УДК 621.396.96

М.Ш. БОЗИЕВ

Открытое акционерное общество «Гранит», г. Макеевка

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОРОТКИХ СООБЩЕНИЙ РАДИОЛИНИЙ

Анотація. У даній статті обговорюється проблема виділення корисного сигналу з вхідного повідомлення і визначення його параметрів. Повідомлення представлене реалізацією як короткочасний сигнал фінітного типу. Для спектрального аналізу фінітного сигналу в реальному часу використано поняття кінцевого спектру відрізка. Приведений алгоритм рішення задачі та отримання комплексу спектральних параметрів сигналу.

Ключові слова: Повідомлення, радіолінія, фінітний сигнал, спектральний аналіз, апроксимація, цифрова обробка, алгоритм.

Аннотация. В данной статье обсуждается проблема выделения полезного сигнала из входного сообщения и определения его параметров. Сообщение представлено реализацией как кратковременный сигнал финитного типа. Для спектрального анализа финитного сигнала в реальном масштабе времени использовано понятия конечного спектра отрезка. Приведен алгоритм решения задачи и получения комплекса спектральных параметров сигнала.

Ключевые слова: Сообщение, радиолиния, финитный сигнал, спектральный анализ, аппроксимация, цифровая обработка, алгоритм.

Abstract. The problem of selection of useful signal from the entrance report and determination of his parameters comes into question in this article. The report is represented by realization as brief signal of fynytnogo type. For the spectral analysis of fynytnogo signal the concepts of eventual spectrum of segment are used in the real time. The algorithm of decision of task and receipt of complex of spectral parameters of signal is resulted.

Keywords: Report, radyolynyya, fynytnyy signal, spectral analysis, approximation, digital treatment, algorithm.

Введение

Для организации системы связи передачи информации с погруженными подводными объектами используются радиолинии на сверхдлинноволновом (десятки килогерц) и сверхнизкочастотном (сотни герц) диапазонах волн. Прием и передача данных по радиолиниям на такие объекты, в силу их специфики, требует обеспечения своевременного, достоверного и скрытного доведения информации, поэтому передача данных осуществляется в сжатой форме и на ограниченном отрезке времени. Качество связи по радиолиниям существенно зависимость от состояния ионосферы и атмосферы, трассы распространения, атмосферных и промышленных помех каналам связи, а скрытность передаваемой информации требуют обеспечить защиту от трансформаций и искажений, приводящих к потере части передаваемых данных.

При современном уровне развития науки и техники появляется реальная возможность реализации высоких тактико-технических характеристик радиолиний связи с подводными объектами не за счет увеличения мощностей передающих, а за счет использования современных методов передачи и обработки сигналов. При этом обработка сигналов является общей проблемой для любого канала связи. Для решения этой проблемы основное внимание следует уделить спектрально-временной обработке сигналов, использованию адаптивных методов, подавлению помех, сосредоточенных по спектру или времени, компенсации индустриальных помех, а при вторичной обработке информации – разработке проблемных вопросов идентификации объектов радиоизлучения с использованием методов распознавания образов и элементов искусственного интеллекта. При создании технических средств обработки следует применять цифровую технику, использующую сигнальные микропроцессоры для спектрального анализа сигналов, методы обработки пространственной информации с визуализацией в пространственную форму. Данные о характеристиках излучаемых сигналов объектов радиоизлучений используются также при формировании каталогов данных и алгоритмов распознавания и классификацией целей в аппаратуре радиотехнической обстановки. Добывание информации о параметрах излучаемых сигналов обеспечивается специальными службами, в том числе с использованием измерительной аппаратуры собственного изготовления.

Анализ особенностей определения параметров коротких радиолиний

В работе обсуждается проблема выделения полезного сигнала из входного сообщения, принятого некоторым устройством, и определения его параметров. Представим сообщение в виде его реализации на ограниченном временном интервале в виде непрерывного отрезка функции

$$x(t), \quad \text{где} \quad t \in [0, T], \tag{1}$$

или в виде дискретной последовательности из N ее значений (отсчетов)

$$x(t_0), x(t_1), \ldots, x(t_{N-1}) = \{x_n\}, \text{где } t_0 = 0;\ t_N = T. \tag{2}$$

Каждая реализация является кратковременным сигналом. Такие сигналы называются также финитными. Будем рассматривать условия передачи сообщения, когда $x(t)$, как входной сигнал, подлежащий обработке и анализу, который представляется суммой

$$x(t) = s(t, u(t)) + \xi(t), \tag{3}$$

где $s(t) = s(t, u(t))$ результат преобразования исходного сигнала $u(t)$, и $\xi(t)$ аддитивная помеха – случайный процесс с не известными параметрами (например, узкополосные помехи, шум в канале связи, ошибки вычислительных операций и т. д.).

Считаем, что полезный сигнал $u(t)$ характеризуется совокупностью параметров

$$c_1, c_2, ... = \{c_k\}, \tag{4}$$

и существует функциональная зависимость

$$u = u(t, \{c_k\}). \tag{5}$$

Короткий сигнал $x(t)$ содержит весь объем информации о сообщении, структуру и состав которых необходимо раскрыть, таким образом, целью обработки является выделить исходный сигнал $u(t)$ и, в частности, определить его истинные параметры

$$\hat{c}_1, \hat{c}_2, ... = \{\hat{c}_k\}. \tag{6}$$

Поставленная задача возникает при разработке и использовании устройств цифровой обработки для обнаружения и различения сигналов и помех, измерения их параметров, для анализа случайных процессов и оценки их характеристик, например, для гармонического анализа. Необходимость специальной обработки именно коротких сигналов связана с процессом анализа сигналов в радиотехнических системах. Этот процесс можно разбить на три этапа:

- На первом этапе, широкополосное приемное устройство принимает с радиолинии радиосигнал. Далее при необходимости осуществляется детектирование низкочастотного сигнала и его дискретизация. В результате формируется временной процесс в виде непрерывной функции или последовательности отсчётов. Этот процесс содержать отдельные составные элементы – короткие сигналы, например, сигналы с дискретно изменяющейся амплитудной модуляцией, фазовой манипуляцией, с частотной перестройкой.
- На втором этапе, каждый отдельный сигнал рассматривается как имеющий ограниченную длительность, то есть финитный. Здесь анализирующее устройство осуществляет последовательную выборку и обработку отдельных сигналов с целью отделения их от помех, определения их параметров, например, текущего непрерывного гармонического спектра или набора составляющих гармоник.
- На третьем этапе, выполняется дополнительное преобразование и передача далее в другие устройства обработанного сигнала.

Построение функциональных зависимостей $\{\hat{c}_k\} = \{C_k[x(t)]\}$, связывающие искомые параметры сигнала $u(t)$ с функцией – аргументом $x(t)$, и определяются алгоритмы преобразования, реализуемые функционалами. Они будут составлять алгоритм работы устройства обработки и анализа сигналов.

В качестве меры правильности выбора функционалов $\{C_k[x(t)]\}$ и меры точности определения параметров полезного сигнала может быть использован функционал:

$$J = J(x(t), y(t, \{c_k\})), \tag{7}$$

называемый расстоянием между входным сигналом $x(t)$ и некоторой функцией

$$y(t) = y(t, \{c_k\}), \tag{8}$$

являющейся аппроксимацией зависимости $s(t) = s(t, u(\{c_k\})$. Для этого проводится оптимизация (7), то есть его минимизация по функциям $y(t)$, и усреднение по различным реализациям $u(t)$ и $\xi(t)$.

Рассмотрим важный вариант поставленной задачи в получении аппроксимирующей зависимости коротких сообщений, сигналов радиолиний и расчет их гармонических дискретных спектров.

В настоящее время традиционные способы определения спектра процессов и отдельных сигналов основаны на использовании их разложений в ряды Фурье или представлении их интегралами Фурье [1-3]. Однако эти способы не всегда эффективны для коротких процессов и финитных сигналов, заданных на конечном интервале $[0, T]$. Главным является то, что в них искусственно навязывается поведение сигнала на концах и вне интервала, что существенно сказывается на показателях, характеризующих колебательные свойства сигнала внутри интервала.

Поэтому в данной работе решение следующей практически важной задачи спектра коротких сообщений радиолиний сверхдлинноволнового диапазона решается в постановке, предлагаемый в работе [7,8], как определения спектра короткого процесса.

Постановка задачи

Определить минимальное количество K гармоник, не обязательно ортогональных, в сумме образующих внутри временного интервала $[0,T]$ короткий процесс – непрерывный - $x(t)$, или дискретный по времени - $x[n]$, а также рассчитать значения

$$A_0,(A_1,B_1,\omega_1),...(A_K,B_K,\omega_K)=\{A_K,B_K,\omega_K\} \tag{9}$$

параметров этих гармоник – частоты и амплитуды, при этом поведение процесса вне интервала ничем не должно быть ограничено. Набор (9) будем считать гармоническим спектром короткого процесса.

Сформулированная постановка отражает дуальность задачи: с одной стороны, является задачей определения спектра короткого процесса, а с другой – задачей аппроксимации короткого процесса функцией

$$y(t)=A_0+\sum_{1}^{K}(A_k\cos\omega_k t+B_k\sin\omega_k t), \tag{10}$$

если рассматривается непрерывный процесс (1), или функцией

$$y(t_n)=A_0+\sum_{1}^{K}(A_k\cos\omega_k t_n+B_k\sin\omega_k t_n), \tag{11}$$

если рассматривается дискретная последовательность (2).

Следует отметить, что такая постановка задачи предполагает решение обеих задач в комплексе. При определении спектров коротких процессов параметры гармоник при фиксированном K, предлагается рассчитывать путем минимизации по переменным $\{A_k,B_k,\omega_k\}$ (9) выше рассмотренного функционала $J=J[x(t),y(t)]$ (7), специально выбранного для поставленной задачи. Аппроксимирующая функция $y(t)$ берется в виде суммы синусоидальных функций

$$y(t)=\sum_{k=0}^{K}(A_k\cos\omega_k t+B_k\sin\omega_k t). \tag{12}$$

При этом, что важно, допускается присутствие в этом наборе, как ортогональных так и неортогональных функций, то есть, имеющих такие частоты, что интеграл

$$\int_0^T[A_i\cos(\omega_i t)+B_i\sin(\omega_i t)][A_j\cos(\omega_j t)+B_j\sin(\omega_j t)]dt\text{, где } i\neq j,$$

не обязательно равен нулю в случае представления $x(t)$ в виде (1), или имеющих частоты, различающиеся на не обязательно кратные значения $2\pi/T$, в случае представления в виде (2).

В качестве функционала (7) использована традиционная форма в виде интеграла

$$J=\frac{1}{T}\int_0^T\left[x(t)-\sum_{k=0}^{K}(A_k\cos\omega_k t+B_k\sin\omega_k t)\right]^2 dt \tag{13}$$

если рассматриваемый сигнал $x(t)$ является непрерывный, и суммы

$$J=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left[x(t_n)-\sum_{k=0}^{K}(A_k\cos\omega_k t_n+B_k\sin\omega_k t_n)\right]^2, \tag{14}$$

если сигнал – дискретная последовательность. Каждое из этих выражений определяет среднеквадратичное расстояние $\delta = \sqrt{J}$ между сигналом $x(t)$ и его оценкой $y(t)$. Минимальное значение, определяемое соотношением $\overline{\delta} = \sqrt{\overline{J}} = \sqrt{\overline{J}(x(t), \overline{y}(t))}$, является погрешностью представления сигнала $x(t)$ его оптимальной оценкой $\overline{y}(t)$ в виде

$$\overline{y}(t) = \sum_{k=0}^{K} (\overline{A}_k \cos \overline{\omega}_k t + \overline{B}_k \sin \overline{\omega}_k t), \tag{15}$$

и будет характеризовать расстояние между входным сигналом $x(t)$ и суммой K оптимальных гармоник, как ошибку воспроизведения сигнала по найденному спектру (9).

Амплитуды и частоты спектра определятся методом наименьших квадратов путем минимизации ошибки J, как целевой функции, по параметрам (9). Естественно результат решения будет различным в зависимости от количества K используемых гармоник.

Следует отметить, что при анализе отрезков одиночных или нескольких элементов реального сообщения, принимаемого с радиолинии, расчет гармонического спектра короткого процесса целесообразно осуществлять с помощью цифровой обработкой, обеспечивающей любую точность вычислений. Поэтому задача должна решаться с учетом выполнения дополнительного условия, связывающего параметр K с величиной допустимой ошибки J.

Для понимания современного подхода в понимании спектра коротких сообщений в [7,8] введены понятия конечного спектра отрезка (КСО) и полного спектра отрезка (ПСО).

Под спектром КСО понимается такой минимальный набор из $\overline{K}$ синусоидальных компонент, характеризующихся совокупностью параметров

$$\overline{\delta}, \overline{K}, \overline{A}_0, [\overline{A}_1, \overline{B}_1, \overline{\omega}_1], ..., [\overline{A}_K, \overline{B}_K, \overline{\omega}_K], \tag{16}$$

означающих амплитуды и частоты этих гармоник, представляющих отрезок процесса (короткий сигнал) $x(t)$ с ошибкой, не превышающей заданное значение $\overline{\delta}$.

Под спектром ПСО понимается конечный спектр отрезка процесса $x(t)$, в котором количество отыскиваемых гармоник K при расчете не фиксировано и не задано, а определяется как минимально возможное при условии равенства нулю ошибки δ аппроксимации отрезка набором гармоник с таким спектром. Таким образом, спектром ПСО сигнала $x(t)$ в таком случае будет являться совокупность величин:

$$\overline{K}, \overline{A}_0, [\overline{A}_1, \overline{B}_1, \overline{\omega}_1], ..., [\overline{A}_K, \overline{B}_K, \overline{\omega}_K] \tag{17}$$

Конкретные методы определения КСО и ПСО сигнала $x(t)$ с условием достижения оптимального соотношения между ошибкой δ и количеством гармоник K , представляющих сигнал, могут быть разные и зависят от исходного варианта, какая из величин задана: K или δ.

Основной алгоритм решения задачи

Для практических целей нас будет интересовать определение спектра КСО в реальном масштабе времени для сверхдлинноволнового радиосигнала. В этом случае задается среднеквадратическая ошибка $\overline{\delta}$ аппроксимации сигнала $x(t)$, а определяется минимальное значение числа гармоник K. Последовательность этапов для данного варианта будет следующая.

1. Формируется реализация сигнала $x(t)$ на интервале $[t_0, T + t_0]$ в виде отрезка функции или дискретной последовательности.

2. Фиксируются момент t_0 – начала и T – длительность сообщения. Для удобства последующего анализа перенесем начало координат вправо по начальному отсчету в момент времени t_0, т. е. $t_0 = 0$, тогда реализация сигнала будет рассматриваться на интервале $[0, T]$.

3. Строится функционал в виде(13) или (14).

4. Ориентируясь на цифровую обработку, сигнал $x(t)$ представим последовательностью из N равноотстоящих отсчётов $\{x_n\}$ (2). Если процесс $x(t)$ не содержит гармоник с частотами большими

$\omega_{\max}$, то число отсчетов дискретизованного процесса $N=[T\omega_{\max}/\pi]$ [4-6], здесь [▫] – целая часть числа. Произведем замену

$$n = T/N,\, t_n = n\Delta t,\, \omega_k = p_k N/T, \text{ ãäå } 0 \le p_k \le \pi\,, \tag{18}$$

где p_k - относительная частота, $0 \le p_k \le \pi$, и из (14) получим

$$J = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}[x_n - \sum_{k=0}^{K} A_k \cos(p_k n) - \sum_{k=1}^{K} B_k \sin(p_k n)]^2\,. \tag{19}$$

5. Задается начальное минимальное ожидаемое (априорное) значение числа гармоник $K = K_a$. Значение K_a определяется по одному из трех вариантов:

$$\begin{aligned}&\text{1) если } N \text{ кратно 3, то } K_a < N/3;\\ &\text{2) если } N+1 \text{ кратно 3, то } K_a < (N+1)/3;\\ &\text{3) если } N+2 \text{ кратно 3, то } K_a < (N+2)/3.\end{aligned} \tag{20}$$

6. Составляется система из 3*K*+1 уравнений вида:

$$\frac{\partial S}{\partial A_0}=0,\ \frac{\partial S}{\partial A_1}=0,\ldots,\frac{\partial S}{\partial A_K}=0;\ \frac{\partial S}{\partial B_1}=0,\ldots,\ \frac{\partial S}{\partial B_K}=0;\ \frac{\partial S}{\partial \omega_1}=0,\ldots,\ \frac{\partial S}{\partial \omega_K}=0\,. \tag{21}$$

7. Осуществляем подстановку (19) в систему (21) и, после взятия производных, в результате получаем систему из 3*K*+1 уравнений линейных относительно амплитуды и нелинейных относительно частот, которая имеет вид:

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial S}{\partial A_0} &= \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}[x_n - \sum_{k=0}^{K}(A_k\cos(p_k n) - B_k\sin(p_k n))],\\
-\frac{\partial S}{\partial A_i} &= \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}[x_n - \sum_{k=0}^{K}(A_k\cos(p_k n) - B_k\sin(p_k n))]\cos(p_i n),\\
-\frac{\partial S}{\partial B_i} &= \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}[x_n - \sum_{k=0}^{K}(A_k\cos(p_k n) - B_k\sin(p_k n))]\sin(p_i n),\\
-\frac{\partial S}{\partial p_i} &= \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} n[x_n - \sum_{k=0}^{K}(A_k\cos(p_k n) - B_k\sin(p_k n))][A_i\sin(p_i n) - B_i\cos(p_i n)],
\end{aligned} \tag{22}$$

где $i = 1,2,\ldots,K$.

8. Решается система уравнений (22). Решением этой системы будет являться КСО сигнала $x(t)$ из набора относительных частот $\{p_n\}$ и набора их параметров (16) для заданного K.

9. Вычисляется среднеквадратическая ошибка по (19) на j – ой итерации, которая будет равна

$$\bar{\delta}_j = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}[x_n - \sum_{k=0}^{K}\bar{A}_k\cos(\bar{p}_k n) + \bar{B}_k\sin(\bar{p}_k n)]^2}\,. \tag{23}$$

10. Сравниваем $\bar{\delta}_j$ с $\bar{\delta}$.

Если $\bar{\delta}_j > \bar{\delta}$, то заданная точность вычислений не достигнута, и значение K следует увеличить, и процесс повторить с шага 5.

Если $\bar{\delta}_j \le \bar{\delta}$, то для некоторого значения K заданная точность достигнута, и перейти на шаг 11.

11. Считать, что спектр КСО сигнала $x(t)$ найден, состоит из $\overline{K}$ гармоник с параметрами из последней найденной группы (16) и обеспечивает на интервале $[0,T]$ представление входного сигнала функцией

$$\overline{y}(t)=\sum_{k=0}^{K}(\overline{A}_k\cos\overline{\omega}_k t+\overline{B}_k\sin\overline{\omega}_k t) \quad (24)$$

с заданной точностью $\overline{\delta}$.

Анализ ошибки приближения δ (23) показывает, что она представляет сложную зависимость от тригонометрических функций и имеет множество локальных минимумов. То есть δ как функция представляет собой «овражно-бугристую» многомерную поверхность, причем, чем ближе друг к другу частоты гармоник в исходном сигнале, тем ближе локальные минимумы к глобальному и тем самым процесс установления оптимального значения $K_{опт}$ числа гармоник спектра КСО. Поэтому для ускорения процесса вычислений необходимо разрабатывать вычислительные спецпроцессоры с распараллеливанием вычислений, которые обеспечивают быструю сходимость алгоритмов для поиска минимума ошибки приближения.

Выводы

1. Предлагается современный подход построения спектра и аппроксимации радиосигналов, ограниченной длительности сверхдлинноволнового диапазона, основанный на понятиях конечного спектра (КСО) и полного спектра (ПСО) отрезка процесса, содержащие ограниченный набор гармоник.
2. Приводится один из вариантов алгоритмов расчета спектра КСО сигнала ограниченной длительности в реальном масштабе времени для практической реализации.
3. Для ускорения быстродействия вычислений многомерной система нелинейных уравнений по определению набора $\{\overline{A}_K,\overline{B}_K,\overline{\omega}_K\}$ совокупностей спектра КСО рекомендуется разработать специализированные процессоры с распараллеливанием вычислений.
4. Способ определения спектра КСО может быть использован в реальном масштабе времени для частотно-временного анализа низкочастотных сигналов: звуковых и гидроакустических сигналов, длинноволновых и сверхдлинноволновых радиосигналов, а также атмосферных и геофизических процессов.

Список использованой литературы

1. Заездный А.М. Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи. – Л.: Энергия, 1971. – 528 с.
2. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М: Физматгиз, 1962.– 236 с.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: «Радио и связь». 1989. – 656 с.
4. Голденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов. – М.: Сов. Радио, 1990. – 256 с.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб: Питер, 2002. – 608 с.
6. Воллернер Н. Ф. Аппаратурный спектральный анализ. – М.: Сов. Радио, 1977. – 208 с.
7. Дмитриев Е. В. Гармонические спектры и аппроксимация коротких сигналов. – Воронеж: ВГУ, 2006. – 73с.
8. Дмитриев Е. В. Гармонические дискретные спектры и аппроксимация коротких процессов, сигналов, функций. Авиакосмическое приборостроение, 2006. – №3.

Стаття надійшла до редакції: 11.10.10.

Сведения об авторах

Бозиев Малик Шутаевич, Открытое акционерное общество «Гранит», г. Макеевка, e-mail: granit@tr.dn.ua