

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R SM.1600-1
(09/2012)

**Техническая идентификация
цифровых сигналов**

Серия SM
Управление использованием спектра



Международный
союз
электросвязи

Предисловие

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

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

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

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

Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2013 г.

© ITU 2013

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.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R SM.1600-1

Техническая идентификация цифровых сигналов

(2002-2012)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описаны процессы, методы и инструменты технической идентификации цифровых сигналов. Проведено сравнение методов и инструментов и рекомендуется применение для разных сценариев. Рекомендация не содержит подробного пояснения алгоритмов или особенностей проектных решений аппаратных и программных инструментов.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что неуклонно расширяется масштаб использования радио;
- b) что широко используются цифровые сигналы;
- c) что использование постоянно возрастающего числа устройств не требует лицензии или процесса сертификации, и это создает трудности для администраций при идентификации источника излучений;
- d) что формируется тенденция к использованию того же спектра несколькими технологиями радиосвязи;
- e) что жалобы на помехи при использовании цифрового излучения зачастую сложно разрешить;
- f) что техническая идентификация является, как правило, обязательным условием любого измерения цифровых сигналов, имеющих сложную форму, которые используются во многих цифровых системах связи;
- g) что существуют базы данных сигналов, которые могут связать современные цифровые сигналы с их соответствующими внешними и внутренними параметрами;
- h) что доступны новые инструменты и методы анализа и идентификации, которые могут обеспечить распознавание характера неизвестного сигнала или выполнить идентификацию современных цифровых стандартов,

рекомендует

- 1** идентифицировать цифровые сигналы следующим образом:
 - процесс общей идентификации на основе внешних характеристик сигнала;
 - идентификация на основе внутренних характеристик сигнала (тип модуляции и другие внутренние параметры формы сигналов), если имеются некоторые/частичные априорные знания о сигнале;
 - идентификация на основе корреляции с характеристиками известных форм сигналов, если имеются обширные априорные знания о сигнале;
 - идентификация, подтвержденная демодуляцией, декодированием и сравнением сигнала с характеристиками известных форм сигналов,
- 2** следовать процессу, описанному в Приложении 1.

Приложение 1

Введение

В настоящем Приложении описаны шаги, разработанные для выполнения либо по отдельности, либо совместно в последовательности в целях идентификации рассматриваемого цифрового сигнала. Данная информация предназначена для представления теоретической, практической и логической консультационной помощи при обработке стандартных современных цифровых сигналов. В тексте рассматривается использование внешних параметров сигналов, приводятся рекомендации в области анализа внутренних параметров сигналов для более точной классификации сигнала, и описывается использование программных инструментов и методов для положительной идентификации стандартного современного цифрового сигнала.

Некоторые современные анализаторы спектра могут снимать характеристики сигналов, однако многие из них не могут сохранить и предоставить данные сигналов с синфазно-квадратурной модуляцией (I/Q), что полезно для более глубокого анализа свойств сигнала. Основное внимание в настоящем Приложении уделяется векторным анализаторам сигналов и приемникам контроля, тем не менее в некоторых случаях могут также использоваться анализаторы спектра с функциями анализа сигнала.

Определения

Стандартные современные цифровые сигналы: эти сигналы включают, как правило, следующие схемы модуляции и форматы многостанционного доступа:

- амплитудная, фазовая и частотная манипуляция (ASK, PSK, FSK), включая манипуляцию минимальным сдвигом (MSK);
- квадратурная амплитудная модуляция (QAM);
- ортогональное частотное разделение (OFDM);
- многостанционный доступ с временным разделением (TDMA);
- многостанционный доступ с кодовым разделением (CDMA);
- (доступ) с (кодированным) ортогональным частотным разделением (C)OFDM(A);
- многостанционный доступ с частотным разделением каналов с одной несущей (SC-FDMA);
- выравнивание в частотной области с одной несущей (SC-FDE).

Системы и программное обеспечение идентификации сигналов: это класс систем или программ, обеспечивающих положительную идентификацию современного цифрового сигнала путем корреляции формы сигнала с библиотекой известных шаблонов, таких как преамбула, мидамбула, защитный интервал, слово синхронизации, сигналы синхронизации, настроечные последовательности, пилотные символы и коды, коды скремблирования, и путем сопоставления демодулированного или декодированного сигнала с библиотекой известных шаблонов, таких как данные сигнализации в каналах вещания.

Данные сигнала I/Q: I/Q означает данные сигналов с синфазно-квадратурной модуляцией. Данные I/Q, полученные в результате дискретизации сигнала, позволяют сохранить всю информацию об амплитуде, частоте и фазе, содержащуюся в сигнале. Это дает возможность точного анализа и демодуляции сигнала различными способами и является общепринятым методом детального анализа сигналов.

Программное обеспечение распознавания модуляции: это программное обеспечение, которое может работать с исходными I/Q или демодулированными записями аудиосигнала и оценивать следующие характеристики сигналов:

- центральная частота и частотный разнос между несущими;
- ширина полосы сигнала;
- длительность сигнала и межимпульсная длительность (в случае импульсного сигнала);
- класс модуляции: одна или несколько несущих, линейная или нелинейная;
- формат модуляции;
- скорость модуляции;

- отношение сигнал-шум (SNR)¹;
- определяемые сигналом шаблоны (такие, как сигналы синхронизации/пилот-сигналы, защитные интервалы, структура кадра).

Векторные анализаторы сигналов (VSA) и программное обеспечение VSA: инструментальные VSA объединяют либо супергетеродинную технологию или аппаратуру прямого преобразования с высокоскоростными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) и цифровой обработкой сигналов (DSP), программируемыми вентильными матрицами (FPGA) или встроенными общими программируемыми процессорами (GPP) для выполнения быстрых измерений спектра с высоким разрешением, демодуляции и расширенного анализа во временной области и области спектр-время. VSA особенно полезны для определения характеристик сложных сигналов, таких как импульсные сигналы, сигналы переходного периода или сигналы с цифровой модуляцией, используемые для целей связи, видео и вещания. VSA обеспечивают для пользователя возможность сбора необработанных I/Q о рассматриваемых сигналах, возможность распознавания модуляции и возможность идентификации сигналов, определенных выше. Программное обеспечение VSA может осуществлять или не осуществлять управление физическим приемником. Однако во всех случаях оно дает пользователю возможность анализировать необработанные данные I/Q, либо снятые с приемника, либо полученные из файлов.

Приемник контроля: приемник контроля выбирает радиосигнал из всех сигналов, перехватываемых антенной, к которой он подключен, и воспроизводит на выходе приемника информацию, передаваемую радиосигналом, обеспечивая при этом доступ для измерения детальных характеристик этого сигнала. Как правило, это выполняется следующим образом:

- доступ к промежуточным этапам цепочки сигнала; или
- в большинстве современных приемников путем записи или выдачи в качестве выходных данных полных характеристик амплитуды и фазы (обычно путем дискретизации и сохранения данных I/Q).

Величина вектора ошибки (EVM): вектор ошибки – это векторная разница в данный конкретный момент времени между идеальным опорным сигналом и измеренным сигналом. Иными словами, это остаточный шум и искажение, остающиеся после изъятия идеальной версии сигнала. EVM является среднеквадратическим значением (RMS) вектора ошибки во времени в моменты тактовых переходов символов (или чипов).

Шаги идентификации цифрового сигнала

1 Оценка внешних характеристик сигнала

Первым шагом осуществления идентификации цифрового сигнала является применение простейшего подхода. Он включает сравнение "внешних" параметров сигнала с базой данных лицензированных сигналов регуляторного органа и частотным планом. К внешним параметрам сигнала относятся следующие:

- центральная частота и частотный разнос между несущими;
- ширина полосы сигнала;
- форма спектра;
- длительность сигнала (в случае импульсного или перемежающего сигнала);
- сдвиг частоты.

Визуальная проверка и сопоставление исследуемого сигнала с базой данных лицензий регуляторного органа является хорошей отправной точкой при идентификации конкретного цифрового сигнала. Совпадение сигнала со всеми внешними параметрами обеспечивает высокие шансы правильной идентификации без дальнейшего анализа.

¹ Этот параметр не является общепринятым параметром модуляции, однако он часто предоставляется программным обеспечением распознавания модуляции.

В таблице 1 приведен пример Таблицы распределения частот. В таблицу включено общее описание служб, которым разрешена работа в данной полосе, эксплуатационные параметры, значения ширины полосы и размещение каналов. Все эти данные могут использоваться для поиска совпадения внешних параметров сигнала и проведения начальной оценки идентичности рассматриваемого сигнала.

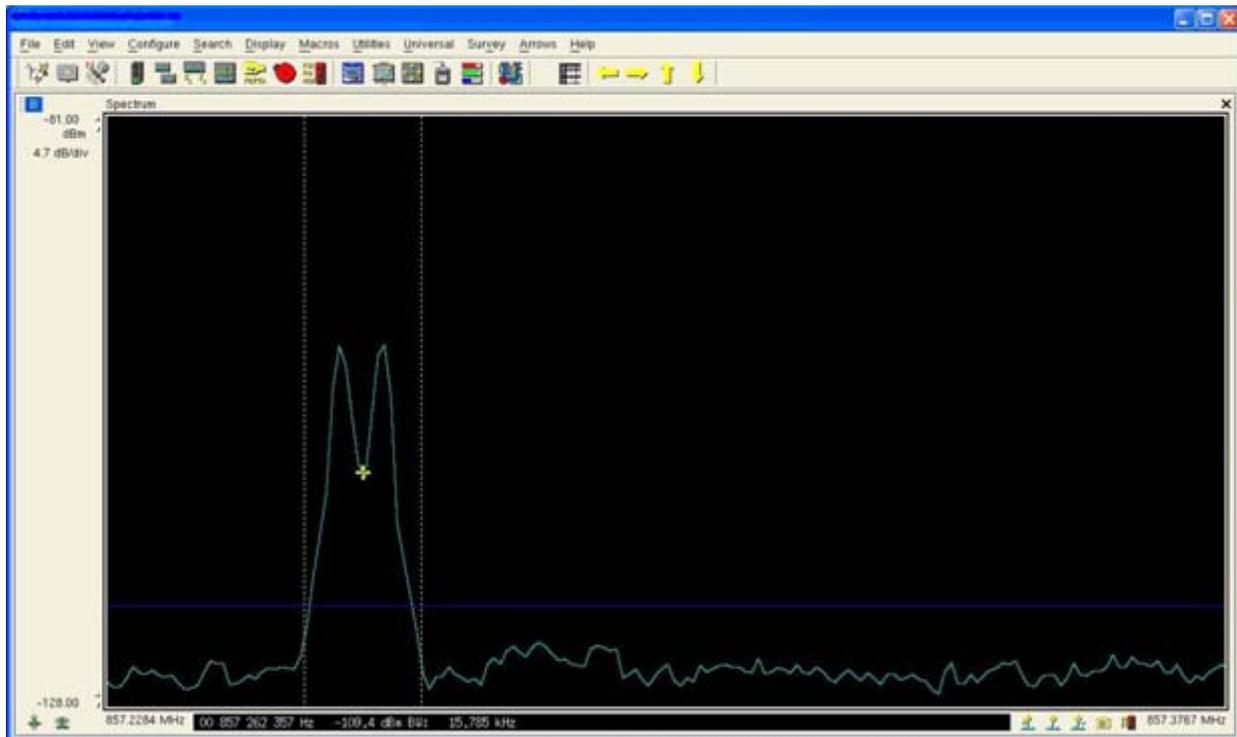
ТАБЛИЦА 1
Пример таблицы распределения частот

Таблица распределения частот			698–941 МГц (УВЧ)		Стр. 29
Международная таблица			Таблица Соединенных Штатов		Часть(и) правил ФКС
Таблица для Района 1	Таблица для Района 2	Таблица для Района 3	Федеральная таблица	Нефедеральная таблица	
(См. предыдущую страницу)	698–806 ФИКСИРОВАННАЯ ПОДВИЖНАЯ 5.313В 5.317А РАДИОВЕЩАТЕЛЬНАЯ	(См. предыдущую страницу)	698–763	698–763 ФИКСИРОВАННАЯ ПОДВИЖНАЯ РАДИОВЕЩАТЕЛЬНАЯ NG159	Беспроводная связь (27) Конвертор IPTV и TV (74G)
			763–775	763–775 ФИКСИРОВАННАЯ ПОДВИЖНАЯ NG158 NG159	Сухопутная подвижная связь общественной безопасности (90R)
			775–793	775–793 ФИКСИРОВАННАЯ ПОДВИЖНАЯ РАДИОВЕЩАТЕЛЬНАЯ NG159	Беспроводная связь (27) Конвертор IPTV и TV (74G)
790–862 ФИКСИРОВАННАЯ ПОДВИЖНАЯ, за исключением воздушной подвижной 5.316В 5.317А РАДИОВЕЩАТЕЛЬНАЯ	5.293 5.309 5.311А		793–805	793–805 ФИКСИРОВАННАЯ ПОДВИЖНАЯ NG158 NG159	Сухопутная подвижная связь общественной безопасности (90R)
			805–806	805–806 ФИКСИРОВАННАЯ ПОДВИЖНАЯ РАДИОВЕЩАТЕЛЬНАЯ NG159	Беспроводная связь (27) Конвертор IPTV и TV (74G)

Используя анализатор спектра, векторный анализатор сигналов или приемник контроля, регуляторный орган может определить центральную частоту сигнала, частотный разнос между соседними несущими и ширину полосы сигнала. Частота должна проверяться по частотному плану, с тем чтобы убедиться в центровке сигнала в одном из распределенных каналов. Кроме того, следует проверить ширину полосы сигнала на соответствие стандартам размещения каналов для рассматриваемой полосы частот. На рисунке 1 показано, как могут использоваться индикаторные маркеры для определения центральной частоты, ширины полосы сигнала и мощности, измеренной на входе приемника.

РИСУНОК 1

Пример отображения спектра с маркерами



SM.1600-01

В таблице 2 представлен всеобъемлющий набор методов анализа, которые может использовать регуляторный орган для обнаружения сигналов и оценки внешних параметров сигналов. Многие прикладные программы анализа сигналов обладают возможностью выполнения математических операций с данными времени или спектральными данными, или же серией спектральных данных. Такие прикладные программы могут использоваться для проведения определенных оценок внешних параметров сигналов.

ТАБЛИЦА 2

Ручные методы обнаружения сигналов и извлечения внешних параметров

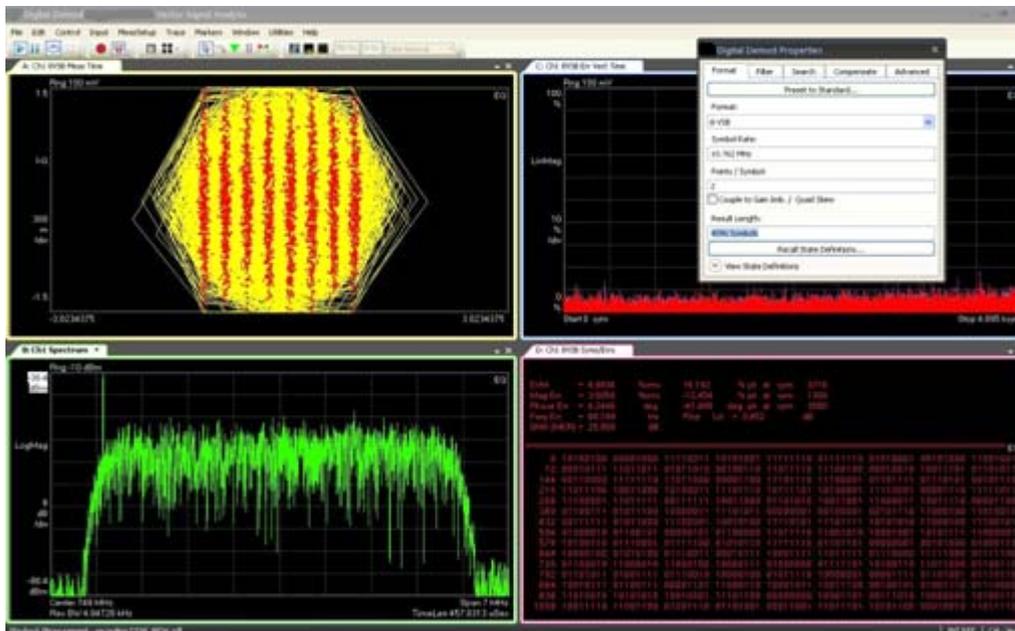
Подлежащие измерению параметры	Инструменты анализа	Тип модуляции	Радиосреда
Наличие сигналов радиосвязи	Кросс-корреляция I/Q сигнала или мгновенной амплитуды A_i с опорным сигналом	Любой тип модуляции, но в особенности для известных сигналов TDMA, CDMA и DSSS	Любая
	Спектральная плотность мощности	Любой тип модуляции	Среднее или высокое SNR
	Автокорреляция и циклическая автокорреляция	OFDM, SC-FDMA, SC-FDE	Любая
	Спектральный корреляционный анализ	Неизвестные DSSS и слабые сигналы	Любая
PRF или длина пачки	Амплитудно-временной анализ сигнала	ООК, радар, IFF, другие импульсные сигналы	Среднее или высокое SNR
Несущая частота Поднесущие частоты	Спектральная плотность мощности	Любой тип модуляции	Среднее или высокое SNR
	Гистограмма мгновенной частоты, F_i	FSK	Среднее или высокое SNR
	Среднее мгновенной частоты, F_i	FSK	Среднее или высокое SNR
	Спектр I/Q сигнала в степени N ($=M$ (MPSK), 4 (QAM) или $1/h$ для CPM)	PSK, QAM, CPM	Положительное SNR
	Спектральный корреляционный анализ	Любая линейная модуляция и особенно ASK, BPSK, QPSK	Любая
	Спектр сигнального модуля в степени 2 или 4 с жесткой фильтрацией	$\pi/2$ DBPSK, $\pi/4$ DQPSK, SQPSK	Положительное SNR Любая
Ширина полосы излучения и размещение каналов	Спектральная плотность мощности в сравнении с маской или функцией предельной линии	Любой тип модуляции	Среднее или высокое SNR
Частотный разнос между поднесущими (Сдвиг для FSK)	Спектральная плотность мощности. Поиск гармоник и/или маркеры гармоник	FSK, OFDM, COFDM	Среднее или высокое SNR
	Гистограмма мгновенной частоты, F_i	FSK	Среднее или высокое SNR

Форма спектра: другим методом идентификации сигналов с использованием внешних параметров сигнала является оценка формы спектра или сигнатуры. Большинство программного обеспечения VSA имеет демонстрационную библиотеку стандартных современных цифровых сигналов. Эти демонстрационные базы позволяют регуляторному органу рассматривать внешние параметры (и в некоторых случаях – внутренние) сигналов, в том числе форму спектра, длительность и другие.

Некоторые виды излучения обладают особенностями, которые уникальны для данного типа передачи, например для передачи пилот-сигналов. В ряде видов передачи цифрового телевидения высокой четкости пилот-сигнал может помещаться в низкочастотной части сигнала. На представленном на рисунке 2 экране отображена телевизионная передача (США, канал 60, 749 МГц) с использованием системы ATSC. Следует обратить внимание на нижнюю левую трассировку и уникальную форму спектра с наличием пилот-сигнала. Эта форма, в сочетании с центральной частотой и шириной полосы, обеспечивает четкую индикацию типа передачи.

РИСУНОК 2

Экран VSA, на котором отображается уникальная форма спектра



SM.1600-02

Если для положительной идентификации необходима более подробная информация о сигнале, потребуется исследование внутренних параметров сигнала.

2 Оценка внутренних параметров сигнала

После оценки внешних параметров сигнала, как это описано в разделе 1, следующим шагом идентификации цифрового сигнала является анализ характеристик во временной области (или внутренних) исследуемого сигнала. Для этого потребуется VSA или приемник контроля (или приемлемый анализатор спектра), способный выполнять запись I/Q. К внутренним параметрам сигнала относятся следующие:

- формат модуляции (то есть QPSK, QAM, GMSK, FSK, PSK);
- скорость модуляции; скорость модуляции часто называют скоростью в бодах;

a) Запись I/Q

- установить центральную частоту: VSA или приемник контроля должны быть центрированы по частоте, на которой, как известно, появится сигнал;
- установить ширину полосы: ширина полосы захвата должна быть установлена такой, чтобы включать полный сигнал, но не настолько широкой, чтобы захватывать соседний канал. Экран VSA или приемника контроля может использоваться для измерения центральной частоты и ширины полосы сигнала. Значения ширины полосы захвата, имеющиеся в современных VSA и приемниках контроля, лежат в пределах от 1 кГц до 160 МГц.

В случае узкополосных сигналов оператор должен использовать соответствующую установку ширины полосы, В. Приемлемые значения В составляют:

$B = 100 \text{ Гц} - 4 \text{ кГц}$ (ширина полосы телеграфных или телефонных сигналов);

$B = 15-45 \text{ кГц}$ (излучение со средней шириной полосы).

Использовать значения типовой ширины полосы канала (В), которые представлены в таблице 3, плюс приемлемый запас (10–50%), допуская при этом постобработку с алгоритмами цифровой фильтрации и предварительного формирования сигналов.

Более широкая полоса захвата сигнала требует более сложных АЦП или цифровых осциллографов с процессорами сигналов. Рекомендуется использовать систему, в состав которой входят следующие компоненты:

- аналоговый или цифровой приемник с точно регулируемой центральной частотой, широким динамическим диапазоном и регулируемым усилением (50–60 дБ);
- фильтры, преобразователи групповых частот, аналого-цифровые преобразователи и устройства записи:
 - 14-битовый или выше;
 - частота дискретизации выше 4 дискретов на каждый символ с цифровой модуляцией;
 - глубина хранения обеспечивает длительность записанного сигнала в несколько миллисекунд для широкополосных сигналов и несколько секунд для узкополосных сигналов.

Большинство используемых в связи современных цифровых сигналов имеют ширину полосы менее 20 МГц, хотя и существует ряд исключений².

² Например, стандарты связи для WLAN (802.11ac и 802.11ad) для предназначенных для малых расстояний применений требуют ширины полосы от 160 МГц до более чем 2 ГГц.

ТАБЛИЦА 3

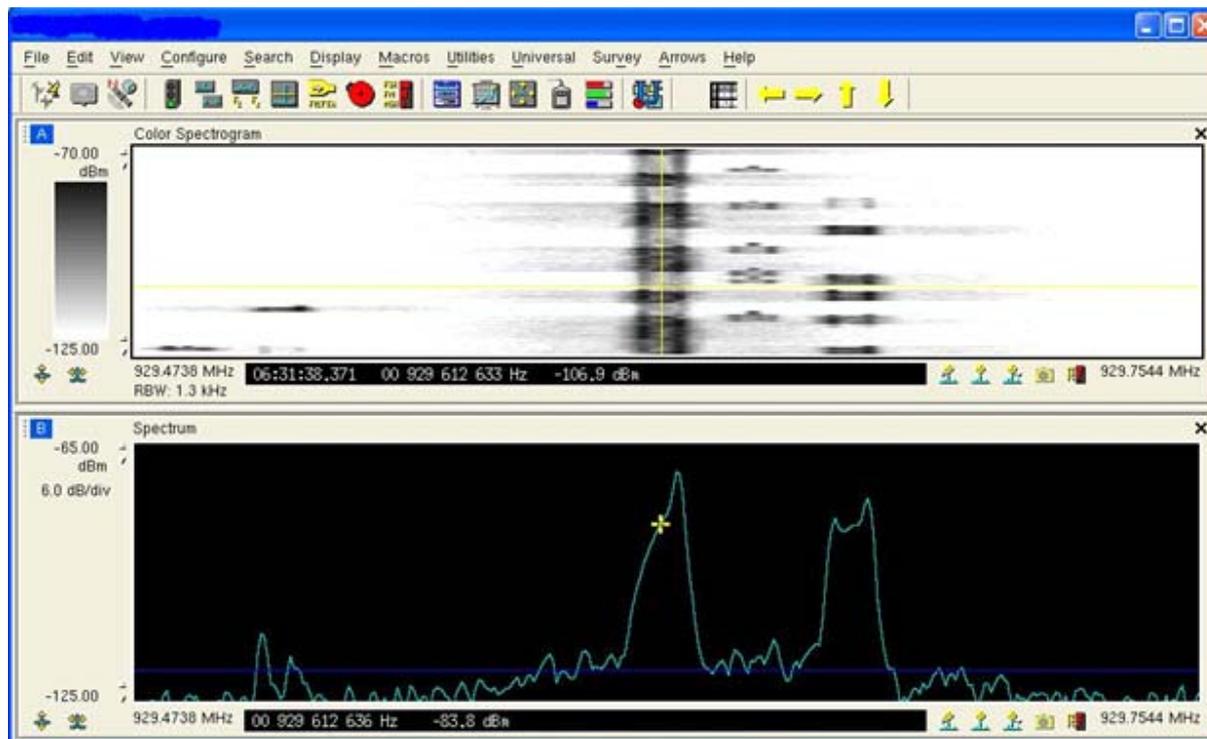
Пример ширины полосы каналов распространенных цифровых сигналов

Тип сигналов	Ширина полосы канала
GSM	200 кГц
CDMA (IS-95)	1,25 МГц
CDMA2000	1,25 МГц (связывание каналов при 1xEv-DO Rev. B, C)
3GPP WCDMA	5 МГц
3GPP TD-CDMA	5 МГц
3GPP LTE	1,4; 3; 5; 10; 15; 20 МГц
WIMAX IEEE 802.16xxx	3,5; 5; 7; 8,75; 10; 20 МГц
TETRA	25 кГц; 50 кГц; 100 кГц; 150 кГц
WLAN и WIFI	22 МГц (IEEE 802.11b) 20 МГц (IEEE 802.11a,g) 20 МГц; 40 МГц (IEEE 802.11n) 20 МГц; 40 МГц; 80 МГц (IEEE 802.11ac)
DECT	1,728 МГц
ZigBee	5 МГц
ATSC	6 МГц
DVB-H	5; 6; 7; 8 МГц
T-DMB	1,536 МГц

- Установить длительность записи: как правило, для определения формата модуляции и скорости передачи символов сигнала потребуется небольшая длительность записи (менее одной секунды). VSA и приемники контроля имеют постоянную память записи сигналов, поэтому при более широком диапазоне сбора память захвата заполнится в течение меньшего времени по сравнению с захватом узкополосных сигналов. При необходимости пользователь может наблюдать длительность сигнала на VSA для обеспечения надлежащей длительности записи и оптимального использования памяти захвата.
- Значения длительности сигнала могут наблюдаться путем использования индикатора спектрограммы или каскадной диаграммы. Такой тип спектрального индикатора отображает на одном экране характеристики частоты, мощности и времени (см. рисунки 3 и 4, ниже). Мощность сигнала представляется изменением цвета или шкалой серого, как показано на цветовой полосе в левой части экрана. С течением времени происходит перемещение изображения на экране снизу вверх и под спектрограммой представляется текущее изображение спектра.

РИСУНОК 3

Спектрограмма дискрета с отображением спектра

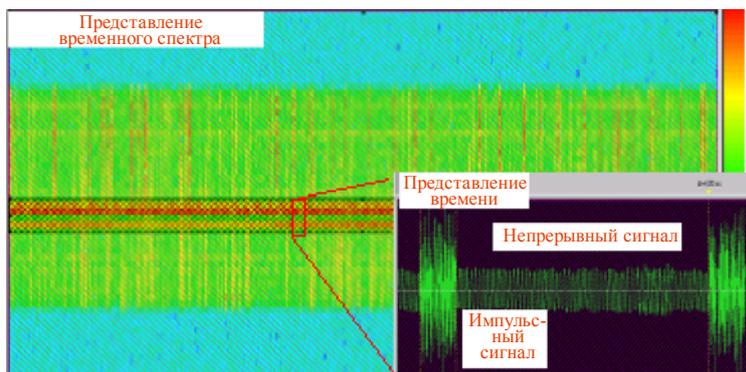


SM.1600-03

Для создания представления временного спектра может использоваться программное обеспечение векторного анализа сигнала, что поможет регуляторному органу понять сигнальную обстановку на интересующей частоте и определить надлежащую установку длительности при выполнении записи I/Q. Для обеспечения эффективного анализа внутренних параметров сигнала следует использовать соответствующие методы разделения сигналов на совпадающей частоте.

РИСУНОК 4

Диаграмма временного спектра (частота/амплитуда по оси Y и время по оси X)



SM.1600-04

- Триггер записи: если сигнал имеет малый коэффициент заполнения, то для инициирования записи может использоваться величина ПЧ. Величина ПЧ в качестве триггера записи – это типовая функция VSA и приемников контроля. Она дает пользователям возможность определить уровень принимаемой предварительно детектированной мощности РЧ, при котором будет начата запись. Правильная установка механизма запуска имеет важное значение и требует определенных знаний о сигнале и характере шума на интересующей частоте. Установка уровня триггера слишком низким может привести к тому, что запись будет начинаться при шумовом выбросе, произошедшем в пределах ширины полосы записи. Установка уровня триггера слишком высоким приведет к пропуску полезного сигнала. Если наблюдаемый сигнал является импульсным или имеет очень малую длительность, следует использовать память АЦП или память задержки для эффективного запуска записи до времени срабатывания триггера и завершения записи после ослабления сигнала или по истечении надлежащего времени записи.
- Проверить форму записанного сигнала: программное обеспечение VSA дает пользователю возможность немедленного просмотра записанного сигнала, с тем чтобы убедиться в правильности использованных центральной частоты, ширины полосы, длительности и времени срабатывания триггера.

b) Классификация сигнала с помощью программного обеспечения распознавания модуляции

После успешного осуществления записи I/Q пользователь может "воспроизвести" сигнал с помощью ряда прикладных программ, с тем чтобы провести более глубокий анализ внутренних параметров сигнала. VSA и приемники контроля разных производителей выполняют запись необработанных данных I/Q, используя собственные проприетарные заголовки, содержащие такую информацию о сигнале, как центральная частота, ширина полосы записи, частота дискретизации, дата и время и т. д. Структура данных обычно публикуется в технических руководствах и может использоваться для установок идентификации сигнала или программного обеспечения распознавания модуляции.

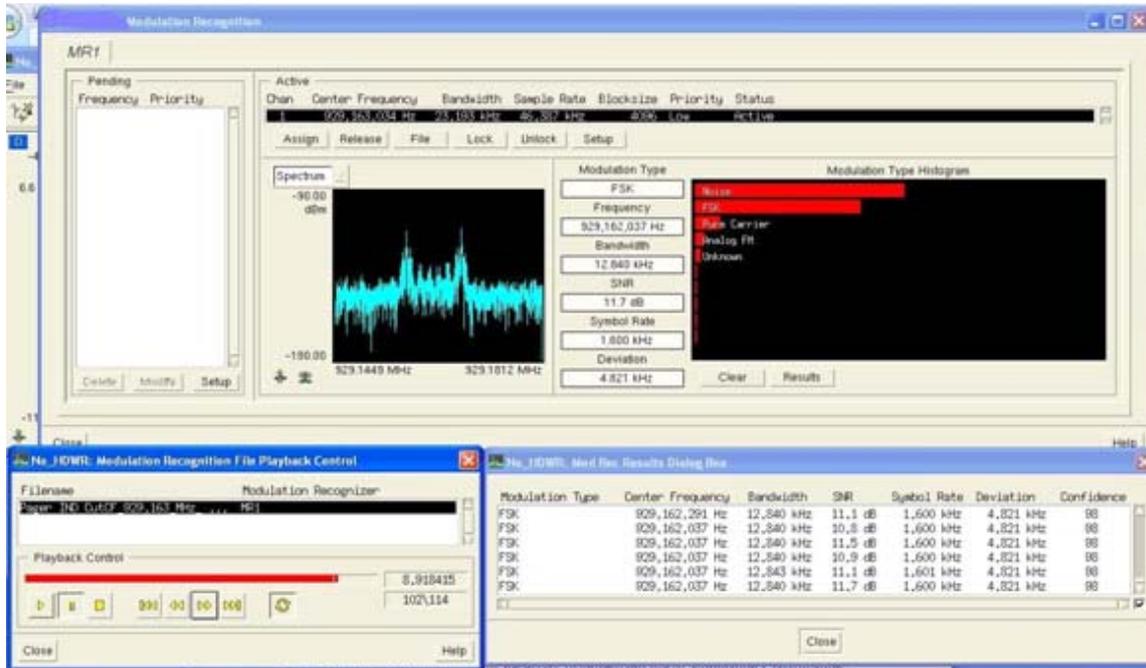
Для выполнения успешного измерения в целях классификации модуляции должны быть выполнены установки программного обеспечения для надлежащей обработки записи. Как правило, необходимы следующие настройки программного обеспечения:

- центральная частота;
- частота дискретизации и ширина полосы сигнала;
- фильтрация по соседнему каналу;
- обнаружение пачки импульсов;
- размер блока: этот параметр определяет, какой объем данных I/Q будет анализироваться для определения модуляции. Например, если дискреты I/Q составляют 16 кбайтов, а размер блока установлен равным 2 кбайтам, то программное обеспечение распознавания модуляции будет оценивать тип модуляции и скорость передачи символов 8 (восемь) раз на протяжении прохождения файла. Если сигнал присутствует только в малой части файла, возможно, что полезная информация будет содержаться только в одном или двух измерениях.

На рисунке 5 показано воспроизведение выполненной записи I/Q прикладной программой распознавания модуляции, которая определяет нелинейную модуляцию FSK. Размер используемого для каждого измерения блока составляет 4 к (или 4096), а в записи I/Q (как видно в левой нижней части окна) содержится 114 блока. Использовалась память задержки, для того чтобы запись началась до запуска сигнала. В результате первые 61 измерение были классифицированы либо как шум, либо как чистая несущая. Процесс был приостановлен при первом появлении сигнала и был классифицирован как FSK на скорости 1600 бод, как показано на рисунке.

РИСУНОК 5

Пример работы программного обеспечения распознавания модуляции



SM.1600-05

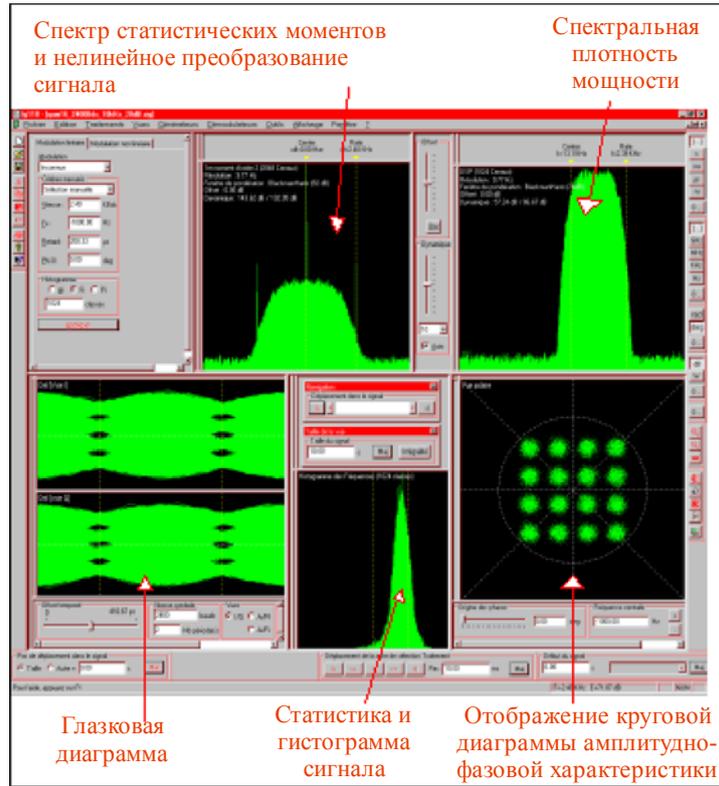
После обработки большей части записи I/Q число полученных в результате измерений FSK со скоростью передачи символов 1600 выросло и составило значительную процентную долю. Это подтверждается гистограммой результатов определения модуляции (красный столбик), показанной в верхней правой части окна. Также видно, что были обработаны 102 блока записи.

В конце обработки все 114 блоков данных были обработаны и сигнал более не видим в окне экрана. Результатом измерения снова становится шум, но имеется достаточно информации, чтобы сделать вывод: сигнал с FSK, 1600 бод с девиацией в 4,821 кГц и SNR порядка 11 дБ. В этом файле за один раз обрабатывался один блок, и пошаговое движение по записи выполнялось вручную. Такой метод обеспечивает максимальный контроль над процессом анализа.

На рисунке 6 приведен другой пример обработки для оценки параметров модуляции в линейно модулированном сигнале (16 QAM). Эта обработка показывает спектр статистических моментов и нелинейное преобразование сигнала в верхней левой части экрана, а также спектральную плотность мощности в нижней правой части экрана. Этот тип программного обеспечения весьма полезен для определения внутренних параметров сигнала и служит хорошим началом демодуляции параметров.

РИСУНОК 6

Пример обработки сигнала для оценки параметров модуляции



SM.1600-06

На рисунке 7 показаны алгоритмы статистического оценивания, применяемые к цифровым сигналам с одной несущей, таким как PMR, GSM и UMTS, которые могут использоваться для измерения внутренних параметров сигнала.

РИСУНОК 7

Использование статистических алгоритмов оценивания для анализа параметров модуляции

Назначение	Измерение мощности и ширины полосы	Оценка центральной частоты	Оценка скорости передачи символов		Синхронизация и демодуляция символов	
			Спектр 2-й момент 2-го порядка $E(x ^2)$	Спектр 2-й момент 4-го порядка $E(x ^4)$	Глазковая диаграмма и гистограмма I/Q , амплитуда-фаза-частота	Глазковая диаграмма и круговая диаграмма
Статистический алгоритм оценивания	Спектр	Спектр 1-й момент 2-го порядка $E(x ^2)$	Спектр 2-й момент 2-го порядка $E(x ^2)$	Спектр 2-й момент 4-го порядка $E(x ^4)$	Глазковая диаграмма и гистограмма	Глазковая диаграмма и круговая диаграмма
Пример сигнала	Плотность мощности					
FSK2 Ind. 1 SNR 20 дБ "PMR-подобный"						
GMSK Ind. 0,5 SNR 20 дБ "PMR-подобный"						
O-QPSK Спад 0,25 SNR 20 дБ "CDMA 2 000 UL-подобный"						
QPSK Спад 0,25 SNR 20 дБ "UMTS-подобный"						

SM.1600-07

В таблице 4 представлено дополнительное руководство по методам для извлечения внутренних параметров сигнала с использованием математических операций, в случае если серийно выпускаемое программное обеспечение анализа сигналов недоступно или непригодно для обработки рассматриваемого сигнала.

ТАБЛИЦА 4

Ручные методы извлечения внутренних параметров сигнала

Подлежащие измерению параметры	Инструменты анализа	Тип модуляции	Тип радиосреды
Модуляция – скорость асинхронной или синхронной модуляции (скорость передачи символом)	Спектр мгновенной амплитуды, A_i	PSK (фильтрованная или нефильтрованная) Нефильтрованная CPM или после жесткой фильтрации QAM (фильтрованная или нефильтрованная)	Среднее или высокое SNR
	Спектр мгновенной частоты, F_i в степени N ($N = 2$ (2FSK), 4 (4FSK))	FSK (нефильтрованная)	Только идеальная: высокое SNR. Отсутствие многолучевого распространения
	Спектр перехода через нуль по мгновенной частоте, F_i	FSK (фильтрованная или нефильтрованная) PSK, QAM, MSK	Только идеальная: высокое SNR. Отсутствие многолучевого распространения
	Спектр сигнального модуля в степени N ($=2$ или 4 или ...) после жесткой фильтрации по частоте	PSK, QAM (фильтрованная или нефильтрованная) FSK (фильтрованная или нефильтрованная)	Положительное SNR
	Спектр сигнала в степени N ($N = 1/h$)	CPM (фильтрованная или нефильтрованная)	Положительное SNR
	Спектр сигнала в степени N	$\pi/2$ DBPSK, $\pi/4$ DQPSK, SQPSK	Положительное SNR
	Автокорреляция и циклическая автокорреляция	OFDM, SC-FDMA, SC-FDE	Любой
	Спектральный корреляционный анализ	PSK, QAM, ASK, SQPSK, $\pi/2$ DBPSK, $\pi/4$ DQPSK	Любой
	Спектр вейвлет-преобразования Хаара	FSK	Любой, особенно комплексные каналы с многолучевым распространением

ТАБЛИЦА 4 (окончание)

Подлежащие измерению параметры	Инструменты анализа	Тип модуляции	Тип радиосреды
Число состояний (Тип модуляции)	Диаграмма созвездия или векторная диаграмма, связанная со слепым выравниванием (то есть алгоритм слепого выравнивания для сигналов с постоянной амплитудой (СМА), Беневисте Гурсат)	Любая линейная модуляция и в основном PSK, QAM, ASK	Среднее или высокое SNR Каналы со сложным многолучевым распространением
	Спектр в степени N ($N = 2$, SQPSK и $\pi/2$ DBPSK; $N = 4$, $\pi/4$ DQPSK)	SQPSK, $\pi/2$ DBPSK, $\pi/4$ DQPSK,	Положительное SNR
	Спектральная плотность мощности с высоким разрешением	OFDM, COFDM, мультиплексирование	Среднее или высокое SNR
	Гистограмма мгновенной частоты, F_i	FSK	Среднее или высокое SNR
Число поднесущих или тональных сигналов	Спектральная плотность мощности	Любая модуляция	Среднее или высокое SNR
	Гистограмма мгновенной частоты, F_i	FSK	Среднее или высокое SNR
Синхронизация символов	Глазковая диаграмма I/Q , $A_i F_i \Phi_i$ и векторная диаграмма	PSK и QAM (фильтрованная или нефильтрованная)	Среднее или высокое SNR
	Глазковая диаграмма $A_i F_i \Phi_i$ и отображение гистограммы частоты, F_i	FSK (фильтрованная или нефильтрованная)	Среднее или высокое SNR
	Диаграмма созвездия, отображение гистограммы частоты, F_i , и фазы, Φ_i	CPM (фильтрованная или нефильтрованная)	Среднее или высокое SNR
	Циклическая автокорреляция	OFDM, SC-FDMA, SC-FDE	Любой
	Кросс-корреляция с известными сигналами	TDMA, CDMA Несколько OFDM и SC-FDMA и SC-FDE	Любой

Эти методы должны быть связаны с надлежащим представлением сигнала после различных преобразований, которым он подвергался при извлечении и проверке характеристик сигнала.

3 Использование программного обеспечения анализа сигнала для более глубокой оценки

Первые два шага позволяют определить базовые характеристики исследуемого сигнала:

- центральная частота;
- ширина полосы сигнала;
- отношение сигнал-шум;
- длительность;
- формат модуляции;
- символьная скорость.

Как правило, этой информации достаточно для положительной идентификации типа сигнала путем совпадения с опубликованными таблицами распределения частот и техническими спецификациями систем связи, которые используются в исследуемой сфере. Если требуются дальнейшие подтверждения характеристик исследуемого сигнала, может понадобиться детальный анализ или декодирование сигнала.

Программное обеспечение векторного анализа сигнала декодирует схемы большинства современных цифровых форматов связи. Эти алгоритмы демодуляции и декодирования не выполняют обработку записи I/Q обратно к исходному содержимому, а скорее измеряют качество сигнала по сравнению с идеальной моделью. Это обеспечивает дополнительное подтверждение правильной идентификации записи I/Q.

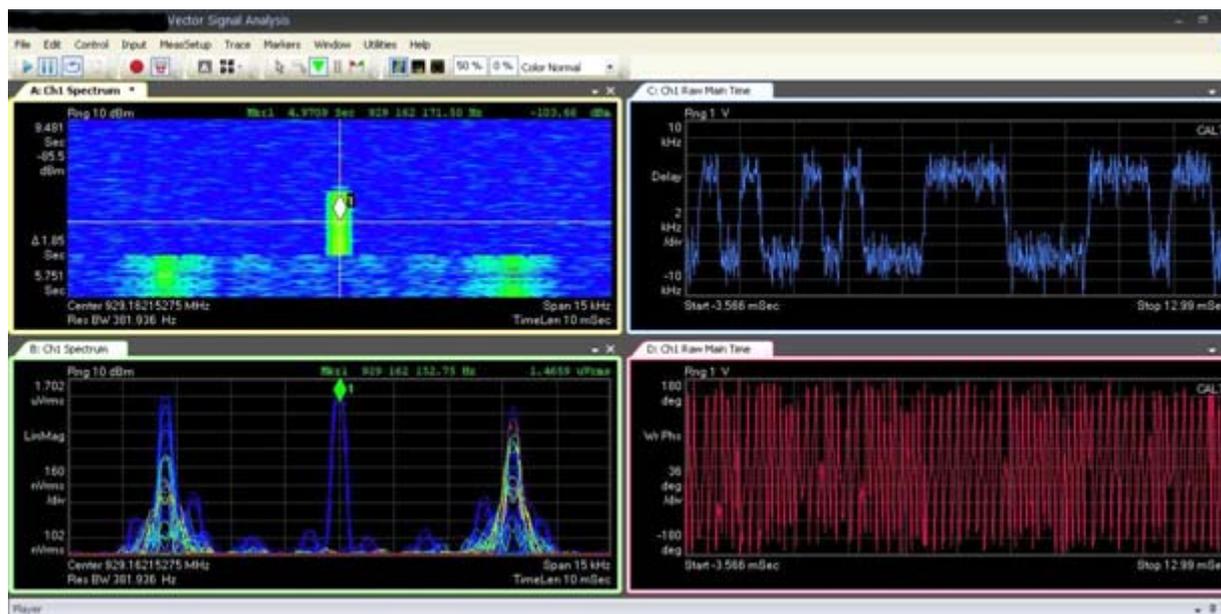
В случае если необходима положительная идентификация конкретной передачи, потребуются прикладные программы декодирования сигнала или методы внутренней, авто- или кросс-корреляции. В продаже имеются стандартные пакеты декодирования, которые пригодны для некоторых, не для всех, современных форматов связи.

a) Просмотр записи I/Q с помощью программного обеспечения VSA

Программное обеспечение VSA дает пользователям возможность выполнить ряд аналитических просмотров сигнала. На рисунке 8 представлено полученное с помощью программного обеспечения VSA представление того же сигнала, который использовался выше. Верхний левый экран – это спектрограмма, показывающая начало сигнала, включая несущую и первую часть модулированного сигнала. Внизу слева – спектр, показанный с цифровым послесвечением, дающим пользователю возможность наблюдать короткие по длительности характеристики в контексте более устойчивых аспектов передачи. Верхний правый экран показывает групповую задержку или частоту в зависимости от времени. Поскольку это сигнал с частотной манипуляцией, могут наблюдаться отдельные передаваемые символы. В нижней правой части показана фаза в зависимости от времени, что особенно полезно, если исследуемый сигнал модулирован по фазе.

РИСУНОК 8

Програмное обеспечение VSA – выборочные окна анализа сигнала



SM.1600-08

Читателю следует принять к сведению, что этот сигнал был получен при очень низком уровне мощности. Несущая измерялась на уровне $-103,7$ дБм на входе приемника. Вследствие этого на верхнем правом экране (в котором показана форма сигнала ЧМ) присутствует значительный шум. Поскольку программное обеспечение VSA работает с записанными данными I/Q, измерения возможны с использованием информации о мощности, частоте и фазе сигнала.

b) Подтверждение распознавания и идентификация путем демодуляции записи I/Q с помощью программного обеспечения VSA

Рекомендуется иметь в рамках того же инструмента анализа широкий выбор цифровых демодуляторов, предназначенных для модуляции нелинейного и линейного типа, связанных с различными алгоритмами частотной коррекции каналов и с графиками и экранами, позволяющими выполнять оценку сходимости демодуляции.

Продолжая рассматривать предыдущую запись I/Q, мы можем использовать возможности цифровой демодуляции программного обеспечения VSA для проверки формата модуляции и символьной скорости исследуемого сигнала. Переведя программное обеспечение VSA в режим цифровой демодуляции, мы можем ввести конкретный формат модуляции (2-уровень FSK) и символьную скорость (1600), определенные на предыдущем шаге, для проверки параметров исследуемого сигнала.

На рисунке 9, на котором показан пример сигнал с нелинейной FSK, в верхней части показан график I/Q (или круговая диаграмма) с двумя состояниями частоты сигнала – левая (красная точка) представляет символ "0", правая – символ "1". Если формат и символьная скорость определены верно, эта трассировка I/Q должна быть очень стабильной, а красные точки (или состояния) – попадать в соответствующие поля. Такая сходимость предполагает, что были выбраны верные значения демодуляции и применена надлежащая фильтрация и коррекция по частоте.

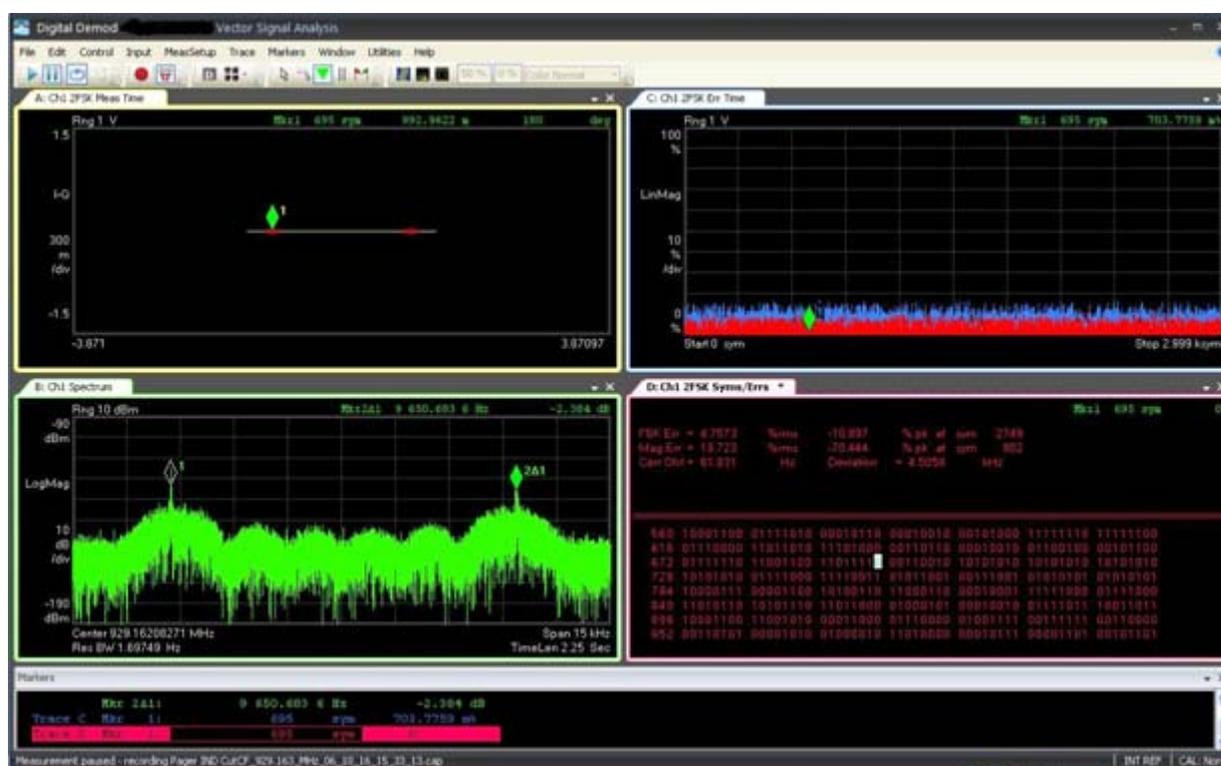
Нижняя левая трассировка – это график спектра сигнала, интегрированный по ряду демодулированных символов, в нашем случае были демодулированы 3000 символов. Это спектральное отображение должно довольно точно совпадать с сигналом, который наблюдался первоначально.

В верхней правой трассировке показана величина вектора ошибки (EVM) для каждого символа, который был демодулирован. EVM – это фаза и величина разницы между идеальным опорным состоянием "0" или "1" и реальными демодулированными состояниями, наблюдаемыми с теми установками, которые использовались при настройке цифровой демодуляции. EVM может рассматриваться как общее среднее или посимвольно. Все значения ошибки, связанные с этой демодуляцией, лежат ниже 1%, поэтому мы получаем высокую уверенность в правильности битов, связанных с данным сигналом.

Нижняя правая трассировка – это совокупное отображение реальных демодулированных битов и ошибок. Следует отметить, что маркеры на четырех трассировках связаны, для того чтобы показать символ "0", относящийся к символу № 695 из 3000. Эти маркеры отображают след при движении по записи I/Q для обеспечения пользователю обратной связи о том, что установки демодуляции выбраны верно.

РИСУНОК 9

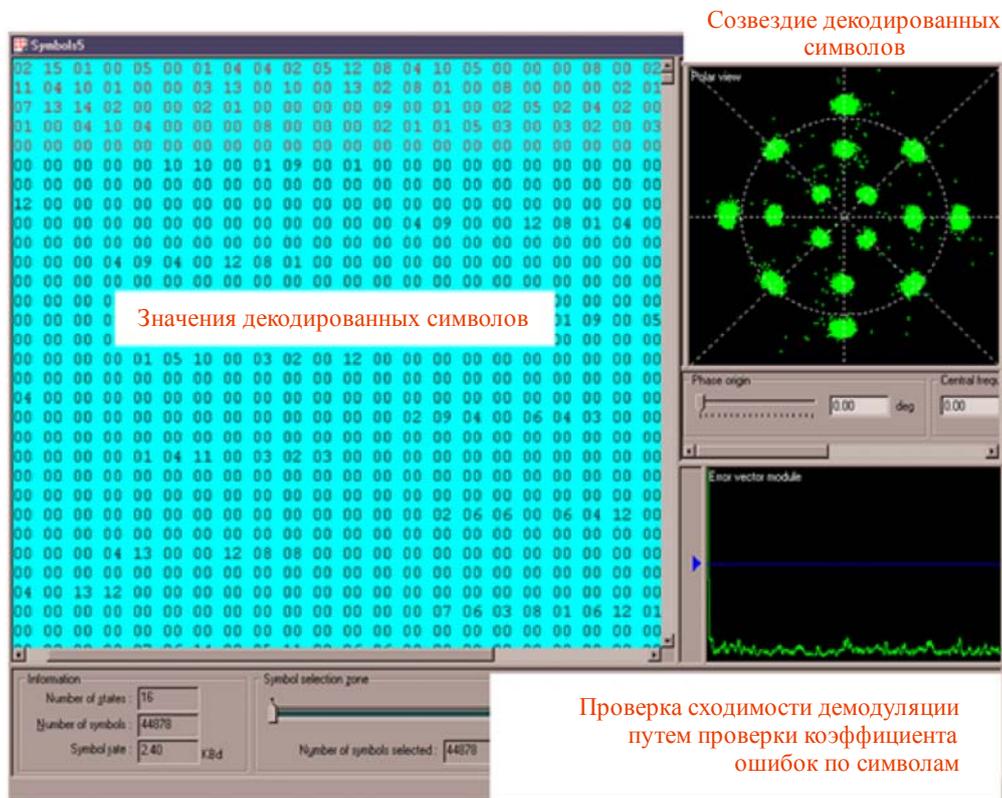
Программное обеспечение VSA – инструменты цифровой демодуляции



Для полноты представления на рисунке 10 показан результат идентификации сигнала высшего уровня (16QAM V29) с использованием того же метода и другой прикладной программы анализа, предназначенной для модуляции линейного типа:

РИСУНОК 10

Пример демодуляции сигнала 16QAM V29



SM.1600-10

4 Обработка записи I/Q

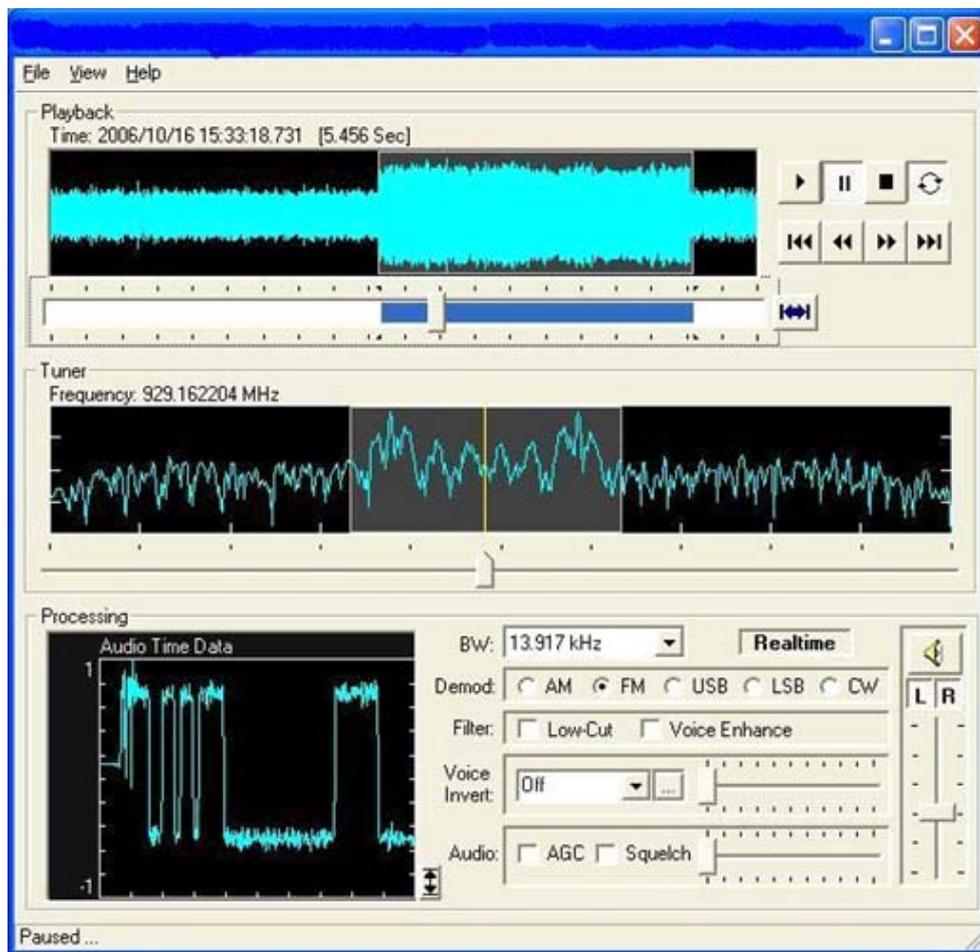
Последний шаг технической идентификации неизвестного цифрового сигнала заключается в декодировании записи I/Q в целях извлечения части или полного оригинального содержимого. Этот шаг должен выполняться в соответствии с правовыми и этическими ограничениями, связанными с использованием информации. В нашем примере с помощью серийно выпускаемого программного обеспечения декодирования может быть обработана та же запись I/Q для положительной идентификации источника передачи.

a) *Обработка с помощью программного обеспечения демодуляции аудиосигнала*

Функционирование определенного программного обеспечения декодирования основано на обработке аудиосигнала, созданного в результате демодулирования сигнала со стандартным форматом (AM, FM, U/LSB или CW). В этом случае потребуется программа, которая может создать аудиосигнал. Примером может служить программа, показанная на рисунке 11. Эта программа будет воспроизводить запись I/Q и выходной аудиосигнал. Поскольку запись не была ранее "обнаружена", программа дает пользователю возможность отрегулировать центральную частоту и ширину полосы процесса демодулирования. Это обеспечивает гибкость при работе с алгоритмами декодирования, которые весьма чувствительны к значениям центральной частоты и охвата аудиосигнала.

РИСУНОК 11

Пример программного обеспечения проигрывателя аудиосигнала I/Q



SM.1600-11

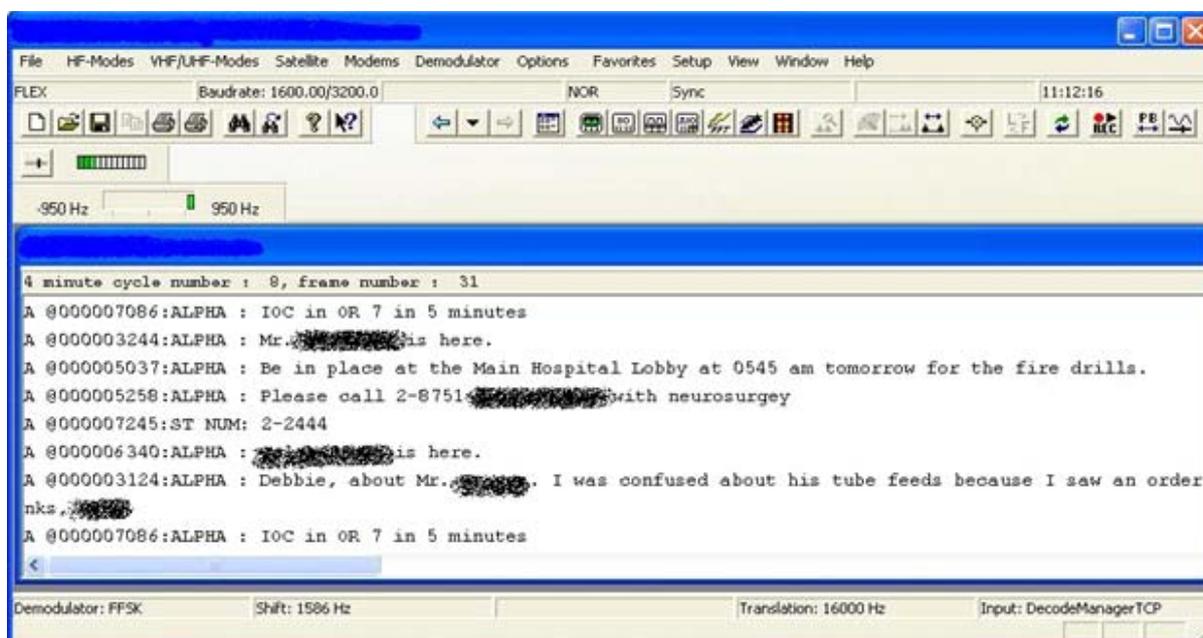
Другое преимущество работы с записями I/Q заключается в возможности использования разных схем обнаружения для получения наилучшего аудиосигнала для декодирования. Эта гибкость снижает обеспокоенность оператора при выполнении записей "в полевых условиях". Если центральная частота записанного сигнала I/Q смещена относительно центра, для получения приемлемых результатов запись может быть повторно дискретизована и/или центрована (как показано выше).

b) *Обработка с использованием программного обеспечения декодирования сигналов*

Программное обеспечение декодирования сигналов будет применять выбранную схему для записи и выдачи результатов в окно или записи результатов в текстовый файл. Как правило, для каждой схемы декодирования существует несколько регулировок. Некоторые из этих программ включают "идентификаторы сигналов", но они предназначены в основном для очень простых схем модуляции, таких как FSK или PSK. В приведенном ниже примере в схему декодирования была введена запись I/Q, был установлен формат FLEX и POCSAG, два широко используемых пейджинговых сигнала. Эти форматы были выбраны на основе центральной частоты (929,162 МГц), ширины полосы (12,5 кГц) – или внешних параметров сигнала и формата модуляции (FSK) и символьной скорости (1600) – или внутренних параметров сигнала. Для POCSAG результатов декодирования выработано не было. Результаты декодирования FLEX показаны ниже.

РИСУНОК 12

Пример серийно выпускаемого программного обеспечения декодирования



SM.1600-12

Информационное содержимое, извлеченное из оригинального излучения, даст пользователю возможность идентифицировать источник и принять необходимые регуляторные меры на основании достаточных доказательств.

5 Коррелятивные и другие перспективные методы

Данный раздел посвящен передовым алгоритмам, которые может применять регуляторный орган для цифровой идентификации сигналов. Приведено описание общих методов, а в Приложении 2 представлены конкретные примеры для рассмотрения.

a) *Коррелятивные методы*

Кросс-корреляция: кросс-корреляция – это мера подобия двух сигналов как функция отставания по времени, применяемая к одному из них. Это также называется скользящим скалярным произведением или скользящим внутренним произведением.

Автокорреляция: автокорреляция – это кросс-корреляция сигнала самого с собой. Информационно это подобие наблюдений как функции времени, которое их разделяет. Это математический инструмент поиска повторяющихся шаблонов, таких как наличие периодического сигнала, который погружен глубоко в шум, или идентификации пропущенной частоты основной гармоники в сигнале, на который указывают частоты его гармоник. Автокорреляция часто используется при обработке сигнала для анализа функций или серии значений, таких как сигналы во временной области.

Использование этих алгоритмов может обеспечить обнаружение и распознавание встроенных периодических последовательностей, которые можно применять в качестве известного опорного сигнала при дальнейшей обработке.

Эти алгоритмы широко используются для поиска в сигнале большой длительности более короткого сигнала (например пре- или мидамбула, слово синхронизации или пилотный код). На практике эти известные свойства модулированы в цифровых стандартных формах сигнала и обеспечивают шаблон, который может использоваться для однозначной классификации исследуемого сигнала:

- слова синхронизации имеются во многих стандартных непрерывных сигналах (например, частотное разделение каналов (FDM) и многостанционный доступ с частотным разделением (FDMA), которые встречаются во многих радиосистемах, пайджинговых системах и PMR (NMT, TETRAPOL и т. д.);
- настроечные последовательности имеются в стандартизованных сигналах TDMA, таких как сигналы, встречающиеся в сотовых системах 2G и PMR (GSM, D-AMPS, TETRA, PHS);
- коды PILOT или слова синхронизации имеются в стандартизованных сигналах CDMA или TDMA/CDMA и т. д., которые часто встречаются в сотовых системах 3G (3GPP/UMTS, 3GPP2/CDMA2000);
- символы PILOT или разнесенные поднесущие PILOT имеются в модулированных сигналах OFDM, OFDMA, COFDM и SC-FDMA/SC-FDE, которые очень часто встречаются в радиовещательных системах (DAB, DVB-T/H) и сотовых системах 4G (3GPP/LTE).

Для практической реализации этих методов используются скользящие окна временной области для обнаружения времени поступления сигнала, и методы компенсации доплеровского сдвига частоты для компенсации движения источника сигнала. В целом эти методы включают два шага:

Шаг 1: оценка доплеровской ошибки по частоте и момент синхронизации по времени.

Шаг 2: корректировка доплеровской ошибки по частоте и оптимизация обнаружения и разделения источников сигналов.

b) Другие перспективные методы

Вейвлет-преобразования Хаара: "с помощью этой схемы возможно выполнение автоматической классификации модуляции и распознавание сигналов беспроводной связи с априорно неизвестными параметрами. Особыми характеристиками процесса являются возможность его динамической адаптации почти ко всем типам модуляции и возможность идентификации. Разработанная схема, основанная на вейвлет-преобразовании и статистических параметрах, использовалась для идентификации M-разрядной PSK, M-разрядной QAM, GMSK и M-разрядной FSK модуляций. Результаты моделирования показывают, что правильная идентификация модуляции возможна при нижней границе в 5 дБ. Процентная доля идентификации анализировалась на основе матрицы неточностей³. Если SNR выше 5 дБ, предложенная система показывает вероятность обнаружения более 0,968. При сравнении эффективности предложенной схемы с существующими методами было определено, что схема будет идентифицировать все виды цифровой модуляции с низким значением SNR" (см. справочный документ [1]).

³ В области искусственного интеллекта матрица неточностей – это таблица специальной формы, позволяющая визуализировать эффективность алгоритма, как правило, алгоритма управляемого обучения (при неуправляемом обучении эта таблица обычно называется матрицей соответствия). Каждый столбец матрицы представляет экземпляры в прогнозируемом классе, а каждый ряд – экземпляры в фактическом классе. Название связано с тем, что таблица позволяет легко понять, не путает ли система два класса (то есть неправильно маркирует один как другой). Вне сферы искусственного интеллекта матрицу неточностей часто называют таблицей сопряжения или матрицей ошибок.

Спектральный коррелятивный анализ: многие используемые в системах связи сигналы характеризуются периодичностью своих статистических параметров второго порядка в силу таких операций как дискретизация, модуляция, мультиплексирование и кодирование. Эти циклически стационарные характеристики, называемые спектральными корреляционными свойствами, могут использоваться для обнаружения и распознавания сигнала. Для анализа циклически стационарных свойств сигнала обычно используются две ключевые функции:

- 1) циклическая автокорреляционная функция (CAF) используется для анализа во временной области; и
- 2) спектральная корреляционная функция (SCF), которая показывает спектральную корреляцию и выводится путем преобразования Фурье циклической автокорреляции.

На основании ряда характеристических параметров SCF и SCC возможно различение сигналов разных типов (то есть AM, ASK, FSK, PSK, MSK, QPSK). Этот алгоритм эффективен также в случае слабых сигналов и может использоваться для классификации неизвестных сигналов (см. справочный документ [2]).

6 Краткие выводы

Приведенные в настоящей Рекомендации примеры служат иллюстрацией процесса идентификации и использования серийно выпускаемых программных средств, а также методов углубленного анализа современных цифровых сигналов. Примеры корреляции приведены для иллюстрации передовых методов обработки, которые могут использоваться для идентификации сложных сигналов.

За последние годы все в большем числе векторных анализаторов сигналов и приемников контроля предусматривается функция выполнения записи I/Q. Наряду с этим все более доступными и приемлемыми по цене становятся инструменты анализа сигнала, распознавания модуляции и идентификации сигналов. Эти инструменты позволяют регуляторным органам в области использования спектра наращивать уровень автоматизации обнаружения, записи, классификации и идентификации рассматриваемых цифровых излучений и эффективность распознавания и смягчения последствий помех.

Справочные данные по программным инструментам

Программное обеспечения VSA поддерживает, как правило, следующие схемы демодуляции:

- FSK: уровень 2, 4, 8, 16 (включая GFSK);
- MSK (включая GMSK) Тип 1, Тип 2;
- CPMBPSK;
- QPSK, OQPSK, DQPSK, D8PSK, $\pi/4$ DQPSK;
- 8PSK, $3\pi/8$ 8PSK (EDGE); $\pi/8$ D8PSK;
- QAM (полное кодирование): 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024;
- QAM (дифференциальное кодирование в соответствии со стандартом DVB): 16, 32, 64, 128, 256;
- QAM со звездообразной топологией: 16, 32;
- APSK: 16, 16 w/DVB, 32, 32 w/DVB, 64 VSB: 8, 16, специализированная APSK.

Программное обеспечение VSA поддерживает, как правило, следующие стандартные форматы цифровой связи:

- сотовая связь: CDMA (базовая), CDMA (подвижная), CDPD, EDGE, GSM, NADC, PDC, PHP (PHS), W-CDMA, LTE, LTE Advanced;
- беспроводные сети: Bluetooth™, HiperLAN1 (HBR), HiperLAN1 (LBR), IEEE 802.11b, ZigBee 868 МГц, ZigBee 915 МГц, ZigBee 2450 МГц;
- цифровое видео: DTV8, DTV16, DVB16, DVB32, DVB64, DVB128, DVB256, DVB 16APSK, DVB 32APSK;
- прочее: APCO 25, APCO-25 P2 (HCPM); APCO-25 P2 (HDQPSK), DECT, TETRA, VDL режим 3, MIL-STD 188-181C: CPM (вариант 21).

Справочные документы

- [1] PRAKASAM P. and MADHESWARAN M., Digital modulation identification model using wavelet transform and statistical parameters, Journal of Computer Systems, Networks, and Communications Volume 2008 (2008),
Article ID 175236, 8 pagesdoi:10.1155/2008/175236.
- [2] HAO Hu, JUNDE Song, Signal Classification based on Spectral Correlation Analysis and SVM in Cognitive Radio, 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication and Yujing Wang, Dept. of Telecommunication Engineering, Xidian University.

Приложение 2

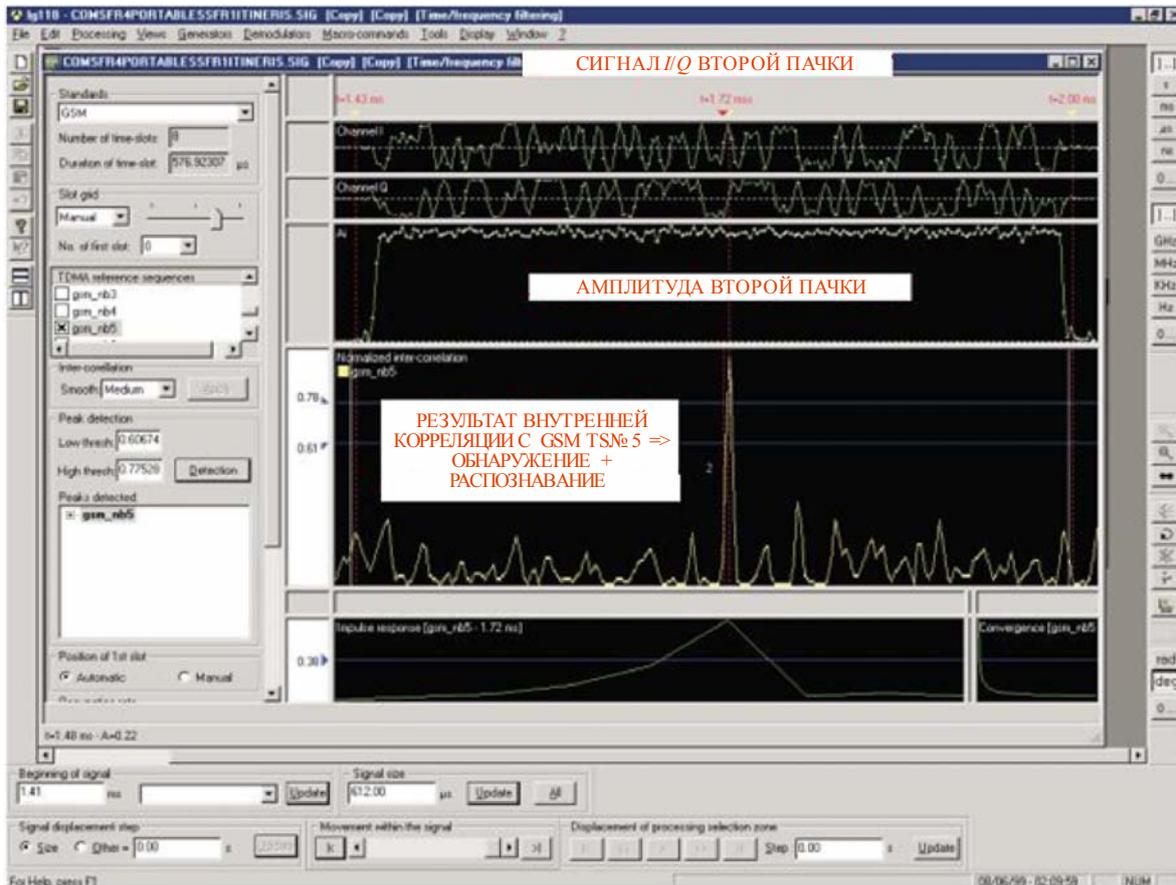
В настоящем Приложении приведены примеры конкретных сложных цифровых сигналов и описаны подходы к их идентификации.

a) Пример идентификации сигнала GSM (TDMA)

На представленном ниже экране показан пример корреляции пачки GSM. В этом примере выполняется сравнение записи I/Q с известным элементом сигнала GSM (мидамбула) и результаты корреляции выведены во втором снизу окне.

РИСУНОК 13

Пример метода внутренней корреляции для идентификации сигнала



SM.1600-13

b) Пример метода идентификации сигналов для OFDM, SC-FDMA, SC-FDE

Циклическая автокорреляция обеспечивает большое число преимуществ при анализе частично известных сигналов, таких как сигналы OFDM, OFDMA, SC-FDE и CDMA. Этот метод может помочь в определении периодических и циклических характеристик формы сигнала. Одним из применений обработки на основе циклической автокорреляции является распознавание повторяющихся последовательностей в передаваемых сигналах, таких как защитные интервалы в OFDM-подобных символах. Например, может быть обеспечено точное обнаружение и распознавание модулированных сигналов OFDM, (O)FDMA и SC-FDE путем расчета циклической автокорреляции.

Для определения скорости модуляции и синхронизации символов можно использовать дублирование начала или окончания символа для построения защитного интервала. Таким образом, для применения дублирования сигнала в случае сигналов OFDM базовыми математическими функциями являются функция автокорреляции и функция циклической автокорреляции, представленные выше.

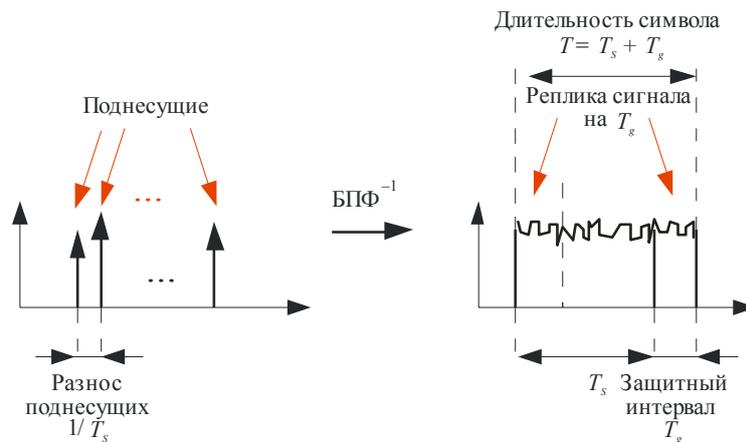
Практическая реализация идентификации OFDM может быть выполнена в три этапа:

- Этап 1:* подсчет поднесущих, который можно произвести с использованием высокоточного спектрального отображения (разрешение по частоте лучше $1/(2 \cdot TS)$). Рекомендуются:
- панорамное представление сигнала с переменным спектральным разрешением (и соответствующим временем интегрирования);

- использование большого числа точек для расчета БПФ с применением соответствующих методов интерполяции;
- дополнительные функции увеличения изображения и возможности измерения с помощью курсора.

Этап 2: расчет автокорреляции сигнала выполняется для обнаружения пика, соответствующего задержке $\tau = T_s$, в целях определения разноса между поднесущими $1/T_s$ (см. рисунок 14, левая часть). Следует заметить, что необходимо различать серию пиков, соответствующих эхо-сигналам канала, и пик, соответствующий длительности символа на поднесущих, в силу их значений.

РИСУНОК 14
Структура символа (С) OFDM во временной и частотной областях



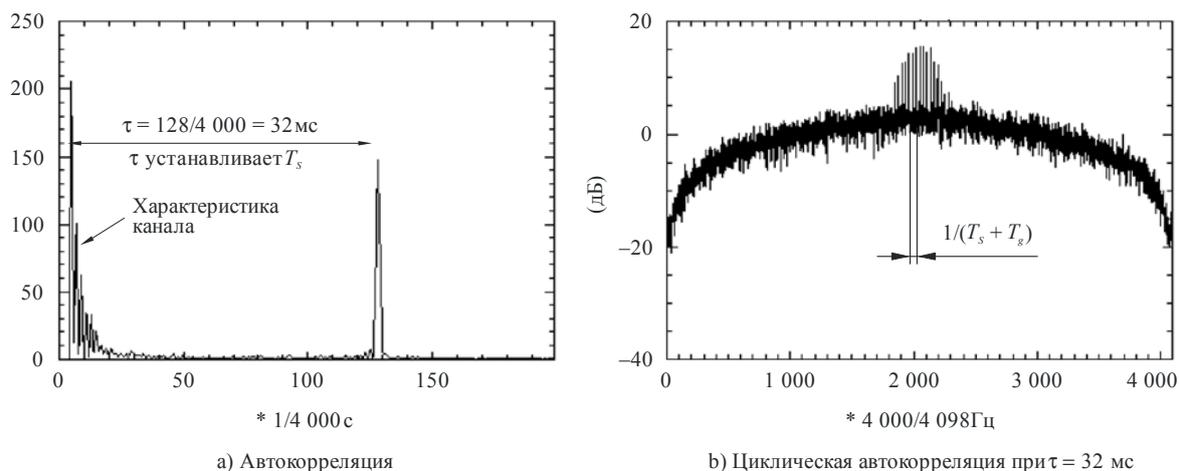
SM.1600-14

Этап 3: расчет циклической автокорреляции для задержки τ (τ устанавливает T_s), полученной в результате автокорреляции, с тем чтобы можно было извлечь части коррелированного сигнала, соответствующие реплики части символа в целях создания защитного интервала (см. рисунок 14, правая часть):

- для подтверждения дополнительно значения длительности символа T_s (циклическая автокорреляция, рассчитанная для значения τ , отличного от T_s , не обеспечивает представления характеристических пиков);
- для определения скорости модуляции поднесущих $1/(T_s + T_g)$ и защитного интервала T_g .

РИСУНОК 15

Методы корреляции и циклической автокорреляции, применяемые к сигналу (С) OFDM



SM.1600-15

с) Пример метода идентификации сигнала для WCDMA

Практическая реализация анализа сигнала WCDMA может быть выполнена в три этапа:

Этап 1: оценка символьной скорости.

В качестве примера: символьная скорость сигналов 3GPP/WCDMA составляет 3,84 МГц и может быть определена путем расчета спектральной корреляции. Эта стандартизованная символьная скорость может сравниться с рассчитанным значением, полученным в результате обработки сигнала. В случае сетей 3GPP/WCDMA это позволяет ограничить область поиска для символьной скорости в расчете спектральной корреляции значениями, близкими к 3,84 МГц, с тем чтобы сократить объем вычислений. На рисунке 16 а) показан расчетный результат символьной скорости.

Этап 2: поиск соты: поиск соты выполняется обычно за три шага, которые описаны ниже.

Шаг 1: синхронизация слотов: выполняется, как правило, с помощью одного фильтра, согласованного с первичным кодом синхронизации канала синхронизации (SCH), который является общим для всех сот. Синхронизация слотов в соте может быть достигнута путем детектирования пиков на выходе согласованного фильтра.

Шаг 2: синхронизация кадров и идентификация группы кода: это выполняется при помощи корреляции принимаемого сигнала со всеми возможными последовательностями вторичного кода синхронизации SCH и определения максимального значения корреляции. Поскольку циклические сдвиги последовательности для группы кодов уникальны, то определяется кодовая группа и синхронизация кадров.

Шаг 3: идентификация кода скремблирования: используя определенные на втором шаге синхронизацию кадров и номер кодовой группы, выполняется корреляция общего пилотного канала (CPICH) со всеми возможными восемью разными последовательностями в кодовой группе. Код, показавший максимальную корреляцию, считается номером кода скремблирования данной соты.

Детальное описание поиска соты можно найти в технической спецификации Проекта партнерства третьего поколения (3GPP TS) 25.214.

Этап 3: выполнение измерений, относящихся к модуляции WCDMA.

Дескремблирование полученного сигнала для захвата символа CPICH: символы CPICH получают путем умножения полученного сигнала на последовательность кода скремблирования начиная с границы кадра, найденного на этапе 2, и суммирования 256 дискретов.

Подтверждение модуляции QPSK: после умножения дескремблированного сигнала на код первичного общего физического канала управления (ССРСН) и компенсации сдвига частоты возможно проверить тип модуляции сигнала первичного ССРСН. Сдвиг частоты оценивается по символам CPICH, как указано выше.

На рисунках 16 б) и с) показано созвездие модуляции QPSK и результаты поиска соты, полученные с помощью рекомендованного выше анализа реальных сигналов WCDMA (3GPP/UMTS), использующих общую несущую (обнаружены 9 базовых станций (BS), сигналы которых были измерены), соответственно.

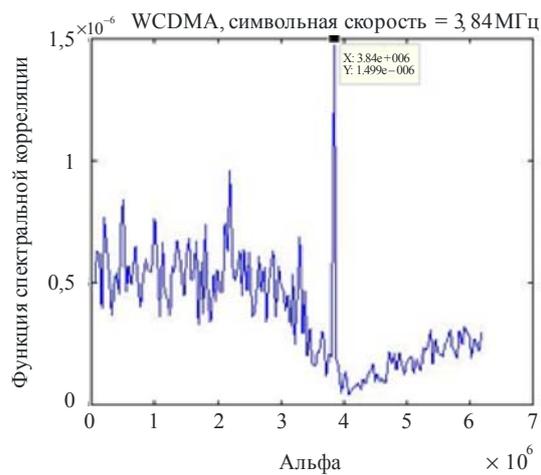
РИСУНОК 16

Иллюстрация процесса полной идентификации сигналов 3GPP/WCDMA в три этапа

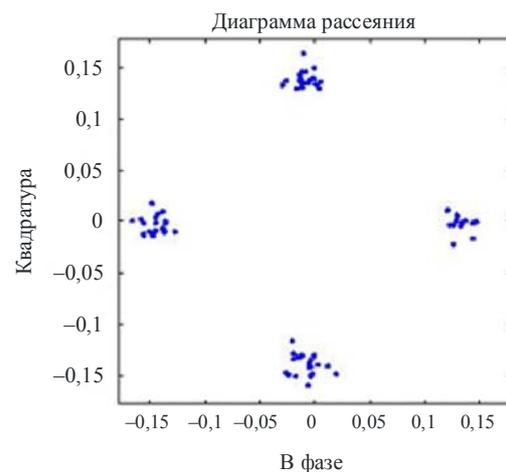
16 а) восстановление символьной скорости.

16 б) синхронизация слотов, дескремблирование CPICH и демодуляция ССРСН.

16 с) выполнение этапов а) и б) для поиска сот WCDMA, использующих ту же несущую.



а) Оценка символьной скорости



б) Созвездие сигнала первичного ССРСН

РИСУНОК 16с

Обнаружение и идентификация нескольких сот WCDMA, использующих общую несущую, после синхронизации слотов, дескремблирования CPICH и демодуляции SSPCH

