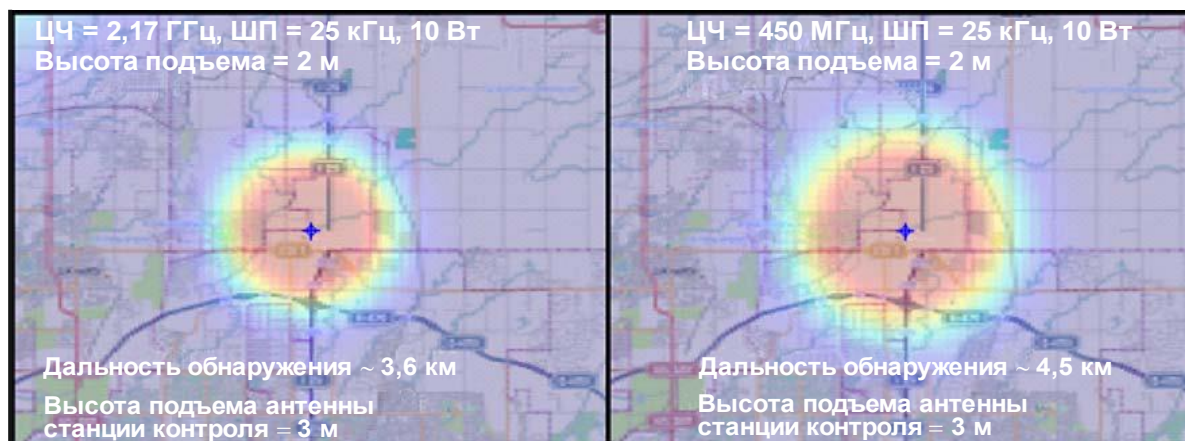
Средство моделирования, использованное в данном Отчете, позволяет пользователю менять любые из этих факторов или все факторы вместе, чтобы определить влияние на дальность обнаружения РЧ-сигнала и зону охвата определением географического положения (для взаимно коррелированных измерений TDOA с целью определения географического положения). Для простоты в Отчете используется модель рельефа для сельского района и прямой видимости (LoS). В средстве моделирования имеются и другие модели рельефа для сценариев использования в городских и пригородных условиях, а также внутри помещения и внутри/вне помещения. Оно также включает модели распространения радиоволн в условиях прямой видимости и при отсутствии прямой видимости (NLoS).

3(а) Влияние несущей частоты источника излучения

На рисунке 4 станция SE-504 изображена на графике измерений, охватывающем 17,2 км с севера на юг и 21,8 км с востока на запад (в данном разделе этот график используется во всех расчетах по модели, связанных с дальностью обнаружения РЧ-сигнала). Предполагается, что данная станция работает при минимальном уровне шума -150 дБм/Гц, высоте антенны 3 м и РЧ-кабеле типа LMR-400 длиной 2 м, соединяющем приемную антенну с РЧ-датчиком. В расчете, приведенном слева, источник излучения имеет несущую частоту 2,17 Гц, ширину полосы сигнала 25 кГц, выходную мощность 10 Вт и высоту подъема антенны 2 м. В расчете, приведенном справа, показано влияние уменьшения несущей частоты источника излучения до 450 МГц на дальность обнаружения РЧ-сигнала³.

РИСУНОК 4

Модель распространения в сельском районе в условиях LoS, источник и станция контроля расположены близко к уровню земли



Report SM.2211-04

Более высокие полосы частот (выше 3 ГГц) начинают использоваться для сотовой телефонной связи и других лицензируемых услуг. Осуществлять контроль этих услуг с фиксированных площадок будет

³ На более низких частотах потери распространения ниже, что приводит к большей дальности обнаружения РЧ-сигнала.

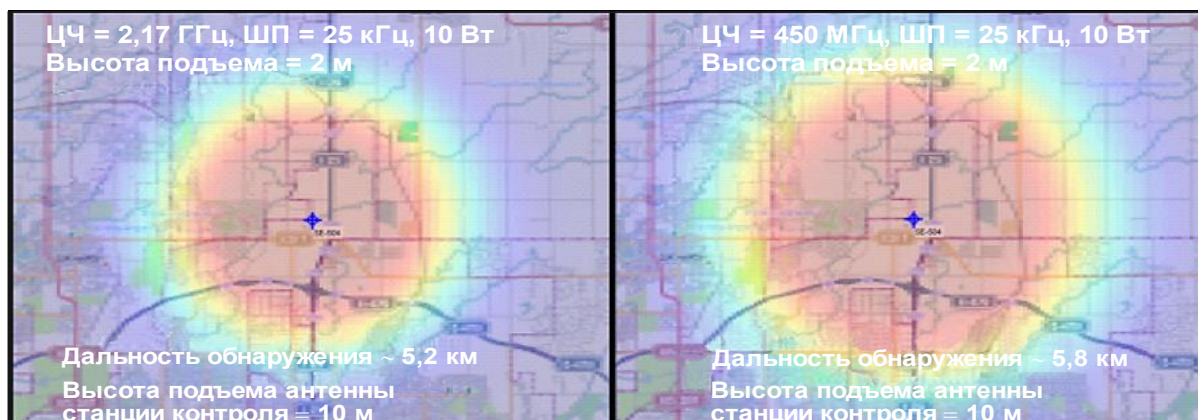
все труднее в связи с увеличением количества мест контроля, необходимых для обеспечения охвата. По этой причине все большее значение могут приобретать технологии на базе сетей фиксированных, мобильных и перемещаемых станций контроля.

3(b) Влияние высоты подъема антенны станции контроля

На рисунке 5 высота подъема антенны станции контроля увеличена до 10 м, а все остальные факторы не изменились. Ожидаемая дальность обнаружения РЧ-сигнала существенно возросла в связи с повышением вероятности прямой видимости требуемых источников излучения. Высота подъема антенны источника излучения оказывает аналогичное влияние.

РИСУНОК 5

Модель распространения в сельском районе в условиях LoS, источник расположен близко к уровню земли, станция контроля приподнята



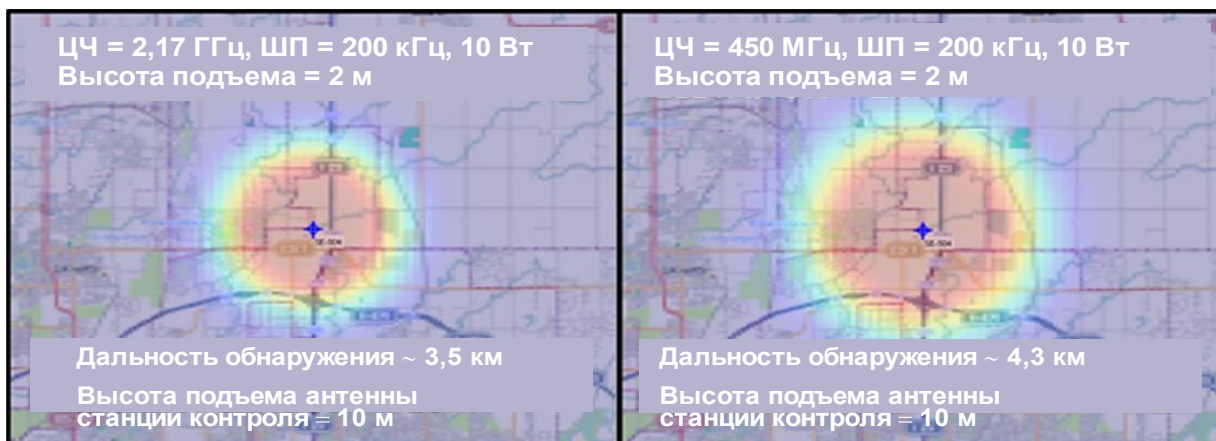
Report SM.2211-05

3(c) Влияние ширины полосы сигнала

На рисунке 6 все элементы остаются неизменными, как на рисунке 5, однако ширина полосы сигнала увеличена с 25 кГц до 200 кГц. Обратите внимание на уменьшение дальности обнаружения из-за низкой спектральной плотности мощности.

РИСУНОК 6

Совпадает с рисунком 5, за исключением ширины полосы сигнала, измененной с 25 кГц до 200 кГц



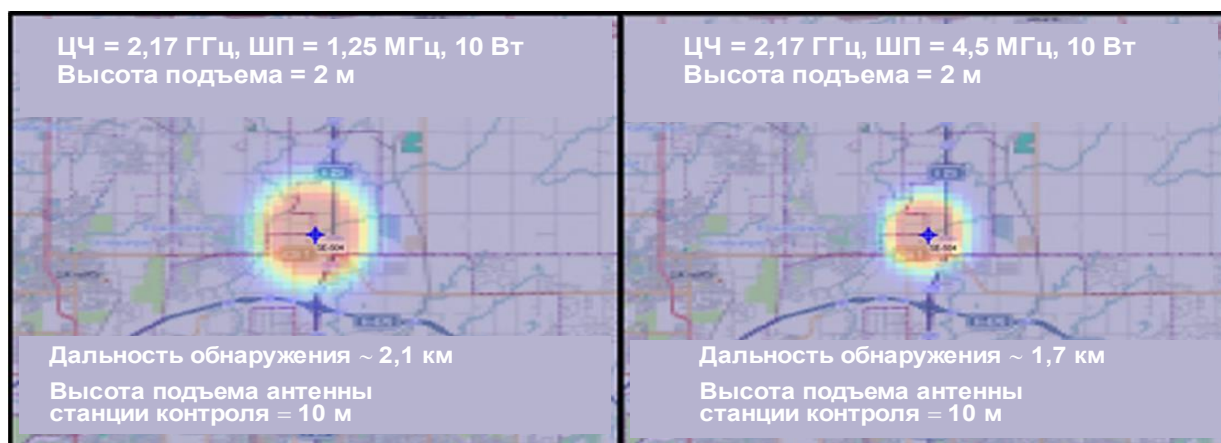
Report SM.2211-06

На рисунке 7 показаны результаты расчетов по модели, в которых используется пример с частотой 2,17 ГГц, а ширина полосы сигнала увеличена до 1,25 МГц и 4,5 МГц, соответственно. Все остальные переменные те же, что и на рис. 5 (слева). Очень четко видно, как ширина полосы сигнала влияет на

способность источника излучения распространять волны в пространстве, и соответствующее уменьшение дальности обнаружения РЧ-сигнала станцией контроля.

РИСУНОК 7

Ширина полосы сигнала изменена на 1,25 МГц и 4,5 МГц при тех же значениях мощности, подъема антенны и несущей частоты источника излучения



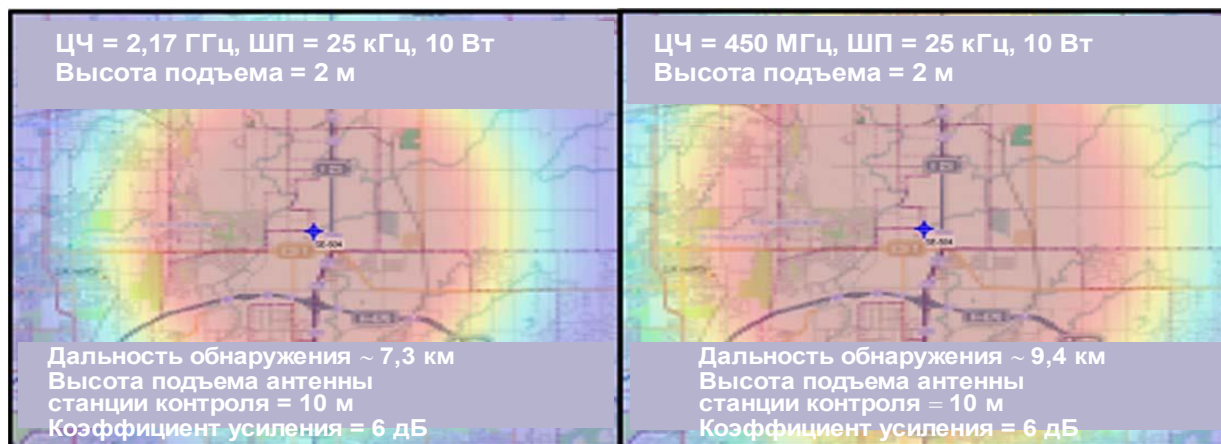
Report SM.2211-07

3(d) Влияние коэффициента усиления антенны

На рисунке 8 показаны результаты расчета по модели при добавлении коэффициента усиления антенны 6 дБ, чтобы пояснить использование направленной антенны. Ширина полосы сигнала снова уменьшена до 25 кГц. В результате получено ориентировочное ожидаемое расстояние охвата для некоторых традиционных станций АОА, коэффициент усиления которых обусловлен их антенной системой, или для станции TDOA, оснащенной направленной антенной. Масштаб карты пока что не меняется во всех расчетах.

РИСУНОК 8

Коэффициент усиления антенны был увеличен до 6 дБ, а ширина полосы источника излучения была уменьшена до 25 кГц при несущих частотах 2,17 ГГц и 450 МГц соответственно

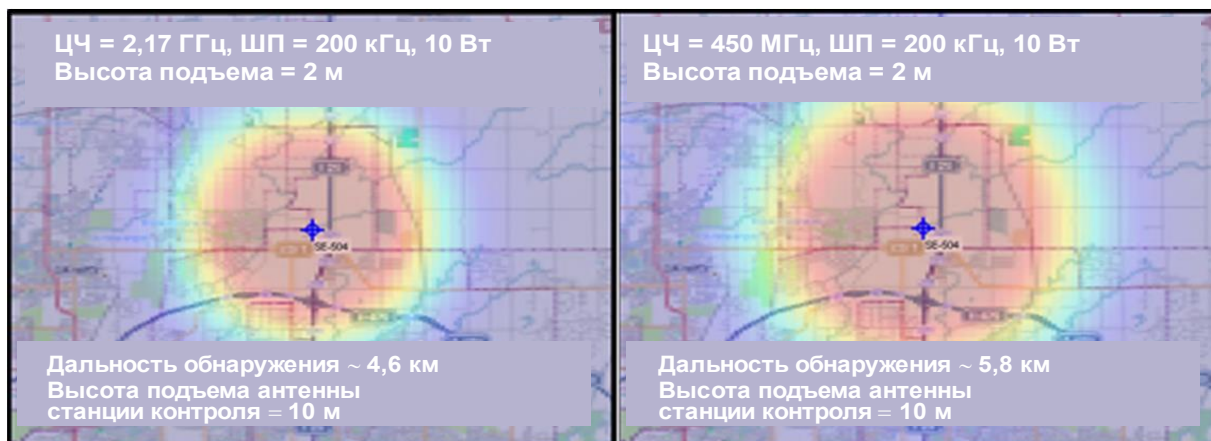


Report SM.2211-08

На рисунке 9 показаны результаты того же самого моделирования, что и на рис. 8, за исключением увеличения ширины полосы источника излучения до 200 кГц.

РИСУНОК 9

Совпадает с рисунком 8, за исключением увеличения ширины полосы источника излучения до 200 кГц



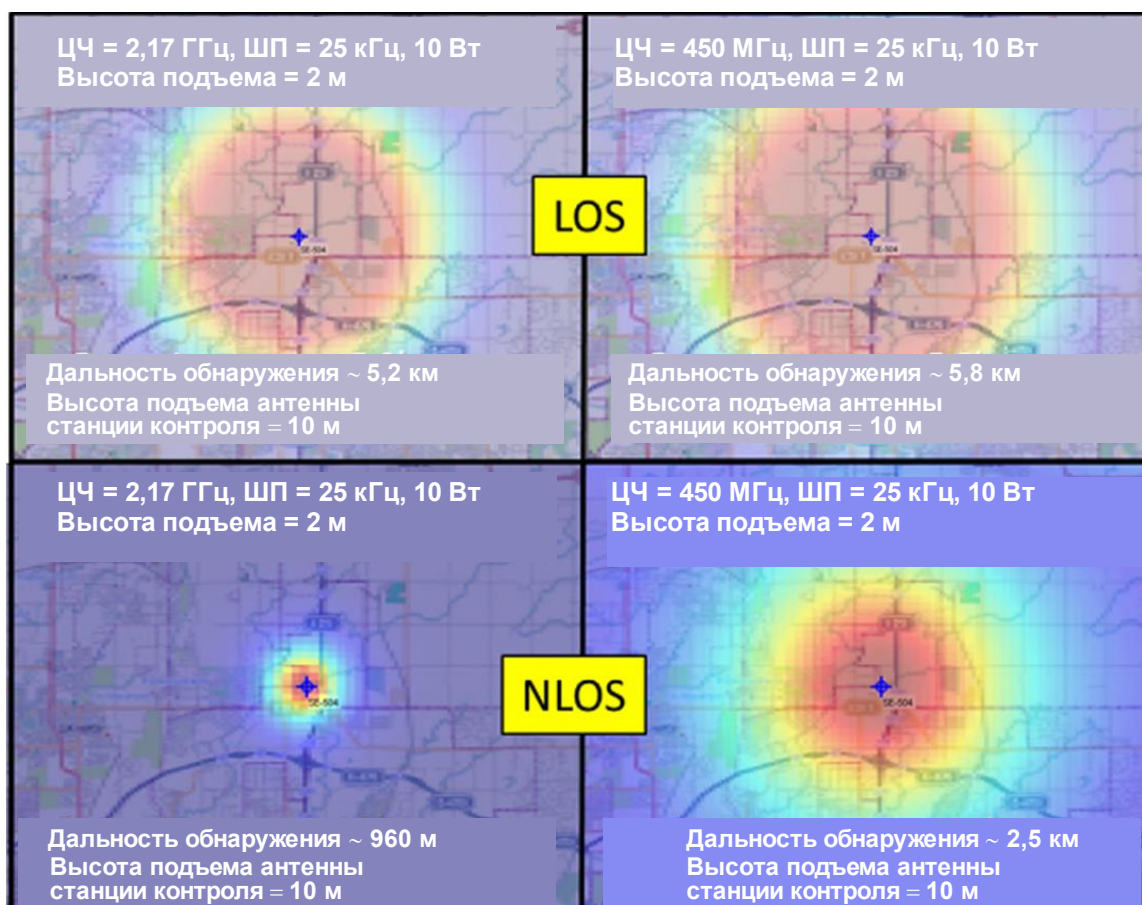
Report SM.2211-09

3(е) Влияние рельефа и прямой видимости

На рисунках 4–9 приведены результаты расчетов по модели, чтобы пояснить влияние различных факторов проектирования и характеристик источника излучения на дальность обнаружения РЧ-сигнала одной отдельно работающей станции контроля. В приведенных выше расчетах по модели не показано влияние экранирования зданиями и рельефом. Чтобы показать это воздействие на дальность обнаружения, на рис. 10 приведено сравнение моделей распространения в сельском районе в условиях прямой видимости и при отсутствии прямой видимости. При этом в верхней части расчетов по модели повторяется сценарий, приведенный на рисунке 5, который сравнивается с моделью распространения NLoS, приведенной в нижней части. Весьма наглядно показано возможное влияние прямой видимости на обнаружение РЧ-сигнала. Это моделирование также призвано подчеркнуть важное значение мобильных и передвижных станций для современных систем контроля за использованием спектра. Эти факторы должны учитываться при выборе площадки и проектировании станции контроля, которая будет использоваться для измерений с целью определения местоположения источника излучения.

РИСУНОК 10

Воздействие распространения в условиях LoS и NLoS на дальность обнаружения РЧ-сигнала



Report SM.2211-10

4 Моделирование факторов, влияющих на зону охвата определением географического местоположения, на станциях контроля TDOA и AOA

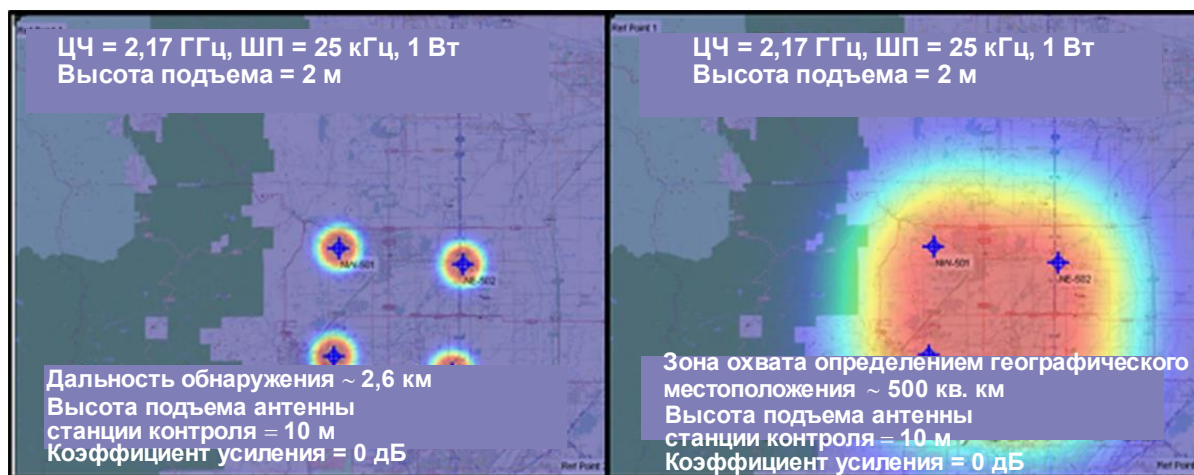
В этом разделе изображена расширенная географическая зона и показаны четыре станции контроля. Расчеты по модели, приведенные слева, дают дальность обнаружения РЧ-сигнала отдельных независимо работающих станций контроля. Расчеты по модели, приведенные справа, дают зону охвата определением географического местоположения для взаимно коррелированных измерений TDOA.

Зона охвата определением географического местоположения определяется как географическая зона, в пределах которой местоположение источника излучения может быть достаточно точно определено с помощью доступных методов (то есть AOA, TDOA, гибридный метод, POA). Важно отметить разницу между дальностью обнаружения РЧ-сигнала, которой требуется положительное ОСШ на входе станции контроля, и зоной охвата определением географического местоположения, которой не требуется положительное ОСШ на входе каждой станции контроля.

На рисунке 11 показаны результаты моделирования, при котором источник излучения имеет частоту 2,17 ГГц, однако уровень мощности уменьшен до 1 Вт. При подъеме антенны источника на 2 м (по-прежнему используется модель распространения в сельском районе в условиях прямой видимости, без данных о рельефе) дальность обнаружения станции контроля составляет около 2,6 км – и это весьма оптимистичный результат, с учетом того, что на практике сигнал будет экранирован зданиями или рельефом. Предполагаемая зона охвата определением географического местоположения методом TDOA, показанная справа, будет гораздо больше в связи с использованием взаимно коррелированных измерений в рамках всей сети станций контроля⁴. В этом моделировании задается корреляция между четырьмя парами станций контроля.

РИСУНОК 11

Сравнение дальности обнаружения РЧ-сигнала четырех отдельных станций контроля (слева) и зоны охвата определением географического местоположения с использованием TDOA (справа)



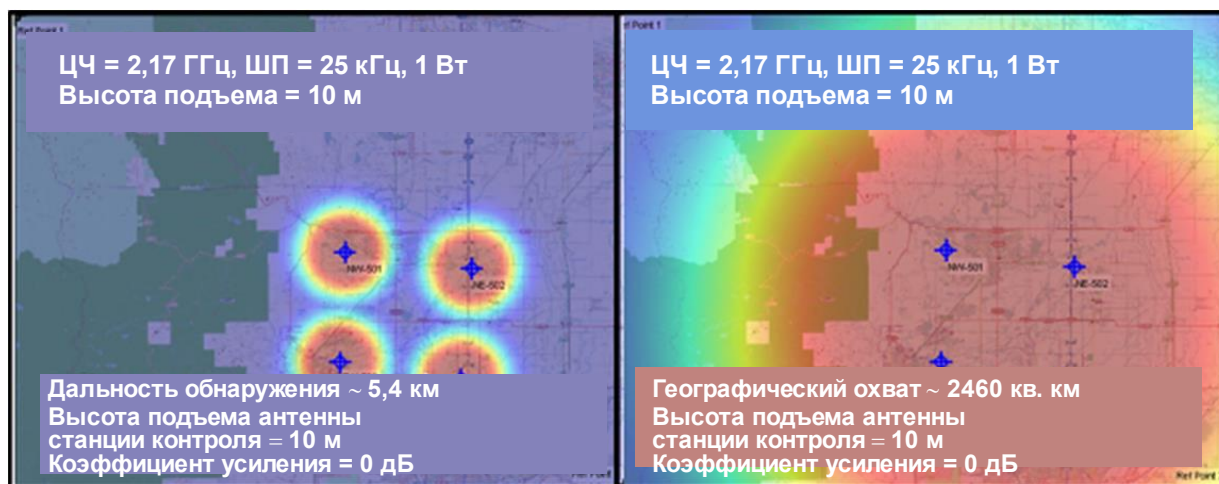
Report SM.2211-11

На рисунке 12 представлены результаты моделирования, при котором высота подъема источника излучения увеличивается до 10 м. Рисунок иллюстрирует увеличенную дальность обнаружения РЧ-сигнала системами AOA и TDOA. Увеличена также зона охвата определением географического местоположения методом TDOA (справа). Важным фактором данного моделирования является геометрический показатель снижения точности (GDOP), связанный с геометрическим положением станции относительно местоположения источника излучения. Этот показатель используется для указания того, как ошибки в данных измерений повлияют на окончательную оценку географического местоположения (в п. 5 на рисунке 14 это представлено в графическом виде). GDOP для сетей TDOA увеличивается по мере перемещения местоположения источника излучений за пределы зоны, ограниченной станциями контроля. Следовательно, точность TDOA, как ожидается, уменьшится за пределами сети датчиков. Моделирование показывает значительную область, в которой возможны измерения для определения географического местоположения, однако оно не показывает воздействия GDOP на ожидаемую точность.

⁴ В случае измерений TDOA один и тот же передаваемый сигнал, принятый двумя отдельными датчиками, взаимно коррелируется, что приводит к подавлению независимых характеристик шума. При теоретическом пределе долговременной взаимной корреляции шум приемника и шум окружающей среды не являются факторами, и показатели обнаружения системы в меньшей степени ограничиваются характеристиками отдельного приемника, в том числе коэффициентом шума.

РИСУНОК 12

Сценарий, аналогичный представленному на рисунке 11, за исключением увеличения высоты подъема источника излучений до 10 м



Report SM.2211-12

Выигрыш при обработке, который достигается благодаря усовершенствованным алгоритмам TDOA, может обеспечить возможности по определению местоположения источника излучений в области, превышающей дальность обнаружения РЧ-сигнала отдельными станциями.

5 Сравнение результатов моделируемых и реальных измерений для определения географического местоположения РЧ-сигнала

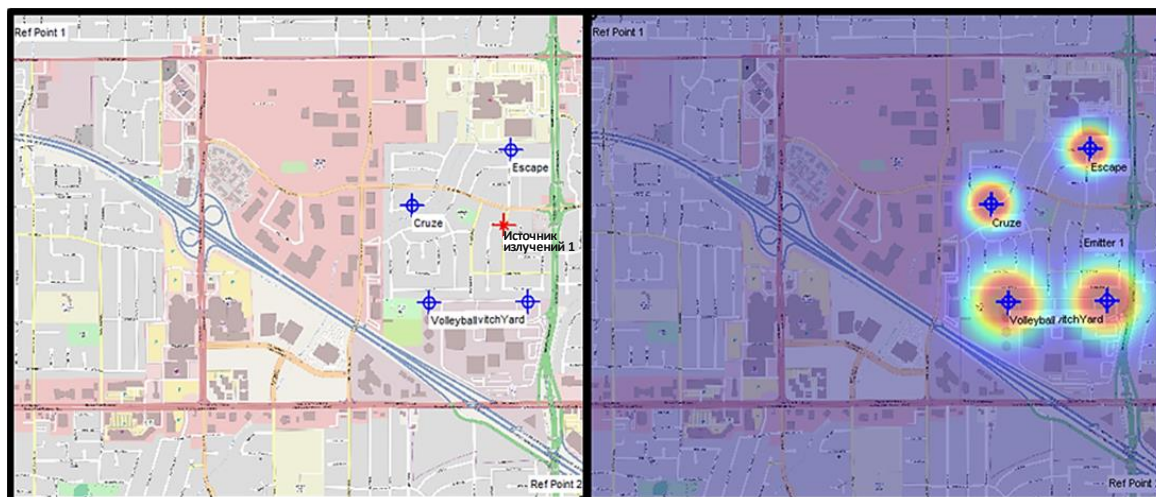
Описываемые ниже испытания проводились с конкретной целью определения местоположения маломощных источников излучения, аналогичных по характеру мобильным телефонам. Вследствие этого станции радиоконтроля были разнесены на менее чем 1 км. Этот сценарий, хотя и не может напрямую применяться к задачам, характерным для регулирования использования спектра, служит хорошим примером для сравнения результатов моделируемых измерений и реальных полевых измерений.

Область проведения этих испытаний – Санта-Клара, шт. Калифорния, рельеф – типично пригородный с легкой промышленной средой (пяти-шестиэтажные офисные здания, больница, крытые автостоянки, магазины и т. д.). В имитируемой модели мы использовали для рельефа модель "Пригородные районы с NLoS". Станции "Volleyball" и "SwitchYard" были временными, но оба элемента – всенаправленная антенна и направленная патч-антенна – были фиксированными. Они находились на штативах высотой 2,5 м, электропитание обеспечивалось небольшими литий-ионными батареями. Станции "Escape" и "Cruze" были мобильными – установленными на автомобилях с антеннами на магнитных креплениях, питание полностью обеспечивалось аккумуляторными батареями. Передатчик передвигался по зоне, ограниченной станциями контроля.

На рисунке 13 (слева) показана схема размещения станций контроля и местоположение одного испытательного источника излучений. В этих примерах источником излучений служил мобильный телефон, который вел передачу по линии вверх UMTS с мощностью 2 Вт на частоте 831 МГц (ширина полосы сигнала примерно равна 4,5 МГц) из автомобиля. На правом рисунке показана ожидаемая дальность обнаружения РЧ-сигнала станциями контроля. Как видно, если принята модель рельефа "Пригородные районы с NLoS", источник излучений находится за пределами дальности обнаружения РЧ-сигнала каждой отдельной станции.

РИСУНОК 13

Применявшаяся при испытаниях в Санта-Кларе схема определения местоположения источника излучений и ожидаемая дальность обнаружения РЧ-сигнала



Report SM.2211-13

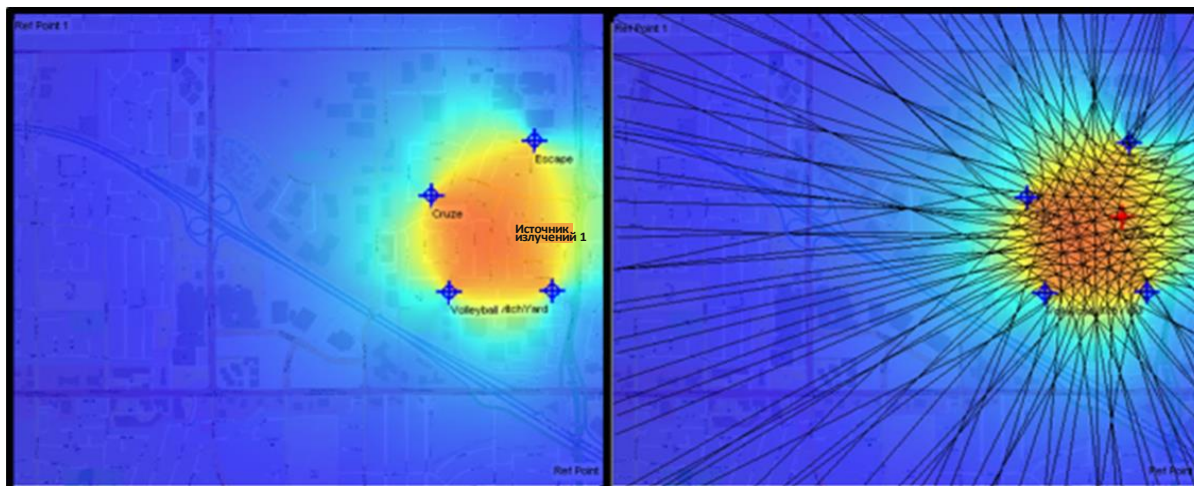
Дальность обнаружения двух самых южных станций контроля больше благодаря несколько большему углу места и направленным антеннам, ориентированным на север. Все станции контроля подсоединены с помощью сотовых модемов к серверу определения местоположения с маршрутизируемым IP-адресом, который находился в одном из офисных зданий в Санта-Кларе. Управление сетью датчиков осуществлялось через портативный компьютер из автомобиля, на котором перемещался источник излучений.

На рис. 14 (слева) показано расчетное представление геометрического показателя снижения точности (GDOP) для данной схемы развертывания станций контроля. Заметно, как низкий (хороший) GDOP расширяется за пределы границы сети в некоторых, но не всех, направлениях. На практике возможность сети на основе TDOA определять линию положения/направления на источник излучений может быть расширена существенно за периметр, образуемый станциями контроля⁵. На рисунке справа показаны ожидаемые гиперболические линии постоянной разницы во времени между парами датчиков. Точность определения географического положения, как ожидается, улучшится в областях низкого GDOP (выделены красным цветом) и на перпендикуляре, пересекающем гиперболические линии.

⁵ "Линия положения", создаваемая от кластера нескольких станций TDOA, аналогична единичному пеленгу АОА от одной станции АОА, но она не обеспечивает результата определения географического положения. Она определяет только направление на источник излучений (если источник излучений находится за пределами области, ограниченной станциями TDOA).

РИСУНОК 14

GDOP станции в Санта-Кларе и представление гиперболических линий TDOA

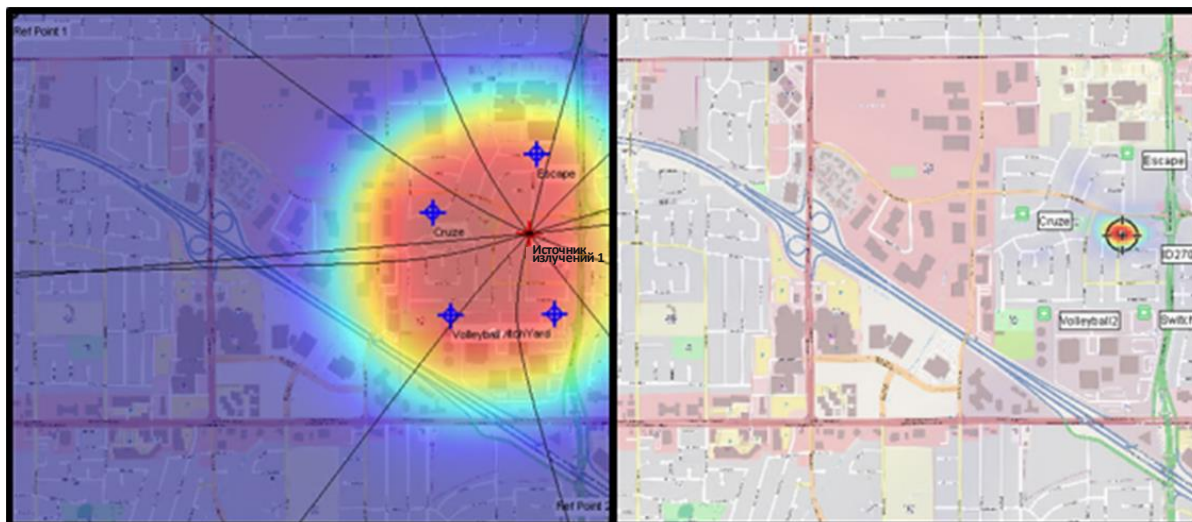


Report SM.2211-14

На рисунке 15 (слева) показана ожидаемая зона охвата определением географического местоположения (предполагая корреляцию до четырех пар датчиков) и гиперболические линии, направленные к местоположению источника излучений. На правом рисунке показаны результаты реального измерения для определения местоположения источника излучений. В этом местоположении было проведено несколько измерений с ошибкой TDOA менее 50 м.

РИСУНОК 15

Оценка геометрической зоны охвата и результаты реального измерения местоположения источника излучений

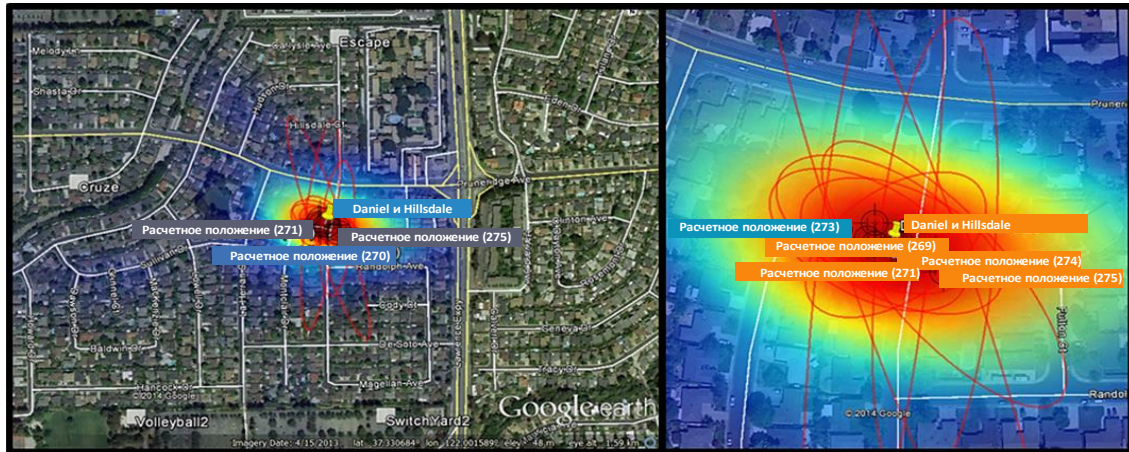


Report SM.2211-15

На рисунке 16 отображены некоторые результаты определения географического местоположения, наложенные на карту Google Earth®, с соответствующим цветовым выделением правдоподобия, вероятности эллиптической ошибки (ЕЕР) и расчетного положения источника излучений (ЕР). Желтый значок кнопки указывает реальное местоположение источника излучений.

РИСУНОК 16

Результаты измерения для определения географического местоположения, наложенные на карту Google Earth. Справа показан крупный план



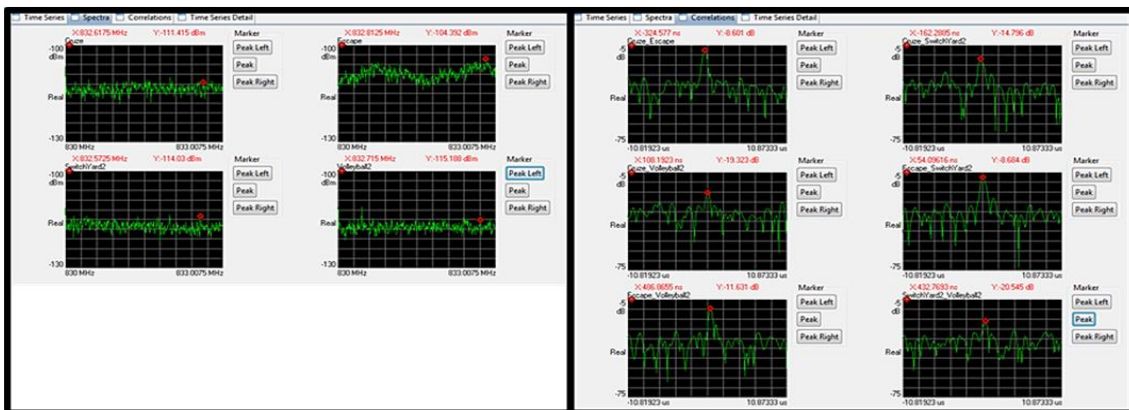
Report SM.2211-16

В этом случае результаты моделирования и измерений согласуются.

На рисунке 17 (слева) показано, что сигнал источника излучений достиг только одного местоположения контроля с положительным ОСИШ (Escape). Однако возможность определения географического местоположения источника излучений на основе TDOA была весьма высокой, что подтверждается хорошей взаимной корреляцией между парами датчиков, как показано на рисунке 17 (справа).

РИСУНОК 17

Типовые спектральное и корреляционное поля для устройства UMTS, измеренные в ходе полевых испытаний в 2013 году



Report SM.2211-17

Цель этого моделирования и измерений заключается в иллюстрации разницы между дальностью обнаружения РЧ-сигнала и зоны охвата определением географического местоположения, а также влияющих на них условий. Дальность обнаружения РЧ-сигнала зависит от многих разнообразных факторов и определяется проектным решением и ограничениями по размещению. На зону охвата определением географического местоположения влияют ограничения, обуславливаемые дальностью обнаружения РЧ-сигнала, но она изменяется в зависимости от метода определения местоположения (то есть AOA, TDOA, POA и т. д.). Все эти соображения имеют существенное значение при выборе метода определения географического местоположения и места для размещения станции контроля.

6 Выводы

Сети TDOA могут быть более эффективными при обслуживании больших городов и промышленных центров, в которых может быть установлено большое число датчиков, делая возможным автоматизацию процесса контроля, включая функцию определения местоположения передатчика.

Напротив, относительно небольшие города и соседние с ними пригороды, а также обособленные промышленные центры могут более эффективно обслуживаться меньшим числом станций радиопеленгации или гибридных станций на основе AOA/TDOA, отстоящих друг от друга на относительно значительном расстоянии. В этом случае для осуществления определения географического местоположения передатчиков эффективным может быть использование только двух станций.

Обнаружение полной активности сигнала на всей территории города с пригородами практически невыполнимо, независимо от используемой технологии определения местоположения или контроля, основанной на фиксированной связи. Регуляторные органы отдают предпочтение, как правило, контролю частей спектра в определенных областях и в течение определенного имеющего важное значение времени/мероприятия. Развертывание системы, отвечающей значительной части потребностей и обеспечивающей гибкость в изменении при необходимости местоположения и конфигурации, имеет решающее значение в современной среде использования спектра.

Развертывание надлежащего типа станции контроля исходя из характеристик местности позволит использовать минимальное число станций, обеспечивая при этом максимально возможные охват и эффективность. Например, в открытой сельской местности, характеризующейся отсутствием крупных отражателей, высокую эффективность обеспечат станции на основе AOA или AOA/TDOA (гибридные). Однако в плотных городских или густонаселенных районах, где городские кварталы характеризуются большим числом близкорасположенных отражателей, более эффективным может оказаться использование сети на основе TDOA с возможностью использования также POA и гибридных алгоритмов определения географического местоположения.

Приложение 2

Проведенное методом моделирования исследование точности определения географического положения и зоны его охвата для гибридных станций контроля AOA/TDOA

1 Введение

В настоящем Приложении проводится сравнение точности определения географического местоположения, обеспечиваемой гибридными станциями радиоконтроля AOA/TDOA с независимыми системами AOA и TDOA, на основе результатов натурального компьютерного моделирования.

Для исследований использовались компьютерные расчеты для моделирования точности и зоны охвата станций радиоконтроля, способных реализовать гибридные методы AOA/TDOA. Это моделирование показывает, что по сравнению со станциями на основе только AOA или только TDOA гибридная система AOA/TDOA может обеспечить охват большей зоны, которая представляет интерес, при использовании меньшего числа станций, а также более высокую точность определения географического местоположения как в пределах, так и за пределами области, окружающей станции контроля.

2 Методы определения географического местоположения

Типовой процесс определения географического местоположения предусматривает объединение измерений, произведенных на нескольких площадках, для выработки оценки местоположения источника излучений. Качество оценки определения местоположения определяется величиной промаха (выражаемой в метрах). Чем меньше значение величины промаха, тем лучше оценка местоположения.

При увеличении плотности источников излучений способность системы контроля использования спектра/радиопеленгации *точно* определять географическое местоположение источника излучений становится важной характеристикой, особенно в случае разрешения вопросов помех.

Существует большое число методов, пригодных для процесса определения географического местоположения. В настоящем документе рассматриваются три разных метода определения географического местоположения. Первый метод объединяет измерения АОА, проведенные на нескольких площадках с использованием решеток радиопеленгационных антенн для определения АОА. Второй метод объединяет измерения TDOA, проведенные на не менее чем трех площадках (для определения географического местоположения необходимы три пары измерений TDOA). Третий метод является сочетанием измерений АОА и TDOA для выполнения процесса определения географического местоположения (необходимы не менее двух площадок: одна с возможностью измерения и АОА и TDOA, другая – с возможностью измерения TDOA). Для простоты эти три метода называются АОА, TDOA и гибридный АОА/TDOA.

Следует заметить, что площадка для размещения станции контроля, которая может измерять АОА, называется площадкой с системой АОА; площадка для размещения станции контроля, которая может измерять TDOA, называется площадкой с системой TDOA, и площадка для размещения станции контроля, которая может измерять и АОА и TDOA, называется площадкой с гибридной системой АОА/TDOA.

Основные характеристики трех методов определения географического местоположения представлены в таблице 1, ниже.

(Более подробное рассмотрение преимуществ и ограничений систем TDOA см. в Отчете [МСЭ-R SM.2211.](#))

ТАБЛИЦА 1

Характеристики систем определения географического местоположения	ТОЛЬКО АОА	ТОЛЬКО TDOA	Гибридные АОА/TDOA
Минимальное число станций, требуемых для определения географического местоположения	2 станции	3 станции	2 станции, гибридные АОА/TDOA. Одна станция может быть только TDOA
Точность определения географического местоположения	Линейное уменьшение при увеличении и расстояния до станции контроля	Примерно постоянная между площадками с системами TDOA. Быстро ухудшается в зоне за пределами площадок с системами TDOA	Такая же, как у системы TDOA в зоне между площадками с гибридными системами. Аналогично АОА в области за пределами площадок
Точность уменьшается при увеличении расстояния до источника излучений	Да	Только для передатчиков, которые находятся в зоне за пределами площадок с системами TDOA	Только для передатчиков, которые находятся на значительном удалении от площадок с гибридными станциями
Независимость в отношении модуляции сигнала	Да	TDOA не работает с немодулированными сигналами. Сложность в случае узкополосных сигналов	Да, если имеется не менее двух площадок с гибридными системами
Требования к скорости передачи данных	Низкая скорость, 10–30 кбит/с	Скорость средняя до высокой, 120 кбит/с – 2 Мбит/с	Может быть такой же низкой, как в случае АОА, если используется только АОА, или немного выше, чем в случае TDOA, если одновременно используются АОА и TDOA

ТАБЛИЦА 1 (окончание)

Ограничения по размещению станции (см. п. 3)	Могут возникнуть сложности при развертывании большей по размеру антенны, что возможно ограничит пригодность площадки	Простая всенаправленная, которую проще развернуть	Те же, что в отношении АОА для площадок с гибридными системами
Сложность антенны	Многоэлементная антенна	Одноэлементная антенна	Многоэлементная или одноэлементная антенна
Требования к калибровке	Иногда (в зависимости от системы АОА ⁶)	Нет	Иногда (в зависимости от системы АОА)

Как видно из таблицы, каждому методу присущи определенные преимущества и недостатки. Оптимальная конфигурация в конкретном применении (город/пригород, постоянно/временно, равнинная местность/горы и т. д.) будет определяться требованиями к развертыванию.

3 Моделирование точности определения географического местоположения с использованием конкретного примера

Проводилось компьютерное моделирование точности определения географического местоположения в городе Белу-Оризонти в Бразилии и вокруг него. Моделировались различные конфигурации системы контроля за использованием спектра (СКС), включая системы АОА, TDOA и гибридную систему АОА/TDOA, и результаты этого моделирования сравнивались по показателю точности определения географического местоположения.

Моделирование проводилось с использованием программного инструмента, в котором расчеты для определения географического местоположения объединены со слышимостью целевого сигнала на разных рассматриваемых станциях в зависимости от мощности передатчика и влияния распространения сигнала с использованием 3D-рельефа. Моделирование включает определенные соглашения относительно числа площадок, высоты приемной антенны, высоты источника излучений и других параметров, которые приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2

Параметры, использовавшиеся при компьютерном моделировании с представленными результатами

Центральная частота	450 МГц
Ширина полосы сигнала	25 кГц
Выходная мощность передатчика	10 Вт или 1 Вт (э. и. м.) (см. текст)
Высота передающей антенны	10 м (над средним уровнем поверхности земли)
Высота приемной антенны	30 м (над средним уровнем поверхности земли)
Коэффициент усиления приемной антенны	0 дБ
Коэффициент шума приемника	12 дБ
Принимаемый в приемнике ОСШ	+10 дБ
Минимальное число станций приема с конкретным ОСШ	2 станции для АОА и гибридной системы, 3 станции для TDOA

ПРИМЕЧАНИЕ. – Если иное не указано в таблице, те же параметры использовались для всех методов определения географического местоположения: АОА, TDOA и гибридного.

Точность определения географического местоположения оценивалась на основе величины промаха.

⁶ Некоторые систем АОА являются самокалибруемыми и в отсутствие изменений не требуют дополнительной калибровки.

4 Специализированный программный инструмент анализа

Для данного примера полный программный инструмент включает следующие модели.

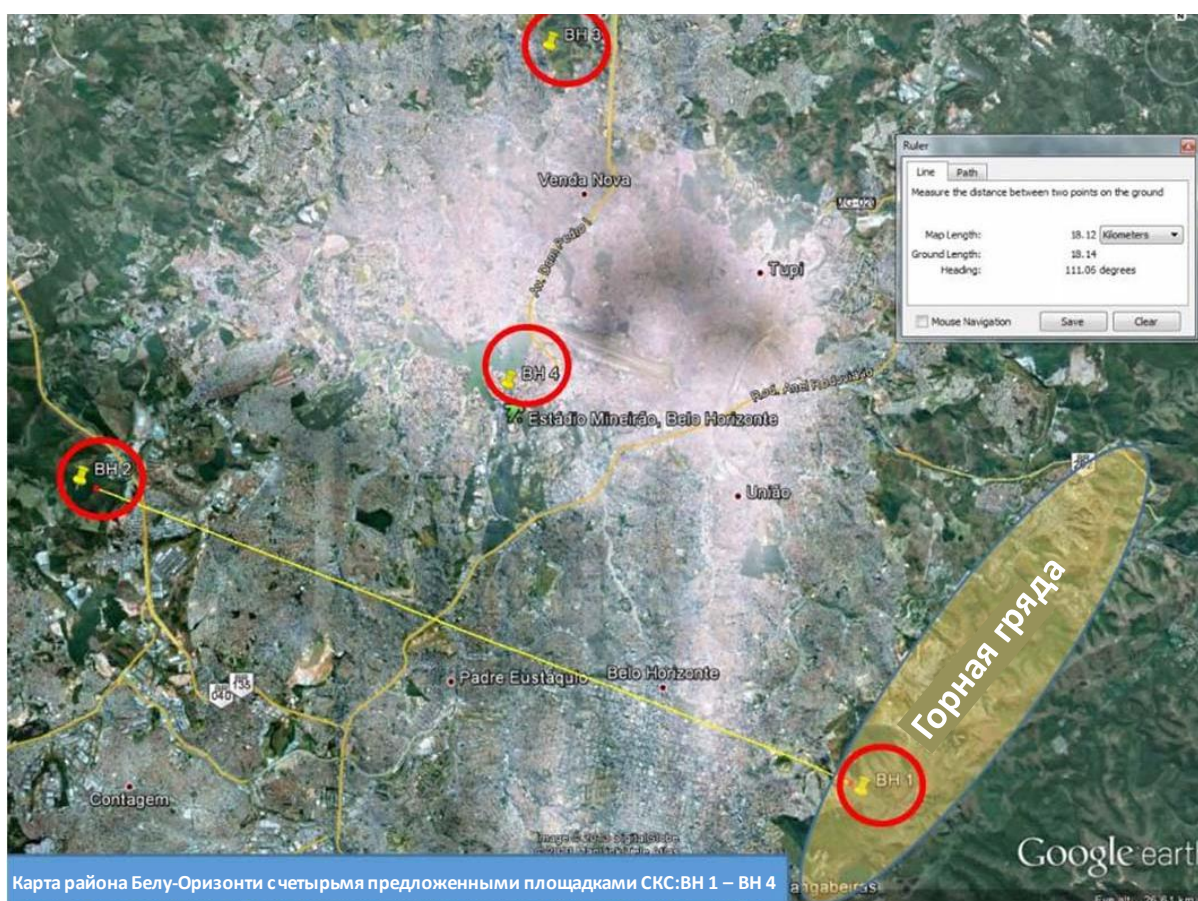
Охват – анализ охвата показывает число мест, в которых возможно принимать ("слышать") сигналы источника излучений, осуществляющего передачу из конкретного местоположения с разными уровнями мощности.

Точность определения географического местоположения – анализ точности определения географического местоположения методом AOA, TDOA и гибридным методом AOA/TDOA показывает эффективность различных методов определения географического местоположения.

Оптимизация конфигурации системы – этот вид анализа показывает число площадок, необходимых для достижения сравнимой точности определения географического местоположения при использовании различных методов определения географического местоположения.

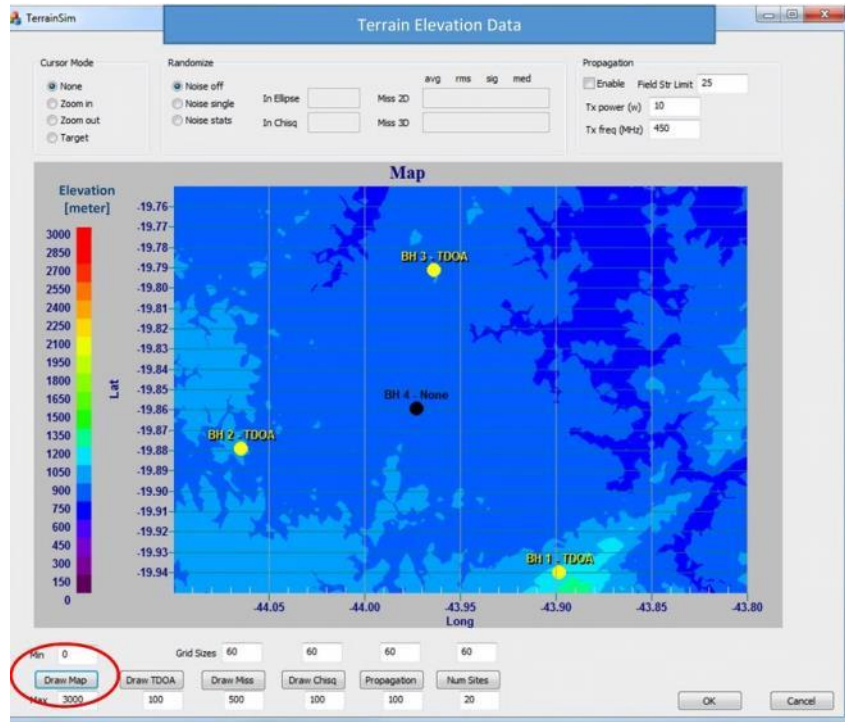
4(a) Пример географического местоположения

На нижеследующем рисунке на карте Google показаны местоположения четырех площадок, выбранных для анализа и обозначенных как ВН1, ВН2, ВН3 и ВН4 в городе Белу-Оризонти и вокруг него. Площадки разнесены относительно друг друга примерно на 18 км, рельеф относительно плоский, за исключением горной гряды в районе площадки ВН1.



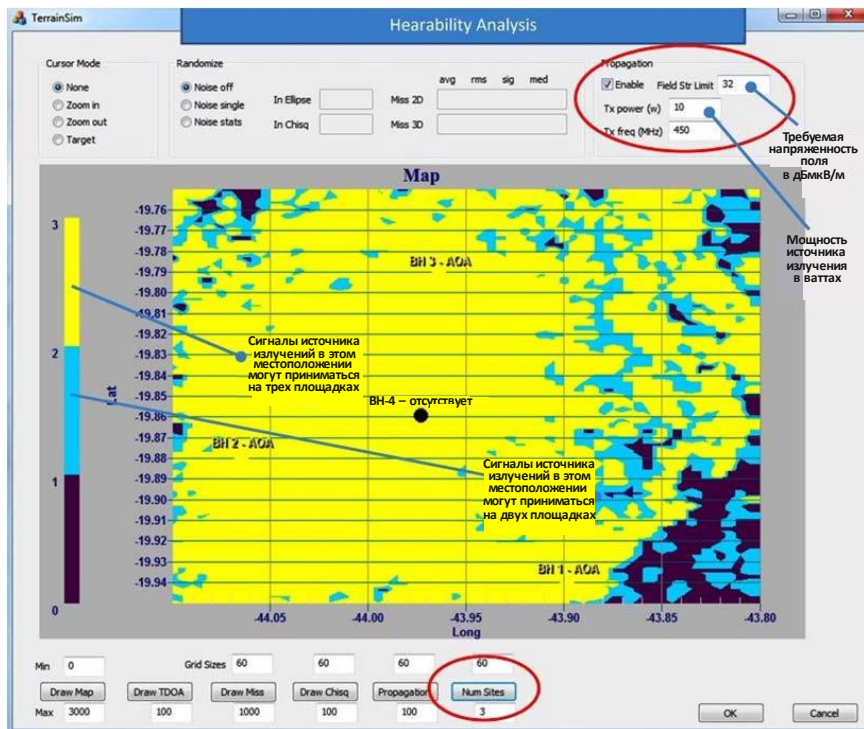
4(b) Пример данных высоты местности

Ниже показан экран, на котором отображены данные высоты местности. Также отображаются местоположения четырех площадок с указанием их названий и возможностей определения географического местоположения. На этом записанном изображении на всех выбранных площадках обеспечены возможности TDOA. Данные о рельефе используются при расчете характеристик распространения и для определения географического местоположения.



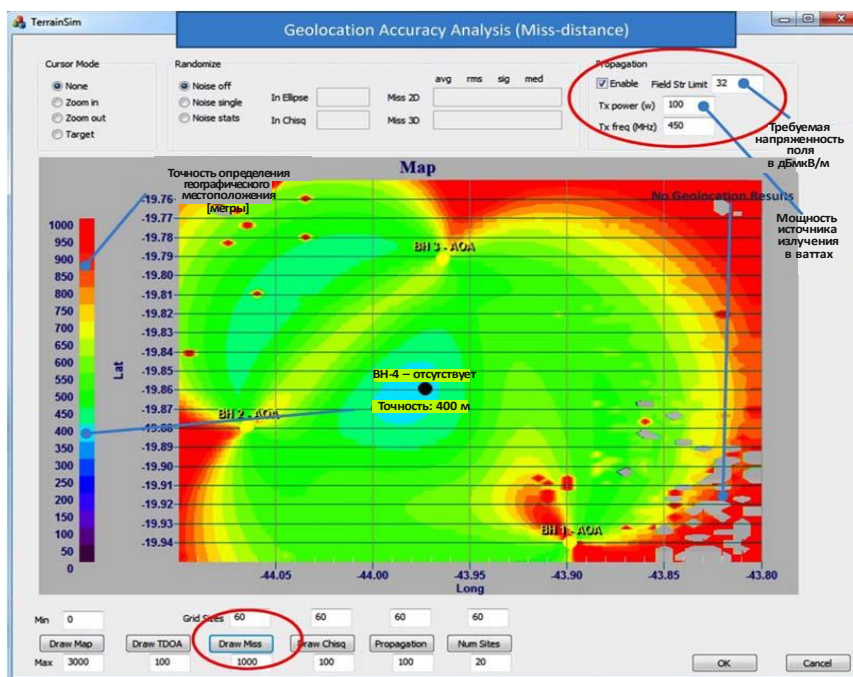
4(с) Пример анализа слышимости

На следующем экране показаны контуры "слышимости". На этом изображении цветом обозначено число станций, которые могут принимать сигналы источника излучений при требуемой напряженности поля. На экране отображаются воздействия изменения высоты местности и уровня мощности передатчика. На этом записанном изображении на всех выбранных площадках обеспечены возможности АОА.



4(d) Пример графика величины промаха

На следующем экране отображены контуры точности определения географического местоположения, которая представляется величиной промаха (метры). Величина промаха также рассчитывается для конкретной требуемой напряженности поля. На этом записанном изображении на всех выбранных площадках обеспечены возможности АОО.

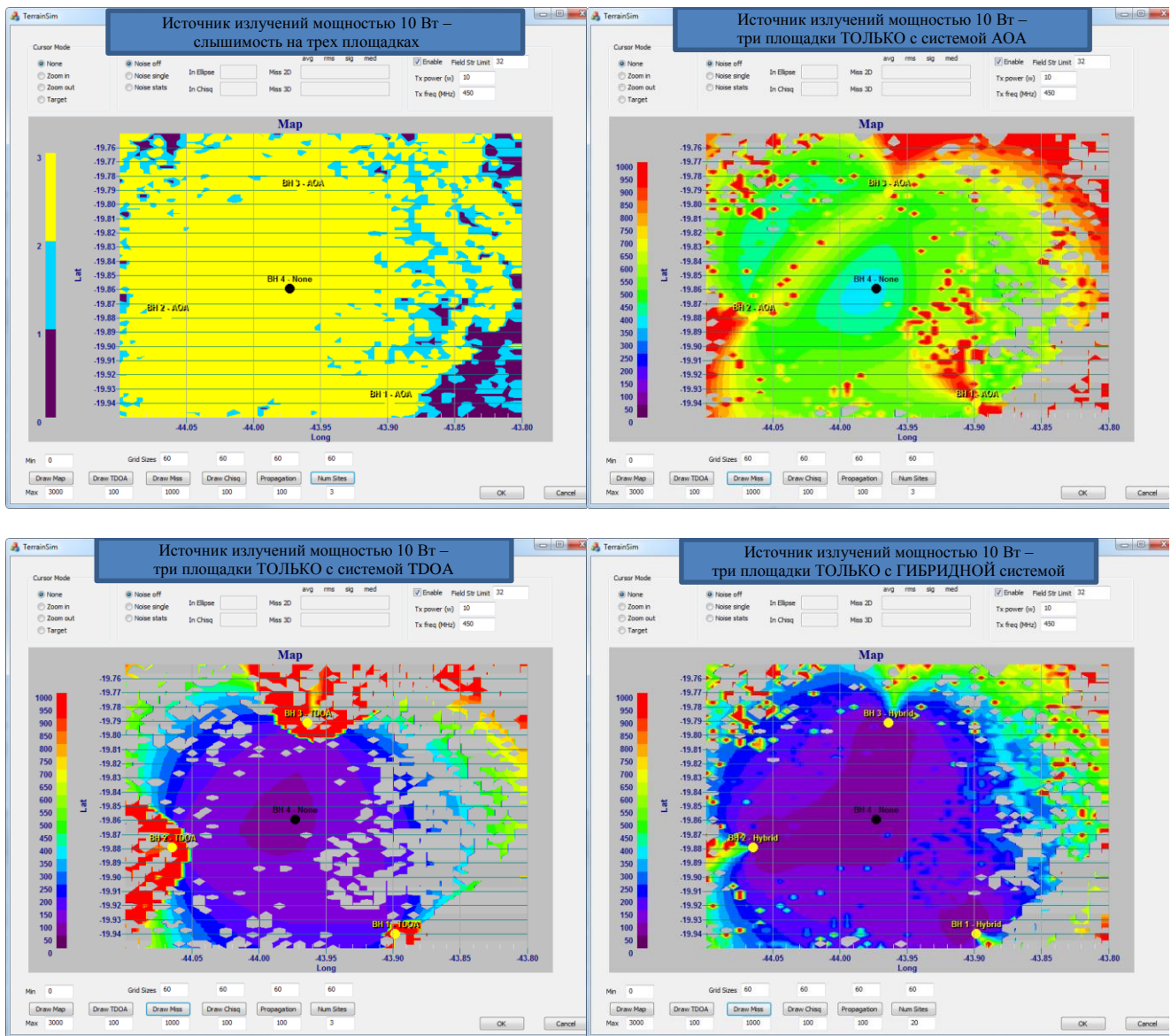


5 Результаты расчетов по моделям

Данное исследование конкретной ситуации проводилось при разных условиях, таких как число станций в составе сети контроля за использованием спектра, мощность передатчика, которая изменялась в диапазоне от 1 Вт до 100 Вт, с различными условиями распространения и разными методами определения географического местоположения. В нижеследующих разделах приведен обзор основных результатов данного исследования для вариантов 10 Вт и 1 Вт.

5(a) Сеть из трех станций контроля

Нижеследующие рисунки иллюстрируют сравнение систем определения географического местоположения АОО, TDOA и гибридной системы АОО/TDOA для случая передатчика мощностью 10 Вт. На первом графике отображена слышимость на каждой из трех станций передатчика мощностью 10 Вт, который расположен в представляющей интерес зоне.



5(b) Обзор результатов расчетов по моделям (3 станции)

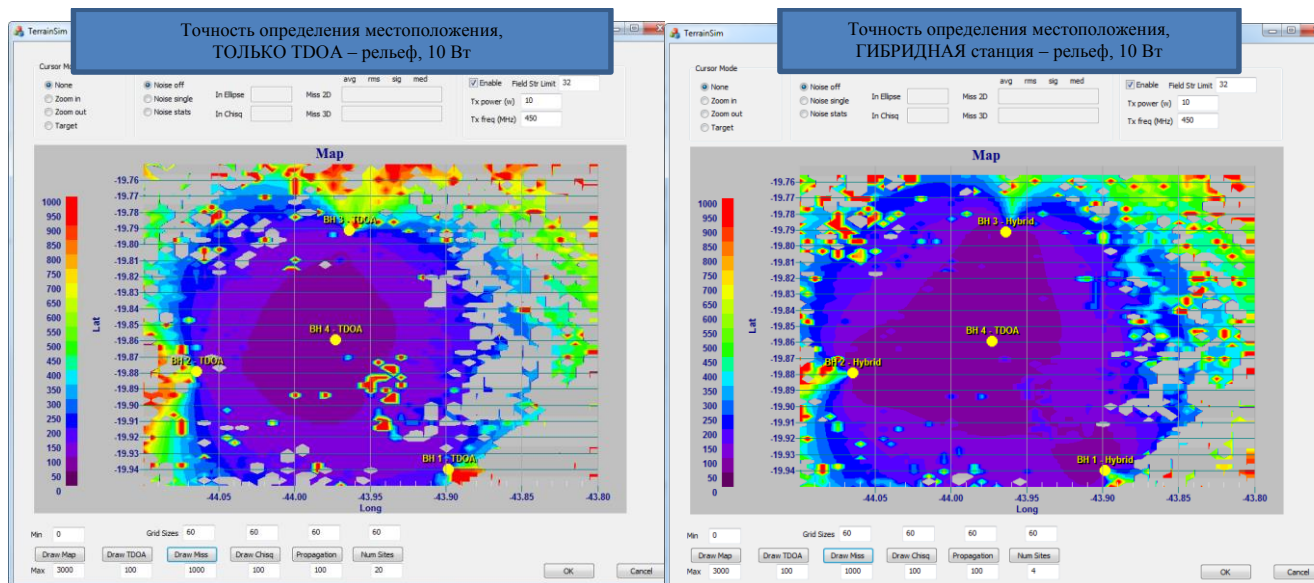
Система в составе трех станций АОА охватывает всю представляющую интерес зону, но точность определения географического местоположения хуже для случая отдаленных передатчиков. Однако станции АОА могут обеспечивать LoB даже при перехвате сигнала передатчика только одной станцией.

Система в составе трех станций TDOA обеспечивает хорошую точность в зоне, ограниченной станциями. Однако, как ожидается, точность определения географического местоположения снижается за пределами этой зоны. При использовании этой модели существуют также значительные разрывы (серые области), в которых не предвидится результатов определения географического местоположения, так как охват определением географического местоположения на основе TDOA частично зависит от геометрии площадки, а также от расстояния разноса. Охват для случая передатчиков мощностью 1 Вт или ниже ухудшается, как и ожидалось, если используются только три станции TDOA с таким расстоянием разноса (18 км) или если источник излучений находится недостаточно близко по крайней мере к одной из станций. При использовании этой модели предполагается, что требуется не менее трех площадок со станциями, имеющими положительное ОШС. Это не обеспечивает возможности корреляции минимального уровня шума (системы на основе и АОА и TDOA могут вырабатывать результат, используя коррелятивные методы, только если одна из станций имеет положительное ОШС).

Для этого примера гибридная система, в которой используются оба метода – АОА и TDOA, будет обеспечивать, как ожидается, более высокую точность определения географического местоположения в большей зоне охвата.

5(с) Сеть из четырех станций контроля

Нижеследующие рисунки иллюстрируют сравнение результатов определения географического местоположения системами на основе станций TDOA и гибридных станций AOA/TDOA для случая передатчика мощностью 10 Вт.



5(d) Обзор результатов расчетов по моделям (4 станции)

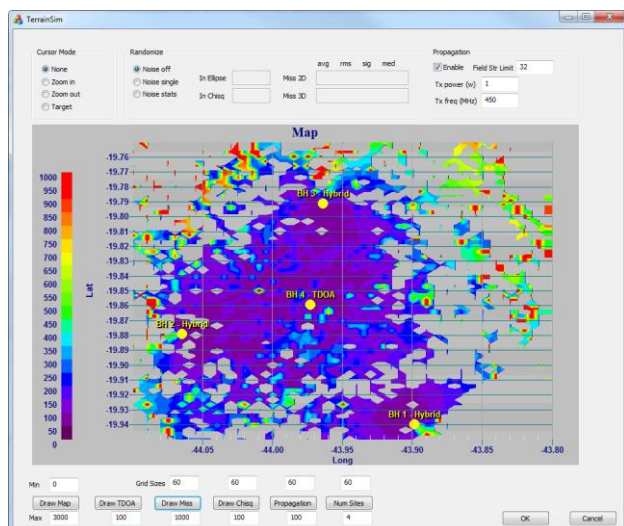
Результаты с использованием сети из четырех станций согласуются с результатами, полученными с использованием трех станций, при этом результаты охвата улучшены. Использование только станций TDOA обеспечивает хорошую точность в зоне, окруженной четырьмя станциями, однако точность определения географического местоположения снижается за пределами этой зоны. Существуют также значительные разрывы (серые области), в которых не имеется результатов определения географического местоположения. При использовании четырех станций TDOA охват для случая передатчиков мощностью 1 Вт или ниже ухудшается (по причинам, рассматриваемым в случае использования трех станций).

Так же как и в примере с тремя станциями, данное моделирование показывает, что гибридная система, в которой используются оба метода – AOA и TDOA, может обеспечить более высокую точность определения географического местоположения в большей зоне охвата.

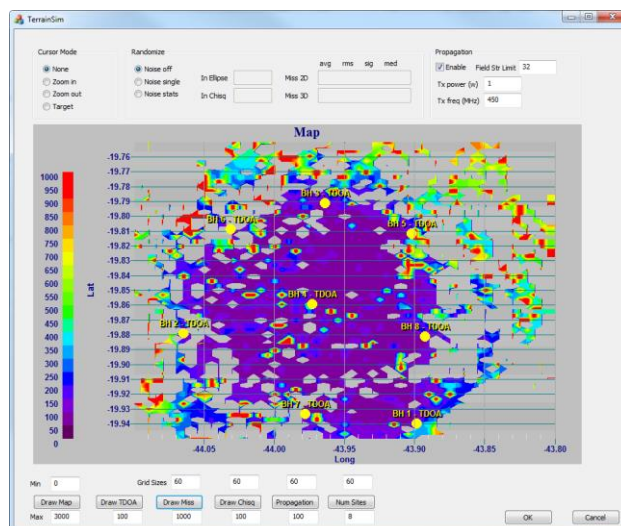
5(e) Сравнение числа станций в сети

Проведенный в предыдущих разделах анализ показывает, что зона охвата гибридной системы, в которой используются методы и AOA и TDOA, может быть больше зоны охвата такого же числа станций ТОЛЬКО TDOA. Для количественной оценки преимуществ реализации гибридной системы AOA/TDOA было выполнено моделирование числа станцией ТОЛЬКО TDOA, требуемых для обеспечения охвата, эквивалентного охвату сети в составе трех гибридных станций AOA/TDOA плюс одна станция TDOA, для случая передатчика мощностью 1 Вт.

На нижеследующих рисунках показаны результаты моделирования четырех гибридных станций – слева, и восьми станций ТОЛЬКО TDOA – справа.



Четыре площадки с гибридными станциями
(3 x ГИБРИДНЫЕ + 1 x TDOA)



Восемь площадок со станциями
ТОЛЬКО TDOA

На основании данного компьютерного моделирования ожидается, что для достижения того же или лучшего охвата и той же или лучшей точности в случае гибридного решения AOA/TDOA определения географического местоположения потребуется меньшее число станций, чем в случае решения ТОЛЬКО TDOA определения географического местоположения. Исходя из принятых в данном моделировании условий, гибридная система, в которой используются и метод AOA и метод TDOA, может обеспечить меньшую стоимость установки и меньшие текущие расходы. Учитывая особенности каждой конкретной ситуации, следует тщательно анализировать требования к охвату, рельеф, ограничения места размещения и другие факторы, указанные в таблице 1, с тем чтобы определить оптимальную схему конкретного применения.

6 Вывод

Согласно результатам компьютерного моделирования гибридное решение AOA/TDOA для определения географического местоположения может обеспечить ряд преимуществ по сравнению с системами TDOA и AOA. В представленном примере комбинированное решение AOA/TDOA обеспечивает лучший охват при меньшем числе площадок контроля.

Приложение 3

Практическое исследование использования системы TDOA вместе с существующей системой AOA

1 Введение

Контроль методом TDOA с помощью решетчатой сети⁷ обеспечивает покрытие сложной среды без значительных затрат, а также расширенные возможности контроля использования спектра и определения местоположения излучателя. Однако у метода TDOA имеются определенные недостатки по сравнению с системами AOA, и наоборот. Использование существующей системы AOA вместе с системой TDOA обеспечивает полезное комплементарное решение, устраняющее эти недостатки систем обоих типов.

⁷ Решетчатая сеть контроля состоит из датчиков контроля, антенн и дополнительных принадлежностей, предназначенных для контроля обширного района, разделенного на несколько небольших зон контроля (ячеек решетки).

В 2016 году в Токио (Япония) была выполнена экспериментальная программа простого контроля с использованием датчиков TDOA и AOA для изучения эффективности такой комбинированной системы контроля.

2 Цели и сценарии испытаний

Цель программы заключалась в определении наилучшей конфигурации системы TDOA в сочетании с существующей системой AOA с учетом сильных и слабых стороны обеих систем.

2.1 Совместное расположение датчиков TDOA и AOA

Датчики TDOA размещались вместе с существующими датчиками AOA в районе залива Токио и использовались для определения местоположения тестовых излучателей. Для измерений использовались обе системы.

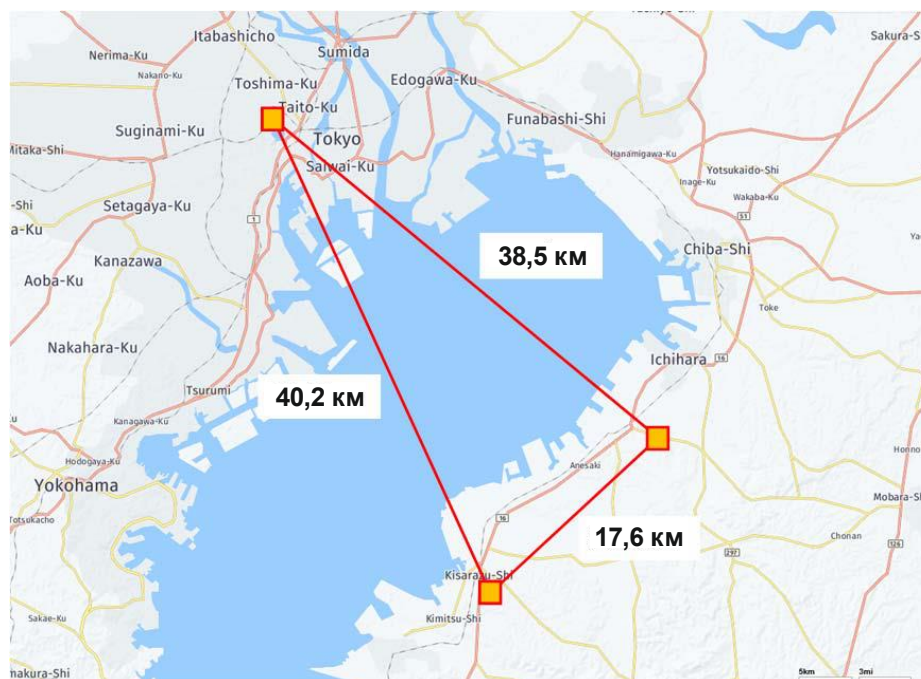
Датчики TDOA были подключены к всенаправленной антенне с использованием кабельной локальной сети.

В эксперименте использовался сигнал тестового передатчика, расположенного в известном месте.

На рисунке 18 показано расположение датчиков AOA и TDOA (3 датчика AOA и 3 датчика TDOA).

РИСУНОК 18

Расположение датчиков AOA и TDOA



Report SM.2211-18

2.2 Взаимодействие между фиксированными датчиками AOA и подвижными датчиками TDOA

Поскольку система AOA не позволяет оценить местоположение излучателя, пока не получены две или более линий пеленга, в том случае, когда может быть получена только одна линия пеленга, оценку местоположения излучателя можно получить с помощью подвижных датчиков TDOA.

Для выполнения этого в целях испытаний в местах установки каждого датчика AOA было размещено по одному фиксированному датчику TDOA. Кроме того, использовался один подвижный датчик TDOA.

Идея этой системы контроля заключается в том, что подвижная станция TDOA перемещается вдоль линии пеленга, измеренной датчиком АОА.

3 Результаты

3.1 Совместное расположение датчиков TDOA и АОА

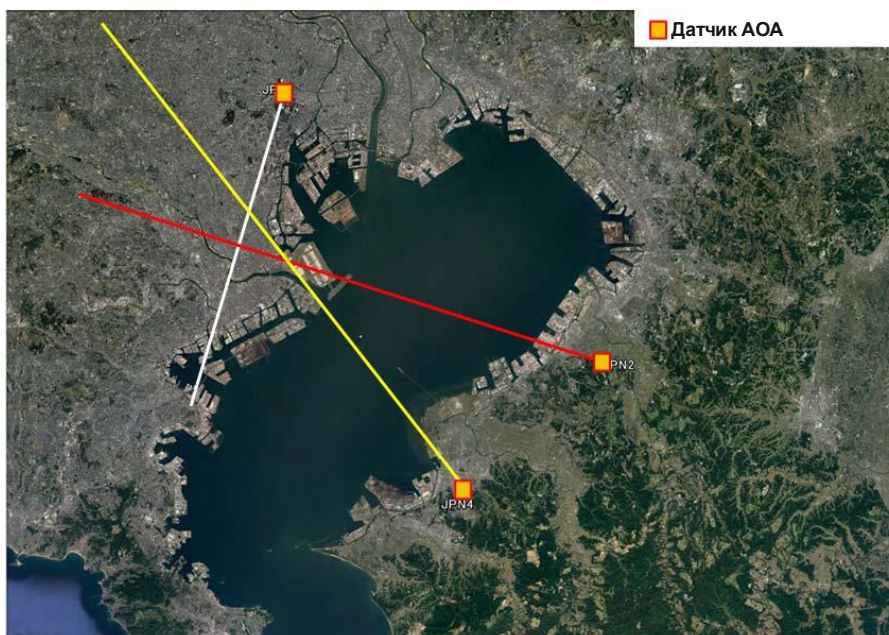
Был зафиксирован сигнал из известного местоположения излучателя и это местоположение излучателя было оценено с использованием системы АОА. Цветные линии (на рисунках – белые, желтые и синие) соответствуют линиям пеленга, рассчитанным методом АОА. Во время некоторых измерений линии пеленга не пересекались в одной точке, как показано на рисунке 19.

Причину этого определить не удалось, но, возможно, это связано с близко расположенным отражателем или другим искажением волнового фронта.

Профиль сигнала известного излучателя в данном случае выглядит следующим образом:

Частота:	1020,0 МГц
Занимаемая полоса частот:	500 кГц

РИСУНОК 19
Результат, полученный методом АОА



Report SM.2211-19

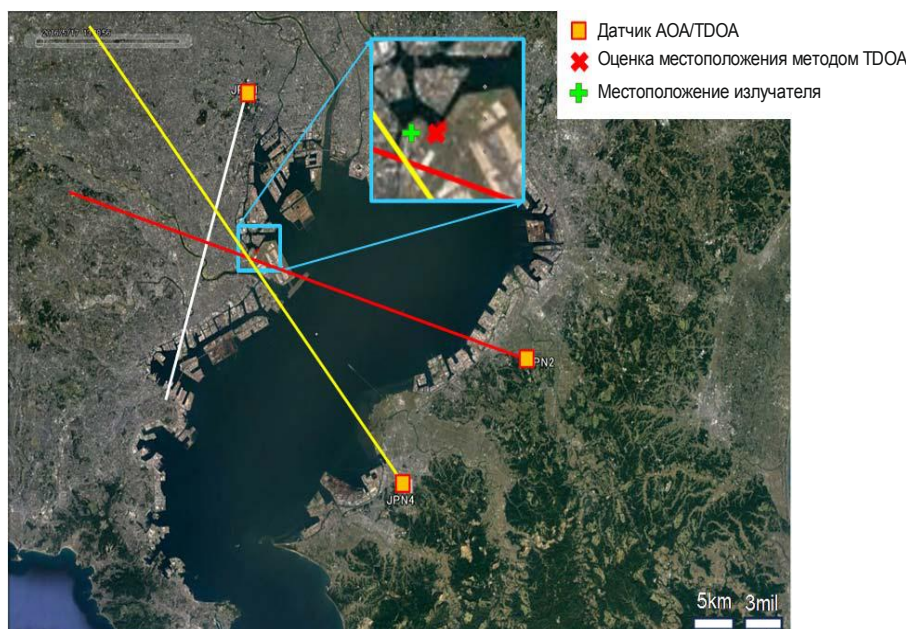
Тот же сигнал зафиксировали датчики TDOA, и было рассчитано местоположение источника.

Чтобы сузить область возможного местонахождения излучателя и минимизировать неопределенность, были продемонстрированы результаты как TDOA, так и АОА.

На рис. 20 показана оценка местоположения путем наложения данных АОА и TDOA.

РИСУНОК 20

Расчетное положение, определенное методом TDOA и АОА



Report SM.2211-20

Эти результаты показывают, что одновременные измерения методами АОА и TDOA могут уменьшить неопределенность и/или повысить точность измерения местоположения излучателя.

В некоторых случаях было обнаружено, что при определении местоположения излучателя хороший эффект дает работа одного датчиками АОА с двумя датчиками TDOA.

Если один из методов (АОА или TDOA) используется по отдельности, то для успешной оценки положения излучателя необходимы по крайней мере два датчика АОА или три датчика TDOA. Однако сигнал излучателя бывает невозможно обнаружить достаточным количеством датчиков вследствие многолучевости, препятствий, малой мощности сигнала и т. д.

Было установлено, что для решения этой проблемы можно успешно использовать комбинацию методов АОА и TDOA и оценить положение излучателя, даже если не удастся получить сигнал достаточного уровня с помощью достаточного количества датчиков.

На рисунке 21 показаны фактические результаты измерений, полученные от одной станции АОА и двух датчиков TDOA. Красная линия соответствует линии пеленга, а синяя – гиперболической линии, построенной по данным двух датчиков TDOA.

Видно, что одна линия пеленга и одна гиперболическая линия позволяют определить положение излучателя. По пересечению двух линий можно получить оценку местоположения излучателя (красный крестик).

РИСУНОК 21

Результат комбинации с одним датчиком АОА и двумя датчиками TDOA



Report SM.2211-21

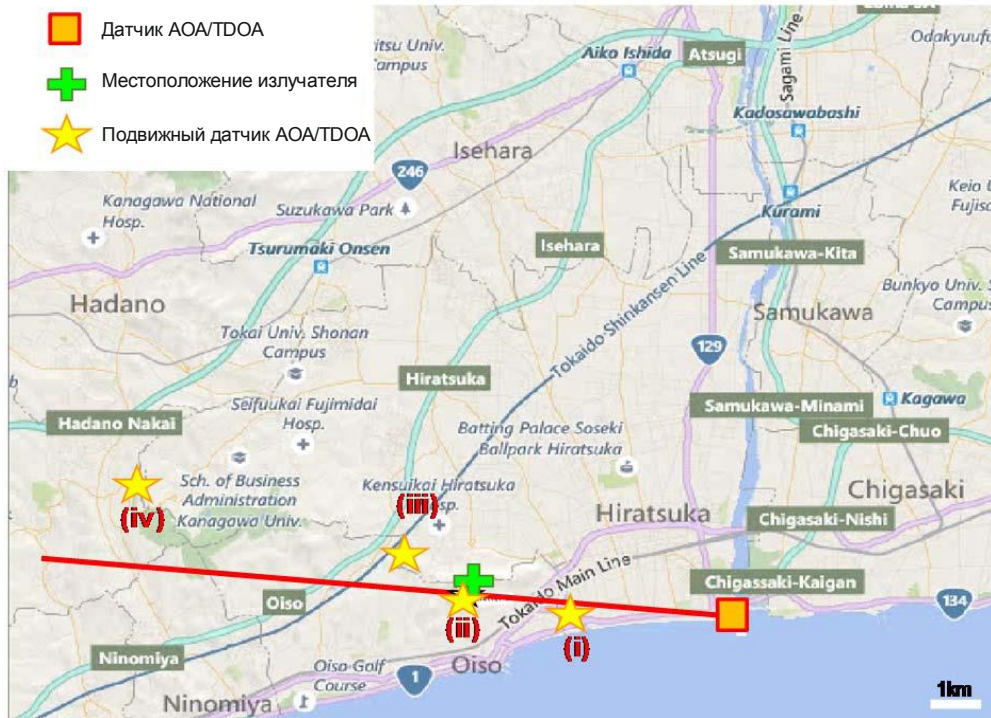
3.2 Использование подвижных датчиков TDOA вместе с фиксированным датчиком АОА

Если от одного из датчиков АОА получена линия пеленга, то можно предположить, что излучатель расположен на этой линии. В этом случае по линии пеленга от датчика АОА до ее дальнего конца может перемещаться подвижный датчик TDOA, и местоположение излучателя можно оценить по гиперболическим линиям, образованным другим фиксированным датчиком TDOA, расположенным в том же месте, что и датчик АОА.

Этот метод иллюстрирует рисунке 22.

РИСУНОК 22

Метод с использованием датчика АОА и подвижного датчика TDOA



Report SM.2211-22

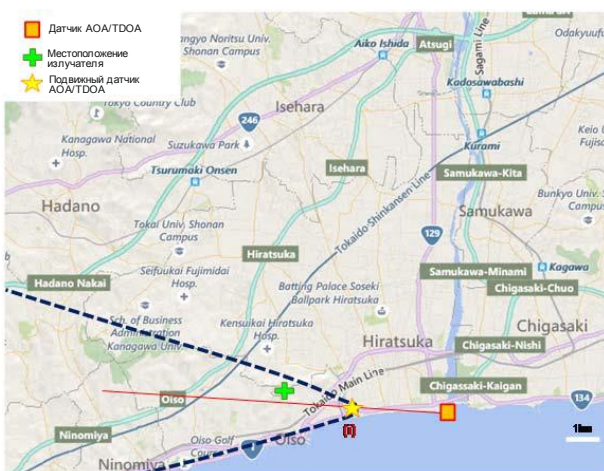
На рисунке 22 линия пеленга, полученная датчиком АОА, показана красной линией.

Подвижный датчик TDOA перемещался из положения вблизи датчика АОА в направлении дальнего конца линии пеленга. Это движение продолжалось до местоположения излучателя (от точки (i) до точки (iv), как показано на рисунках 23–26), и в каждом положении были построены гиперболические линии.

На рисунках 23, 24, 25 и 26 показаны результаты расчетов положения излучателя с помощью одного датчика АОА и двух датчиков TDOA.

РИСУНОК 23

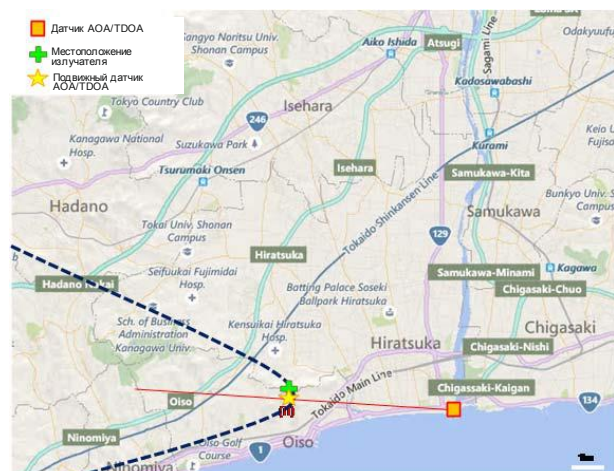
Оценка положения в точке (i)



Report SM.2211-23

РИСУНОК 24

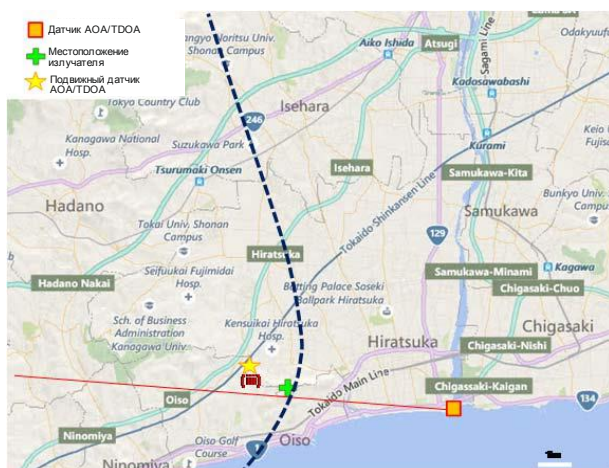
Оценка положения в точке (ii)



Report SM.2211-24

РИСУНОК 25

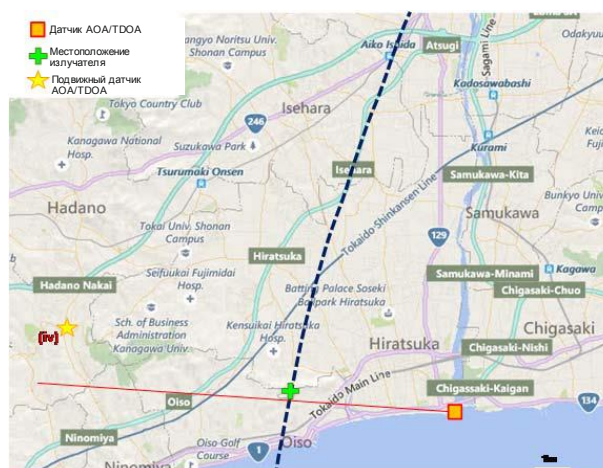
Оценка положения в точке (iii)



Report SM.2211-25

РИСУНОК 26

Оценка положения в точке (iv)



Report SM.2211-26

Результат, рассчитанный в точке (i), не указывает на действительное положение, поскольку расчетная разница во времени прихода превысила время распространения радиоволн между датчиками TDOA.

Расстояние между датчиками TDOA на рисунке 23 составляло 3,0 км, а время прохождения этого расстояния радиоволнами равнялось 10 мкс. Расчетное значение разницы во времени прихода по алгоритму TDOA составило 9,99 мкс.

Это означает, что местоположение излучателя не может находиться между двумя датчиками, где оно может быть определено датчиками TDOA.

Расстояние между датчиками TDOA на рисунке 24 составляло 5,0 км, а время прохождения этого расстояния радиоволнами равнялось 16,7 мкс. Расчетное значение разницы во времени прихода по алгоритму TDOA составило 16,6 мкс.

Расчеты для положений (iii) и (iv) дали хорошие результаты, поскольку местоположение излучателя последовательно оказывалось между двумя датчиками.

Расстояние между датчиками TDOA на рисунках. 25 и 26 составляло соответственно 6,6 км и 12,55 км с временем прохождения радиоволн 22 мкс и 41,7 мкс. Разница времени прихода, рассчитанная по алгоритму TDOA, составила 11,74 мкс и –8,42 мкс.

4 Заключение и предмет для изучения в будущем

В некоторых областях, где системы AOA уже развернуты, система контроля TDOA может использоваться в качестве дополняющей.

В настоящем Приложении продемонстрировано, как система контроля TDOA работает совместно с существующим датчиком AOA. В результате был выявлен ряд преимуществ взаимодействия систем TDOA и AOA.

- Преимущество 1: сравнивая результаты TDOA и AOA, можно уменьшить неопределенность расчетного местоположения излучателя.
- Преимущество 2: комбинируя линии пеленга, полученные методом AOA, с гиперболической линией, полученной методом TDOA, можно оценить положение излучателя при меньшем количестве датчиков.

- Преимущество 3: даже при отсутствии физической сети датчиков TDOA возможно совместное использование систем AOA и TDOA для определения местоположения излучателя с одним датчиком AOA и двумя датчиками TDOA (при этом по крайней мере один из них должен быть подвижным).

Эксперименты, описанные в данном Приложении, проводились с системой TDOA без постоянного сетевого соединения и постоянно установленных датчиков.

Подвижная система TDOA не может принимать сигнал в каждой точке измерения одновременно, но если гиперболические линии сочетаются с результатом AOA, она хорошо работает и позволяет определить местоположение излучателя.

Кроме того, она может повысить надежность существующих станций/сетей контроля AOA благодаря дополнительным датчикам TDOA.
