

УДК 621.396

МОДЕЛЬ СИГНАЛОВ БС СОТОВОЙ СВЯЗИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАДИОЧАСТОТНОГО КОНТРОЛЯ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. А. Былинкин, доцент кафедры ИТ-5 «Защита информации» Московского государственного университета приборостроения и информатики, к.т.н.; andrbylinkin@mail.ru

Рассматриваются вопросы радиочастотного контроля, проводимого в целях обеспечения информационной безопасности предприятий. Экспериментальные исследования электромагнитных излучений анализируются применительно к решению задач обнаружения сигналов, несущих конфиденциальную информацию. С помощью статистических методов осуществлена обработка сигналов базовых станций сотовой связи. Показано, что при определенных значениях частотного разрешения приемной аппаратуры квадратурные составляющие комплексного спектра анализируемых сигналов имеют гауссовское распределение.

Ключевые слова: информационная безопасность, радиочастотный контроль, критерий Пирсона, модель сигнала.

Введение. Одним из актуальных направлений в области обеспечения информационной безопасности предприятий является создание эффективных комплексов радиочастотного контроля. Такие комплексы предназначены в основном для обнаружения и определения местоположения источников электромагнитных излучений, используемых злоумышленниками с целью получения конфиденциальной информации.

Источниками электромагнитного излучения могут быть стандартные средства радиосвязи, технические средства обработки информации (источники побочных электромагнитных излучений), а также радиопередающие устройства (РПДУ), известные как закладные устройства, электронные устройства перехвата информации и т.д. В РПДУ применяются методы скрытой передачи информации с целью снижения вероятности обнаружения их сигналов комплексами радиочастотного контроля. Одним из методов скрытой передачи информации является маскирование (также встречается термин «прикрытие») сигналов устройств путем организации передачи информации вблизи полосы либо непосредственно в полосе рабочих частот различных станций [1, 2]. Учитывая современную загрузку радиочастотного диапазона, в качестве маскирующих могут быть использованы сигналы радиовещательных и телевизионных станций, базовых станций (БС) сотовой связи, а также помехи промышленного оборудования.

Обнаружение маскированных сигналов может проводиться с использованием классических алгоритмов спектрального анализа [1, 2]. В отдельных комплексах радиочастотного контроля, в частности в аппаратуре «АРК-Д4» (<http://www.sis-tss.ru>, <http://www.bnti.ru>), реализован режим обнаружения излучений под «прикрытием» мощных станций на основе распределенной антенной системы.

Для повышения эффективности решения задачи радиочастотного контроля в сложной электромагнитной обстановке необходимо располагать моделями обнару-

живаемых сигналов, маскирующих сигналов и помех. На основе данных моделей можно выбрать подходящие алгоритмы обнаружения (из совокупности известных алгоритмов) либо разработать новые, используя статистическую теорию принятия решений. Применение методов радиочастотного контроля без учета моделей анализируемых электромагнитных излучений обычно приводит к снижению вероятности правильного обнаружения сигналов, повышению ложных тревог и временных затрат на процедуру обнаружения.

Модели сигналов и помех могут быть построены на основе изучения специализированной литературы, анализа возможностей технических разведок [3], а также экспериментальных исследований электромагнитной обстановки в окрестностях предприятия, на котором планируется проводить радиочастотный контроль. В связи с наличием большого количества видов модуляции и кодирования сигналов, применяемых в радиосвязи, а также широкого класса помех, описываемых с помощью различных случайных процессов, для решения задач радиочастотного контроля целесообразно опираться на обобщенные модели, учитывающие общие структурные особенности электромагнитных излучений. При этом сигналы, которые требуется обнаружить, и помехи будут отличаться параметрами указанных моделей (например, абсолютными значениями либо формами спектров).

Применение обобщенных математических моделей позволит улучшить ряд технических характеристик комплексов радиочастотного контроля, в частности упростить алгоритмы обработки сигналов и схемы отдельных блоков, повысить быстродействие, уменьшить габариты и массу.

Предлагаемый подход к построению обобщенных математических моделей сигналов и помех содержит анализ статистических данных, полученных в результате экспериментальных исследований сигналов БС следующих стандартов сотовой связи: CDMA 450 (диапазон рабочих частот 463–467,5 МГц), GSM-900 (935–960 МГц), GSM-1800 (1805–1880 МГц) и UMTS 2100 (2110–2170 МГц).

Описание задачи экспериментальных исследований. В данной статье принцип построения математических моделей основан на определении вида распределения сигналов методом проверки гипотез согласия принятых выборочных значений сигнала. Для проверки вида распределения экспериментально полученной выборки значений используем критерий хи-квадрат (критерий Пирсона) с уровнем значимости 0,05 [4], который количественно определяет эффективность математической модели.

В качестве гипотетических могут рассматриваться широко известные законы распределения случайных величин: гауссовский закон, закон распределения гармонического

процесса со случайной начальной фазой, закон Рэля, распределение хи-квадрат и т.д.

Согласно центральной предельной теореме [4], при определенном времени накопления сигнала со случайным изменением во времени (по произвольному закону) амплитуды, частоты и/или фазы можно установить:

- гауссовский закон распределения для квадратурных составляющих комплексного спектра сигнала;
- закон Рэля для выборочных значений амплитудного спектра сигнала;
- распределение хи-квадрат (при двух степенях свободы) для выборочных значений спектра мощности.

Процесс накопления сигнала (без учета различных переходных процессов в блоках измерительной аппаратуры) можно охарактеризовать частотным разрешением спектра:

$$df = \frac{f_d}{N},$$

где f_d — частота дискретизации аппаратуры; N — объем обрабатываемых данных (обычно выбирается как 2^n , где $n = 1, 2, \dots$ — натуральное число).

Длительное время накопления достигается при высоком частотном разрешении, когда f_d мало, а N принимает большое значение.

В случае установления гауссовского закона распределения для квадратурных составляющих комплексного спектра будут справедливы закон Рэля для значений амплитудного спектра и хи-квадрат для значений спектра мощности.

Распределение гармонического процесса со случайной начальной фазой [5] может применяться для описания временных реализаций сигнала с постоянными либо с медленно изменяющимися амплитудой и частотой.

При выборе гипотетических законов распределения рекомендуется предварительно провести качественную оценку структуры сигнала во временной (спектральной) области и определиться с изменяющимися (неизменяющимися) во времени параметрами сигнала. Возможная потребность в выполнении временного и спектрального анализа сигнала определяет необходимость использовать в процессе измерений анализатор спектра и осциллограф. Структурная схема измерительной установки для проведения анализа временных и спектральных реализаций сигнала приведена на рис. 1.



Рис. 1. Измерительная установка

Назначение блоков измерительной установки:

1. Антенна, анализатор спектра: прием, селекция сигналов, измерение спектра, перенос выбранного сигнала на промежуточную частоту (ПЧ). Для экспериментов был выбран анализатор спектра, имеющий ПЧ 21,4 МГц.

2. Усилитель мощности: усиление сигнала с выхода ПЧ анализатора спектра до уровня, достаточного для его приема и обработки с помощью осциллографа.

3. Цифровой осциллограф: оцифровка с заданной частотой дискретизации сигнала на ПЧ и передача полученных отсчетов в компьютер (по интерфейсу USB либо Ethernet).

4. Компьютер: обработка полученных от цифрового осциллографа данных, принятие решения о виде распределения сигнала.

Вид плотности вероятности принимаемого сигнала в различных точках пространства будет одинаковым при следующих условиях:

- малое влияние собственных шумов измерительной аппаратуры на результат измерения (обеспечение большого отношения сигнал/шум, например более 20 дБ в полосе сигнала);
- незначительные амплитудные и фазовые искажения принимаемого сигнала, вызванные интерференцией радиоволн.

При соблюдении указанных условий в процессе экспериментов достаточно выбрать только одну точку пространства для приема сигнала. В любых других точках пространства вид плотности вероятности анализируемого сигнала сохраняется, а изменяться будут только ее параметры (например, среднее квадратическое отклонение). В случае неизвестных параметров плотности вероятности для конкретных точек пространства могут быть получены соответствующие оценки.

Радиостанции, имеющие одинаковые виды кодирования и модуляции, будут иметь один и тот же вид распределения сигналов, что позволяет в ходе экспериментов делать упрощения: обобщать результаты исследований сигнала одной радиостанции на сигналы однотипных радиостанций.

Результаты экспериментальных исследований. Рассмотрим результаты исследований сигналов БС сотовой связи на следующих рабочих частотах: 465 МГц (стандарт CDMA 450), 943,2 МГц (GSM-900), 1819,2 МГц (GSM-1800) и 2132,5 МГц (UMTS 2100). В таблице приведены параметры измерительной установки, при которых осуществлялись прием и обработка сигналов. Обработка сигналов проводилась в среде Matlab.

Параметры измерительной установки

Частота настройки анализатора спектра, МГц	Радиостанции	Ширина полосового фильтра ПЧ анализатора спектра, МГц	Частота дискретизации осциллографа, МГц
465	БС CDMA 450	5	25
943,2	БС GSM-900	0,5	10
1819,2	БС GSM-1800	0,5	10
2132,5	БС UMTS 2100	5	25

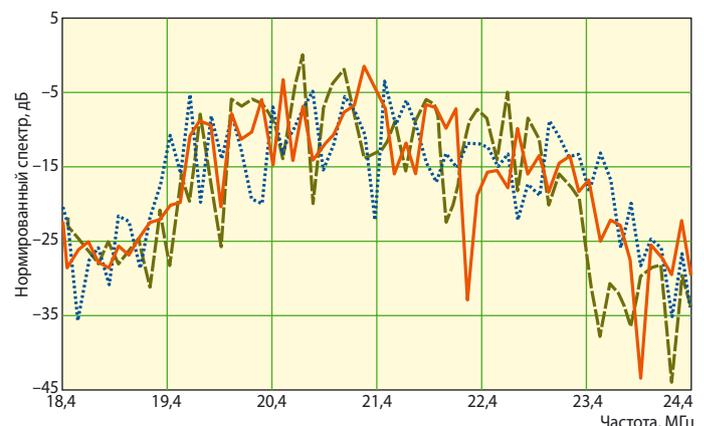


Рис. 2. Реализации спектра сигнала БС сотовой связи стандарта UMTS 2100

На рис. 2 показаны три последовательные реализации спектра сигнала БС сотовой связи стандарта UMTS 2100 (точечная, штриховая и сплошная кривые), полученные в результате быстрого преобразования Фурье 256 временных отсчетов на компьютере. Разрешающая способность спектра составляла $25 \text{ МГц} / 256 \approx 97,7 \text{ кГц}$.

Из рис. 2 следует, что при переходе от одной реализации спектра к другой амплитуды изменяются случайным образом на всех частотах. Данное обстоятельство свидетельствует о возможности проверки квадратурных составляющих комплексного спектра на принадлежность гауссовскому закону распределения с нулевым математическим ожиданием (постоянная составляющая в принятом сигнале отсутствует ввиду того, что анализируемый сигнал ограничен полосовым фильтром ПЧ).

Плотность распределения вероятности для гауссовской случайной величины z , имеющей нулевое математическое ожидание, определяется выражением [5]:

$$W(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right),$$

где σ — среднее квадратическое отклонение случайной величины.

Вопрос, какую квадратурную составляющую (косинусную или синусную) проверять, принципиального значения не имеет, так как они были получены путем линейного преобразования временной реализации сигнала (при линейном преобразовании вектора гауссовских случайных величин получается также вектор гауссовских случайных величин [6]).

В процессе исследований проводился анализ выборочных значений синусной квадратурной составляющей спектра сигнала на частоте $21,4 \text{ МГц}$ объемом $L = 2^k - 1$, $k = 8, 9, \dots, 14$. Каждое из данных значений было получено методом быстрого преобразования Фурье при 2^n временных отсчетах сигнала, $n = 6, 7, \dots, 12$.

Для проверки на соответствие гауссовскому распределению квадратурных составляющих комплексного спектра сигнала были сформированы из принятых компьютером выборочных значений сигнала $Z(z_1, \dots, z_L)$ нормированные величины вида $Y_\ell = \frac{z_\ell}{\sigma}$, $\ell = 1 \dots L$. Выборочное среднее квадратическое отклонение σ' определялось следующим образом (несмещенная оценка):

$$\sigma' = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{\ell=1}^L z_\ell^2}.$$

На основе сформированного вектора нормированных значений Y_ℓ по методике [4] строилась гистограмма распределения. Интервалы (Y_{j-1}, Y_j) , $j = 1 \dots v$, по которым группировались экспериментальные данные, выбирались одинаковой ширины и в количестве $v = 22$. В качестве статистики рассматривалась величина вида

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^v \frac{(U_j^* - U_j)^2}{U_j},$$

где U_j и U_j^* — соответственно гипотетическое и экспериментально полученное количество выборочных значений сигнала, попавших в j -й интервал.

Вследствие неопределенности истинного среднего квадратического отклонения выборочных значений принятого колебания число степеней свободы ϑ было уменьшено на одну единицу относительно v . С учетом теоремы Пирсона [4], согласно которой ϑ должно быть уменьшено на едини-

цу, получали $\vartheta = v - 2 = 20$ степеней свободы. Выбранным параметрам уровня значимости $\alpha = 0,05$ и $\vartheta = 20$ соответствовало [7] критическое значение $\chi_{0,05}^2 = 31,41$ (в логарифмическом масштабе $10\lg(\chi_{0,05}^2) = 14,97 \text{ дБ}$). При $\chi^2 < \chi_{0,05}^2$ гипотеза о принадлежности величин гауссовскому распределению принималась с выбранным уровнем значимости по критерию Пирсона. График зависимости статистики χ^2 от частотного разрешения df приведен на рис. 3.

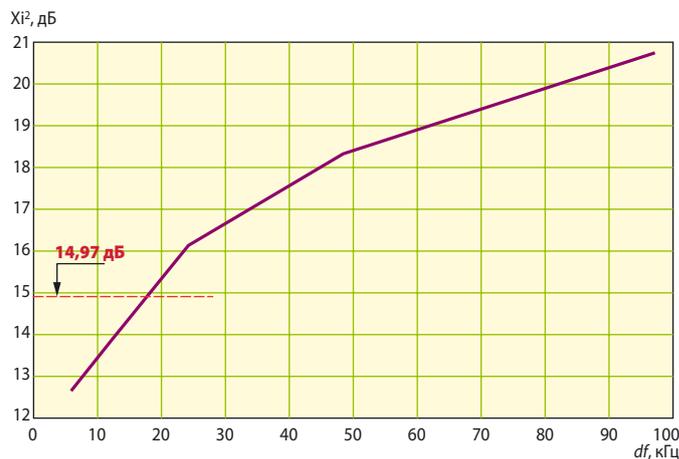


Рис. 3. Зависимость статистики χ^2 от частотного разрешения df

Экспериментально проверено, что при $0 < df \leq 12,2 \text{ кГц}$ значение статистики χ^2 меньше критического значения $\chi_{0,05}^2$ (значению $df = 12,2 \text{ кГц}$ соответствует $\chi^2 = 24,32$, $10\lg(\chi^2) = 13,86 \text{ дБ}$). Поэтому при данных значениях df анализируемый сигнал можно считать распределенным по гауссовскому закону.

Для наглядного сравнения практических и теоретических данных на рис. 4 приведены гистограмма распределения δ значений Y_ℓ (при частотном разрешении спектра $12,2 \text{ кГц}$) и график теоретической кривой плотности распределения W нормированной гауссовской случайной величины x (с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией).

Гауссовский закон распределения для выборочных значений сигналов БС сотовой связи стандарта CDMA 450 был установлен при частотных разрешениях $0 < df \leq 3 \text{ кГц}$,

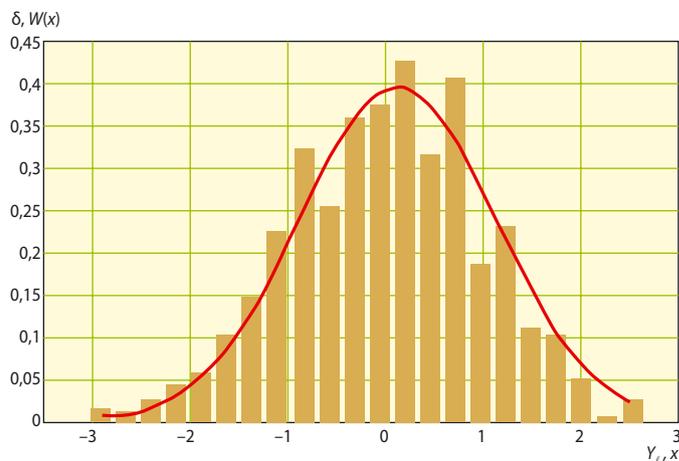


Рис. 4. Распределение нормированных значений синусной квадратурной составляющей сигнала БС UMTS 2100 и плотность распределения гауссовской случайной величины

а сигналов БС сотовой связи GSM-900 и GSM-1800 — при $0 < df < 4,88$ кГц. Равенство значений верхних пределов интервалов частотных разрешений для стандартов GSM-900 и GSM-1800 можно объяснить однотипными сигналами, применяемыми в данных стандартах [8].

Обобщенная математическая модель сигналов. Как показали результаты экспериментальных исследований, при определенных частотных разрешениях измерительной аппаратуры квадратурные составляющие спектров сигналов БС сотовой связи могут быть описаны с помощью гауссовского закона. Для решения задач радиочастотного контроля целесообразно привести общий интервал частотных разрешений (для всех рассмотренных в настоящей статье сигналов) $0 < df \leq 3$ кГц (по минимальной верхней границе экспериментально полученных интервалов частотных разрешений).

Математическое описание сигнала в спектральной области представим в виде

$$z_m = z_m^c + iz_m^s,$$

где z_m^c и z_m^s — соответственно косинусная и синусная квадратурные составляющие на частоте m .

Каждая из квадратур имеет нулевое математическое ожидание. Спектральная плотность мощности сигнала на частоте m равна

$$G_m = M\{|z_m|^2\} = 2M\{(z_m^c)^2\} = 2M\{(z_m^s)^2\} = 2D_m,$$

где $M\{\dots\}$ — операция математического ожидания; D_m — дисперсия квадратурных составляющих (одинаковая для косинусной и синусной составляющих).

Совместная плотность вероятности для квадратурных составляющих имеет вид

$$W(z_m) = W(z_m^c)W(z_m^s) = \frac{1}{\pi G_m} \exp\left\{-\frac{|z_m|^2}{G_m}\right\},$$

где

$$W(z_m^c) = \frac{1}{\sqrt{\pi G_m}} \exp\left\{-\frac{(z_m^c)^2}{G_m}\right\}$$

и

$$W(z_m^s) = \frac{1}{\sqrt{\pi G_m}} \exp\left\{-\frac{(z_m^s)^2}{G_m}\right\}$$

— плотность вероятности соответственно для косинусной и синусной квадратурной составляющей.

Заключение. Рассмотрен подход к построению обобщенных математических моделей сигналов радиостанций на основе анализа экспериментальных данных с использованием критерия хи-квадрат. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности описания квадратурных составляющих сигналов БС сотовой связи (стандарты CDMA 450, GSM-900, GSM-1800, UMTS 2100) гауссовскими случайными величинами при частотных разрешениях измерительной аппаратуры $0 < df \leq 3$ кГц.

В общем случае на результат проверки закона распределения сигналов могут влиять следующие факторы: отношение сигнал/шум, мощность промышленных помех в полосе анализируемого сигнала, многолучевое распространение радиоволн и т.д. Степень влияния указанных факторов различна в зависимости от частот настройки комплекса радиочастотного контроля и выбранной точки пространства для установки приемной антенны. Поэтому в процессе проведения радиочастотного контроля на конкретном предприятии следует предусмотреть этап набора и анализа статистики электромагнитных излучений для оптимизации параметров комплекса радиочастотного контроля (например, его частотного разрешения) по отношению к применяемому алгоритму обнаружения сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорев А. А. Способы и средства защиты информации. — М.: Министерство обороны Российской Федерации, 1998. — С. 239–240.
2. Каргашин В. Л. Проблемы обнаружения и идентификации радиосигналов средств негласного контроля информации. Ч. 2 // Специальная техника. — 2000. — № 4. — С. 31.
3. Модели технических разведок и угроз безопасности информации / Под ред. Е. М. Сухарева. Кн. 3. — М.: Радиотехника, 2003. — 142 с.
4. Куликов Е. И. Прикладной статистический анализ. — М.: Радио и связь, 2003. — 376 с.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. — М.: Мир, 1974. — С. 34.
6. Вероятность и математическая статистика // Энциклопедия / Гл. ред. Ю. В. Прохоров. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. — С. 133.
7. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. — М.: Наука, 1983. — 416 с.
8. Попов В. И. Основы сотовой связи стандарта GSM. — М.: Экотрендз, 2005. — С. 241.

Получено 07.04.14

ИНФОРМАЦИЯ

ЛЕТНЯЯ ШКОЛА СПБГУТ

18 июля завершила работу Международная летняя школа, организованная СПбГУТ совместно с Международной ассоциацией электронных наук (IAFES). В этом году здесь встретились 30 студентов из Китая, Кипра, Германии, Австрии и Финляндии.

Обучение проходило по следующим курсам:

- Интернет вещей: от идеи до серийного производства (Р. В. Киричек, к. т. н., СПбГУТ);

- Компьютерная музыка и звуковой дизайн (Г. Г. Рогозинский, к. т. н., СПбГУТ);

- Журналистика — старые и новые технологии в масс-медиа (проф. Университета Данаубе, Австрия, Йоханн Гюнтер);

- Эффективный коммуникатор в новую медийную эру: межкультурный аспект (Н. Н. Журавлева, к. полит. н., СПбГУТ).

Участники Летней школы не только получили сертификаты о ее успешном окончании, но и посетили достопримечательности

Санкт-Петербурга, осмотрели город с акватории Невы, побывали в Гатчине, Пушкине, Петергофе.

В торжественном закрытии Летней школы участвовали проректор по воспитательной работе и международному сотрудничеству СПбГУТ О. В. Золотокрылин и соорганизатор и партнер проекта Йоханн Гюнтер.