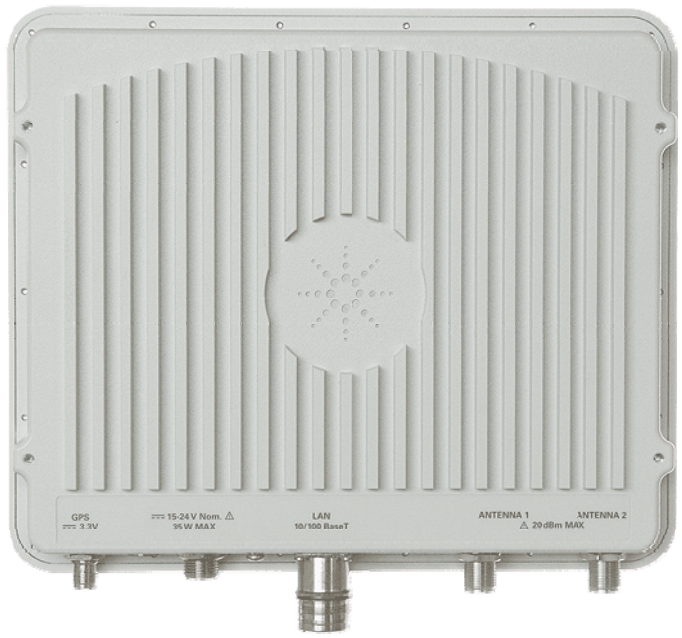
Основы спектрального мониторинга, радиочастотного регулирования и геолокации источников радиоизлучения



Мониторинг радиосигналов систем беспроводной связи, как правило, требуется различным операторам связи, органам качества, государственного контроля и регулирования. Применение систем спектрального мониторинга может варьироваться от проверки каналов передачи известных сигналов до нахождения и определения несанкционированных передатчиков. Традиционные методы спектрального мониторинга основаны на использовании анализаторов спектра с высокими параметрами и оцифровщиков, обычно работающих в качестве отдельных систем. С возрастанием необходимости в контроле сигналов в широком диапазоне спектра, системы спектрального мониторинга эволюционировали в недорогие системы из сенсоров, которые совместно производят мониторинг спектра в широком географическом пространстве. Эта статья описывает различные проблемы и методы спектрального мониторинга в ВЧ/СВЧ диапазоне, а также рассматривает необходимое оборудование для его выполнения. Мы рассмотрим основные задачи и проблемы автоматизации для различных применений систем мониторинга, а также представим общие принципы построения удаленных сетей сенсоров для нахождения положения источников радиоизлучения.

Agilent Technologies

Введение

Спектральный мониторинг известных и неизвестных сигналов беспроводной связи требуется различным операторам связи, органам качества, государственного контроля и регулирования. Применение систем спектрального мониторинга может варьироваться от измерения сигналов на известных несущих частотах, до поиска сигналов в широком диапазона спектра с занесением показаний в журнал истории. Во всех этих случаях к оборудованию системы мониторинга предъявляются серьезные требования по частотному диапазону, скорости сканирования, разрешению и динамическому диапазону. Также важно наличие возможностей сохранения данных и автоматизации работы системы для произведения различных действий после нахождения интересующего сигнала. В одних случаях спектральный мониторинг необходим для подтверждения соответствия с требованиями органов контроля и регулирования, в других требуется нахождение неизвестного источника излучения. В процессе поиска могут возникать задачи определения типа и параметров сигнала, включая длительность передачи, число перехватов, частоты, занимаемой полосы, тип модуляции и положение источника излучения. На Рисунке 1 показана типичная система спектрального мониторинга, которая может содержать стационарные или мобильные приемники, расположенные на расстоянии друг от друга. Несколько приемников могут быть объединены в единую сеть для улучшения параметров системы и повышения точности определения положения источника.

Рисунок 1 – Система спектрального мониторинга и контроля

Частотное регулирование

Одной из задач систем спектрального мониторинга является частотное регулирование лицензионной и нелицензионной области спектра с набором известных частот и параметров модуляции. Эти системы используются для подтверждения согласованности и совместимости различных беспроводных сетей. Обычно в частотном регулировании заинтересованы такие организации как органы государственного контроля, радиочастотные центры, операторы беспроводной мобильной связи, станции теле- или радиовещания, навигационные службы и др. Кроме того, органы регулирования, контролирующие использование спектра, лицензирование и распределение частот в национальном и интернациональном регионе, зачастую устанавливают системы мониторинга покрывающие плотно заполненные области спектра. Международный телекоммуникационный союз (ITU) назначил организацию Радио-телекоммуникации (ITU-R) производить регулирование РЧ спектра и спутниковых передач на мировом уроне. Национальные органы регулирования, такие как FCC, NTIA, OFCOM, SRRC, и ANFR, контролируют использование спектра на национальном уровне. Эти агентства должны иметь четкое представление об использовании спектра, поскольку может возникнуть риск потери прибыли от лицензирования частот, в связи с их несанкционированным использованием, а также могут произойти случаи интерференции сигналов различных систем.

Контроль

Системы спектрального мониторинга, сконфигурированные для задач контроля неизвестных или несанкционированных передач, должны позволять производить измерения кратковременных сигналов, которые возникают в неизвестный момент и находятся в эфире в течение короткого времени. Кроме того, обычно требуется определить информативную часть, содержащуюся в этих сигналах. Контроль сигналов беспроводной связи широко развит в различных областях, таких как деятельность правоохранительных органов, пограничной охраны и военной разведки. Во многих случаях определение информационного содержания предполагает прослушивание сигнала после его демодулирования. Системы спектрального контроля должны поддерживать работу как внутри помещения, так и в полевых условиях. Пеленгация и геолокация являются важной функцией систем спектрального контроля, в связи с распространенной необходимостью нахождения источника сигнала. В государственных и военных структурах эта область обычно называется Радиотехническая разведка (SIGINT).

Обнаружение интерференции

Системы спектрального мониторинга, сконфигурированные для задач обнаружения интерференции потенциально вредных сигналов, должны позволять проводить специфические измерения для различных применений. Некоторые применения требуют проведения спектрального мониторинга в широком географическом пространстве, в то время как другие будут ограничены территорией здания или комнаты. Например, при тестировании ЭМС бортовой оснастки самолетов, системы спектрального мониторинга могут быть использованы для исследования и анализа интерференции при включении подсистем. В некоторых ситуациях, когда радиосигналы могут вызывать интерференцию на чувствительных элементах, таких как специализированное медицинское или измерительное оборудование, роль системы спектрального мониторинга становиться крайне важной для обеспечения корректной работы приборов. Например, администрация больниц часто вводит ограничения на пользование беспроводными и мобильными телефонами в операционных и палатах реабилитации. Ряд исследований показал, что использование мобильных телефонов вблизи чувствительных элементов может нарушить корректность работы монитора электроэнцефалограммы и других приборов [1, 2]. Поскольку трудно предотвратить ситуацию попадания мобильных телефонов в эти специализированные помещения, возникает необходимость в мониторинге спектра и срабатывания сигнализации при возникновении нежелательной передачи сигнала.

Геолокация источника

Определение расположения источника излучения особенно востребовано в задачах контроля и определения интерференции. Методы пеленгации и геолокации обычно основаны на использовании приемников с направленными антеннами. В этом случае могут быть использованы различные техники, основанные на определении принимаемой мощности сигнала, триангуляции и угла падения, которые позволят определить положение источника в двухмерном или трехмерном пространстве. Повышение точности определения положения источника может быть достигнуто путем увеличения числа приемников и добавлением функций GPS, которые определяют временную базу и позиционирование приемников. Другие методы геолокации включают измерение

разности времен приема сигнала (TDOA) и функции корреляции, которые применяются при цифровой обработке сигналов, одновременно захваченных многими приемниками. Временная синхронизация между множеством приемников может быть получена с помощью GPS или сетевым временным протоколом IEEE 1588, разработанным компанией Agilent и принятым организацией IEEE в 1992 году.

Наиболее важной и сложной задачей для любой системы мониторинга является быстрое обнаружение, идентификация и определение параметров сигнала, который в свою очередь может быть кратковременным, низкоуровневым и скачкообразным (ППРЧ). Направление развития современной беспроводной связи заключается в большем использовании цифровой модуляции, повышении несущей частоты и расширении занимаемой полосы сигнала. С повышением несущей частоты увеличиваются потери при распространении сигнала между передатчиком и приемником системы мониторинга, что осложняет детектирование нужного сигнала из-за снижения отношения сигнал/шум (SNR) на приемнике. Кроме того, расширение занимаемой полосы сигнала приводит к снижению спектральной плотности мощности на приемнике, снова усложняя детектирование сигнала. Во многих случаях система спектрального мониторинга, расположенная в определенной фиксированной точке, может не справляться с поставленными задачами из-за рассмотренных выше проблем, в связи с чем возникает необходимость в использовании многих приемников или сенсоров, связанных в одну сеть и расположенных ближе к нужному источнику сигнала.

Оборудование и методы спектрального мониторинга

Наиболее упрощенная конфигурация системы спектрального мониторинга включает в себя приемник, антенну, малошумящий усилитель (МШУ), дисплей и программное обеспечение, с функциями автоматизации поиска и сохранения данных. Традиционные анализаторы спектра, работающие по принципу свипирования, могут предоставить минимальный набор функций для использования их в качестве приемника системы мониторинга. Анализатор спектра является очень гибкой платформой с высоким динамическим диапазоном, широким частотным диапазоном и дисплеем с возможностями установки ограничительных линий по амплитуде для детектирования различных сигналов. Как правило, между анализатором спектра и антенной устанавливается малошумящий усилитель (МШУ) для повышения чувствительности анализатора спектра путем снижения коэффициента шума измерительной системы и повышения уровня сигнала. Большинство высококачественных анализаторов спектра, таких как анализаторы компании Agilent серии PSA или MXA, имеют опциональные встроенные МШУ. Многие анализаторы спектра имеют встроенные функции аналоговой демодуляции, но часто они требуют перестройки полосы обзора и центральной частоты анализатора спектра для соответствия параметрам интересующего сигнала. При изменении частотных параметров анализатора очень важно, чтобы внутренний гетеродин мог быстро перестроиться под эти параметры, иначе будет невозможно детектировать кратковременные сигналы и сигналы с перестройкой частоты. Другие типы приемников, которые специально разработаны для задач спектрального мониторинга, используют быстро настраивающиеся гетеродины и высокоскоростные оцифровщики для мгновенного анализа спектра с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Например, система E3238S, производимая компанией Agilent, оснащена шестью процессорами, которые параллельно друг другу делают БПФ, что позволяет получить крайне высокие скорости анализа спектра. При выборе архитектуры приемника, предназначенного для системы спектрального мониторинга, необходимо проверить качество и параметры системы для выполнения поставленных задач. В таблице 1 рассмотрены важные характеристики, на которые необходимо обратить пристальное внимание при выборе приемника для системы спектрального мониторинга.

Таблица 1. Требуемые характеристики приемника системы спектрального мониторинга.

Характеристики	Функции
Широкий частотный диапазон	Установка начальной и конечной частоты
Высокие скорости измерений	Быстро подстраивающийся гетеродин и обработка спектра с использованием БПФ с узкими полосами пропускания
Высокая чувствительность	МШУ и узкие полосы пропускания
Хорошее разрешение	Форма фильтров
Выход ПЧ или видео выход	Аналоговый выход после понижающего преобразования с широкой полосой пропускания. Полезно с использованием функции «Handoff» приемника
Графический дисплей	Визуальный анализ сигналов и возможность установки ограничительных линий.
Локальный или удаленный контроль	Программируемое управление. Поддержка интерфейсов подключения LAN, USB, IEEE-488

Существует несколько архитектур построения приемников, которые будут удовлетворять требованиям из таблицы 1. Например, на Рисунке 2 показана блок-диаграмма супергетеродинной архитектуры, которая используется в большинстве современных анализаторах спектра. Принимаемый сигнал на входе фильтруется и переносится на промежуточную частоту (ПЧ), при помощи смесителя и гетеродина. Широкий набор различных частот может быть измерен благодаря свипированию гетеродина и измерению амплитуды сигнала после фильтра ПЧ анализатора спектра. В задачах спектрального мониторинга крайне важно иметь быстрое свипирование гетеродина для поиска кратковременных сигналов и повышения вероятности их перехвата. В случаях, когда повышение разрешения и чувствительности требует узких фильтров ПЧ, скорость свипирования пропорционально возрастает, уменьшая тем самым вероятность перехвата сигналов. Для преодоления ограничений по времени свипирования множество архитектур приемников используют цифровые фильтры ПЧ и цифровую обработку. Использование цифровых фильтров может дать существенное уменьшение времени свипирования по сравнению с аналоговыми фильтрами. Цифровая обработка сигналов (DSP) на ПЧ также дает возможности для гибкой демодуляции сигналов в случаях, когда требуется дополнительный анализ и идентификация сигналов. На Рисунке 2 также показано ответвление сигнала ПЧ на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), где детектируется амплитуда сигнала и затем обрабатывается цифровыми процессорами DSP.

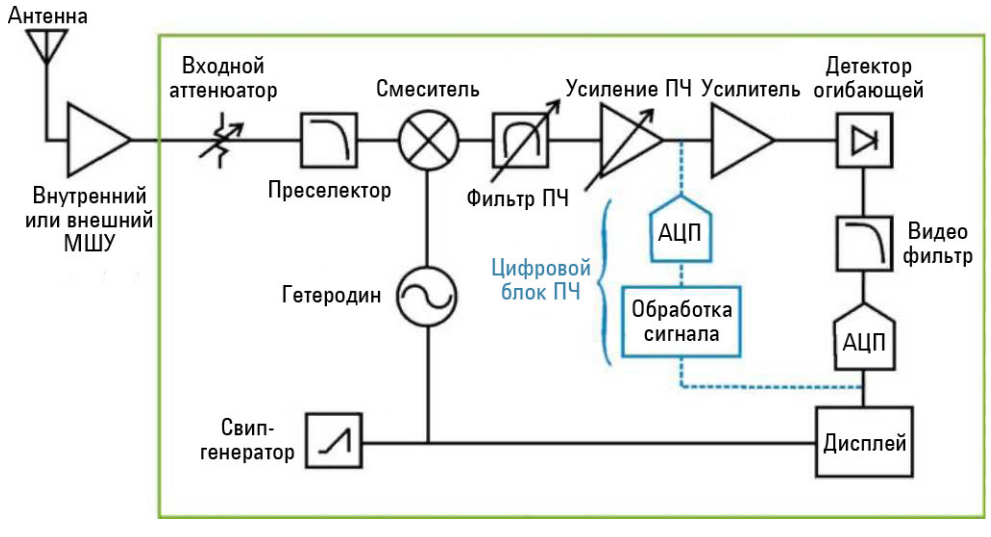


Рисунок 2 – Блок-диаграмма супергетеродинного приемника

Оборудование и методы спектрального мониторинга (продолжение)

В системах, где требуется демодуляция сигнала, полоса фильтра ПЧ должна быть шире полосы модуляции, иначе часть сигнала будет ослаблена. В традиционных аналоговых системах связи, использующих амплитудную и частотную модуляцию, полоса сигнала обычно была много меньше 200 кГц. В этом случае фильтр ПЧ корректно пропустит нужный сигнал при хорошей чувствительности системы, получающейся благодаря относительно узкой полосе фильтра ПЧ. С повышением скорости передачи данных и введением схем с цифровой модуляцией, занимаемая полоса сигнала увеличилась до 5-20 МГц для многих радиочастотных систем, таких WiMAX™[1] и 3GPP LTE. Поскольку увеличилась полоса сигнала, то полоса пропускания фильтров ПЧ также должна быть увеличена для корректной демодуляции и идентификации сигналов. К сожалению, повышение полосы пропускания приводит к снижению отношения сигнал/шум на приемнике. Для преодоления этих ограничений в системах спектрального мониторинга повышается коэффициент усиления МШУ и антенны, или производится приближение самой системы к источнику излучения. На практике эти способы имеют собственные ограничения. Например, повышение коэффициента усиления может привести к появлению продуктов интермодуляционных искажений, когда приемник работает в присутствии других сигналов с высокой амплитудой. Повышение усиления направленной антенны может потребовать увеличения ее размеров и снижению рабочего диапазона частот. Приближение системы мониторинга к источнику излучения может быть непрактичным по множеству причин, в частности, когда неизвестно его положение. Следовательно, необходимо увеличение числа приемников, расположенных в разных местах, что поможет компенсировать проблемы, связанные с недостаточным отношением сигнал/шум при мониторинге широкополосных высокочастотных сигналов. Это может привести к серьезному увеличению стоимости системы. Сейчас появилась возможность использовать недорогие РЧ сенсоры N6841A, разработанные компанией Agilent, которые компенсируют рассмотренные выше проблемы и не требуют серьезных финансовых вложений.

Традиционная система спектрального мониторинга, конфигурируемая анализатором спектра или VXI приемником, обычно устанавливается в защищенную от атмосферных воздействий камеру или строение, и ее подключение к антеннам осуществляется через коаксиальные кабели. Эти обычно автономные установки могут также содержать несколько «handoff» приемников для демодуляции и сохранения данных интересующих сигналов. Handoff приемники используют перенесенный на ПЧ аналоговый сигнал и работают параллельно с основным приемником. Они демодулируют интересующие сигналы, при этом не прерывая функции поиска, реализуемые основным приемником. Для проведения спектрального мониторинга в широком частотном диапазоне могут потребоваться различные антенны для покрытия интересующих частот. В этом случае, к приемнику подключается радиочастотный мультиплексор, который производит переключения между разными антеннами, расположенными на установке или на передвижном средстве.

В отличие от традиционных систем спектрального мониторинга, РЧ сенсоры могут быть использованы в качестве понижающего преобразователя и системы захвата сигналов с функциями передачи дискретных IQ данных по сети на удаленную систему (ПК с программным обеспечением), контролирующую анализ сигналов, демодуляцию и хранение данных. Типичный недорогой РЧ сенсор, такой как Agilent N6841A, представляет собой компактный защищенный от атмосферных воздействий приемник, который легко может быть установлен на мачте, в стойке, на крыше автомобиля или выполнять функцию переносной портативной системы. Для повышения гибкости приемника, РЧ сенсор оснащается цифровым широкополосным трактом ПЧ и программным обеспечением, контролирующим его работу. На Рисунке 3 показана упрощенная блок-диаграмма сенсора N6841A. Сенсор имеет два антенных входа для подключения широкополосных и разнесенных антенн. Система также имеет набор фильтров, осуществляющих преселекцию. Эти фильтры полезны при поиске слабых сигналов на фоне сигналов высокого уровня, они были разработаны для уменьшения стоимости сенсора и повышения достоверности измерений.

1("WiMAX," "Fixed WiMAX," "Mobile WiMAX," "WiMAXForum,"the WiMAX Forum logo, "WiMAXForum Certified," товарный знак WiMAX Forum. Все остальные перечисленные торговые марки являются собственностью их обладателей)

Понижающее преобразование на ПЧ осуществляется при помощи тюнера, аналогично архитектуре традиционного анализатора спектра. Оцифрованный сигнал ПЧ попадает на цифровой понижающий преобразователь (ЦПП) для переноса ПЧ на полосу частот видеосигнала. Полностью цифровой тракт ПЧ сенсора N6841A имеет регулируемую полосу пропускания с предельным значением 20 МГц, позволяющую анализировать сигналы различных стандартов и типов модуляции. Интегрированное программное обеспечение позволяет управлять запуском приемника, настройками БПФ и памятью для записи сигналов. Полученные данные передаются по сети на удаленный сервер, где производится идентификация сигналов и запись данных. Приемники могут быть синхронизированы по временной базе сети IEEE 1588 или по GPS (опционально). Основная идея построения распределенной системы спектрального мониторинга на базе РЧ сенсоров заключается в получении возможности установки сенсоров в непосредственной близости от передатчиков и обработке полученных данных на центральном компьютере.

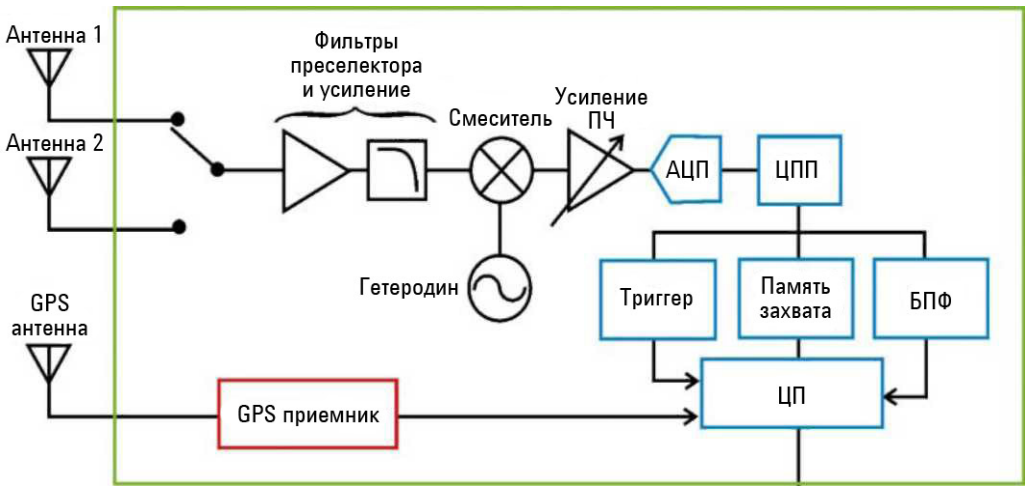


Рисунок 3 – Блок-диаграмма РЧ сенсора N6841A, совмещающего ВЧ/УВЧ приемник с программной обработкой сигналов

Расположение приемника и Усиление сигнала

Расположение оборудования для спектрального мониторинга и приемных антенн сильно влияет на качество приема сигнала. Ослабление распространяющегося сигнала (потери на трассе) и ближняя интерференция могут оказать влияние на возможность приемника обнаружить сигнал от источника излучения. Величина потерь на трассе представляет собой функцию, зависящую от несущей частоты и относительного расстояния между источником излучения и приемником. С повышением несущей частоты потери на трассе увеличиваются, что может привести к необходимости приблизить приемник к источнику. Интерференция, возникающая от сигналов в эфире, также влияет на качество приема. Например, когда приемник расположен поблизости от станции вещательного телевидения, базовой станции мобильной связи или радарной системы, может быть индуцирована значительная интерференция от помех, гармоник и интермодуляционных искажений [3]. Эти эффекты могут также привести к перегрузке приемника по входу из-за присутствия мощных передатчиков. Важно произвести первоначальное исследование спектральной обстановки в области предполагаемой установки приемника для определения наличия интерференции и мощных передатчиков, которые могут повлиять на качество приема.

Приемные антенны системы спектрального мониторинга обычно устанавливаются на высокие мачты, строения или холмы для уменьшения влияния эффекта многолучевого распространения, возникающего из-за влияния окружающей среды [4]. В идеальном случае антенны должны быть отделены от окружающих металлических объектов на расстояние нескольких длин волн, иначе могут возникать искажения. Даже металлическая мачта, на которую крепится антенна, может серьезно повлиять на усиление. Также другие антенны, находящиеся поблизости, могут ухудшить качество приема непредсказуемым образом. Правильное расположение антенны является важной составляющей для получения наилучшего качества приема системы спектрального мониторинга, особенно в случаях, когда ограниченное число высококачественных приемников расположено в широком географическом пространстве. С другой стороны, системы, построенные на базе недорогих РЧ сенсоров, имеют менее жесткие требования к антеннам из-за более плотного расположения приемников и их близости к источникам сигнала. На Рисунке 4 показан РЧ сенсор, расположенный на крыше, с подключенной к нему широкополосной антенной и второй антенной, расположенной на отдельной мачте. Сенсор располагается близко к антеннам для снижения потерь в кабеле, которые ухудшают коэффициент шума системы.

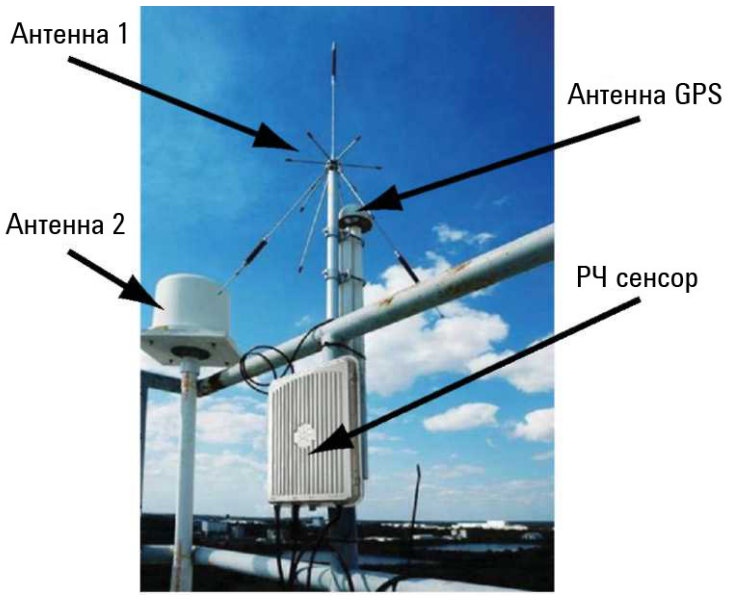


Рисунок 4 – РЧ сенсор и антенны, установленные на крыше

Расположение приемника и Усиление сигнала (продолжение)

В случаях, когда неизвестно положение источника сигнала, желательно использовать всенаправленные антенны для детектирования наземных сигналов. К сожалению, всенаправленные антенны имеют низкий коэффициент усиления, что не способствует улучшению отношения сигнал/шум. Повышение усиления антенны может улучшить отношение сигнал/шум, но в результате угол наилучшего приема будет определяться диаграммой направленности антенны. Если не использовать остронаправленные антенны (с большим усилением), которые физически или с помощью электроники осуществляют поиск направления источника, то есть вероятность не обнаружить сигнал неизвестного источника из-за низкого значения отношения сигнал/шум.

В современных системах беспроводной связи (мобильная связь, WLAN) используются более высокие несущие частоты, что дает большие потери в свободном пространстве при распространении радиосигнала, чем при использовании несущих частот диапазонов ОВЧ/УВЧ. На этих несущих частотах может появиться необходимость приближения приемника и антенны ближе к источнику излучения для получения лучшего отношения сигнал/шум. Улучшение качества сигнала, достигаемое путем приближения приемника к передатчику, называется «усиление при сближении». Например, представьте, что две системы связи работают на одном расстоянии между передающей антенной и антенной системы мониторинга. Одна система работает на несущей частоте 100 МГц с полосой сигнала 20 кГц. Другая система работает на несущей частоте 2,4 ГГц с полосой сигнала 20 МГц. Какое будет измеренное отношение сигнал/шум для каждой системы, предполагая в обеих системах одинаковую мощность передачи, усиление антенн, потери в кабелях и коэффициент шума приемника? Что внесет наибольший вклад разницу отношений сигнал/шум? Для того чтобы ответить на эти вопросы и определить характеристики каждой системы, необходимо рассчитать отношение сигнал/шум, используя выражение (1).

$$SNR = [P_T + G_T - P_L + G_R - C_L] - [-174 + NF + 10\log_{10}(BW)], \quad (1)$$

где

SNR = Отношение сигнал/шум на приемнике (дБм)

GR = Коэффициент усиления приемной антенны (дБ)

CL = Потери в кабеле между антенной и приемником (дБ)

PT = Мощность передаваемого сигнала (дБм)

GT = Коэффициент усиления антенны передатчика (дБ)

NF = Коэффициент шума приемника (дБ)

PL = Потери на трассе (дБ)

BW = Полоса пропускания приемника (Гц)

Потери на трассе (PL), представляют собой функцию зависимости от несущей частоты и расстояния между приемной и передающей антенной. Они увеличиваются при повышении несущей частоты и увеличении расстояния. Потери на трассе могут быть вычислены по выражению (2) [6].

$$PL = K + 20\log_{10}(/) + 20\log_{10}(R), \quad (2)$$

где

f = Частота (МГц)

R = Расстояние (км)

K = 32.45 (для R в км)

Расположение приемника и Усиление сигнала (продолжение)

В качестве примера допустим, что источник передает сигнал с мощностью +20дБм (100 мВт) на расстоянии 5 км от системы мониторинга. Имея антенну с усилением 0 дБ, коэффициентом шума приемника 14 дБ и потерями в кабеле 0 дБ, для сигнала с частотой 100 МГц и полосой 20 кГц отношение сигнал/шум будет равно +51 дБ. Для сигнала с частотой 2,4 ГГц и полосой 20 МГц отношение сигнал шум будет равно -7 дБ. В этих условиях будет легко измерить сигнал с частотой 100 МГц, и очень сложно измерить сигнал с частотой 2,4 ГГц. В таблице 2 приведено сравнение потерь на трассе и отношения сигнал/шум для этих двух систем. Разница в отношении сигнал/шум напрямую зависит от несущей частоты и полосы сигнала. В этом примере отношение сигнал/шум при частоте 2,4 ГГц уменьшается на 28 дБ относительно сигнала с частотой 100 МГц за счет увеличения потерь на трассе из-за повышения частоты и еще на 30 дБ за счет увеличения шумов системы при работе с широкополосным сигналом. На практике улучшение коэффициента шума системы и усиления антенны, представляется сложной задачей, поэтому улучшение отношения сигнал/шум для систем, работающих с сигналами на высоких частотах, обычно требует уменьшения расстояния между передатчиком и приемником. «Усиление при сближении» превзойдет дополнительные потери на трассе, возникающие при работе с сигналами на высоких несущих частотах. Продолжим рассматривать наш пример. Если требуемое минимальное отношение сигнал/шум равно 10 дБ, то «усиление при приближении» должно увеличить это отношение на 17 дБ (от -7 дБ). Получается, что необходимо уменьшить расстояние с начальных 5 км до 0,7 км. Важно заметить, что для покрытия того же пространства, на котором осуществляется мониторинг спектра, при работе с сигналами на высоких частотах, необходимо увеличивать плотность расположения приемников.

Таблица 2. Рассчитанные параметры двух радиочастотных систем

Базовые параметры

P_T =+20дБм

G_T = 0 дБ

G_R = 0 дБ

C_L = 0 дБ

N_F = 14 дБ

R = 5 км

	Система 1	Система 2
Частота (МГц)	100 МГц	2400 МГц
Полоса (МГц)	20 кГц	20 МГц
Потери на трассе (дБ)	86	114
Отношение сигнал/шум (дБ)	51	-7

Расчет потерь на трассе был проведен для условий идеальной линии радиовидимости (LoS) без учета эффектов фединга (fading), многолучевого распространения и затенения. Многолучевое распространение может создать дополнительные потери сигнала на приемнике и зачастую привязывается к глубине фединга. Было проделано много исследований по определению влияния многолучевого распространения в различных условиях, но в общем случае для системы, работающей на частотах диапазона ОВЧ/УВЧ, глубина фединга приблизительно равна 5 – 40 дБ в городской местности [7,8,9].

Расположение приемника и Усиление сигнала (продолжение)

Увеличение усиления при сближении является лишь одним из нескольких техник борьбы с пагубными эффектами многолучевого распространения. Другой относительно простой техникой является использование второй антенны, что может уменьшить влияние федингa путем разделения по поляризации или пространству. Известно, что две антенны, разведенные на расстояние большее К длин волн, или ориентированные таким образом, чтобы получить поперечную поляризацию, будут иметь некоррелированные характеристики многолучевых сигналов. Это становиться возможным благодаря тому, что одна антенна будет принимать сигналы с высоким влиянием федингa, в то время как другая антенна будет иметь корректное значение уровня сигнала. Система мониторинга будет снимать показания с двух антенн, выбирая для анализа сигнал с наибольшим уровнем мощности. Большинство систем мониторинга оборудованы РЧ мультиплексорами для добавления дополнительных антенн. Например, приемник N6841A компании Agilent имеет три антенных порта – два порта мультиплексирования и один опциональный для подсистемы GPS. Два порта мультиплексирования могут быть использованы для борьбы с эффектами федингa путем разделения антенн по поляризации/пространству, или для расширения частотного диапазона, используя несколько антенн на различные частоты. Серьезное влияние эффектов многолучевого распространения сигнала на качество работы системы выявило необходимость в понимании и симулировании этих эффектов для измерения их воздействия на систему. Компания Agilent опубликовала специальную заметку, где рассматриваются эти темы на примере измерений с помощью прибора Agilent PXB N5106A – симулятора каналов для систем MIMO (системы со многими входами и выходами) [10].

Задачи и методы идентификации сигналов

Как было замечено ранее, каждая система спектрального мониторинга должна иметь достаточно высокие характеристики, чтобы обеспечить быстрое обнаружение, идентификацию радиосигналов и найти местоположение источника сигнала. При этом сигналы могут быть кратковременными, прерывающимися и широкополосными. Потенциально интересующие сигналы могут быть сигналами систем мультимедийного вещания, мобильной связи, передачи базовых станций, беспроводной локальной сети (WLAN), РЧ идентификации (RFID), спутниковые сигналы и др. В любой момент времени измерений спектр в широком частотном диапазоне будет содержать множество этих типов сигналов. Одна из важных функций системы спектрального мониторинга заключается в отсеивании ненужных сигналов для измерения только интересующих сигналов.

Рациональное фильтрование полученных данных может быть сложной задачей для человека, работающего оператором на анализаторе спектра. Автоматизирование процесса поиска сигналов значительно упрощается при использовании программного обеспечения спектрального контроля Agilent N6820E. Когда эта программа работает с высококачественным приемником, таким как приемник VXI системы спектрального мониторинга E3238S или РЧ сенсором N6841A, процесс автоматизированного детектирования сигналов может быть усовершенствован путем использования энергетических порогов и настройки сигнализации для установки критериев срабатывания системы по уровню сигнала. На Рисунке 5 показан типовой пример использования РЧ сенсора с различным программным обеспечением. РЧ сенсор может непрерывно передавать поток данных при установленной полосе пропускания 200 кГц и менее. Из-за задержек в сети 10/100 TCP/IP сигналы с большими полосами пропускания (до 20 МГц) требуют временного кодирования. Программа N6820A обрабатывает данные интересующих сигналов. Она может иметь функцию автоматического распознавания неизвестного типа модуляции (опция MR1) и записи сигналов. Захваченные данные могут быть впоследствии проанализированы с помощью различных программных пакетов.

Как показано на Рисунке 5, РЧ сенсоры могут работать с программой Agilent 89601A, которая может быть использована для демодулирования захваченных сигналов с аналоговой и цифровой модуляцией, или с программой Agilent N6829A для прослушивания записанных аудио файлов.

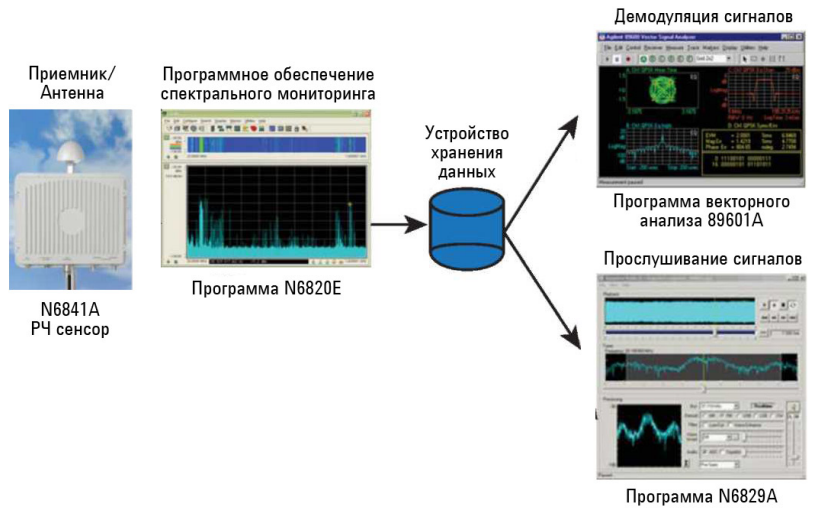


Рисунок 5. Программное обеспечение спектрального мониторинга осуществляет сбор данных для их последующей обработки в других программах.

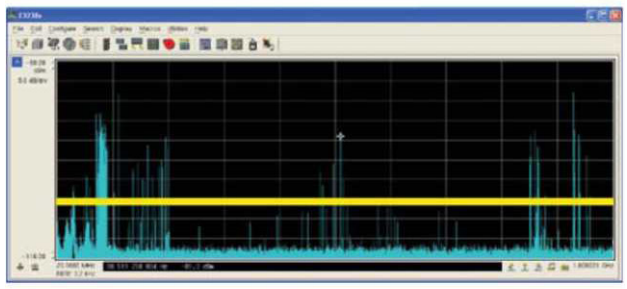
Ограничительные линии и системы сигнализаций важны для каждой системы мониторинга. Эти сигнализации могут быть настроены на поиск и обнаружение сигналов неизвестных источников, а также использоваться для подтверждения соответствия частоты известных передатчиков. Энергетические пороги детектирования могут быть определены пользователем по уровню мощности или автоматически по шумовому порогу из эфира. Например, на Рисунке 6 показаны три возможных типа установки энергетических порогов детектирования, доступных в программе спектрального мониторинга N6820A. На верхнем графике показан «порог по уровню», который аналогичен ограничительной линии в анализаторе спектра. Порог по уровню хорошо подходит для случаев, когда шумы системы находятся на одном ровном уровне и не меняются с течением времени, что характерно для ОВЧ/УВЧ и СВЧ диапазона спектра. На центральном графике показана функция установки «автоматического порога», которая автоматически принимает форму шумов. Эта функция полезна, когда шумовой порог неровный и меняется с течением времени, что характерно для ВЧ диапазона спектра. На нижнем графике показана функция установки «порога из эфира», которая использует временное накопление спектра, включая все существующие сигналы, а затем устанавливает энергетический порог детектирования исходя из накопленной формы спектра.

Другой возможностью автоматического определения интересующих сигналов является использование программной опции «универсальных детекторов сигналов» к программному обеспечению спектрального мониторинга N6820A (опция USD). Эта опция позволяет автоматически идентифицировать сигналы по их РЧ характеристикам. Универсальные детекторы (классификаторы) включают в себя фильтры по занимаемой полосе и форме сигнала, частотные планы, широкополосные детекторы (по форме спектра) и узкополосные критерии (тип модуляции, символьная скорость и т.д.). Комбинация широкополосных и узкополосных технологий эффективно работает с заполненным спектром и увеличивает вероятность перехвата. Таким образом, система может осуществлять поиск сигналов из эфира в широком частотном диапазоне и применять функции детектирования сигналов для отброса всех не интересующих сигналов. При нахождении интересующего сигнала только он будет определен и записан для дополнительного анализа. С появлением новых сигналов обновляется история событий, заложенная в программе спектрального мониторинга.

В журнал истории событий автоматически записываются все сигналы, превышающие установленный энергетический порог при каждом свипировании. Ниже указаны параметры, которые будут отображаться в журнале истории событий. По этим параметрам можно также настроить сигнализацию, которая будет осуществлять запуск различных функций системы спектрального мониторинга.

- Частота
- Полоса сигнала
- Процент заполнения
- Дата и время первого перехвата
- Дата и время последнего перехвата
- Статистика амплитуды
- Длительность

(a) Порог по уровню



(b) Автоматический порог

(c) Порог из эфира

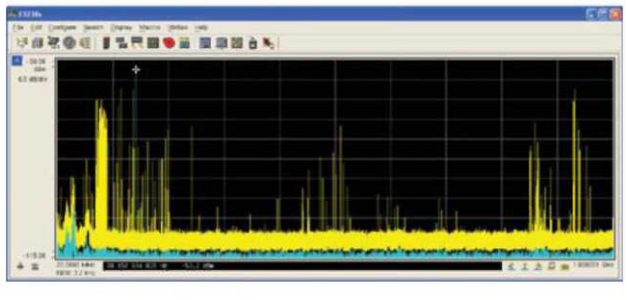


Рисунок 6. Техники установки энергетического порога детектирования

Объединение сенсоров в сети и геолокация

Направлением развития современных систем связи является увеличение несущей частоты и полосы сигнала, что выражается в повышении потерь на трассе и увеличении шумов приемника. Как было показано ранее, вероятность обнаружения сигнала напрямую зависит от несущей частоты и полосы модуляции. Это направление характерно также для беспроводной связи, особенно в мобильной связи 3G и 4G поколения, что приводит к повышению плотности расположения базовых станций. Некоторые исследовательские лаборатории изучают пикосотовые и фемтосотовые топологии для более высоких частот и пониженных уровней мощности сигнала [11, 12]. Комбинация условий снижения мощности сигнала и повышения потерь на трассе приводит к снижению вероятности перехвата широкополосного сигнала. Для преодоления этих сложностей можно улучшить параметры системы спектрального мониторинга путем увеличения «усиления при сближении» приемников, или другими словами установить систему мониторинга ближе к источнику излучения. Увеличение усиления при сближении требует определенных затрат. Если расстояние между приемником и источником сигнала требуется сократить вдвое для получения хорошего отношения сигнал/шум, то эквивалентная зона покрытия снижается до К от исходной. Для поддержания достаточной вероятности детектирования мобильные или портативные приемники могут перемещаться по различным географическим зонам вблизи источника излучения. Альтернативным подходом является увеличение плотности расположения приемников, включая фиксированные РЧ сенсоры, которые могут быть объединены в сети, что повышает параметры всей системы спектрального мониторинга. Эти сети приемников могут также использоваться для определения положения источника излучения, что называется термином геолокация.

Объединение сенсоров в сети было изучено и осуществлено в последние годы для различных областей применения, включая датчики состояния окружающей среды, датчики отслеживания производственного процесса и в других сферах. Однако, использование сетей датчиков для реализации спектрального мониторинга является относительно новой идеей. Сети РЧ сенсоров спектрального мониторинга осуществляют либо когерентные, либо некогерентные техники измерений распределенных приемников, объединенных по проводной сети. Приемники в сетях сенсоров, использующие метод некогерентного детектирования, будут иметь более высокую скорость измерений благодаря уменьшению операций обработки сигналов и взаимодействию между приемниками в сети. Однако, некогерентное детектирование может не дать возможности отделить сигналы от шумов. С другой стороны, сети РЧ сенсоров, использующие метод когерентного детектирования, объединяющий захваченные сигналы с многих приемников, дает существенное повышение вероятности детектирования по сравнению с методом некогерентного детектирования. Один из методов когерентной обработки использует функцию кросс-корреляции. В этом случае, измерения двух различных сенсоров подвергаются кросс-корреляции, что дает подавление шумовых характеристик системы. В теоретических пределах по времени, требующегося на кросс-корреляцию, при длительной обработке вероятность детектирования понижается и уже не так сильно зависит от шумового порога системы. Однако, даже при работе с сигналами короткой длительности, метод когерентного детектирования с использованием нескольких сенсоров дает большие преимущества относительно метода некогерентного детектирования.

Для сравнения между техникой некогерентного детектирования и использования сетей сенсоров на Рисунке 7 показана вероятность детектирования сигнала при использовании трех сенсоров, работающих с использованием кросс-корреляции и традиционной техники некогерентного детектирования. На этом рисунке синие зоны имеют более 80% вероятность детектирования сигнала с частотой 1,6 ГГц, мощностью 300 мВт и полосой 200 кГц. Красные зоны имеют вероятность детектирования менее 20%. Как показано на рисунке 7а, сенсоры, работающие независимо друг от друга, имеют очень небольшую зону с высокой вероятностью перехвата. Для традиционных некогерентных схем качество детектирования ограничено параметрами приемника и усилением сигнала.

Объединение сенсоров в сети и геолокация (продолжение)

На рисунке 7б показана вероятность детектирования с использованием тех же сенсоров, но с применением когерентного приема. Как видно на рисунке вероятность детектирования существенно увеличивается по сравнению с некогерентным приемом.

Другое преимущество использования РЧ сенсоров заключается в возможности геолокации источников сигналов в окружающей среде. Определение расположения радиопередатчиков, которые находятся как внутри здания, так и снаружи, применяется в различных областях, таких как поисковые и спасательные работы, отслеживание дорогого оборудования, поиск несанкционированных передатчиков и др. Было разработано много различных методов определения положения источников радиосигнала, основанных на уровне принимаемого сигнала, угле приема, времени приема, и разницы во времени приема. Большинство этих методов требуют снятия измерений с трех различных точек. Независимо от измеряемых параметров – уровень мощности, время приема и др., геолокация источника осуществляется путем математической триангуляции принимаемых сигналов. Когерентная обработка сигналов, измеренных РЧ сенсорами, идеально подходит для осуществления геолокации. Функция кросс-корреляции выдает значение разницы времени приема, что важно для геолокации. Имея значение разницы времени приема между тремя и более РЧ сенсорами, можно провести триангуляцию и определить положение источника по отношению к приемникам. Например, на Рисунке 8 показаны измерения с двух РЧ сенсоров с применением кросс-корреляции. На этом рисунке кросс-корреляция между измерениями сенсора 1 и сенсора 2 показана синим цветом, а кросс-корреляция между сенсором 2 и сенсором 3 показана желтым. Корреляция между сенсором 1 и сенсором 3 не показана, но она требуется для определения положения источника сигнала. Пики на графике соответствуют относительному времени между измерениями сигналов на связанных приемниках. Все измерения корреляции на этом рисунке поступают от одного источника, передающего широкополосный сигнал формата CDMA. Положения источника рассчитывается из разницы во времени между пиками на графике кросс-корреляции. В этом примере разница времени между пиками корреляции сенсоров 1-2 и 2-3 примерно равна 10 мкс. Используя измерения разницы времени между пиками пар сенсоров 1-2/1-3 и 2-3/1-3, может быть определено положение источника. Очевидно, что использование большего количества сенсоров приводит к значительному повышению геолокации, особенно в средах с многолучевым распространением сигналов.

(а) Традиционное некогерентное детектирование (б) Когерентное детектирование

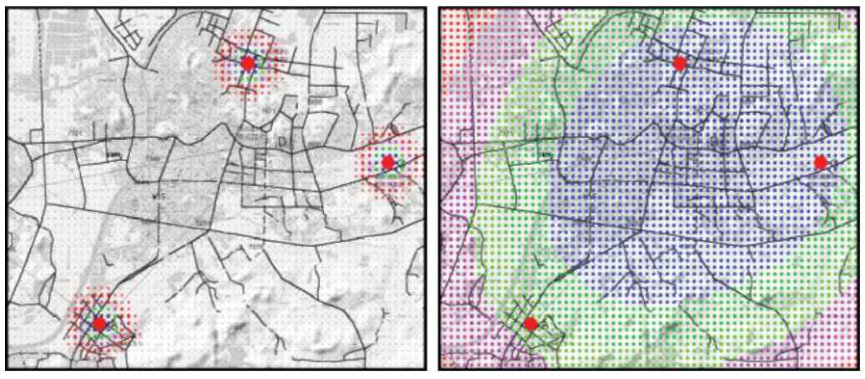


Рисунок 7 – Вероятность детектирования с использованием когерентной и некогерентной схемы

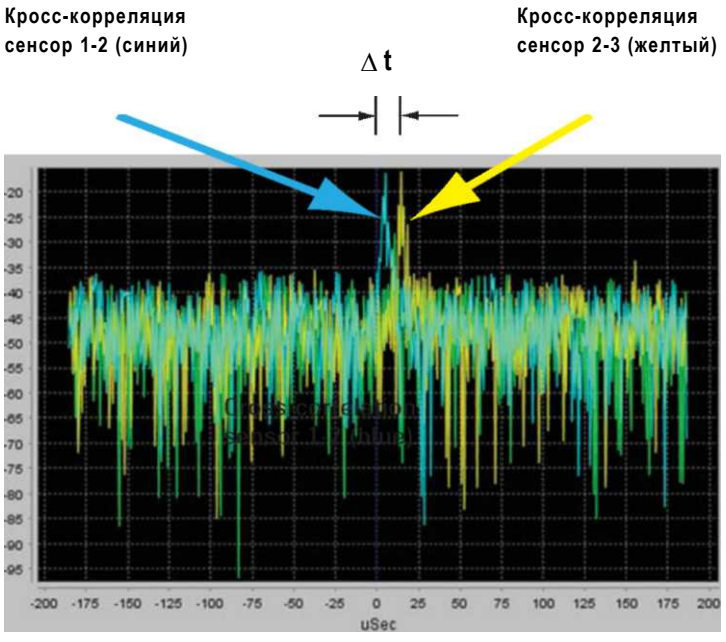


Рисунок 8 – Кросс-корреляция между несколькими сенсорами

Заключение

Эта статья описывает методики, проблемы и направления развития спектрального мониторинга и радиочастотного контроля. В статье были рассмотрены новые технологии, основанные на использовании недорогих РЧ сенсоров, которые улучшают качество приема системы мониторинга и позволяют реализовать функции геолокации источников излучения.

Литература

[1] E.D. Nanoun, V.G. Tsiafakis, E.S. Kapareliotis, A.I. Sotiriou, C.N. Capsalis, "Electromagnetic compatibility between GSM base station and EEG signal," IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications 2005, vol. 1, pp 535 - 538, Aug. 2005.

[2] J.L. Silberberg, "Achieving medical device EMC: the role of regulations, standards, guidelines and publications," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2001, vol. 2, pp. 1298 - 1303, Aug. 2001.

[3] International Telecommunications Union Radiocommunication Sector (ITU-R), Supplement to Handbook on Spectrum Monitoring, 2008.

[4] A.G. Kanatas, , N. Papadakis, P. Constantinou, "An empirical model for high elevation angle land-mobile satellite channels at urban environment," IEEE Communications Letters, vol., issue 4, pp 92-93, April 1998.

[5] M. Albani, P. Focardi, A. Freni, S. Maci, "Pattern distortion for corrugat horns open-ended on a finite ground plane," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1999, vol. 4, pp 2272-2275, July 1999.

[6] Modern Antenna Design, Thomas A. Milligan, Wiley Interscience, 2nd edition, 2005.

[7] K.H. Loso, W.T. Barnett, A. Vigants, F.G.; Inserra, J.R.; Brockel, "US Army tactical LOS radio propagation reliability," Proceedings of the Tactical Communications Conference, 1992. Vol. 1 Tactical Communications: Technology in Transition, pp 109-117, April 1992.

[8] T.S. Seidel, S.Y. Rappaport, "Simulation of UHF indoor radio channels for open-plan building environments, IEEE 40th Vehicular Technology Conference, pp 597-602, May 1990.

[9] H. Suzuki, "A Statistical Model for Urban Radio Propogation, H. Suzuki," IEEE Transactions on Communications, vol. 25, issue 7, pp 673-680, Jul. 1977.

[10] Agilent Application Note "MIMO Channel Modeling and Emulation Test Challenges," lit. number 5989-8973EN, Oct. 2008.

[11] C. Edwards, "The future is femto, " Engineering & Technology, vol.3, issue 15, pp 70-73, Sept. 2008.

[12] D. Das, V. Ramaswamy, "On the Reverse Link Capacity of a CDMA Network of Femto-cells," IEEE Sarnoff Symposium, 2008, pp 1-5, April 2008.

Web-ресурсы

Для получения дополнительной информации и литературы рекомендуется посетить сайт компании Agilent.

Agilent Email Updates

www.agilent.com/find/emailupdates

По этому адресу пользователь может получить новейшую информацию по выбираемым им изделиям и вопросам их применения.

LXI

www.lxistandard.org

LXI является стандартом, расширяющим возможности интерфейса LAN и позволяет обеспечить более простое и быстрое подключение оборудование. Компания Agilent является членом и одним из основателей LXI консорциума.

Устранение всех сомнений

Качественные показатели оборудования компании Agilent всегда следует поддерживать на таком уровне, как будто оно приобретено вновь. Выполнять калибровку (поверку) и ремонт оборудования с помощью компании, которая произвела его. Только компания Agilent может обеспечить поддержание качественных показателей работы оборудования на самом высоком уровне и его срочный ремонт.

Более полную информацию, касающуюся ремонта и калибровки, можно найти на сайте компании по адресу:

www.agilent.com/find/removealldoubt

www.agilent.com

Для получения дополнительной информации по продуктам компании Agilent Technologies, предназначенным для измерений и испытаний, а также по их применению и обслуживанию, пожалуйста, обращайтесь в Российское представительство компании Agilent Technologies по адресу:

Россия, 113054, Москва, Космодамианская набережная, д. 52, стр. 1
Тел: (495) 797 3963, 797-3900
Факс: (495) 797 3902, 797 3901
E-mail: tmo_russia@agilent.com

или посетите нашу страницу в сети Internet
по адресу:
www.agilent.ru

Технические характеристики и описания изделий, содержащиеся в данном документе, могут быть изменены без предварительного уведомления.

© Авторское право Agilent Technologies, Inc.,
2006

Отпечатано в России в Мае 2009 года **Номер публикации 5990-3861RU**

Agilent Technologies