

# Отчет МСЭ-R SM.2355-2

(06/2023)

Серия SM: Управление использованием спектра

## Развитие методов контроля за 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: <https://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: <https://www.itu.int/publ/R-REP/ru>.)

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

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

Электронная публикация  
Женева, 2025 г.

© ITU 2025

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.2355-2

## Развитие методов контроля за использованием спектра

(2015-2019-2023)

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

1	Введение.....	2
2	Обнаружение слабых сигналов.....	2
2.1	Синхронизованный усилитель.....	2
2.2	Корреляция.....	3
2.3	Статистические величины высших порядков (HOS).....	4
2.4	Циклическая стационарность.....	6
2.5	Адаптивное подавление шума.....	6
2.6	Резюме.....	7
3	Разделение сигналов на совпадающих частотах.....	7
3.1	Разделение в одном канале (восстановление сильного сигнала).....	7
3.2	Многоканальное разделение (пространственное формирование луча на основе спектра).....	9
3.3	Резюме.....	10
4	Определение местоположения в нескольких режимах (на основе сочетания технологий определения местоположения).....	10
4.1	Угол прихода.....	10
4.2	Разница времени прихода.....	10
4.3	Разница частоты прихода.....	11
4.4	Мощность прихода.....	11
4.5	Метод на основе информации идентификации.....	11
4.6	Резюме.....	11
5	Заключение.....	11
	Приложение 1 – Примеры применения передовых методов радиоконтроля.....	12
A1.1	Применение корреляции для обнаружения спутниковых помех.....	12
A1.2	Применение восстановления сильного сигнала в радиоконтроле спутников.....	15
A1.3	Применение одноканального ICA для разделения сигналов.....	16
A1.4	Пространственное формирование луча на основе спектра при осуществлении контроля в диапазоне ВЧ/ОВЧ.....	20
A1.5	Применение многоканального ICA для разделения сигналов.....	22

A1.6	Определение географического местоположения базовой станции GSM.....	25
A1.7	Применение малых спутников для контроля за использованием спектра .....	25
Приложение 2 – Примеры применения комбинированного метода определения географического местоположения.....		29
A2.1	Гибридный метод AOA/TDOA .....	29
A2.2	Гибридный метод TDOA/GROA.....	31
Список сокращений.....		38

## 1 Введение

Цель управления использованием спектра заключается в обеспечении максимально эффективного использования спектра, сведении к минимуму помех и исключении неразрешенного и ненадлежащего использования спектра. Контроль за использованием спектра – "глаза и уши" процесса управления использованием спектра – весьма необходим и важен для управления ресурсами спектра, радиостанциями различных типов и электромагнитной средой благодаря предоставлению ценных данных контроля, включая занятость спектра и характеристики сигналов, такие как напряженность поля, ширина полосы, тип модуляции, местоположение источников излучения и т. д.

Происходит непрерывное и стремительное развитие систем радиосвязи. В контексте использования спектра к новым технологиям, применяемым в системах радиосвязи, относятся, в частности, адаптивное использование частот, мультиплексирование на совпадающей частоте, широкополосный доступ, расширение спектра (расширение спектра с применением прямой последовательности и скачкообразной перестройки частоты) и т. д. Типичными примерами новых систем радиосвязи является радио с программируемыми параметрами и когнитивное радио. Соответственно, будущие системы контроля за использованием спектра должны обладать возможностями мониторинга новых технологий и систем радиосвязи, такими как обнаружение слабых сигналов, разделение сигналов на совпадающей частоте и определение местоположения в нескольких режимах на основе цифровой обработки сигналов (DSP), сети радиочастотных датчиков и т. д.

## 2 Обнаружение слабых сигналов

Для обнаружения слабых сигналов с низкой плотностью мощности необходимо повышать чувствительность систем радиоконтроля, так как многие новые системы радиосвязи работают на более низкой мощности, с более широкой полосой и на более высоких частотах.

В некоторых случаях сигналы могут быть слабее фонового шума. Вследствие этого сложно обнаружить и определить местоположение незаконных слабых сигналов с низкой плотностью мощности, используя существующие системы радиоконтроля, обладающие низкой чувствительностью. Для выделения сигналов из фонового шума в будущих системах контроля за использованием спектра должны применяться передовые технологии.

В нижеследующих разделах представлен ряд технологий, которые возможно использовать для обнаружения слабых сигналов.

### 2.1 Синхронизированный усилитель

В синхронизированном усилителе (LIA) для выделения из шума сигнала с известными или предполагаемыми внутренними параметрами используется опорный сигнал.

Самым распространенным сигналом передачи данных является синусоидальная волна, амплитуда и фаза которой могут быть определены с помощью синхронизированного усилителя (LIA). Пусть принятый сигнал описывается формулой:

$$x(t) = U_s \cos w_0 t + n(t), \quad (1)$$

где:

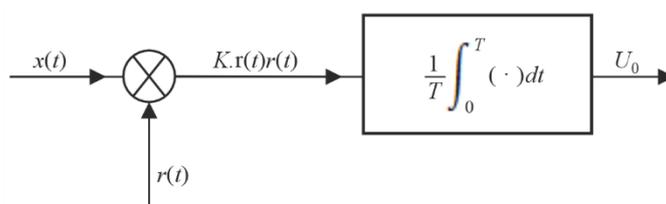
$U_s$ : амплитуда синусоидального сигнала;

$w_0$ : угловая частота;

$n(t)$ : фоновый шум.

$U_s$  можно оценить путем вычисления взаимной корреляции принятого сигнала и местного опорного сигнала, как показано на рисунке 1.

РИСУНОК 1  
Схема ЛИА



Report SM.2355-01

На рисунке 1  $r(t)$  – опорный сигнал с амплитудой  $U_r$  и фазой  $\varphi$ . Частота  $r(t)$  такая же, как и у  $x(t)$ , а  $K$  – постоянная множителя. Тогда выходной сигнал  $U_0$  можно описать следующим образом:

$$U_0 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T K[U_s \cos w_0 t + n(t)][U_r \cos(w_0 t + \varphi)] dt \quad (2)$$

Поскольку фоновый шум не имеет отношения к синусоидальному сигналу, аддитивный шумовой член в (2) можно опустить, записав эту формулу следующим образом:

$$U_0 = \frac{KU_s U_r}{2} \cos \varphi \quad (3)$$

Очевидно, что  $U_0$  достигнет максимального значения при  $\varphi = 0$ , и тогда можно будет получить точное значение  $U_s$ . В этой ситуации опорный сигнал  $r(t)$  и принятый сигнал  $x(t)$  имеют одинаковую фазу.

Выше показано, что ЛИА – это, по сути, применение метода взаимной корреляции между принятым сигналом и местным опорным сигналом. Основной задачей описанного выше ЛИА является восстановление частоты и фазы опорного сигнала, что достигается посредством цепей фазовой синхронизации.

## 2.2 Корреляция

### 2.2.1 Взаимная корреляция

Взаимная корреляция – это мера подобия двух сигналов как функция задержки времени, применяемая к одному из этих сигналов. Принимается, что:

$$x(t) = s_1(t) + n_1(t); \quad y(t) = s_2(t) + n_2(t); \quad (4)$$

и тогда:

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= E[y(t)x(t - \tau)] = E\{[s_2(t) + n_2(t)][s_1(t - \tau) + n_1(t - \tau)]\} = \\ &= R_{s_1 s_2}(\tau) + R_{s_1 n_2}(\tau) + R_{n_1 s_2}(\tau) + R_{n_1 n_2}(\tau) = R_{s_1 s_2}(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

является оператором среднего по ансамблю для получения среднего по нескольким выборкам.

Если предположить, что  $x(t)$  – предопределенная последовательность в приемнике, тогда для детектирования принятого сигнала  $y(t)$  можно использовать взаимную корреляцию, даже если  $y(t)$  слабее фона. Это связано с тем, что в данном случае целью вычисления взаимной корреляции является поиск предопределенного шаблона в принятой последовательности, которая обычно представляет собой псевдослучайную шумовую последовательность. Пик наблюдается только в том случае, когда полезный сигнал в принятом сигнале согласуется с предопределенной последовательностью. Этот принцип используется для обнаружения слабых сигналов в системах с расширением спектра методом прямой последовательности (DSSS).

### 2.2.2 Автокорреляция

Автокорреляция – это кросс-корреляция сигнала самого с собой. Если принять  $x(t) = s(t) + n(t)$ , где  $s(t)$  – периодический сигнал, а  $n(t)$  – шум, тогда автокорреляционную функцию можно определить как:

$$\begin{aligned} R_x(\tau) &= E[x(t)x(t-\tau)] = E\left\{[s(t)+n(t)][s(t-\tau)+n(t-\tau)]\right\} \\ &= E[s(t)s(t-\tau)] + E[n(t)n(t-\tau)] + E[s(t)n(t-\tau)] + E[n(t)s(t-\tau)] \\ &= R_s(\tau) + R_n(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{ns}(\tau) \end{aligned} \quad (6)$$

Если  $s(t)$  и  $n(t)$  не коррелируют, тогда:

$$R_{sn}(\tau) = R_{ns}(\tau) = 0; \quad R_x(\tau) = R_s(\tau) + R_n(\tau). \quad (7)$$

Если шумовой сигнал  $n(t)$  непериодический и его среднее значение равно нулю, тогда:

$$R_n(\tau) = 0 \quad (\text{где } \tau \neq 0). \quad (8)$$

Тогда:

$$R_x(\tau) = R_s(\tau).$$

Автокорреляция позволяет эффективно обнаруживать слабые сигналы. Упрощенно ее можно рассматривать как поиск сходства между данными разных наблюдений за одним и тем же сигналом. Очевидно, что такое сходство может иметь место только у полезного сигнала, формат которого (в том числе периодичность) известен заранее, и маловероятно, что оно может быть обусловлено аддитивным шумом. Таким образом автокорреляция представляет собой действенный способ устранения воздействия сильного аддитивного шума.

### 2.3 Статистические величины высших порядков (HOS)

В статистическом анализе сигналов среднее значение и корреляция (автокорреляция и взаимная корреляция) сигналов называются соответственно первым и вторым моментами. В основе описанных выше методов контроля за использованием спектра лежат моменты первого или второго порядка (см. "Синхронизированный усилитель", пункт 2.1). Однако сигналы систем связи и радиолокации несут в себе гораздо больше информации, чем первый и второй моменты, а также соответствующие им спектральные значения: это, в том числе, фаза сигнала, его нелинейность, негауссовский шум и симметрия. HOS широко применяются для устранения гауссовского шума, обнаружения негауссовских сигналов, нелинейности, переходных сигналов и т. д.

Как уже отмечалось выше, в основе метода HOS лежат следующие величины:

- полиспектры;
- статистические моменты высших порядков;
- полуинварианты.

Из них чаще всего используются третий момент, четвертый момент, биспектр и триспектр.

На рисунках 2 и 3, ниже, приведены результаты расчетов, иллюстрирующие сохранение фазовой информации в статистических величинах высших порядков. На обоих рисунках показан биспектр прямоугольного импульса, модулированного косинусоидальной несущей ( $\cos(2\pi f_c t + \varphi_0)$ ), где  $f_c$  – несущая частота, а  $\varphi_0$  – фаза несущей частоты. На рисунке 2 фаза несущей принята равной  $0^\circ$ , а на рисунке 3 – равной  $45^\circ$ . Если сравнить рисунки 2 и 3, можно видеть, что значения фазы  $\varphi_0$  отражаются как на уровне биспектра, так и на его тренде. Следовательно, данные биспектра можно использовать для извлечения фазы сигнала.

РИСУНОК 2

Биспектр прямоугольного импульса, модулированного косинусоидальной несущей ( $f_c = 2$  и  $\varphi_0 = 0^\circ$ )

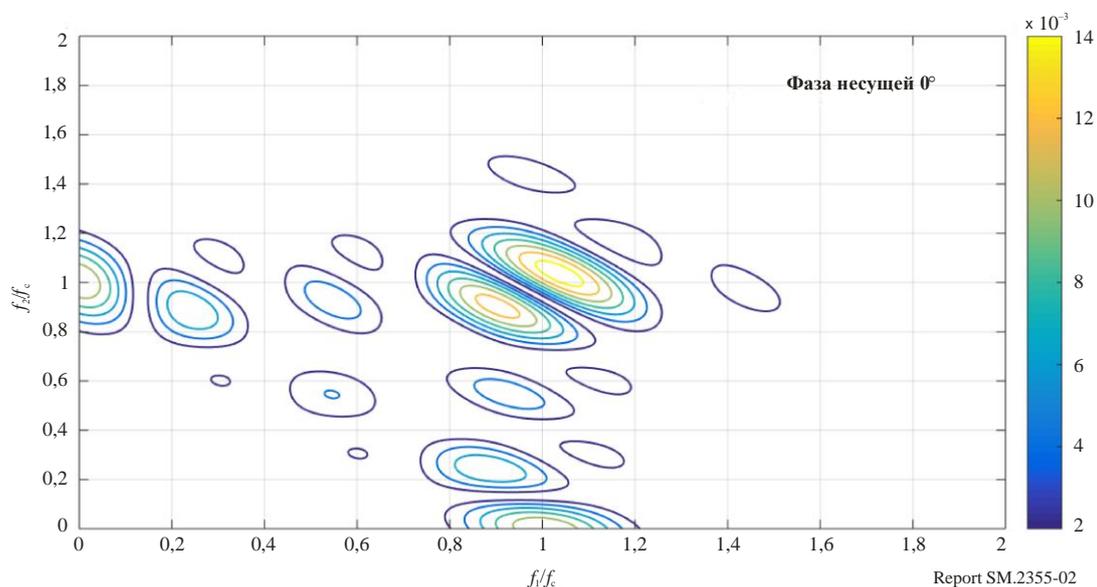
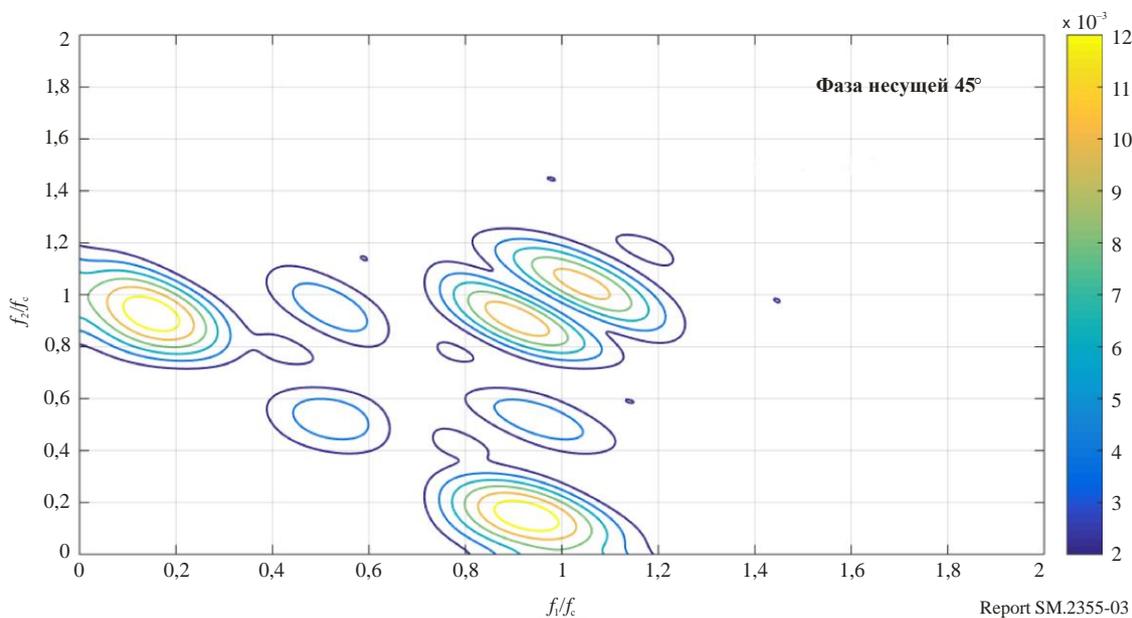


РИСУНОК 3

Биспектр прямоугольного импульса, модулированного косинусоидальной несущей ( $f_c = 2$  и  $\varphi_0 = 45^\circ$ )



Следует отметить, что моменты высших порядков, как и взаимную корреляцию, можно вычислять от двух и более различных сигналов. В таком случае спектр, биспектр и триспектр называют соответственно взаимным спектром, взаимным биспектром и взаимным триспектром.

В заключение данного раздела следует сказать, что метод НОС эффективен для обнаружения слабых сигналов, поскольку биспектр и триспектр аддитивного шума, имеющего обычно гауссовское распределение, могут равняться нулю. Поскольку статистические моменты высших порядков от полезного сигнала, как правило, ненулевые, то вычислив такие моменты, можно полностью устранить аддитивный шум из принятого сигнала. Таким образом, устранение аддитивного шума позволяет выделить сигнал из более сильного фонового шума.

## 2.4 Циклическая стационарность

Понятие циклической стационарности связано с сигналами, статистические характеристики которых меняются циклически в зависимости от времени. Многие сигналы современных систем связи можно смоделировать в виде циклически стационарных сигналов благодаря наличию у них периодичности по одному или нескольким параметрам, которая обусловлена модуляцией стационарных сигналов сообщений периодическими синусоидальными несущими, импульсными последовательностями или повторяющимися кодами. Периодичность может возникать и в результате других процессов, происходящих при дискретизации и мультиплексировании сигналов.

Вследствие периодичности параметров сигнала его функцию автокорреляции можно представить в виде ряда Фурье, по которому строится циклически стационарная сигнатура. При наличии параметра, меняющегося с периодом  $T_0$ , функция автокорреляции может быть разложена в ряд Фурье по циклическим частотам  $\alpha$  ( $\alpha = m/T$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$ ):

$$R_{xx}(t, t - \tau) = \sum_{\alpha} R_{xx}^{\alpha}(\tau) \exp(j2\pi\alpha t/T_0). \quad (9)$$

Коэффициенты разложения в ряд Фурье функции автокорреляции (9) дают циклическую автокорреляционную функцию  $R_{xx}^{\alpha}(\tau)$ .

Преобразование Фурье от циклической автокорреляционной функции (9) дают спектральную плотность корреляции  $S_{xx}^{\alpha}(f)$ :

$$S_{xx}^{\alpha}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}^{\alpha}(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau. \quad (10)$$

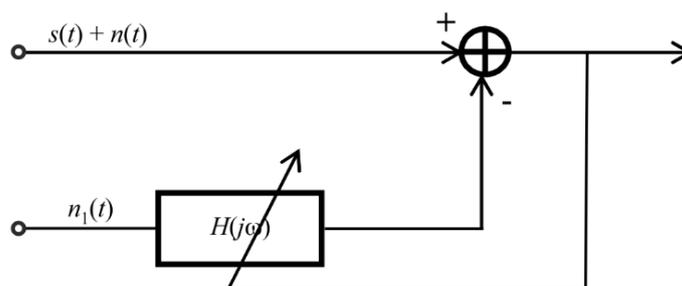
Представленную выше спектральную плотность корреляции (SCD) можно рассматривать как обобщение обычной спектральной плотности мощности. Такое обобщение связано с тем, что SCD является функций двух частот – спектральной частоты  $f$  и циклической частоты  $\alpha/T_0$ , тогда как PSD является функцией только спектральной частоты  $f$ .

В заключение следует отметить, что метод обнаружения сигналов по циклической стационарности применим к широкому кругу стандартов беспроводной связи, в том числе для сигналов CDMA и OFDM. Более того, опираясь на циклически стационарные характеристики, можно повысить эффективность метода обнаружения слабых сигналов. Это связано с тем, что аддитивный шум не имеет циклически стационарных характеристик, и поэтому спектральная плотность корреляции с ненулевой циклической частотой равняется нулю. Отсюда следует, что устранить аддитивный шум из принятого сигнала можно, применив к принятому сигналу формулу (9). Аддитивный шум тем самым устраняется, что позволяет выделить сигнал из более сильного фонового шума.

## 2.5 Адаптивное подавление шума

Адаптивное подавление шума (ANC) выявляет полезный сигнал путем вычитания из обнаруживаемого сигнала адаптивно фильтруемого "опорного" шума, коррелирующего с шумом, который содержится в обнаруживаемом сигнале.

Схема адаптивного подавления шума приведена на рисунке 4.

РИСУНОК 4  
Схема ANC

Report SM.2355-04

Контрольный шум  $n_1(t)$ , коррелирующий с шумом  $n(t)$ , может обрабатываться адаптивным фильтром  $H(jw)$ . Шум  $n(t)$  подавляется, и выходное SNR может быть улучшено.

Такой фильтр ANC можно легко спроектировать, не имея знаний о шуме  $n(t)$  и сигнале  $s(t)$  или практического опыта работы с ними, а эффект фильтрации эквивалентен работе фильтра Винера. Благодаря своим преимуществам фильтр ANC, например адаптивный режекторный фильтр, широко применяется для подавления помех, объединенных с сигналами.

## 2.6 Резюме

В данном разделе рассмотрен ряд алгоритмов, обеспечивающих более эффективное обнаружение слабых сигналов. Все они включают ту или иную обработку сигнала, но, как показано выше, часть из них отличается повышенной вычислительной трудоемкостью, а в некоторых случаях приходится искать компромисс между временем вычисления, длительностью сигнала и уровнем шума. Одни из этих методов эффективны лишь для отдельных типов сигналов, а другие могут применяться для сигналов множества различных типов.

## 3 Разделение сигналов на совпадающих частотах

В целях эффективного совместного использования ограниченных ресурсов спектра все большее количество систем радиосвязи работает на одной и той же частоте. Например, на совпадающих частотах работают многие виды систем сотовой связи и ВЧ-связи. При этом перекрытие частот во многих случаях может приводить к возникновению намеренных или ненамеренных помех.

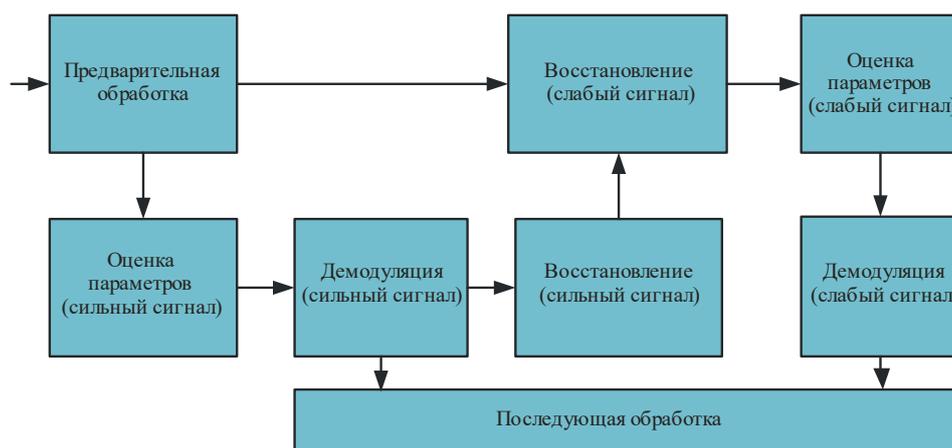
Во многих системах радиосвязи применяется мультиплексирование на совпадающей частоте. В таких случаях одна станция радиоконтроля может принимать несколько разных сигналов от разных передатчиков, работающих на той же частоте. Соответственно эти сигналы трудно отличить друг от друга, используя существующие системы радиоконтроля. В будущих системах контроля за использованием спектра должны применяться передовые технологии разделения сигналов.

Методы разделения сигналов на совпадающей частоте можно подразделить на две категории – разделение в одном канале и разделение в нескольких каналах. Эти методы описаны в следующих ниже разделах.

### 3.1 Разделение в одном канале (восстановление сильного сигнала)

Когда прием ведется только по одному каналу, восстановить исходный сигнал из сигналов с линейной цифровой модуляцией (PSK, QAM) можно с помощью метода восстановления сильного сигнала. Однако этот алгоритм работоспособен только в случае двух сигналов с отношением мощностей более 6 дБ. Схема этого алгоритма приведена на рисунке 5.

РИСУНОК 5  
Схема восстановления сильного сигнала



Report SM.2355-05

#### а) Предварительная обработка

Основная функция этого модуля включает несколько необходимых шагов обработки при приеме, таких как фильтрование, понижающее преобразование, преобразование частоты дискретизации. Однако в рамках этого модуля может применяться ряд алгоритмов подавления узкополосных помех в частотной области, таких как адаптивное режекторное фильтрование (позволяющих устранить относительно слабый мешающий сигнал, добавленный к сильному разрешенному сигналу).

#### б) Оценка параметров сильного сигнала

Для выполнения демодуляции сильных сигналов в этом модуле следует провести оценку нескольких параметров. К таким параметрам относятся амплитуда, несущая частота, начальная фаза, коэффициент и тип модуляции. Однако в большинстве случаев сильный сигнал является разрешенным. Следовательно, некоторые присущие ему параметры, например коэффициент и тип модуляции, известны приемнику, и поэтому отсутствует необходимость в оценке этих параметров. Необходимо оценить только несущую частоту, начальную фазу и амплитуду.

#### в) Демодуляция и восстановление сильного сигнала

Для демодуляции сильных сигналов в целях восстановления последовательности битового потока может применяться традиционная процедура демодуляции. Далее может быть реализована процедура восстановления сильного сигнала при наличии заранее полученных сведений о несущей частоте, начальной фазе, скорости в бодах и типе модуляции.

#### г) Восстановление слабого сигнала

После восстановления сильного сигнала слабый сигнал может быть восстановлен с помощью методов адаптивного подавления сигналов, таких как метод наименьшего среднеквадратичного (LMS) и рекурсивный метод наименьших квадратов (RLS), применяемых для подавления сильного сигнала в исходной комбинации сигналов.

#### д) Оценка параметров слабого сигнала

Требуемые параметры аналогичны указанным в разделе б). Однако характеристики сигнала помехи приемнику не известны и, следовательно, необходимые параметры, такие как скорость передачи и тип модуляции, также следует оценивать. Предполагается, что для устранения последствий неточности восстановления должен быть введен устойчивый алгоритм оценки параметров.

Например, для оценки скорости передачи в базах может применяться алгоритм, базирующийся на циклическом спектре, а для построения алгоритма идентификации модуляции могут использоваться некоторые алгоритмы на основе статистики высокого порядка.

**f) Демодуляция слабого сигнала**

Аналогично вышеупомянутому положению в разделе b), традиционный метод модуляции может быть введен для слабого сигнала. Однако предполагается, что для преодоления межсимвольных помех, создаваемых в результате неточной оценки параметров, может быть введен шаг слепого выравнивания.

**3.2 Многоканальное разделение (пространственное формирование луча на основе спектра)**

Пространственное формирование луча на основе спектра может применяться в случае приема по нескольким каналам. Оно в особенности эффективно для разделения вслепую нескольких сигналов – даже в случае произвольных типов модуляции – и может обеспечивать относительно высокие характеристики в условиях низкого SNR. Теоретические основы можно проиллюстрировать следующим образом.

Допустим, что сигналы  $P$  принимаются антенными решетками  $M$ , тогда принятые сигналы можно описать с помощью матрицы  $X(t)$  следующим образом:

$$X(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{j2\pi d \sin\theta_1/\gamma} & e^{j2\pi d \sin\theta_2/\gamma} & \dots & e^{j2\pi d \sin\theta_P/\gamma} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi d(M-1)\sin\theta_1/\gamma} & e^{j2\pi d(M-1)\sin\theta_2/\gamma} & \dots & e^{j2\pi d(M-1)\sin\theta_P/\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_P(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где  $\{\theta_1, \dots, \theta_P\}$  – направление каждого сигнала соответственно,  $s_i(t)$   $\{i = 1, 2, \dots, P\}$  обозначает входной сигнал  $P$ ,  $n_i(t)$   $\{i = 1, 2, \dots, M\}$  – соответствующий аддитивный белый гауссовский шум (AWGN), и  $\gamma$  – длина волны сигнала.

Вычислив далее матрицу корреляции, можно получить следующее уравнение:

$$R = E(X(t)X^H(t)). \quad (12)$$

Применив к уравнению (12) процедуру разложения по собственным значениям, получим набор собственных значений и собственных векторов. Пространство сигнала может быть разделено на  $P$ -размерное подпространство сигнала и  $M-P$ -размерное подпространство шума. Поскольку подпространства сигнала и шума взаимно ортогональны, можно получить следующее уравнение:

$$a(\theta_k)GG^H a^H(\theta_k) = 0, \quad (13)$$

где  $a(\theta_k) = [1 e^{j2\pi d \sin\theta_k/\gamma} \dots e^{j2\pi d(M-1)\sin\theta_k/\gamma}]^T$ ,  $G$  – составлено из собственных векторов в подпространстве шума с размерностью  $M \times (M-P)$ . Введя  $P(\theta) = 1/[a(\theta_k)GG^H a^H(\theta_k)]$ , направление каждого сигнала может быть оценено путем выделения пиков по  $P(\theta)$ . Это широко известный алгоритм классификации множества сигналов (MUSIC).

Если требуется выделить сигнал с направления  $\theta_k$ , коэффициенты каждого массива должны удовлетворять следующему:

$$\omega^H a(\theta_d) = 1, \quad \omega^H a(\theta_i) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, M, i \neq d). \quad (14)$$

Для решения приведенной выше проблемы можно использовать многие алгоритмы. Одним из наиболее общих и широко используемых алгоритмов является так называемый алгоритм "формирование луча методом Капона", призванный минимизировать выходную мощность. Решение относительно коэффициентов выглядит следующим образом:

$$\omega_{opt} = [R^{-1}a(\theta_k)]/[a^H(\theta_k)R^{-1}a(\theta_k)]. \quad (15)$$

При оценке частоты в суперпозиционной экспоненциальной модели без демпфирования с использованием исходных и сопряженных данных результаты будут лучше, чем при использовании только исходных данных, хотя они и асимптотически эквивалентны. Поэтому для оценки сигналов DOA предлагается измененный алгоритм MUSIC (MMUSIC) с использованием исходных и сопряженных данных. В отличие от алгоритма MUSIC, матрица корреляции алгоритма MMUSIC имеет следующий вид:

$$\bar{\mathbf{R}} = \mathbf{R} + \mathbf{J} \mathbf{E}(\bar{\mathbf{X}}(t) \bar{\mathbf{X}}^H(t)) \mathbf{J}, \quad (16)$$

где  $\bar{\mathbf{X}}(t)$  – данные, сопряженные относительно  $\mathbf{X}(t)$ ,  $\mathbf{J}$  – коммутационная матрица  $P \times P$ , все записи которой нулевые, за исключением одной в  $(i, P - i + 1)$ -й позиции для  $i = 1, 2, \dots, P$ .

### 3.3 Резюме

В данном разделе рассмотрено два метода разделения принимаемых в одной и той же полосе частот сигналов – одноканальный и многоканальный. В одноканальном методе требуется демодуляция сильного сигнала, что обуславливает более высокую вычислительную нагрузку, а в многоканальном методе модуляция не требуется, но требуется большее количество каналов и, соответственно, антенн.

## 4 Определение местоположения в нескольких режимах (на основе сочетания технологий определения местоположения)

Сигналы в разных областях несут соответствующую информацию о местоположении. Следовательно, такая информация о местоположении может быть извлечена с помощью соответствующей технологии или алгоритмов компьютерной обработки. Цифровая обработка сигналов (DSP) и возможности организации сетей становятся все более и более производительными. Устройства и организация сетей на базе DSP становятся все более приемлемыми в ценовом отношении. Системы контроля за использованием спектра на основе алгоритмов DSP и сетевые технологии могут упростить идентификацию передатчиков с различными характеристиками в разных областях, включая амплитудную область, частотную область, временную область, пространственную область, кодовую область и т. д. Соответственно технология определения местоположения в нескольких режимах может использоваться для определения местоположения источника излучений при различных условиях на основе сочетания различных технологий определения местоположения, таких как AOA (угол прихода), TDOA (разница времени прихода), FDOA (разница частоты прихода), POA (мощность прихода), и методов идентификации на основе вспомогательных данных.

### 4.1 Угол прихода

Угол прихода (AOA) – это традиционный и популярный метод определения местоположения передатчика путем определения направления распространения волны, падающей на антенную решетку, при многих условиях. Существует большое число методов поиска пеленга, такие как фазовый интерферометр, корреляционный интерферометр, моноимпульсные методы, формирование луча и пространственный согласованный фильтр, методы подпространств и т. д. В определенных применениях некоторые методы могут объединяться в одной РП-станции радиоконтроля, используемой для разных целей. Для определения местоположения передатчика необходимо объединить результаты с одной или более РП-станций радиоконтроля, чтобы получить пеленг засечкой на основе технологии AOA.

### 4.2 Разница времени прихода

Разница времени прихода (TDOA) – это перспективный метод определения местоположения передатчика путем оценки разницы времени прихода сигнала от источника на несколько приемников. Системы TDOA обеспечивают гибкость в выборе типа антенны и места ее размещения, поскольку на точность метода в минимальной степени влияют близко расположенные отражатели. Для того чтобы определить местоположение передатчика, необходимо объединить три и более системы TDOA, развернутых на разных площадках. На основе значений TDOA разных спаренных приемников позиция передатчика может быть определена путем применения ряда алгоритмов, таких как неитерационные и итерационные алгоритмы. Более полное рассмотрение методов TDOA представлено в Отчете МСЭ-R SM.2211.

### 4.3 Разница частоты прихода

Разница частоты прихода (FDOA) – это один из эффективных методов определения местоположения передатчика в движении или определения местоположения передатчика с помощью мобильной станции радиоконтроля, в частности расположенной на борту воздушного судна. Эффект от быстрого переключения между разными антеннами антенной решетки радиоконтроля сходен с тем, который возникает при перемещении передатчика и приемника радиоконтроля друг относительно друга. Поскольку относительное перемещение позволяет определить местоположение передатчика по доплеровскому сдвигу, TDOA и FDOA можно использовать в сочетании для повышения точности определения местоположения передатчика, и полученные оценки являются довольно независимыми. Объединяя измерения TDOA и FDOA, может быть выполнено мгновенное определение географического местоположения в двух измерениях.

### 4.4 Мощность прихода

Мощность прихода (POA) – это один из экономичных методов определения местоположения передатчика, так как для метода POA не требуется дополнительного аппаратного оборудования приемника радиоконтроля. Мощность радиосигнала может оцениваться согласно моделям распространения, если известны мощность передатчика и трасса распространения, этот метод особенно эффективен для стандартизованных систем беспроводной связи. Но его нельзя применить для определения местоположения передатчика, если мощность последнего неизвестна. Иногда местоположение передатчика определить легко, если модель распространения простая, например в случае радиовещательного ЧМ-передатчика, находящегося на линии прямой видимости с фиксированными станциями радиоконтроля.

### 4.5 Метод на основе информации идентификации

Метод на основе информации идентификации – это приобретающий все большую значимость метод определения местоположения передатчика, который используется в качестве датчика в этой новой эре глобальной взаимосвязанности, в особенности для сетей радиосвязи общего пользования. Цифровые системы радиосвязи имеют дополнительную информацию идентификации пользователя, которая может использоваться для получения информации о передатчике, например его долготы и широты, IP-адреса и т. д. Более эффективно определять местоположение передатчика, объединяя информацию от станции радиоконтроля и из соответствующей базы данных сетей радиосвязи, когда передатчик работает для подвижных служб. Спутниковые мобильные телефоны, спутниковые терминалы интернета и мобильные трубки-телефоны являются классическими передатчиками, местоположение которых можно определить, используя метод на основе информации идентификации.

### 4.6 Резюме

Определение местоположения в нескольких режимах – это, по сути, комбинирование нескольких методов определения местоположения. В данном разделе рассмотрено несколько таких методов, в том числе основанные на угле прихода сигнала (AOA), разнице во времени (TDOA), частоте прихода сигнала (FDOA), мощности сигнала (POA) и его идентификационных данных. Одни из этих методов не предполагают знания содержащейся в сигнале информации, а другие требуют ее восстановления, что обуславливает более высокую вычислительную нагрузку.

## 5 Заключение

В настоящем Отчете кратко представлены методы и применения обнаружения слабого сигнала, разделения сигналов на совпадающей частоте и определения местоположения передатчика в нескольких режимах на основе DSP и сети, включая синхронизованный усилитель, корреляцию, NOS, анализ циклически стационарных свойств сигнала, адаптивное подавление шума, восстановление сильного сигнала, формирование луча на основе спектра, методы FDOA, POA и метод на основе идентификационной информации, которые могут использоваться в будущих системах контроля за использованием спектра в различных ситуациях.

Следует изучить большее число передовых методов и применений контроля за использованием спектра в целях их реализации, с тем чтобы соответствовать стремительному развитию новых систем радиосвязи. В Приложениях 1 и 2 приведены примеры некоторых передовых методов радиоконтроля.

## Приложение 1

### Примеры применения передовых методов радиоконтроля

#### A1.1 Применение корреляции для обнаружения спутниковых помех

Во многих случаях местоположение помех от спутников ГСО может быть определено в пределах эллипса, центр которого находится в десятках или более километров от местоположения передатчика.

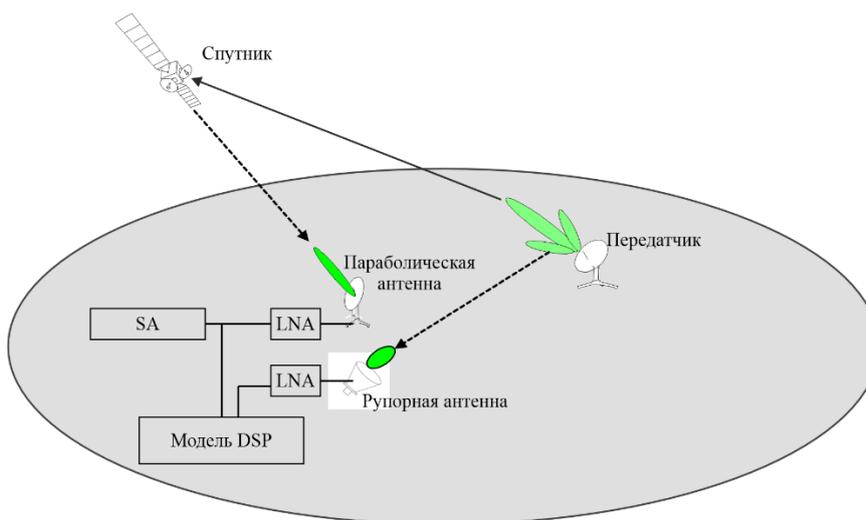
В таком случае сигналы от мешающего спутника и соседнего спутника коррелируются системами определения местоположения передатчика и далее могут быть выработаны данные TDOA и FDOA.

Быстрое определение местоположения и идентификация передатчика на земле являются ключевой задачей станций контроля за использованием спектра во многих странах и администрациях.

Слабый сигнал, передаваемый боковыми лепестками антенны, направленной на спутник ГСО, должен обнаруживаться оборудованием. Далее можно использовать метод взаимной корреляции для повышения чувствительности системы радиоконтроля, установленной на движущемся транспортном средстве. Общая схема данного применения приведена на рисунке A1-1.

РИСУНОК A1-1

Схема применения взаимной корреляции для обнаружения спутниковых помех



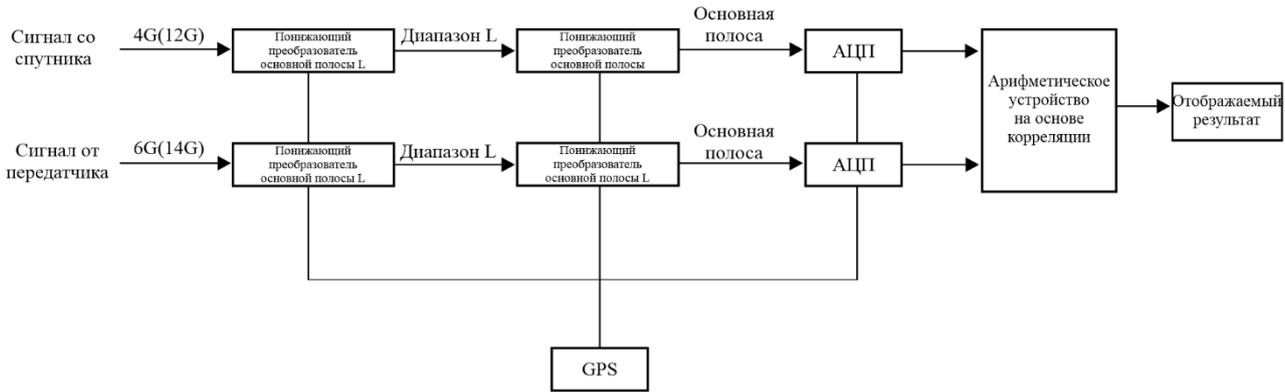
Report SM.2355-A1-01

В модуле DSP этой системы используется арифметическое устройство на основе взаимной корреляции для обработки сигналов от спутника с помощью параболической антенны и от боковых лепестков антенны земной станции с помощью рупорной антенны или непосредственно изотропной антенны.

Схема процесса в модуле DSP представлена на рисунке A1-2.

РИСУНОК А1-2

Схема обработки в модуле DSP



Report SM.2355-A1-02

В арифметическом устройстве на основе взаимной корреляции используется комплексная функция неопределенности на основе алгоритма статистики второго порядка (CAF-SOS) для одновременной оценки TDOA и FDOA сигналов от спутника и передатчика.

SNR взаимной корреляции может быть описано следующим образом, и каждое *snr* является линейным значением:

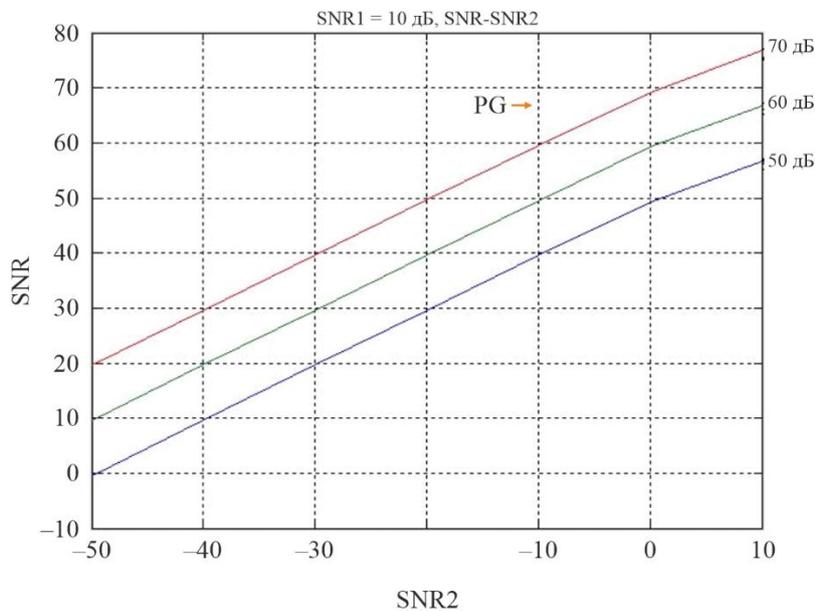
$$snr = 2BT * \frac{snr_1 * snr_2}{1 + snr_1 + snr_2},$$

где  $2BT$  – выигрыш при обработке, если осуществляется дискретизация сигналов с частотой Найквиста, а  $N$  – номер точки отсчета, должно получиться  $2BT = N$ . Значение  $snr_1$  представляет SNR сигнала от спутника, а  $snr_2$  – SNR сигнала от передатчика. В общих случаях  $snr$  не превышает 20 дБ.

Если  $snr$  равно 10 дБ, взаимосвязь  $snr$  и  $snr_2$  может быть описана так, как показано на рисунке А1-3.

РИСУНОК А1-3

Взаимосвязь  $snr$  и  $snr_2$ , когда  $snr_1 = 10$  дБ

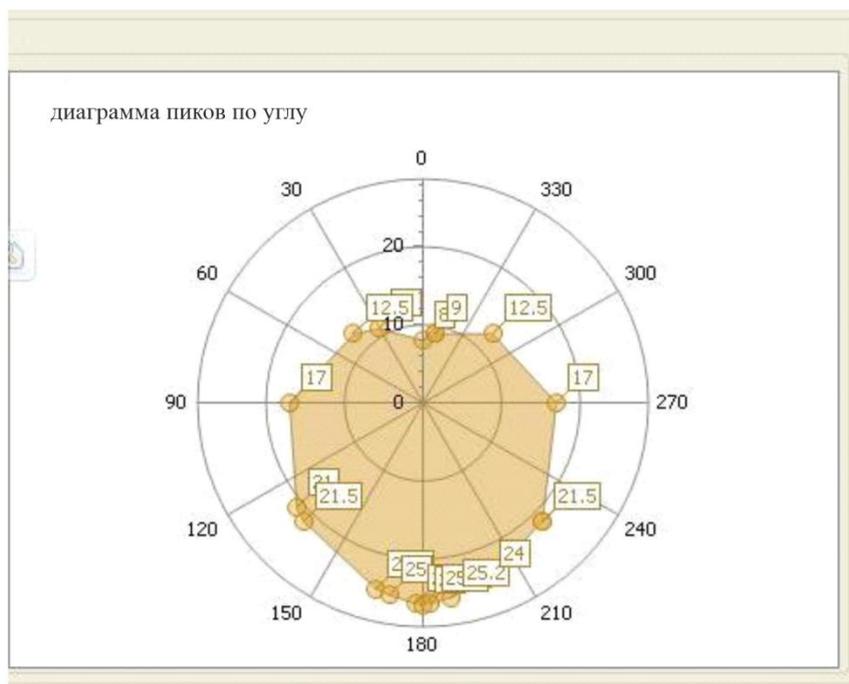


Report SM.2355-A1-03

Как правило, оборудование, в котором используется арифметическое устройство на основе взаимной корреляции, может обнаружить слабые сигналы, значение SNR которых составляет порядка  $-40$  дБ, если выигрыш при обработке составляет  $60$  дБ. То есть оборудование может уловить слабый сигнал, спектральная плотность мощности которого на  $40$  дБ ниже минимального уровня шума.

На практике направленная рупорная антенна поворачивается на определенный угол с последующим процессом взаимной корреляции. После полного оборота антенны на  $360^\circ$  оператор может определить направление, в котором находится передатчик, по моменту, когда корреляция отношения сигнал/шум обоих каналов (от спутника и от земной станции) максимальна, даже если уровень наземного сигнала слишком слаб, для того чтобы анализатор спектра мог его обнаружить (см. рисунок А1-4).

РИСУНОК А1-4  
 Диаграмма пиков по углу

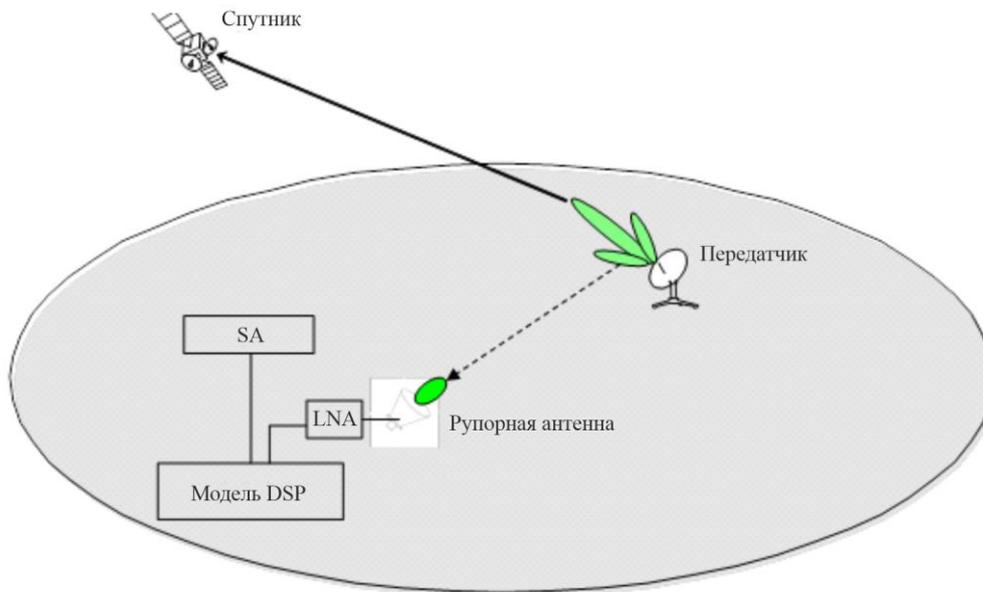


Report SM.2355-A1-04

В ином случае оборудование, в котором используется арифметическое устройство на основе циклической автокорреляции, может обнаруживать слабые сигналы со значением SNR порядка  $-20$  дБ соответственно. При худшей по сравнению с арифметическим устройством на основе взаимной корреляции производительности этот метод по-прежнему характеризуется большей чувствительностью, чем алгоритм обнаружения на основе быстрого преобразования Фурье. Схема приведена на рисунке А1-5.

РИСУНОК А1-5

Схема применения циклической автокорреляции для обнаружения спутниковых помех



Report SM.2355-A1-05

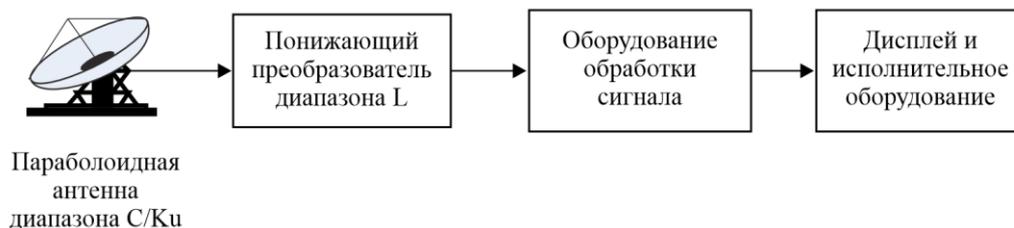
Аналогично оборудование, в котором используется арифметическое устройство на основе циклической автокорреляции, может обнаруживать слабые сигналы от передатчиков земных станций, удаленных на несколько километров, а оборудование, в котором используется арифметическое устройство на основе взаимной автокорреляции, может обнаруживать слабые сигналы от передатчиков земных станций, удаленных на несколько десятков километров; однако оборудование, в котором используется традиционный приемник радиоконтроля или анализатор спектра, может обнаруживать слабые сигналы от передатчиков земных станций, удаленных на несколько сот метров, в определенных ситуациях.

### A1.2 Применение восстановления сильного сигнала в радиоконтроле спутников

Помехи от спутниковой сети ГСО возникают эпизодически вследствие отказа или ненадлежащего функционирования оборудования. Обычно существует два сигнала на перекрывающихся частотах. В этот момент может применяться восстановление сильного сигнала для контроля помех и аварийной сигнализации. Общая схема этого применения приведена на рисунке А1-6.

РИСУНОК А1-6

Схема применения восстановления сильного сигнала в радиоконтроле спутников



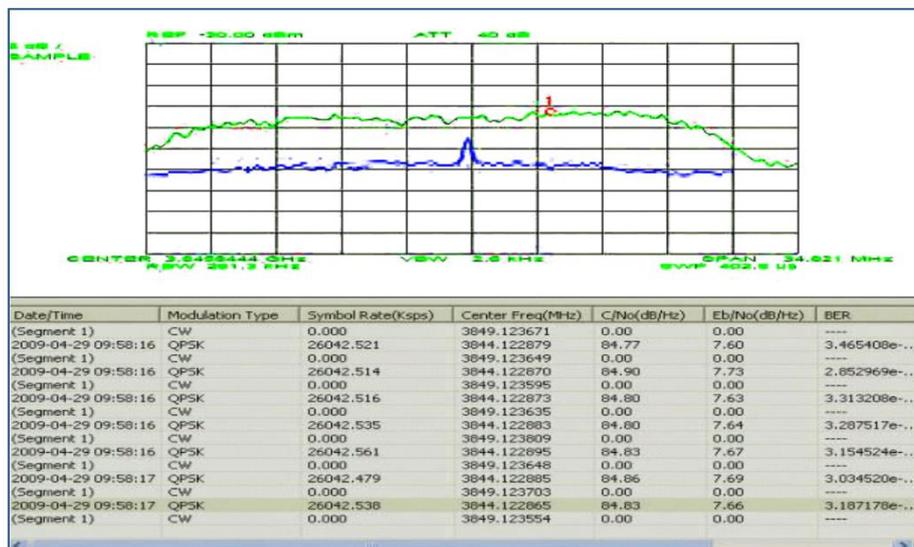
Report SM.2355-A1-06

Это пример применения восстановления сильного сигнала для выделения помех от спутниковой сети ГСО. Разрешенный сигнал является применением РСС, тип модуляции QPSK и скорость в бодах 26,042 Мбит/с, сигнал помехи – немодулированные колебания.

Как видно на рисунке А1-7, спектр, показанный зеленой линией, представляет принятый сигнал, который можно охарактеризовать как спектр смешанного сигнала, а спектр, показанный синей линией, представляет выделенный сигнал помехи. Тип модуляции и соответствующие параметры модуляции приведены в следующей ниже таблице.

РИСУНОК А1-7

Пример выделения помехи от спутниковой сети ГСО



Report SM.2355-A1-07

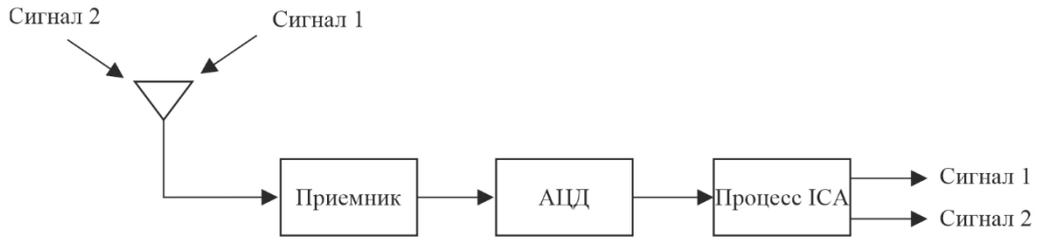
### А1.3 Применение одноканального ICA для разделения сигналов

Это пример разделения двух сигналов с BPSK в совпадающем канале на основе алгоритма ICA. Схема системы приведена на рисунке А1-8. Два сигнала имеют ту же скорость в бодах и лишь небольшой сдвиг несущих частот. На основе алгоритма ICA эти сигналы выделяются из смешанного сигнала, как показано на рисунке А1-9. Если отношение сигнал/шум (SNR) составляет 10 дБ, а отношение сигнал/помеха (SIR) составляет 0 дБ, коэффициент корреляции между исходным и разделенным сигналом может достигнуть значения, превышающего 0,93. Как очевидно, сигналы в совмещенном канале полностью разделены. На рисунках А1-10 и А1-11 представлены результаты разделения в виде диаграмм созвездия. На рисунке А1-12 показаны коэффициенты ошибок по битам (BER) разделенных сигналов при изменении значений SNR с 4 дБ до 12 дБ. Как видно, значение BER составляет менее  $10^{-3}$  при SNR больше 10 дБ, такое значение SNR весьма характерно для спутниковой связи.

При следующем моделировании обрабатывались сигнал 1 и сигнал 2 как полезный и мешающий сигналы соответственно. На рисунке А1-13 показаны BER полезного сигнала при разных значениях SIR (от -10 дБ до 10 дБ). Как видно из рисунка, полезный сигнал может быть корректно извлечен из смешанного сигнала, когда значения SIR превышают 0 дБ. При низких значениях SIR (менее 0 дБ) сначала может быть извлечен из смешанного сигнала и устранен сигнал помехи, после чего можно получить полезный сигнал. В настоящее время с помощью такого алгоритма ICA для совпадающего канала можно разделить только два сигнала с двоичной цифровой модуляцией. Следует изучить более устойчивые алгоритмы для сигналов с многозначной модуляцией.

РИСУНОК А1-8

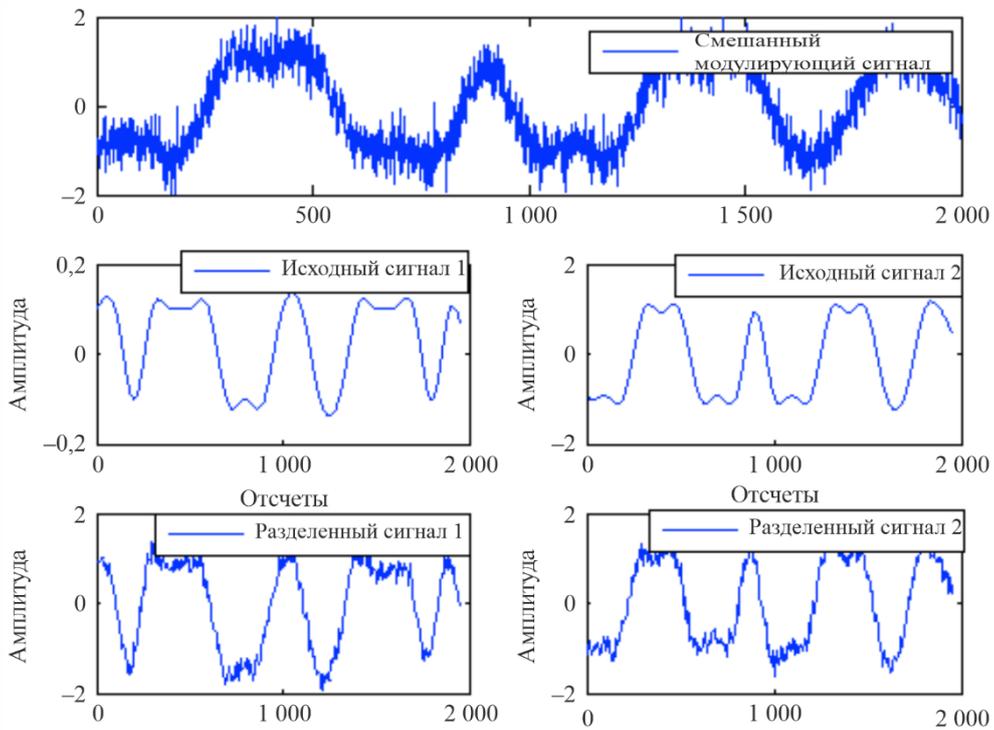
Схема применения одноканального ИСА для разделения сигналов



Report SM.2355-A1-08

РИСУНОК А1-9

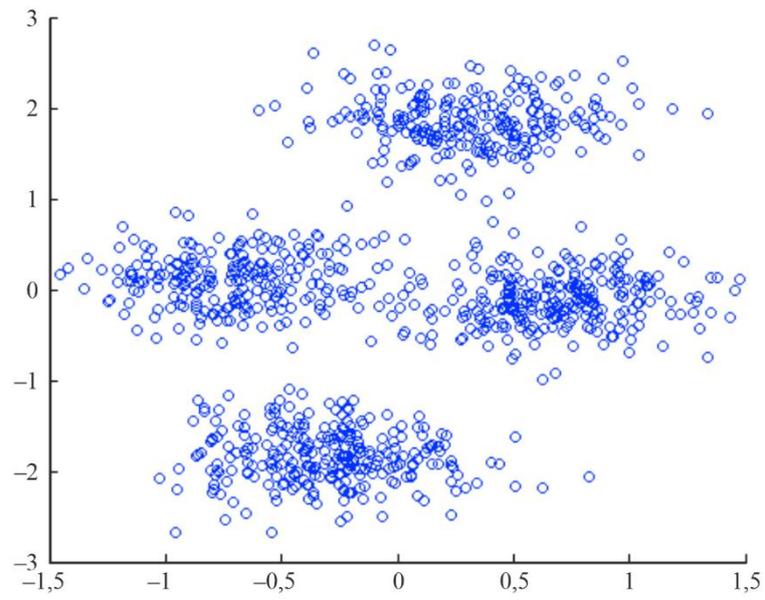
Результат разделения двух сигналов с BPSK



Report SM.2355-A1-09

РИСУНОК А1-10

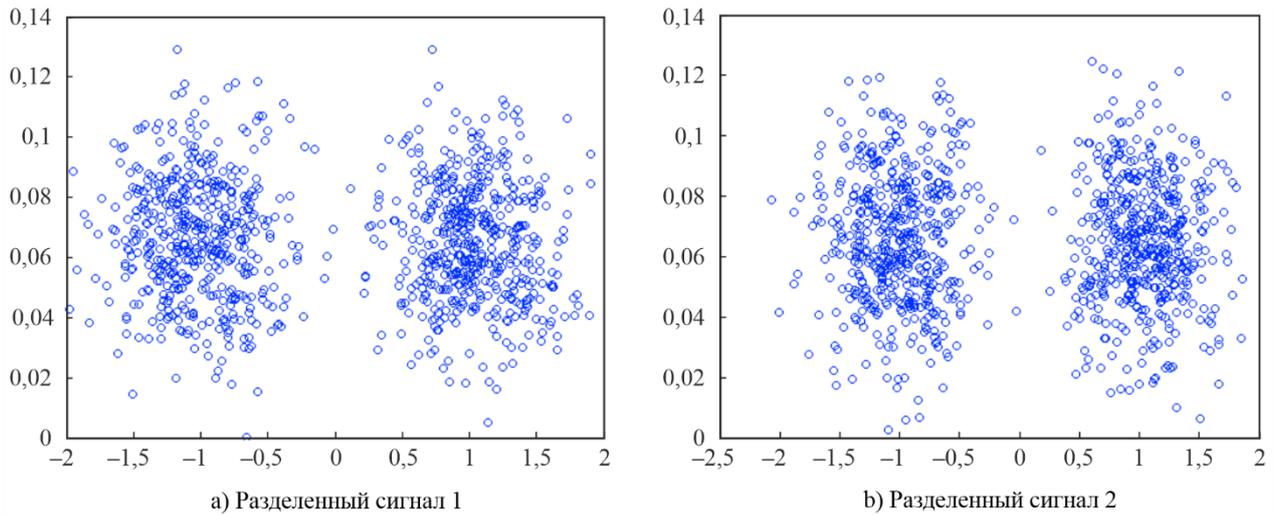
Диаграмма созвездия смешанного сигнала



Report SM.2355-A1-10

РИСУНОК А1-11

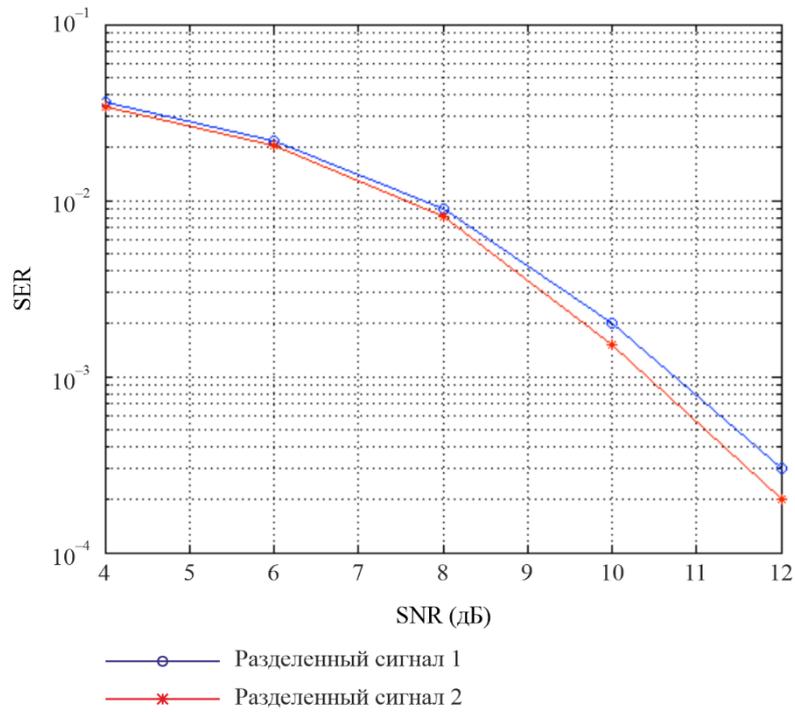
Диаграмма созвездия разделенных сигналов



Report SM.2355-A1-11

РИСУНОК А1-12

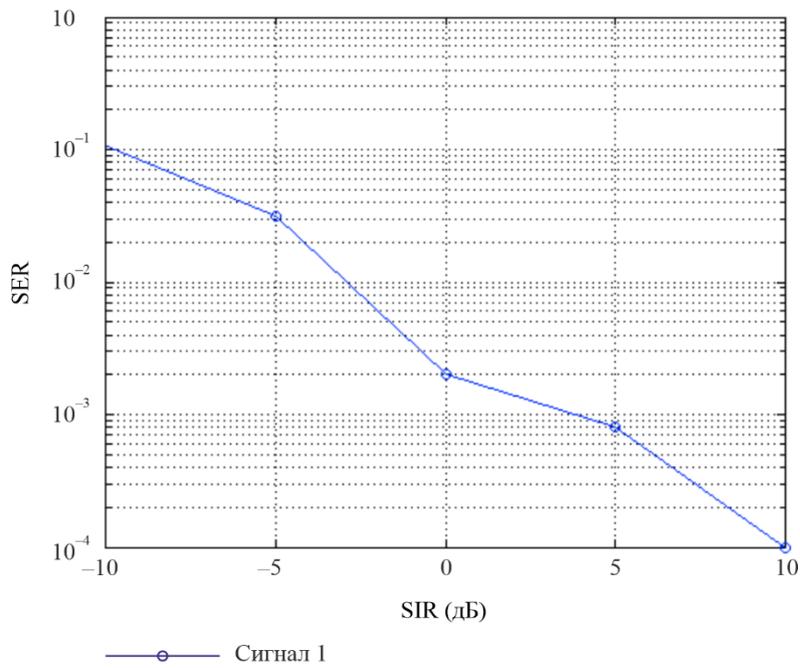
Значения BER разделенных сигналов при разных значениях SNR



Report SM.2355-A1-12

РИСУНОК А1-13

Значения BER разделенного сигнала 1 при разных значениях SIR



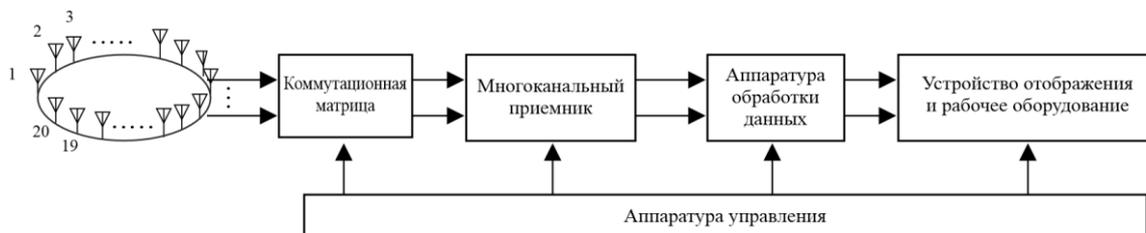
Report SM.2355-A1-13

#### A1.4 Пространственное формирование луча на основе спектра при осуществлении контроля в диапазоне ВЧ/ОВЧ

Технология пространственного формирования луча на основе спектра широко используется в системах контроля диапазона ВЧ/ОВЧ, в случае если необходимо прослушивать ВЧ/ОВЧ-сигналы или определять местоположение их источников при работе на перекрывающихся частотах. Краткая структура процесса изображена на рисунке А1-14.

РИСУНОК А1-14

Схема применения пространственного формирования луча на основе спектра при осуществлении контроля в диапазоне ВЧ/ОВЧ



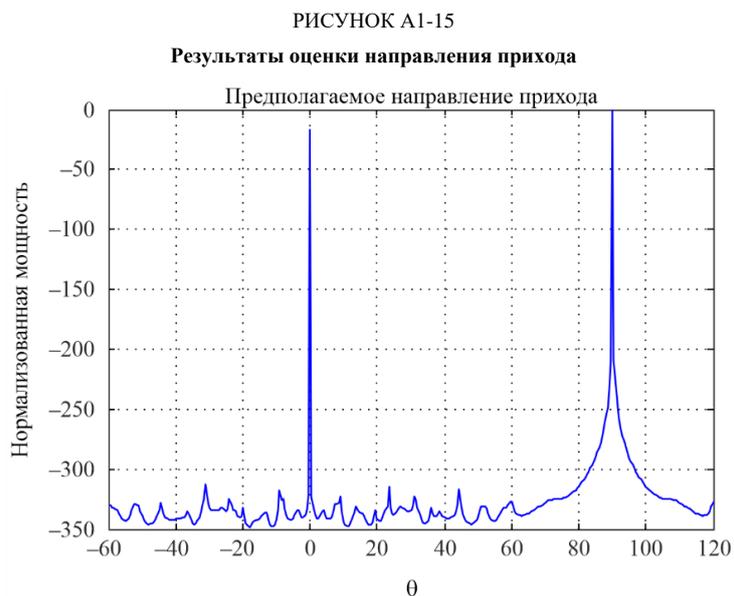
Report SM.2355-A1-14

Наиболее характерной формой антенной решетки является круговая антенная решетка. Также используются треугольные и линейные антенные решетки. Принятый сигнал передается на многоканальный приемник через коммутационную матрицу. Как правило, количество каналов приема равно количеству антенных решеток. Некоторые этапы обработки, такие как преобразование с понижением частоты, фильтрация и оцифровка, обычно выполняются приемником. Следует отметить, что каждый канал приема должен быть согласован по фазе и амплитуде, иначе последующая обработка будет неэффективной. Аппаратура обработки реализует алгоритмы пеленгования и формирования луча и взаимодействует с устройством отображения и рабочим оборудованием.

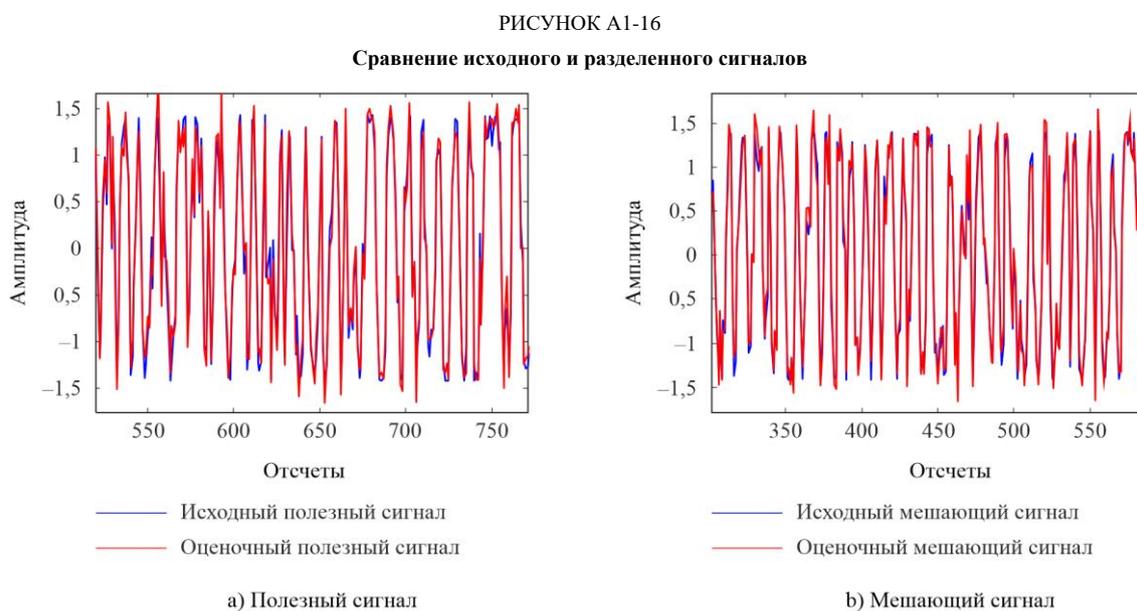
Ниже приведен пример слепого разделения двух сигналов. Оба сигнала создаются применениями внутренней связи. Они являются частотно модулированными сигналами, имеющими одинаковую мощность. На рисунке А1-15 приведен результат оценки направления прихода с помощью алгоритма MUSIC. Можно четко видеть, что получена точная оценка обоих направлений, составляющих  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . Сравнение исходного и разделенного сигналов применительно к полезному и мешающему сигналам показано на рисунках А1-16(а) и А1-16(б) соответственно. Результат свидетельствует об эффективном разделении обоих сигналов. Рассчитаем среднеквадратическую ошибку (MSE) в качестве параметра оценки, определяемого по формуле:

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

где  $S(n)$  и  $S_e(n)$  – отсчеты исходного и разделенного сигналов соответственно,  $N$  – количество отсчетов сигнала. Получим величину MSE порядка  $10^{-3}$ .



Report SM.2355-A1-15

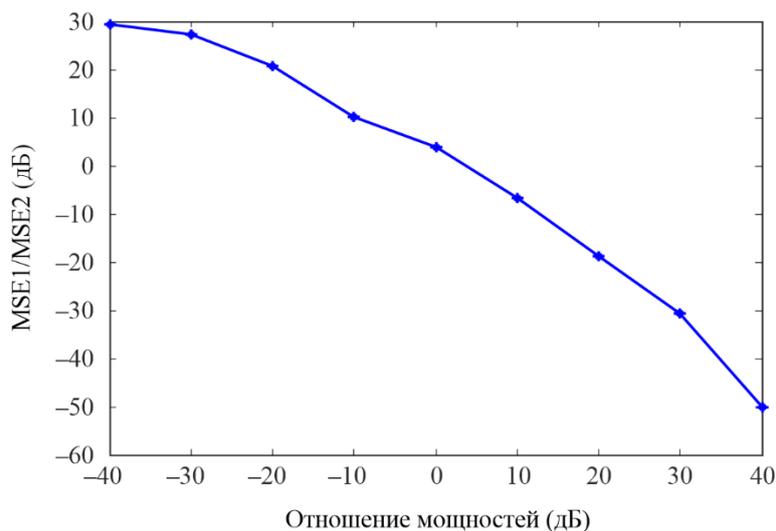


Report SM.2355-A1-16

На рисунке А1-17 изображены результаты оценки отношения MSE при различных отношениях мощностей полезного и мешающего сигналов. Можно заметить, что отношение мощностей существенно влияет на результат разделения. В общем случае при сильном сигнале наблюдается значительно меньшая среднеквадратическая ошибка, а также более высокие показатели разделения, чем при слабом сигнале. В частном случае среднеквадратические ошибки равны при равенстве мощностей обоих сигналов.

РИСУНОК А1-17

Отношения MSE при различных отношениях мощностей полезного и мешающего сигналов



Report SM.2355-A1-17

### A1.5 Применение многоканального ICA для разделения сигналов

В данной части представлены результаты оценки применения многоканального ICA для разделения помехи с использованием экспериментального испытательного стенда.

#### A1.5.1 Подробное описание испытаний

В качестве испытательного сигнала передавался сигнал, который состоял из мешающего сигнала, наложенного на полезный сигнал. Этот сигнал принимался на антенную решетку. Вначале принятый сигнал был преобразован из аналогового в цифровой, и далее была осуществлена обработка методом ICA.

Точность оценки DUR была рассчитана как разность предполагаемого отношения мощностей ( $DUR_{est}$ ) полезного и мешающего сигналов, которые были разделены в результате обработки методом ICA, и заданного отношения электрической мощности (DUR) испытательного сигнала:

Отношение мощностей полезной и мешающей составляющих испытательного сигнала (DUR) = (Мощность полезного сигнала)/(Мощность мешающего сигнала);

Предполагаемое отношение мощностей после обработки методом ICA ( $DUR_{est}$ ) =  
 = (Мощность полезного сигнала)/(Мощность мешающего сигнала);

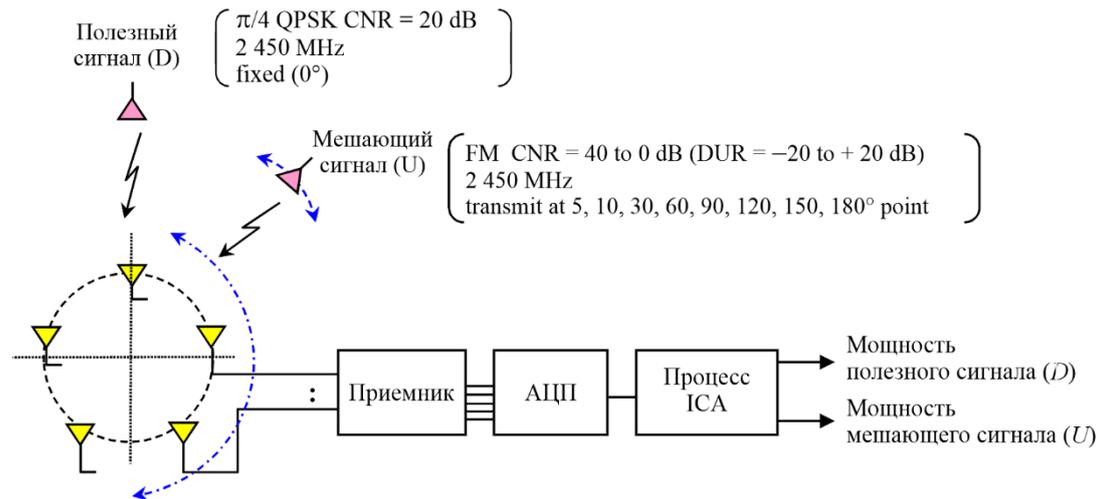
Точность оценки DUR (A) =  $DUR_{est} - DUR$ .

Если смотреть со стороны антенной решетки, направление прихода полезного сигнала остается постоянным, а направление прихода помехи меняется от  $5^\circ$  до  $180^\circ$ . Для каждого угла прихода было получено изменение точности оценки DUR, обусловленное изменением DUR.

На рисунке А1-18 показана системная диаграмма оценочного испытания.

РИСУНОК А1-18

## Системная диаграмма оценочного испытания



CNR = Отношение несущая/шум = (Мощность несущей)/(Мощность шума)  
 DUR = Отношение полезный сигнал/мешающий сигнал  
 = (Мощность полезного сигнала) / Мощность мешающего сигнала

Report SM.2355-A1-18

### A1.5.2 Результаты испытаний

На рисунке А1-19 показана диаграмма сигнального созвездия принятого сигнала до обработки методом ICA, а также полезного и мешающего сигналов, разделенных методом ICA. Кроме того, на рисунке А1-20 показаны результаты измерения точности оценки DUR в случае полезного сигнала с модуляцией  $\pi/4$  QPSK и частотно-модулированного мешающего сигнала.

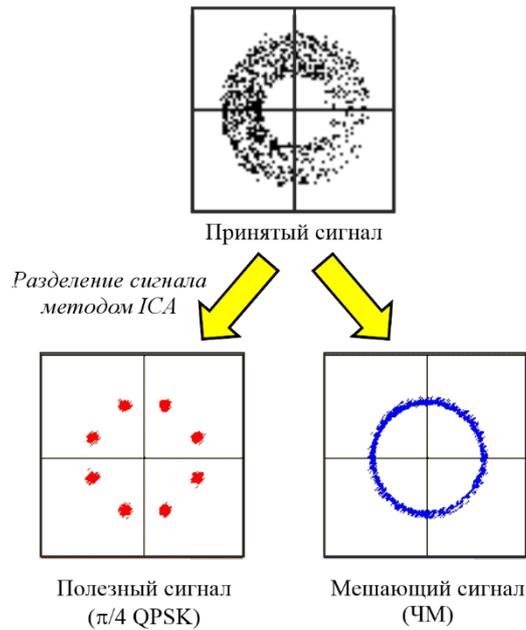
Было подтверждено, что при DUR в диапазоне от  $-15$  до  $+10$  дБ можно оценить DUR мешающего сигнала с точностью менее 2 дБ.

С использованием той же самой процедуры было проведено испытание, в котором испытательный сигнал состоял из амплитудно-модулированного полезного сигнала и частотно-модулированного мешающего сигнала. Несмотря на некоторую незначительную разницу в полученных результатах, в целом они были схожими и демонстрировали одинаковую тенденцию.

При использовании той же самой процедуры результаты проведения испытаний для разных диаметров апертуры антенны показали тенденцию к расширению диапазона DUR, который может быть измерен, при более высоких значениях диаметров апертуры.

РИСУНОК А1-19

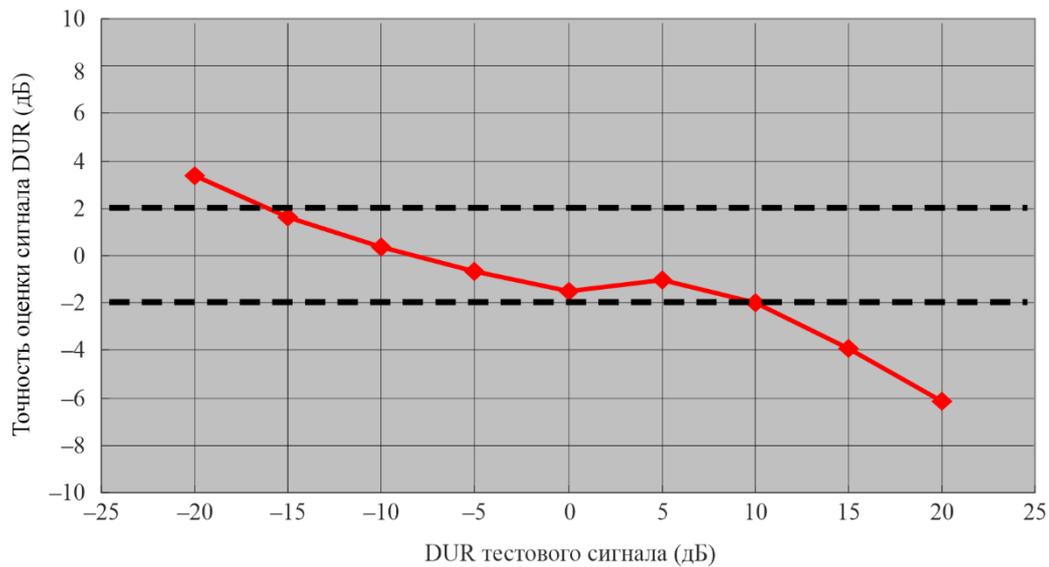
Диаграмма созвездия сигналов, разделенных методом ICA



Report SM.2355-A1-19

РИСУНОК А1-20

Точность оценки DUR



Report SM.2355-A1-20

### A1.5.3 Обработка сигнала для обнаружения помех

Как следует из результатов оценки методом ICA, с помощью данного метода можно с высокой точностью оценивать DUR на основании отношения мощностей сигналов после разделения. Поэтому очевидно, что можно осуществлять количественный контроль в надлежащие сроки в реальных ситуациях помех с низкими уровнями, при которых не происходит существенного ухудшения качества связи, а также при редком возникновении фактических случаев помех.

Более конкретно, в обычной цифровой беспроводной системе, даже при наличии помех с уровнем порядка  $DUR = 10$  дБ, благодаря использованию кодов с исправлением ошибок пользователь не замечает возникновения помех. За счет количественной оценки  $DUR$  с помощью метода ICA представляется возможным принять меры противодействия до того, как наступит существенное ухудшение качества связи.

Как показано на рисунке А1-21, в данном методе при диапазоне значений  $DUR$  от  $-15$  до  $+10$  дБ можно измерить уровень сигнала с точностью  $\pm 2$  дБ. Поэтому ожидается, что в данном диапазоне  $DUR$  можно с высокой точностью обнаружить наличие помех.

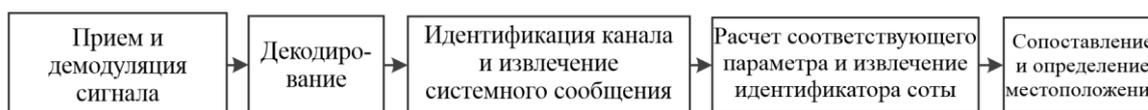
Задавая пороговое значение для обнаружения наличия помех в зависимости от требуемого отношения  $C/N$  ( $= DUR$ ) полезного сигнала в системе связи, можно обеспечить автоматическую подачу предупреждающего сигнала или осуществление записи в момент обнаружения помехи.

## А1.6 Определение географического местоположения базовой станции GSM

Необходимость в определении местоположения базовых станций GSM возникает при наличии помех между операторами различных сетей GSM или потребности в координации сетей GSM в приграничных районах. Станции контроля могут использоваться для различения базовых станций, принадлежащих разным операторам сетей GSM, с помощью традиционного метода радиопеленгации и определения географического местоположения. Однако эту задачу проще выполнить путем декодирования сигналов GSM и извлечения информации, например об операторе сети GSM, глобального идентификатора соты (CGI) и т. д.

CGI – это уникальный номер, используемый для идентификации базовой станции GSM, с которой устанавливает связь оборудование пользователя. Глобальный идентификатор соты представляет собой сочетание идентификационного номера зоны расположения и идентификатора соты. Краткая схема извлечения CGI показана на рисунке А1-21.

РИСУНОК А1-21  
Схема извлечения CGI



Report SM.2355-A1-21

После принятия сигнала GSM приемником станции контроля его вначале следует декодировать и демодулировать. Затем следует идентифицировать специальный канал и из него извлечь системное сообщение. Положение базовой станции GSM можно узнать после сопоставления соответствующего параметра и идентификатора соты с базой данных. В сочетании в методом AOA мобильная станция контроля может определить точное положение базовых станций GSM в одном районе, спланировав соответствующий маршрут осуществления контроля.

## А1.7 Применение малых спутников для контроля за использованием спектра

### А1.7.1 Введение

Традиционный контроль за использованием спектра в основном опирается на наземные системы контроля за использованием спектра, такие как стационарные станции контроля и передвижные средства контроля. Однако возможности этих систем контроля за использованием спектра ограничены в связи с проблемой покрытия средствами контроля множества частотных диапазонов. Радиосигналы с более высокими частотами легко блокируются наземными препятствиями, такими как здания и холмы. Таким образом, наземный контроль за использованием спектра на больших территориях затруднен. Помимо этого, когда в рамках наземного контроля нет возможности обеспечить наблюдение сигнала в зоне прямой видимости (LOS), возможности определения географического местоположения источников излучений в значительной степени ограничены.

Для разрешения проблемы масштабного контроля за использованием спектра может быть рассмотрена возможность контроля за использованием спектра с помощью малых спутников на низкой околоземной орбите. Спутниковый контроль обеспечивает широкое покрытие и позволяет осуществлять непрерывный глобальный контроль за использованием спектра. Это может позволить регуляторным органам в области радиосвязи получать полное представление об использовании спектра на значительных территориях в регионах мира и определять местоположение источников вредных помех.

#### **A1.7.2 Архитектура спутникового контроля**

Спутниковый контроль позволяет применять малые спутники или спутниковые группировки для непрерывного контроля за использованием радиочастотного спектра в глобальном масштабе. По мере движения спутника по орбите он принимает сигналы с различных участков на поверхности земли. Суть спутникового контроля заключается в переходе от существующего двухмерного наземного контроля к трехмерному космическому. В результате появляется возможность преодолевать препятствия рельефа и обеспечивать глобальный контроль за использованием спектра. Пользователи могут получать достаточные данные об использовании спектра, собранные при помощи спутника, для содействия международной координации частот и определения географического местоположения источников сигналов в глобальном масштабе. Национальные органы регулирования использования спектра могут использовать спутниковый контроль для выявления закономерностей использования спектра, с тем чтобы лучше понять ситуацию в отношении спектра и повысить эффективность управления его использованием.

Помимо обеспечения глобального покрытия, такие платформы также могут обеспечить высокую частотность повторного прохождения над всеми географическими точками. Размещение таких подвижных спутниковых платформ контроля на низкой околоземной орбите с большим наклоном может позволить обеспечить глобальный контроль за использованием спектра с помощью относительно небольшого количества средств, в отличие от платформ наземного или воздушного контроля, которые сильно ограничены в подвижности и площади покрытия. Например, спутниковая система контроля за использованием спектра на низкой околоземной солнечно-синхронной орбите (ССО), как правило, может проходить над всей поверхностью земли два раза за сутки. Нарращивание числа спутников в группировке позволит значительно повысить частоту повторных прохождений системы. Например, двенадцать таких равноудаленных систем могут проходить над любой точкой раз в час. В случае размещения спутников на наклонных орбитах можно повысить частоту прохождений над определенными районами.

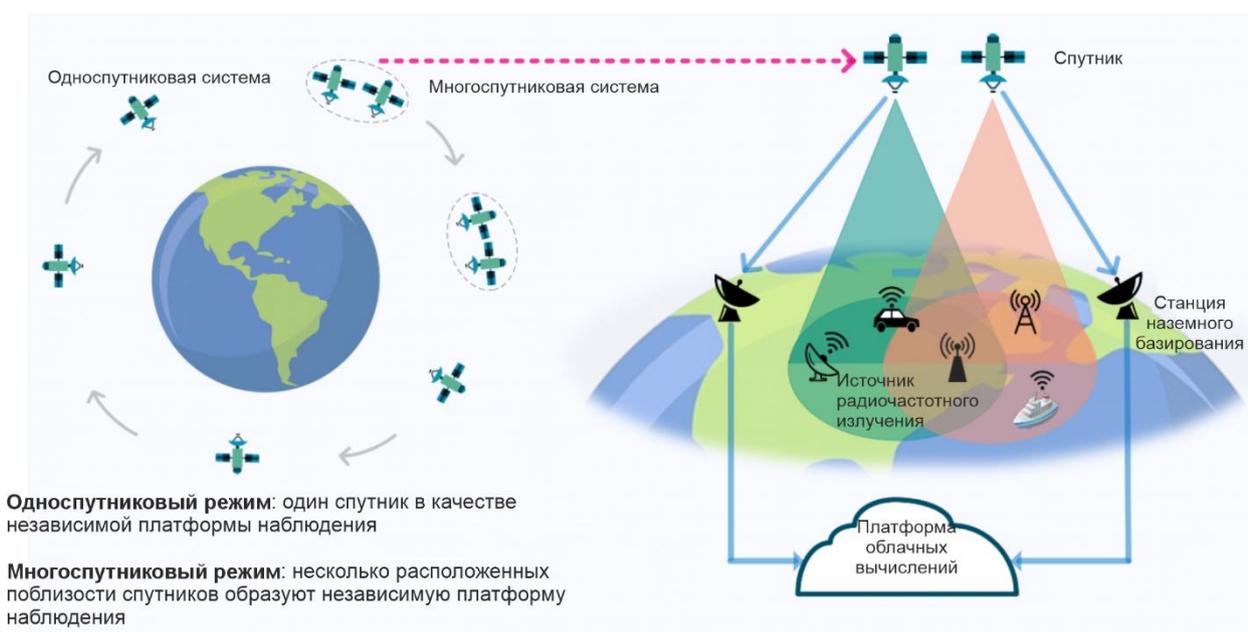
На рисунке A1-22 показана архитектура спутникового контроля за использованием спектра [1]. Каждый малый спутник несет полезную нагрузку для контроля за использованием радиочастот, которая принимает, обнаруживает и обрабатывает радиосигналы, излучаемые с Земли. Затем эти данные об использовании спектра могут быть переданы на соответствующие станции наземного базирования. Эти станции наземного базирования размещены в различных регионах мира. Поскольку время прохождения спутника над приемной станцией составляет всего несколько минут, скорость передачи данных со спутника на Землю должна быть высокой. Для хранения и анализа данных об использовании спектра используется платформа облачных вычислений. Она может рассчитывать занятость частот и определять географическое местоположение источников сигналов. Система может работать в односпутниковом и многоспутниковом режимах в зависимости от количества независимых спутников наблюдения. В первом случае для контроля сигналов и определения географического местоположения их источников используется один спутник. В многоспутниковой архитектуре по меньшей мере два расположенных поблизости спутника работают вместе, образуя платформу наблюдения для улучшения возможностей определения географического местоположения.

Следует отметить, что спутниковый контроль не может осуществляться в отношении всех типов сигналов, излучаемых с Земли. Большинство сигналов, поступающих на спутник, очень слабы из-за больших потерь при распространении, а антенна на малом спутнике обладает ограниченной чувствительностью. Важнейшим элементом определения возможности контроля является выделение сигналов из шума, что в основном зависит от мощности сигнала и потерь при распространении. В общем случае требуется, чтобы отношение несущей принимаемого сигнала к шуму превышало пороговое значение. Спутниковый контроль возможен для таких сигналов, как радиовещание в

диапазоне ЧМ, радиы в диапазоне УВЧ, радиовещание и связь в диапазоне ОВЧ/УВЧ, вышки сотовой связи, передатчики помех Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), маяки AIS и отдельные устройства подвижной спутниковой связи [1]. Помимо этого, сигналы с узкими лучами трудно улавливаются движущимися спутниками на НОО и для спутникового контроля не подходят. Частоты выше диапазона Ку обычно используются для узконаправленных радиосигналов. Поэтому в целом для спутникового контроля подходят диапазоны частот от диапазона ОВЧ до диапазона Ку.

РИСУНОК А1-22

## Архитектура спутникового контроля за использованием спектра



Report SM.2355-A1-22

Следует отметить, что спутниковая система контроля за использованием спектра будет разработана и предназначена для контроля за использованием спектра и определения географического местоположения, например, для оценки частоты сигнала, измерения полосы пропускания, мощности и определения местоположения источников излучения радиосигналов.

### А1.7.3 Сценарий применения

В настоящее время спутниковый контроль за использованием спектра не только разработан теоретически, но и применяется на практике. Отдельные коммерческие спутниковые компании развертывают небольшие спутниковые группировки на НОО для сбора и контроля радиосигналов с Земли в глобальном масштабе, а также определения географического местоположения источников радиосигналов и помех в определенных частотных диапазонах, таких как помехи для ГНСС.

#### А1.7.3.1 Контроль за использованием спектра

Поскольку спутниковый контроль характеризуется широкой зоной покрытия и высокой частотой повторных проходов, он подходит для масштабного контроля за использованием спектра. Платформа спутникового контроля позволяет непрерывно получать данные об использовании спектра по всему миру, а затем использовать эти данные для получения информации об использовании спектра, такой как занятость частот и карты спектра во времени и пространстве. Таким образом, управление использованием спектра может позволить точно понять характер использования спектра и повысить его эффективность.

Помимо этого, такая единая система контроля может позволить устранить пробелы в контроле за использованием спектра по всему миру. Спутник обеспечивает широкое покрытие, и его стоимость не зависит от масштаба зоны покрытия. Этот метод контроля за использованием спектра может эффективно применяться в отдаленных районах, где могут возникать затруднения с применением традиционных средств контроля, – в пустынях, горных районах, приполярных районах и в океанах. Собранные данные контроля могут помочь администрациям в вопросах управления использованием спектра, а также способствовать эффективному использованию радиочастотного спектра в интересах его пользователей как в развивающихся, так и в развитых странах.

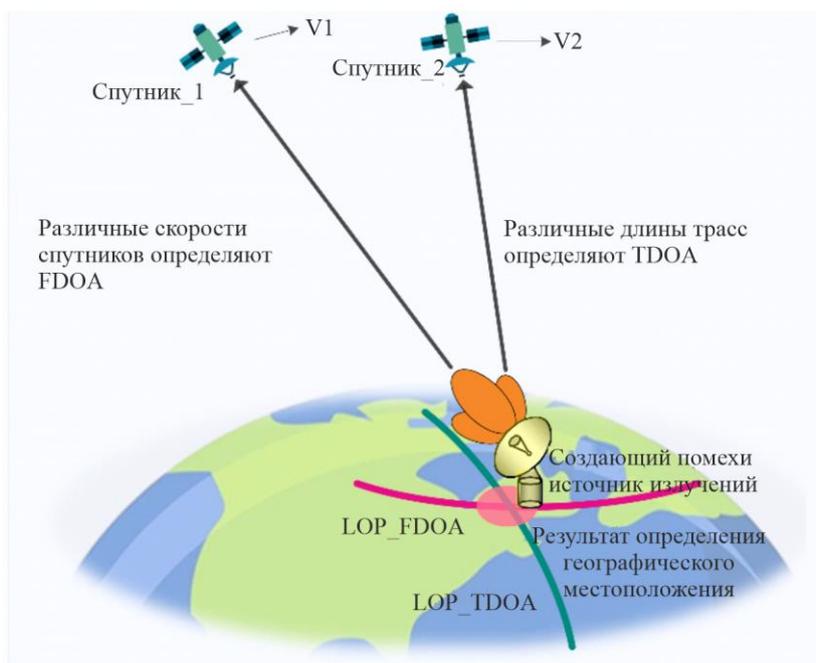
#### **A1.7.3.2 Определение географического местоположения источника излучения**

Определение географического местоположения с помощью спутниковой платформы является перспективным способом решения актуальных проблем, таких как необходимость картирования использования спектра и определения местоположений источников радиопомех для сигналов общего пользования, таких как ГНСС. Основное преимущество заключается в том, что спутники могут напрямую принимать сигналы в зоне прямой видимости без проблем, связанных с препятствиями рельефа. Таким образом, методы определения географического местоположения могут быть легко реализованы. Подходящим методом определения географического местоположения, используемым в спутниковом контроле, является определение географического местоположения с использованием измерений TDOA/FDOA [1].

На рисунке A1-23 изображен принцип определения географического местоположения. Характеристики излучения антенны источника позволяют принять сигнал набором из двух или более спутников, расположенных в близлежащих орбитальных позициях. Синхронизация часов спутников, обеспечиваемая сигналом ГНСС, таким как сигнал Глобальной системы определения местоположения (GPS), может позволять выполнять точные измерения времени прихода радиочастотных сигналов в системе спутникового контроля. Поскольку длина пути распространения сигнала различна, это приводит к возникновению временной задержки и, таким образом, к измерению TDOA. Кроме того, движение спутников относительно источника излучений вызывает доплеровское смещение сигнала, в результате чего каждый спутник измеряет разную частоту, что позволяет измерить FDOA. Каждое измерение TDOA или FDOA может быть использовано для расчета линии положения (LOP) на поверхности Земли, которая будет проходить через местоположение источника излучения. Пересечение различных LOP может позволить определить приблизительное местоположение источника. Точность наблюдений с целью определения географического местоположения источников таких сигналов обычно составляет несколько километров от источника излучения.

РИСУНОК А1-23

Определение географического местоположения с использованием измерений TDOA/FDOA



Report SM.2355-A1-23

## Справочные документы

- [1] Caiyong Hao *et al.*, "Satellite-Based Radio Spectrum Monitoring: Architecture, Applications, and Challenges," *IEEE Network*, vol. 35, no. 4, pp. 20-27, July/August 2021.

## Приложение 2

### Примеры применения комбинированного метода определения географического местоположения

#### A2.1 Гибридный метод AOA/TDOA

В общем не существует единого метода, подобного методам на основе измерения разности времени прихода (TDOA) и угла прихода (AOA), который мог бы обеспечить точный расчет местоположения при любых условиях. У каждого метода есть свои преимущества и ограничения в том, что касается точности определения местоположения.

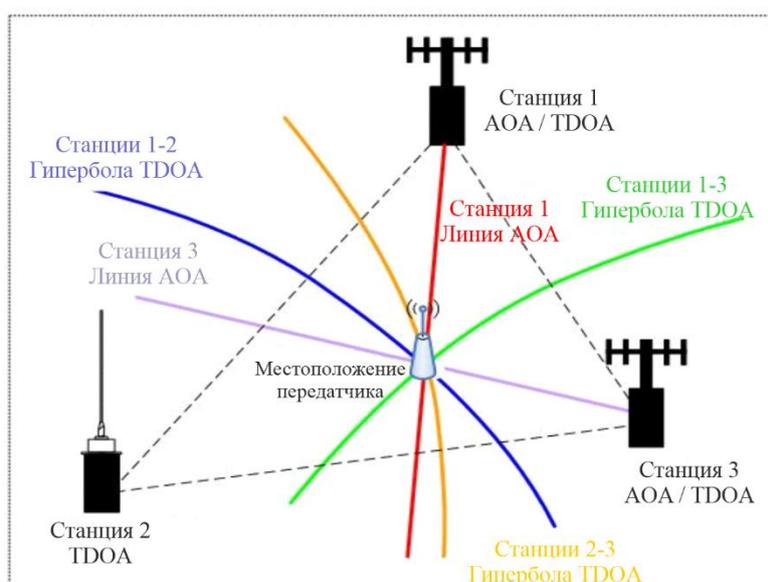
Методы определения местоположения TDOA, как правило, обеспечивают более высокую точность определения местоположения для широкополосных сигналов, чем методы определения местоположения AOA. Однако для определения местоположения источников излучения с помощью методов на основе TDOA требуется относительно большее число станций, чем для методов на основе AOA. Например, для определения местоположения методом TDOA необходимо не менее трех станций, расположенных надлежащим образом. С другой стороны, для определения местоположения методом AOA требуются две станции. Однако малейшая ошибка в измерениях углов приводит к большой

погрешности определения местоположения, если станция находится на значительном удалении от передатчика. Следовательно, чтобы добиться лучшей точности определения местоположения, необходимо рассматривать комбинацию двух или более схем определения местоположения, дополняющих друг друга.

Определение местоположения выполняется на основе обработки информации, полученной с каждой станции, включая результаты измерений угла прихода (AOA), результаты измерений разности времени прихода (TDOA), а также информацию о расположении станции. Сочетание метода AOA с методом TDOA (называемое гибридным методом AOA/TDOA) может способствовать устранению неоднозначности определения местоположения, присущей методу TDOA, и повысить точность определения местоположения. Это иллюстрируется на рисунке A2-1. Более полное обсуждение гибридных методов AOA/TDOA содержится в главе 4, пункт 4.7.3.6 Справочника МСЭ по контролю за использованием спектра, издание 2011 года.

РИСУНОК A2-1

Улучшение результатов с помощью комбинации методов AOA/TDOA

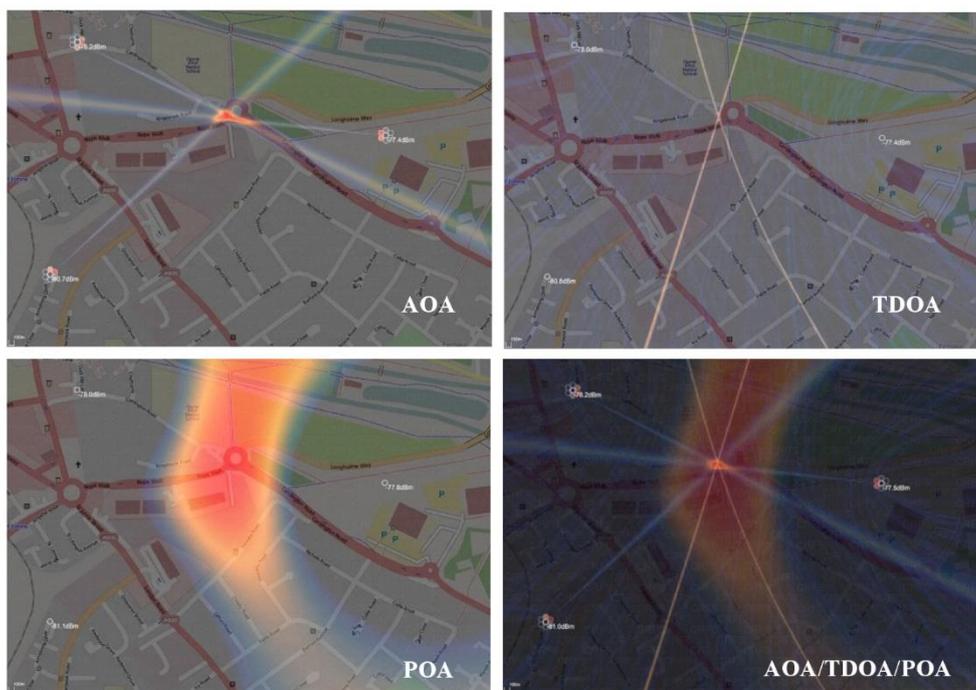


Report SM.2355-A2-01

Использование методов POA, как правило, дает лучшие результаты на определенных расстояниях от передатчика в зависимости от мощности, а также вида отражений и других искажений сигнала (например, поглотителей энергии), имеющих в этом районе. Это особенно важно, поскольку в данных методах обычно используются модели распространения в условиях прямой видимости, работающие как комбинированный метод определения географического местоположения наравне с AOA и TDOA. Это иллюстрируется на рисунке A2-2.

РИСУНОК А2-2

## Комбинированный метод определения географического местоположения



Report SM.2355-A2-02

## A2.2 Гибридный метод TDOA/GROA

### A2.2.1 Введение

Технология решетчатой сети контроля является одной из технологий, которая может дать пространственное описание и изображение неизвестных источников радиочастотного излучения и оценить ресурсы спектра с помощью узлов дистанционного распределенного интеллектуального контроля радиочастот. Технология решетчатой сети контроля соответствует задачам современного использования спектра и требованиям к эффективности управления ресурсами спектра в условиях городской агломерации. Компоненты и архитектура систем данного типа отличаются от других систем, использующих более традиционные системы радиопеленгации (РП) с определением угла прихода, которые могут быть более сложными, дорогостоящими и нередко используемыми в масштабных сценариях.

Китай поручил провести исследование в целях разработки решетчатой сети контроля, которая может быть развернута с использованием большого числа узлов в целях автоматического обнаружения, идентификации и определения местоположения источников мешающих радиосигналов на большой части городской агломерации Китая. В июне 2012 года началось осуществление экспериментальной программы, которая охватывает свыше 75 квадратных километров центральной части Шанхая с использованием 46 подключаемых к сети узлов, как показано на рисунке А2-3. В этой программе приняли участие более 50 научно-исследовательских работников и инженеров. Она является первым экспериментальным направлением по изучению методов контроля за использованием радиочастот в городской агломерации Китая с использованием большого числа экономичных узлов. Эта экспериментальная программа была выполнена в июне 2013 года. В августе 2013 года 16 участниками испытаний, представлявшими сторонние организации, было осуществлено опытное испытание. В течение почти одного года экспериментальная сеть функционировала в режиме испытания, которое завершилось в 2014 году.

РИСУНОК А2-3

Решетчатая сеть контроля, содержащая 46 узлов



Report SM.2355-A2-03

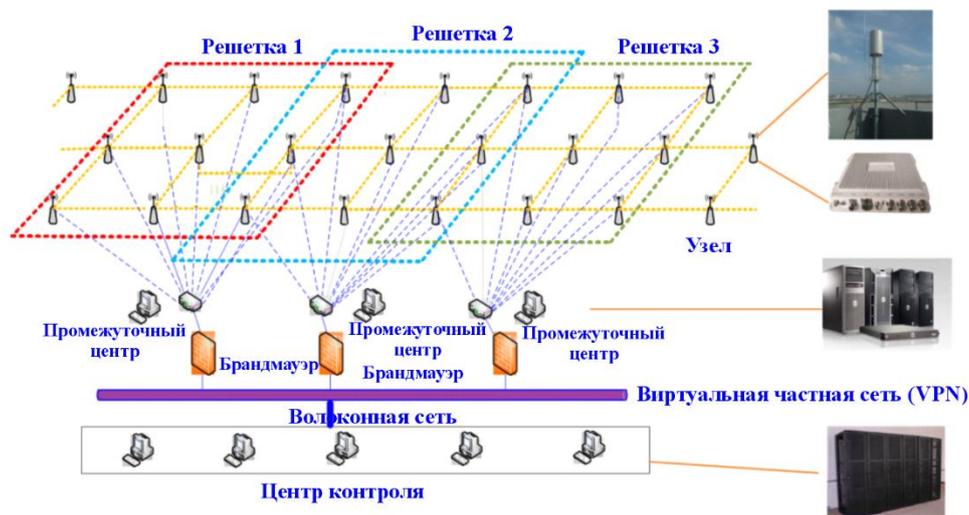
### A2.2.2 Архитектура решетчатой сети контроля

Решетчатая сеть контроля является типовой ячеистой сетью, которая обеспечивает возможность динамического взаимодействия и масштабирования структуры. В этой программе структура решетчатой сети контроля состоит из трех уровней, как показано на рисунке А2-4:

- уровень датчиков – включает все экономичные узлы, подключаемые к сети (биконическая антенна, датчик и антенна GPS);
- промежуточный уровень обслуживания – состоит из серверов промежуточных центров с несколькими решетками и предназначен для организации выполнения и распределения задач по контролю между датчиками;
- уровень центра контроля – включает все прикладное программное обеспечение, например, для контроля за использованием спектра, определения местоположения и интеллектуального анализа данных.

РИСУНОК А2-4

Архитектура решетчатой сети контроля



Report SM.2355-A2-04

Поток операций решетчатой сети контроля изображен на рисунке А2-5.



Report SM.2355-A2-05

Важным компонентом решетчатой сети контроля является экономичный узел, подключаемый к сети, как показано на рисунке А2-6. Он существенно отличается от радиопеленгаторного узла, который нередко является многоканальным и достаточно дорогостоящим. Поэтому затраты на решетчатую сеть контроля могут быть существенно более низкими благодаря использованию методов корреляции сигналов, в зависимости от размера зоны контроля и, соответственно, требуемого количества узлов. Исследование затрат имеет большое значение для развивающихся стран с ограниченным бюджетом, а также для городских агломераций с большим количеством узлов контроля.

РИСУНОК А2-6

Экономичный РЧ-датчик, подключаемый к сети,  
и биконическая антенна



Report SM.2355-A2-06

### А2.2.3 Функциональные возможности системы

#### А2.2.3.1 Перехват слабых сигналов

Испытание характеристик контроля проводилось на основе установленных датчиков решетчатой сети контроля. В течение 19 дней 16 специалистов по испытанию из сторонних организаций проводили опытное испытание в зонах охвата.

Минимальный уровень мощности излучения требуемого источника (источника излучения, подлежащего обнаружению) определяется как отношение сигнал/шум ( $SNR \geq 6$  дБ на входе приемника для разных частот (в том числе 115 МГц, 320 МГц, 575 МГц, 965 МГц, 1300 МГц, 1700 МГц и 2600 МГц) и различной ширины полос (в том числе 12,5 кГц, 25 кГц, 100 кГц, 200 кГц, 1,25 МГц и 8 МГц)). Результаты обнаружения приведены в таблице А2-1.

ТАБЛИЦА А2-1

**Вероятность обнаружения для разных уровней мощности источника излучения  
(131 измерение)**

	<b>Мощность источника излучения <math>\geq 1</math> Вт</b>	<b>Мощность источника излучения <math>\geq 0,1</math> Вт</b>	<b>Мощность источника излучения <math>\geq 0,05</math> Вт</b>
Измерения с обнаружением ( $SNR \geq 6$ дБ)	128	114	92
Вероятность обнаружения ( $SNR \geq 6$ дБ)	97,7%	87%	70,2%

#### А2.2.3.2 Гибридный метод определения географического местоположения

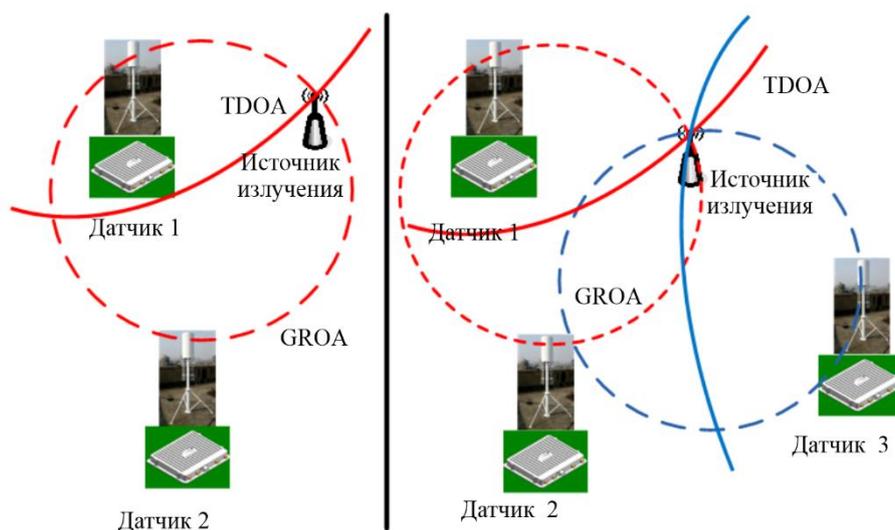
Было проведено испытание характеристик решетчатой технологии определения географического местоположения (гибридный метод TDOA и GROA – разность времени прихода и коэффициент усиления прихода).

Метод коэффициента усиления прихода (GROA) – это пассивный метод, основанный на измерении энергии, который можно использовать для оценки местоположения источника с помощью нескольких датчиков. Данный метод не требует точной временной синхронизации датчиков. Конкретное значение оценки GROA определяет окружность между двумя приемниками, на которой может находиться радиопередатчик.

Метод разности времени прихода (TDOA) является одним из наиболее перспективных методов определения местоположения для систем беспроводной связи. Методы TDOA основаны на оценке разности времени прихода сигнала от источника на несколько приемников. Конкретное значение оценки разности времени определяет гиперболу между двумя приемниками, на которой может находиться передатчик, при условии что источник и приемники находятся в одной плоскости, как показано на рисунке А2-7.

РИСУНОК А2-7

Схематическое изображение гибридного метода определения географического местоположения GROA/TDOA



Report SM.2355-A2-07

Результаты испытания показывают, что доля типовых ошибок (расхождение между истинным и предполагаемым местоположением менее 300 метров) составляет около 82,3% в случае 402 измерений. Доля типовых ошибок для значения расхождения менее 100 метров при использовании решетчатой технологии определения географического местоположения составляет около 24,9%. В таблице А2-2 приведены параметры испытательного передатчика.

В частности, решетчатая сеть контроля может различать и определять географическое местоположение двух источников сигнала, одновременно работающих на одинаковой частоте, благодаря разрешающей способности решетки. В примере испытания с двумя источниками излучения со следующими параметрами: частота 220 МГц, ширина полосы 50 кГц, мощность 1 Вт и модуляция QPSK, решетчатая сеть контроля обеспечивает высокое пространственное разрешение для одновременно и независимо друг от друга работающих источников излучения, находящихся на разных расстояниях (на рисунках А2-8, А2-9 и А2-10), за исключением случая, когда два источника излучения находятся в одной решетке (на рисунке А2-11).

ТАБЛИЦА А2-2

**Параметры испытания с помощью гибридного метода определения географического местоположения**

Параметры	Значение
Частота (МГц)	115, 320, 575, 965, 1300, 1700, 2 600
Ширина полосы (Гц)	12,5 кГц, 25 кГц, 100 кГц, 200 кГц, 1,25 МГц, 8 МГц
Модуляция	AM, FM, FSK, QPSK, MSK, QAM
Мощность	1 Вт

РИСУНОК А2-8

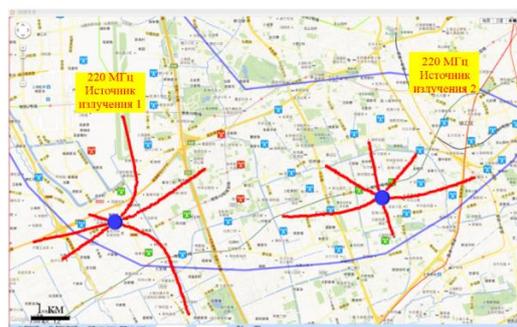
**Пространственное разделение сигналов на совпадающей частоте**  
(расстояние между парными источниками излучения равно 7,2 км)



Report SM.2355-A2-08

РИСУНОК А2-9

**Пространственное разделение сигналов на совпадающей частоте**  
(расстояние между парными источниками излучения равно 5,7 км)



Report SM.2355-A2-09

РИСУНОК А2-10

**Пространственное разделение сигналов на совпадающей частоте**  
(расстояние между парными источниками излучения равно 4,1 км)



Report SM.2355-A2-10

РИСУНОК А2-11

**Пространственное разделение сигналов на совпадающей частоте**  
(расстояние между парными источниками излучения равно 0,6 км)



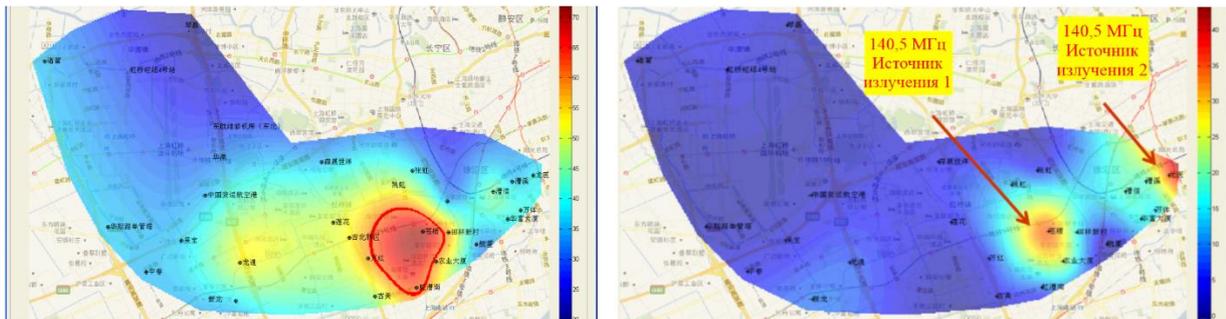
Report SM.2355-A2-11

### А2.2.3.3 Распределение напряженности поля

Напряженность поля может быть измерена с помощью всех узлов одновременно, а распределение канала в зоне охвата можно зарегистрировать и рассчитать с помощью решетчатой сети контроля путем интерполяции данных, поступающих в реальном времени. Распределение рассчитывается в соответствии с напряженностью поля, зарегистрированной всеми датчиками, при этом данные контроля объединяются в реальном времени. Ниже представлены два примера для случая одного источника излучения мощностью 3 Вт и двух источников излучения мощностью 3 Вт, работающих одновременно.

РИСУНОК A2-12

Распределение напряженности поля (частота 140,5 МГц, ширина полосы 12,5 кГц, ЧМ, мощность 3 Вт)



а) Тест с одной рацией “уоки-токи”

б) Тест с двумя рациями “уоки-токи”

Report SM.2355-A2-12

На рисунке A2-12 показано, что в условиях городской агломерации, очевидно, имеет место анизотропное распространение радиоволн, которое отличается от теоретических моделей изотропного распространения. Два источника излучения, работающие на одной частоте, могут быть четко разделены с помощью решетчатой сети контроля. При этом расстояние между источниками излучения составляет менее 3 км. Вместе с тем такое разделение трудно осуществить, используя более традиционную сетевую систему радиопеленгатора в условиях городской агломерации.

#### A2.2.3.4 Географическая занятость спектра и распределение электромагнитного излучения

В традиционном понимании занятость спектра нередко относится к одному значению частоты в одном месте. Кроме того, сложно дать четкое описание того, как используются ресурсы спектра. Решетчатая сеть контроля может обеспечить подробную пространственную информацию о занятости спектра. Занятость спектра может быть измерена с помощью всех узлов одновременно, как показано на рисунке A2-13 (частота 400,5 МГц, ширина полосы 12,5 кГц, ЧМ, мощность 3 Вт).

С помощью необработанных данных об использовании спектра, полученных в решетчатой сети контроля, можно также описать географическое распределение электромагнитного излучения в охваченных зонах, как показано на рисунке A2-14. Диапазон частот составляет от 30 МГц до 3000 МГц, а единицей измерения электромагнитного излучения является мкВт/см<sup>2</sup>.

РИСУНОК A2-13

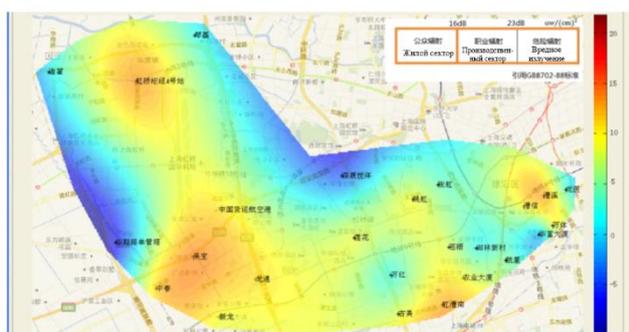
Географическое распределение занятости спектра



Report SM.2355-A2-13

РИСУНОК A2-14

Распределение электромагнитного излучения



Report SM.2355-A2-14

#### 2.2.4 Выводы

Решетчатая сеть контроля с экономичными узлами способна перехватывать слабые сигналы, обеспечивать подробную информацию о результатах радиоконтроля и описывать пространственное распределение спектра для условий городской агломерации. В связи с этим ее целесообразно и эффективно использовать для быстрого определения пространственного распределения спектра и местоположения источников помех.

#### Список сокращений

ANC	Adaptive noise cancelling	Адаптивное подавление шума
AOA	Angle of arrival	Угол прихода
AWGN	Additive white Gaussian noise	Аддитивный белый гауссовский шум
CDMA	Code division multiple access	Многостанционный доступ с кодовым разделением
DSP	Digital signal processing	Цифровая обработка сигналов
FDOA	Frequency difference of arrival	Разница частоты прихода
HOS	Higher order statistics	Статистические величины высших порядков
LIA	Locked-in amplifier	Синхронизированный усилитель
LMS	Least mean square	Метод наименьших средних квадратов
MUSIC	MUltiple SIgnal Classification	Классификация множественных сигналов
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing	Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением
POA	Power of arrival	Мощность прихода
PSK	Phase shift keying	Фазовая манипуляция
QAM	Quadrature amplitude modulation	Квадратурная амплитудная модуляция
RLS	Recursive least square	Рекурсивный метод наименьших средних квадратов
SCD	Spectral correlation density	Спектральная плотность корреляции
TDOA	Time difference of arrival	Разница времени прихода

---