

Радиомониторинг с применением ЦОС

Задача - определение местоположения источников радиоизлучений, значения несущей частоты, вида модуляции и скорости манипуляции, характера и параметров модулированного сигнала и т.д. Решение этой задачи затруднено вследствие:

- возможности использования в радиообмене одним корреспондентом большого количества частот;

- применения в одной системе связи сигналов с различными видами и параметрами модуляции и возможности изменения их значений в ходе сеанса связи;

- разнообразного характера передаваемой информации - от речевых сообщений на аналоговом уровне до межкомпьютерного обмена на цифровом;

- сокращения продолжительности сеансов связи за счет автоматизации процессов организации радиоканала и увеличения скорости передачи информации;

- уменьшения уровня сигналов и, как следствие, соотношения сигнал-шум на входе средств радиоприема;

- большого числа различных видов конфигураций сетей связи, динамического изменения их структуры и возможности их сопряжения с другими системами.

Неавтоматизированные аналоговые средства (панорамного) радиоконтроля практически не позволяют решать эти задачи.

Такие средства должны позволять решать следующие задачи:

- поиск и обнаружение радиосигналов в требуемом диапазоне частот или при контроле фиксированного набора частот;
- определение параметров и вида модуляции обнаруженных сигналов, демодуляция заданных типов сигналов;
- определение вида и структуры двоичных последовательностей, видов синхронизации, первичного и помехоустойчивого кодирования и т.д.;
- декодирование двоичных последовательностей и выделение сообщений, регистрация сигналов и сообщений, архивация данных радиоконтроля.

Соответствующие автоматизированные комплексы должны обеспечивать:

- настройку на сигналы с точностью до 1 Гц в диапазонах частот от 150 кГц до 2 ГГц;
- автоматическое сканирование в заданном диапазоне частот с отображением результатов сканирования в координатах время-частота и амплитуда-частота; автоматическое сканирование по списку заранее заданных частот;
- остановку на частоте обнаруженного радиосигнала по команде оператора или в автоматическом режиме;
- определение в автоматическом режиме или в режиме диалога с оператором модуляц. параметров анализируемых сигналов;
- демодуляцию заданных классов сигналов;
- регистрацию аналоговых сигналов в цифровом виде и демодулированных сигналов на машинный носитель;
- прослушивание записанных сигналов с использованием стандартных средств мультимедиа компьютера;
- ведение базы данных обрабатываемых сигналов.

Организация радиоприема и обработки сигналов систем наземной радиосвязи предусматривает ряд следующих типичных действий оператора:

- управление частотой настройки радиоприемника с целью обнаружения требуемого сигнала;
- определение (подтверждение) технических параметров обнаруженного сигнала;
- настройка аппаратуры и обработка сигнала;
- занесение и проверка параметров сигнала и источника радиоизлучений в соответствующих формах учета результата работы;
- в случае невозможности выполнения в процессе работы вышеперечисленных операций в реальном масштабе времени осуществление записи обнаруженного сигнала с целью проведения операций детального технического и информационного анализа в отложенном режиме.

Режим поиска источников радиоизлучений

Интерфейс Пользователя должен обеспечивать задание оператором необходимых параметров - диапазона поиска, полосу пропускания, шаг перестройки частоты, вид детектора и уровень шумоподавления, вид и параметры модуляции интересующих сигналов. В процессе сканирования при обнаружении сигналов, уровень которых превышает заданный порог, или с интересующими значениями модуляционных параметров значения частоты радиосигнала и параметры модуляции должны регистрироваться в ПЭВМ автоматически или после подтверждения оператором.

В результате сканирования получают полную информацию о загрузке рабочего диапазона в виде списка частот и графического отображения загруженности анализируемого диапазона в координатах уровень-частота. Эта информация может также храниться в компьютере в виде отдельных файлов.

Технический анализ параметров обнаруженных сигналов в автоматическом режиме и в режиме диалога с оператором

В качестве методов и инструментов технического анализа обнаруженных сигналов в реальном времени используемое в комплексе программно-алгоритмическое обеспечение должно осуществлять:

- графическое отображение значений амплитудных, фазовых и частотных параметров сигнала;
- оценку мгновенного и усредненного частотного спектров сигнала;
- автоматическое или в диалоговом режиме определение модуляционных параметров сигнала.

Эти операции должны выполняться с точностью, необходимой для дальнейшей демодуляции.

Демодуляция заданных типов сигналов

Программные средства должны обеспечить:

- настройку демодулятора на модуляционные параметры входного сигнала в ручном или автоматизированном режиме;
- демодуляцию заданных типов сигналов при ошибке в установке значений частоты или скорости манипуляции не более 1 %;
- установление и поддержание тактовой синхронизации при отношении соотношения сигнал-шум не хуже заданного (обычно 3 дБ) в диапазоне скоростей не хуже заданной (обычно до 2400 Бод);
- вывод в процессе обработки основных результатов анализа на монитор (с цветовым представлением) для обеспечения возможности визуального анализа в реальном времени;
- регистрацию демодулированного сигнала в цифровом или тестовом виде в файл на жестком диске компьютера (со служебной информацией о параметрах сигнала и режима работы).

Регистрация сигналов

Запись принимаемых сигналов должна осуществляться при любом режиме работы радиоприемника в звуковых файлах стандартных форматов (например, для Windows, в файлах формата WAV). Нужно обеспечить возможность автоматической регистрации сигнала, если он превышает установленный уровень обнаружения и, по результатам автоматического анализа, соответствует требуемым модуляционным параметрам. Возможен и режим записи по команде оператора.

Служебная информация для такого файла должна содержать сведения о частоте, дате, времени записи, параметрах приема. Записанные звуковые файлы желательно прослушивать с помощью встроенного проигрывателя, обеспечивающего все необходимые операции по воспроизведению, шумоочистке, повышению разборчивости речевых сигналов и т.д.

Устройства преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму обычно включают:

- усилитель входного аналогового сигнала;
- фильтр нижних частот с программируемой верхней граничной частотой;
- собственно АЦП, обеспечивающий заданный динамический диапазон, чувствительность и требуемую производительность вычислительного модуля, зависящую от частоты дискретизации ($T=1/2\Delta f$, $\Delta f=f_2-f_1$, $f_0=(f_1+f_2)/2$).

Возможно использование АЦП с постоянным шагом квантования ΔA , непостоянным ΔA и адаптивно подстраиваемым ΔA . Современные АЦП позволяют получать частоты дискретизации до сотен МГц, число уровней квантования - от 12 до 32 разрядов, одной или двух полярностей входного напряжения.

Операционная система должна обеспечивать:

- поддержку обработки сигналов в реальном времени,
- преемственность возможных последующих версий сверху вниз;
- возможность внесения каких-либо изменений в программное обеспечение, созданное конкретным разработчиком, без изменения остального специализированного ПО;
- возможность взаимодействия разрабатываемых программно-алгоритмических средств в рамках общей, как правило, одноранговой локальной вычислительной сети (ЛВС); единый сетевой протокол взаимодействия в ЛВС и всех разрабатываемых средств;
- наличие безопасности доступа к информационным ресурсам разных компьютеров-клиентов ЛВС, простоту администрирования общих ресурсов.

В принципе, использование ОС Windows NT позволяет удовлетворить многие из перечисленных выше требований и может быть основой для создания систем анализа радиосигналов рассматриваемого класса. При этом обычно используют современные инструментальные средства типа Delphi, CBuilder, Visual-C и т.п.

Во многих практических ситуациях удается реализовать “мягкий” режим ЦОС в реальном времени, для которого допустима потеря некоторых данных с малой вероятностью и задержки в обработке некоторых фрагментов сигналов до нескольких секунд. Реально может быть применен для обработки сигналов звукового диапазона при малом числе каналов.

Использование ОС Windows и указанных выше инструментальных средств позволяет использовать преимущества объектно-ориентированной технологии и существенно сократить время разработки нового ПО за счет использования многих встроенных возможностей.

Цифровой спектральный анализ

служит основой современных методов обработки сигналов радиосвязи.

Реализуется путем обработки выборок данных ограниченной длительности на основе использования ортогональных преобразований (чаще всего, преобразования Фурье, но также преобразования Хартли, ДКП, вейвлетных преобразований и т.д. - в зависимости от приложения и особенностей решаемой задачи). Для многих классов ортогональных преобразований имеются быстрые алгоритмы. Если для выборки данных, содержащей N отсчетов, для выполнения ДПФ необходимо порядка $N \times N$ операций, то для быстрых алгоритмов - порядка $N \log_2 N$ операций, что при размерах выборок более 1000 дает выигрыш в десятки раз. Разработаны и спецпроцессоры для выполнения быстрых преобразований.

Ограниченность размера обрабатываемой выборки данных приводит к эффекту размытия (протекания) - спектр гармонического сигнала представляет собой функцию вида sinc с уровнем боковых лепестков - 13,3 дБ. Поскольку предполагается, что необходимо оценивать спектр широкополосных сигналов (или узкополосных сигналов после смещения центральной частоты, гетеродирования) и определять параметры этой спектральной оценки с высокой точностью (амплитуды и координаты пиков, соотношения амплитуд и т.п.), то для повышения качества спектральных оценок становится необходимо использовать весовые окна.

Среди весовых окон наибольшее распространение получили окна Хэмминга, Ханна, Бртлетта, Блэкмана-Наттола-Хэрриса и др. Имеются многочисленные аналогии с использованием этих функций для АР (взаимосвязь разрешения по частоте или ширины главного лепестка с уровнем боковых лепестков, энергии в боковых лепестках, скорости спада). Особое значение имеет простота программно-алгоритмической реализации.

Для улучшения качества спектральных оценок можно также использовать некогерентное накопление $\hat{S}(\omega) = \sum_{n=1}^N \hat{S}_n(\omega)$, где $\hat{S}_n(\omega)$ - оценка спектра по n -й периодограмме, N - количество таких периодограмм. Кроме того, можно пользоваться и другими методами получения спектральных оценок - фильтрационным, корреляционным и т.д.

Однако для рассматриваемого приложения важно получить не только оценку энергетического спектра (анализ которой позволяет реализовать различные процедуры обнаружения сигнала, анализа его технических параметров, помехоустойчивой обработки и т.д.), но и оценку комплексного текущего спектра вида $X_{ism}(\omega) = S(\omega)\exp(j\varphi(\omega))$, поскольку фазовая информация при анализе характера (типа) и параметров модуляции не менее важна, чем амплитудная.

При анализе типа модуляции часто используется операция возведения сигнала в квадрат и более высокие степени, при которых возникают гармоники удвоенной, учетверенной и т.д. частоты, служащие признаками, характеризующими тип модуляции сигнала. Эти признаки далее используются для распознавания (на основе теории распознавания образов).

Кроме того, при анализе фазовых соотношений полезным является использование преобразование Гильберта, то есть расчет квадратурной составляющей сигнала $x(nT) = s(nT) + j\hat{s}(nT) = a(nT)\exp(jp(nT))$

$$\text{где } a(nT) = \sqrt{s^2(nT) + \hat{s}^2(nT)},$$

$$p(nT) = \arctg(\hat{s}(nT)/s(nT)),$$

$$f(nT) = \{\hat{s}(nT)s(nT-T) - \hat{s}(nT-T)s(nT)\} / 2\pi T(\hat{s}^2(nT) + s^2(nT)),$$

- соответственно амплитуда, фаза и частота сигнала.

Преобразование Гильберта применимо как к детерминированным, так и случайным процессам.

Решение задачи определения модуляционной структуры сигнала предполагает оценку совокупности признаков (выделение данной совокупности признаков из принимаемой смеси сигнала и помех и их обработку).

Необходимо принять решение о приеме сигнала $x(t) = s(t, q_1, q_2, \dots, q_n) + N(t)$ (где q_1, q_2, \dots, q_n - оцениваемые параметры, $N(t)$ - аддитивная помеха) с i -м вариантом модуляционной структуры, если априорно известно, что $q_i \in Q_i, i = 1, \dots, n, Q_i$ - множество значений, которые может принимать i -й параметр.

Если значения q_1, q_2, \dots, q_n распределены равномерно, то коэффициент правдоподобия описывается выражением (C - некоторая константа)

$$z_1(q_1, q_2, \dots, q_n) = C \int_0^T x(t) s_i(t, q_1, q_2, \dots, q_n) dt.$$

Максимально правдоподобное решение о наличии в наблюдаемой реализации i -го сигнала принимается, если для всех $i \neq j, z_i > z_j$ (корреляционный приемник). Метод трудно реализовать практически, что ограничивает практическое применение классических методов оптимального оценивания параметров. Квазиоптимальные методы основываются на использовании статистической теории распознавания образов - отнесение наблюдаемой выборки признаков распознавания к одному из распознаваемых классов S_1, S_2, \dots, S_m .

В настоящее время имеется хорошая теоретическая основа для решения задачи распознавания полностью описанных классов, определяемых их многопараметрическими (многомерными) ПРВ - Байесовские, максимума апостериорной вероятности и другие методы.

Если же эти ПРВ неизвестны, то используются методы, основанные на вычислении (получении) оценок многомерных ПРВ по обучающим выборкам, на методах кластеризации, формировании многомерных гистограмм, методам ближайшего соседа, гибкой логики (нечетких решений) и т.п.

ЧМ и ФМ-сигналы могут распознаваться на основе анализа разностей фаз для отсчетов, отстоящих друг от друга на период T , однако при этом вероятность правильного распознавания не превышает 0,7. Причина - низкая информативность выбранного признака.

Более информативен (надежен) анализ выбросов случайного процесса $\Delta p(nT) = p(nT) - p((n-l)T)$ if $\Delta p(nT) \geq 0$; $\Delta p(nT) = p(nT) - p((n-l)T) + 2\pi$ if $\Delta p(nT) < 0$.

Конкретное значение l устанавливается с учетом возможного значения максимальной скорости V_{max} анализируемого сигнала таким образом, чтобы $1/V_{max} \approx lT$.

Теоретически предельная (потенциальная) вероятность ошибки различения двух сигналов (ЧМ и ФМ) по одному признаку, распределенному по нормальному закону при воздействии гауссовых помех $p_e = 1 - F(\sqrt{E/N(1-R)})$, где $F()$ - интеграл вероятности, E/N - отношение энергии сигнала к энергии шума, R - коэффициент взаимной корреляции сигналов по оцениваемому параметру.

Повышение эффективности распознавания связано с:

- увеличением объемов обучающих и контрольных выборок;
- увеличения времени накопления;
- использования нелинейных преобразований (нормализации закона распределения) случайных величин, если он исходно является негауссовым; применения ранговых критериев;
- использованием нескольких признаков и их совместной обработкой;
- выполнением процедуры распознавания в несколько этапов с решением на каждом из них частной задачи (идти по ветвям логической схемы с уточнением).

В условиях радиоприема при низком соотношении сигнал-шум, наличии замираний, присутствия импульсных помех и других деструктивных факторов выделенный сигнал подвергается различным искажениям, в частности, эффектам дробления внутри посылок демодулируемого сигнала и краевым искажениям. Эти эффекты затрудняют определение скорости манипуляции сигнала.

Если моменты перехода сигнала из одного состояния в другое случайны, то такой сигнал описывается законом распределения Пуассона - вероятность $p_n(t)$ n переходов из одного состояния в другое за время t равно $p_n(t) = (1/n!)k^n t^n e^{-kt}$, где k - среднее число переходов в единицу времени.

При наличии периодической составляющей с периодом t_0 оценка k сходится к $1/t_0$ при неограниченно возрастающем времени.

Искажения сигнала типа дробления проявляются в одно или многократном изменении полярности полезного сигнала на интервале длительности одной посылки. Статистические характеристики дробления определяются экспериментально и зависят от характеристик канала связи и скорости передачи данных. Эффекты дробления оказывают наиболее существенное негативное влияние при дальнейшей обработке сигналов. Для их устранения используется медианная фильтрация, в том числе **рекурсивный** медианный фильтр:

$$y_i = \text{med}\{y_{i-k}, \dots, y_{i-1}, x_i, x_{i+1}, x_{i+k}\},$$

где $k = (m-1)/2$, m - порядок фильтра (размер скользящего окна).

Для вычисления m используют выражение $m = \lceil f_d / V_m \rceil$, где f_d - частота дискретизации (в Гц), V_m - максимально возможная скорость манипуляции.

Краевые искажения (случайные и систематические ошибки момента времени смены полярности), в основном, влияют на помехоустойчивость работы систем тактовой синхронизации по двоичным видеосигналам.

Адаптивная коррекция сигналов

Адаптивный (линейный) фильтр - это фильтр, частотная характеристика которого непрерывно изменяется во времени с целью пропускания (выделения) только полезных составляющих сигнала и максимального ослабления воздействующих на него помех.

Входной сигнал $x(t)$ обрабатывается в таком фильтре с целью получения выходного сигнала $y(t)$, который затем сравнивается со специальным эталонным сигналом $d(t)$. Результат сравнения $e(t) = d(t) - y(t)$ называется ошибкой и используется для корректировки коэффициентов линейного фильтра с целью минимизации $e(t)$.

Пусть $x(t) = S(t) + n(t)$ и образец $d(t)$ коррелирован с $n(t)$ и некоррелирован с $S(t)$. Тогда целью работы фильтра является уменьшение влияния $n(t)$ на $S(t)$ и на выходе фильтра будет формироваться оценка мешающего сигнала, который затем будет вычитаться из $x(t)$.

Тогда можно записать

$$\begin{aligned} e^2(t) &= (x(t) - y(t))^2 = (S(t) + n(t) - y(t))^2 = \\ &= S^2(t) + (n(t) - y(t))^2 + 2S(t)(n(t) - y(t)) \end{aligned}$$

Если МО сигнала и помех нулевые, то

$$m(e^2(t)) = m(S^2(t)) + m((n(t) - y(t))^2).$$

Поскольку $m(S^2(t))$ - средняя мощность передаваемого сигнала, которая на приемной стороне не корректируется, то

$$\min(m(e^2(t))) = m(S^2(t)) + \min(m((n(t) - y(t))^2)),$$

то есть минимизация квадрата ошибки позволяет компенсировать влияние помехи на полезный сигнал.

Качество коррекции зависит от алгоритма адаптации, схемной реализации фильтра и его порядка (числа перестраиваемых или подстраиваемых коэффициентов).

Одним из применений методов адаптивной фильтрации является обработка речевых сигналов. Запись человеческой речи может оказаться искаженной вследствие следующих причин:

- наличия в месте проведения записи посторонних источников акустических сигналов (шумы помещения, работающей бытовой техники, лентопротяжного механизма и т.д.);
- различных помех в линиях связи (атмосферные помехи в радиоканалах, эхо-сигналы в проводных каналах связи);
- неисправностью или плохим качеством передающей, приемной и (или) регистрирующей аппаратуры;
- неграмотным выбором или неправильным использованием связной и звукозаписывающей техники.

Существующие методы очистки речи основаны либо на учете особенностей образования и восприятия речевого сигнала, либо на учете модели удаляемых помех.

На коротком интервале времени речь характеризуется набором резонансных частот, называемых формантами. Для глухих звуков на таких интервалах сигнал имеет шумоподобную структуру, для звонких - гармоническую. Согласные звуки, хотя и маломощны, но весьма существенны для понимания смысла речи. Первая форманта, обычно лежащая в диапазоне частот от 250 до 800 Гц, менее существенна для восприятия, чем вторая и последующие. Хорошее воспроизведение текущего амплитудного спектра является более важным для разборчивости речи, чем сохранение фазового спектра. Кроме того, после громких звуков некоторое время не воспринимаются слабые.

Учет всех возможных типов помех сложен. По этой причине большинство методов шумоочистки основаны на предположении, что шумы имеют аддитивный характер и некоррелированы с сигналом.

Методы фильтрации (шумоочистки речевых сигналов)

- полосовая фильтрация: ФВЧ с верхней частотой до 200-300 Гц устраняет низкочастотные шумы, а ФНЧ с частотой среза порядка 4 кГц удаляет высокочастотные составляющие; метод эффективен для удаления внеполосных помех;
- если помеха занимает (известный) узкий участок (или участки) спектра речевого сигнала, то применяют многополосовую фильтрацию (эквалайзинг);
- при широкополосной помехе разборчивость речи дополнительно повышают путем нормализации (клиппирования), которая увеличивает относительную амплитуду важных для разборчивости, но слабых по мощности согласных звуков, уменьшая их маскирование гласными звуками и шумом;
- методы, основанные на вычитании шума:

$$|S(f)| = |Y(f)| - m|N(f)|,$$

где $|S(f)|$, $|Y(f)|$, $|N(f)|$ - оценки соответственно спектров исходного сигнала, смеси сигнала и шума и собственно шума, m - операция усреднения.

$|Y(f)|$ вычисляется непосредственно по реализациям обрабатываемого сигнала, а $m|N(f)|$ определяется либо из некоторых допущений о свойствах помех (если эти свойства известны), либо путем измерения параметров шума в паузах речевого сигнала, либо с применением методов, рассмотренных ранее (оценивание дисперсии помех по наблюдаемым реализациям смеси).

Исходный сигнал получают путем обратного преобразования $|S(f)|$ в последовательность отсчетов сигнала.

Существуют различные модификации этого метода, в частности

$$|S(f)|^\alpha = |Y(f)|^\alpha - \beta m |N(f)|^\alpha,$$

где α и β - параметры метода.

Используется также Винеровский фильтр, для которого частотная характеристика оптимального фильтра рассчитывается с учетом полученных оценок спектров сигнала и помех.

Области применения фильтрации сигналов и данных; сравнительный анализ цифровой и аналоговой фильтрации; виды цифровых фильтров; практические случаи непостоянства отношения сигнал-шум, статистические свойства помех и первичных оценок параметров; фильтрация на основе ортогональных преобразований, условия их применимости; преимущества и недостатки фильтрации на основе ортогональных преобразований; импульсные и негауссовские помехи, причины возникновения; неадаптивная нелинейной фильтрации в скользящем окне; L-фильтры; робастные оценки; основные требования к методам нелинейной фильтрации одномерных сигналов; тестовые сигналы; классификация нелинейных неадаптивных фильтров; характеристики нелинейных фильтров; количественные критерии эффективности фильтрации; динамические ошибки выходных сигналов нелинейных фильтров при наличии и отсутствии помех; обобщение результатов анализа динамических ошибок; подавление помех для сигналов постоянного уровня и для линейно-изменяющихся сигналов при Гауссовых помехах; особенности поведения выходных сигналов нелинейных фильтров в окрестности отсчетов, искаженных импульсными помехами; зависимость эффективности фильтрации от характеристик помех и сигнала; общие принципы локальной адаптации; локально-адаптивные фильтры на основе Z-параметров; свойства обычного мириадного фильтра; обобщенный принцип разработки адаптивного мириадного фильтра; показатели локальной активности; адаптивный линейно-медианный фильтр; Методы оценивания характеристик помехи их применения при обработке сигналов; методика оценивания дисперсии помех во временной области; оценивание дисперсии помех в спектральной области; влияние точности оценивания дисперсии на эффективность фильтрации; области применения и достоинства векторных фильтров; принцип векторной нелинейной фильтрации на основе порядковых статистик; сортировка векторов; векторные направленные фильтры; радиомониторинг с применением ЦОС - задачи и применения; требования к техническим характеристикам систем радиомониторинга; требования к операционной системе и методам регистрации; цифровой спектральный анализ (общие сведения); анализ фазовых характеристик; распознавание ЧМ и ФМ сигналов; особенности обработки при низких соотношениях сигнал-шум; адаптивная (линейная) коррекция сигналов; причины и свойства помех при обработке речевых сигналов; методы шумоочистки речевых сигналов.