

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Отчет МСЭ-R SM.2211
(06/2011)

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 Приложении 1 к Резолюции 1 МСЭ-R. 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
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая 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 1 МСЭ-R.

Электронная публикация
Женева, 2011 г.

© ITU 2011

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

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

(2011)

Содержание*Стр.*

1	Введение.....	1
2	Обзор технологии TDOA.....	1
3	Сильные и слабые стороны метода TDOA по сравнению с традиционным методом AOA ..	2
4	Резюме.....	6
5	Справочные документы.....	7

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.

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 перекрестной корреляции одного сигнала, поступающего в два приемника. Оценка TDOA является задержкой, которая соответствует максимуму функции перекрестной корреляции. Зная местоположение каждого приемника, можно найти оценку местоположения источника излучений 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.

¹ В методе, основанном на напряженности поля принимаемого сигнала (RSS), для вычисления пункта расположения источника используется измеренное во многих пунктах измерения отношение мощности сигнала. Метод RSS 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.

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 АОА

Для лучшего понимания TDOA дадим краткий сравнительный обзор сильных и слабых сторон этого метода по сравнению с методом АОА. Следует отметить, что методы TDOA и АОА являются взаимодополняющими методами определения географического местоположения. Системы определения географического местоположения, в которых используются оба эти 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 перекрестной корреляции сигнала, и что измерительные приемники ретранслируют дискретизированные 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 АОА на основе корреляционного интерферометра (CI). Корреляционная интерферометрия – это метод АОА, 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. 5.)

ТАБЛИЦА 3-1
Сильные стороны метода TDOA

Более простые требования к антенне	Антенна является дешевой, несложной и может иметь небольшой размер. Приемники TDOA могут использовать одну простую антенну (например, несимметричный или симметричный вибратор). В отличие от систем АОА 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 в местах, имеющих архитектурные ограничения, или при согласовании условий размещения со сторонними организациями.
Более простые требования к выбору места и калибровке	Требования к выбору места являются менее жесткими, чем для АОА, и калибровка практически не требуется. За счет этого обеспечивается большая гибкость при выборе места в системе 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. В отличие от этого, места в системе АОА должны выбираться таким образом, чтобы свести к минимуму искажение фронта волны, обусловленное вторичными излученными локальных препятствий, отражениями от земли и изменением проводимости почвы. Некоторые антенные решетки системы АОА должны быть калиброваны после установки на месте, 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 АОА [2]. Проблемы выбора места в системе АОА подробно рассматриваются в главах 4.7.2.3.1.2 и 2.6.1.3.

ТАБЛИЦА 3-1 (продолжение)

<p>Широкополосные сигналы, сигналы с низким ОСШ, а также сигналы малой длительности</p>	<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>
<p>Сложность системы</p>	<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>
<p>Подавление некоррелированных шумов и помех</p>	<p>С помощью корреляционной обработки, используемой в TDOA, можно подавлять сигналы на совпадающей частоте, совпадающий по времени шум и сигналы помех, которые некоррелированы между местами проведения измерений. 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 перекрестной 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>
<p>Определение географического местоположения внутри помещения, на стадионе или на территории учебного заведения</p>	<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 напряженности поля принимаемого сигнала (RSS), как правило, превосходит метод TDOA в условиях повышенной многолучевости и короткого расстояния, в особенности для узкополосных сигналов.</p>

ТАБЛИЦА 3-1 (окончание)

<p>Ослабление влияния когерентных помех на совпадающей частоте (многолучевости) при определенных условиях</p>	<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 местами проведения измерений ⁽⁵⁾, что обеспечивает высокую эффективность в условиях густонаселенных городских районов ⁽²⁾.</p>
<p>Соображения относительно конфигурации</p>	<p>Оба метода, TDOA и AOA, обеспечивают наибольшую точность, если источник сигнала расположен в центре периметра, образованного местами проведения измерений.</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 перекрестной 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

Узкополосные сигналы	<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 AOA эффективно работают с узкополосными и немодулированными сигналами, а также широкополосными сигналами.</p>
Нет возможности наведения и центрирования при помощи одной станции	<p>Для методов наведения и центрирования требуется как минимум две станции TDOA, из которых хотя бы одна является мобильной, а также канал передачи данных⁽¹⁾.</p> <p>В методах AOA определение географического местоположения наведением и центрированием 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>
Более высокоскоростные каналы передачи данных	<p>Системам TDOA, передающим дискретизированные 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 AOA требуются более низкие скорости передачи данных, поскольку на центральную станцию передаются только некоторые характеристики сигнала, такие как пеленг, частота и время.</p>
Чувствительность к источникам декорреляции сигнала	<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 AOA и некоторые усовершенствованные системы AOA (использующие метод MUSIC) нечувствительны к декорреляции сигнала между местами проведения измерений. Усовершенствованные системы AOA, в которых имеется корреляция с опорными сигналами, чувствительны к декорреляции сигнала.</p>
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 синхронимпульсы. 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 перекрестная корреляция сигнала, они не подвержены этой проблеме.</p>

ТАБЛИЦА 3-2 (окончание)

Скорость вычисления при определении географического местоположения	Дискретизированные 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. Типовые скорости определения географического местоположения могут составлять порядка 1 фиксации в секунду методом TDOA 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.
Малая пригодность для одновременного определения географического местоположения многих источников излучения	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. Скорость передачи данных в TDOA может быть снижена в случае обеспечения вспомогательных данных путем синхронизации сигнала (установления TOA) в каждом приемнике.
Нет возможности определения местоположения из одной точки (SSL)	Для построения линии положения 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. Метод AOA может использоваться при определении местоположения из одной точки.
Соображения относительно конфигурации	Оба метода, TDOA и AOA, обеспечивают наибольшую точность (наилучший показатель GDOP), если источник сигнала расположен в центре периметра, образованного местами проведения измерений. Непосредственно за пределами области, ограниченной местами проведения измерений, точность определения местоположения методом TDOA убывает быстрее, чем точность метода AOA. 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.
Автономный анализ с помощью измерений от одной станции	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.

⁽¹⁾ Для наведения и центрирования при помощи лишь одной переносной станции могут использоваться методы RSS.

4 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.

5 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.
-