

УДК 621.396.96

А.А. Зори (д-р техн. наук, проф.),
Г.В. Мокрый (канд. техн. наук, доц.), М.Ш. Бозиев
 ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
 кафедра электронной техники
 E-mail: zori@kita.dgtu.edu.ua

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ РАДИОЛИНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Рассматривается оптимизационный метод определения линейчатого спектра конечных реализаций сигнала и его аппроксимирующей функции. Приводится модифицированный алгоритм одного из оптимизационных методов для спектрально-временной обработки произвольного фрагмента сигнала радиолинии из реализации в реальном масштабе времени по определению оптимального спектра с требуемой точностью и за время, не превышающее регламентное время принятия решения по распознаванию объекта радиолиний. Для ускорения быстрогодействия вычислений по определению набора совокупностей спектра КСО рекомендуется разработать специализированные процессоры с распараллеливанием вычислений, либо процессоры цифровой обработки сигналов на базе платформы, имеющие VLIW-инструкции распараллеливания вычислений.

Ключевые слова: сигнал, спектр отрезка, аппроксимирующая функция, оптимизация, алгоритм, реализация, параметры.

Для выбора эффективного метода оптимизации задачи определения спектра КСО [1] исследовались различные методы прямой и косвенной оптимизации, ориентированные на реальные сигналы радиолиний [2]. В качестве целевой функции для оценки оптимальной аппроксимации принятого сигнала радиолинии

$$x(t), \text{ где } t \in [t_0, T + t_0] \quad (1)$$

и аппроксимирующей его функцией

$$y(t) = \sum_{k=0}^K (A_k \cos \omega_k t + B_k \sin \omega_k t), \quad (2)$$

выбрана средне квадратичная форма в виде интеграла

$$J = \frac{1}{T + t_0} \int_{t_0}^{T+t_0} \left[x(t) - \sum_{k=0}^K (A_k \cos \omega_k t + B_k \sin \omega_k t) \right]^2 dt. \quad (3)$$

Целью оптимизации является определение минимального количества K гармоник, не обязательно ортогональных, в сумме образующих внутри временного интервала $[t_0, T + t_0]$ процесс – непрерывный $x(t)$, а также рассчитать значения

$$A_0, (A_1, B_1, \omega_1), \dots, (A_K, B_K, \omega_K) = \{A_k, B_k, \omega_k\} \quad (4)$$

параметров этих гармоник – частоты и амплитуды, при этом поведение процесса вне интервала ничем не должно быть ограничено. Набор (4) будем считать гармоническим спектром короткого процесса, точнее, конечным спектром отрезка (КСО).

Ориентируясь на цифровую обработку [3, 4], сигнал $x(t)$ представим последовательностью из N равноотстоящих отсчетов $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N) = \{x_n\}$, где $t_1 = t_0; t_N = T + t_0$. Учитывая априори, что процесс $x(t)$ не содержит гармоник с частотами большими Ω_{\max} , число отсчетов дискретизованного процесса $\{x_n\}$, будет $N = \lceil T\omega_{\max}/\pi \rceil$, (здесь $\lceil \square \rceil$ – целая часть числа). Произведём замену $n = T/N, t_n = n\Delta t, \omega_k = p_k N/T$, где p_k – относительная частота, $0 \leq p_k \leq \pi$, и из (3) получим

$$J = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x_n - \sum_{k=0}^K A_k \cos(p_k n) - \sum_{k=1}^K B_k \sin(p_k n)]^2. \quad (5)$$

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

- 1) если N кратно 3, то $K_a < N/3$;
- 2) если $N+1$ кратно 3, то $K_a < (N+1)/3$;
- 3) если $N+2$ кратно 3, то $K_a < (N+2)/3$,

и составляется систему из $3K+1$ уравнений линейных относительно амплитуды и нелинейных относительно частот вида:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial J}{\partial A_0} &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x_n - \sum_{k=0}^K (A_k \cos(p_k n) - B_k \sin(p_k n))]; \\ -\frac{\partial J}{\partial A_i} &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x_n - \sum_{k=0}^K (A_k \cos(p_k n) - B_k \sin(p_k n))] \cos(p_i n); \\ -\frac{\partial J}{\partial B_i} &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x_n - \sum_{k=0}^K (A_k \cos(p_k n) - B_k \sin(p_k n))] \sin(p_i n); \\ -\frac{\partial J}{\partial p_i} &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} n [x_n - \sum_{k=0}^K (A_k \cos(p_k n) - B_k \sin(p_k n))] [A_i \sin(p_i n) - B_i \cos(p_i n)], \end{aligned} \quad (7)$$

где $i = 1, 2, \dots, K$.

Необходимым условием существования минимума функционала (5) является равенство нулю всех и его первых производных (7) [5-7], т. е. выполняется решение система из $3K+1$ нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{N-1} \left[x_n - A_0 - \sum_{k=1}^K (A_k \cos(p_k n) + B_k \sin(p_k n)) \right] &= 0; \\ \sum_{n=0}^{N-1} \left[x_n - A_0 - \sum_{k=1}^K (A_k \cos(p_k n) + B_k \sin(p_k n)) \right] \cos(p_i n) &= 0; \\ \sum_{n=0}^{N-1} \left[x_n - A_0 - \sum_{k=1}^K (A_k \cos(p_k n) + B_k \sin(p_k n)) \right] \sin(p_i n) &= 0; \\ \sum_{n=0}^{N-1} n \left[x_n - A_0 - \sum_{k=1}^K (A_k \cos(p_k n) + B_k \sin(p_k n)) \right] [A_i \sin(p_i n) - B_i \cos(p_i n)] &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

в результате которого определяем набор оптимизируемых параметров A_0, A_i, B_i, p_i , где $i = 1, 2, \dots, K$.

Для исследования эффективности такого подхода минимизации функционала (5) проводились исследования в системе моделирования MATLAB+Simulink с использованием

пакетов программ fsolve и lsqcurvefit [8], в котором реализованы различные алгоритмы решения систем нелинейных уравнений и оптимизации для задач большой размерности. Из приведенного анализа различных подходов к минимизации функционала вида (5), как оценки близости принятого сигнала радиолитии к его представлению аппроксимирующей функцией, можно сделать следующие выводы:

1) при отсутствии жестких требований на время решения и допустимой точности по определению оптимизируемых параметров, решать задачу минимизации можно как методом косвенной оптимизации, так и с помощью нелинейной минимизации методом наименьших квадратов;

2) решение данной задачи по определению оптимальных параметров спектра КСО за время, установленное регламентов принятия решений для распознавания объекта радиолитии [2], достигнуто крупномасштабным методом и методом Левенберга-Макуарда. Эти методы имеют достаточно быструю сходимость при выборе начальной точки из широкого спектра сигнатуры сигнала радиолитии;

3) при хорошей сходимости обоих методов крупномасштабный метод имеет быстродействие на 10-12% выше (в зависимости начального приближения стартовой точки) метода Левенберга-Макуарда;

4) быстродействие метода Левенберга-Макуарда можно повысить, адаптируя метод к выбору начального приближения, за счёт модификации поисковых процедур базового алгоритма, приведенного в программном пакете [8];

5) необходимо выполнить формализацию модифицированного метода для разработки общего алгоритма решения данного класса задач по определению спектра КСО методом Левенберга-Макуарда в режиме реального времени.

Модифицированный алгоритм минимизации методом Левенберга-Макуарда для оценки спектра КСО радиолитии

Для реализации алгоритма Левенберга-Макуарда на базовой платформе сигнальных процессоров в процессе цифровой обработки принятого сообщения радиолитии и определения его спектра, рассмотрим детализацию модифицированного алгоритма Левенберга-Макуарда. Таким образом, при аппроксимации сложного сигнала радиолитии $\varphi(t)$, заданного последовательностью N равноотстоящих отсчётов $\{\varphi_i\}$, минимизируется функционал, представленный в квадратичной форме в виде:

$$J(X) = F(X, t)^T F(X, t) = \sum_{i=1}^N F_i^2(X, t), \quad (9)$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор оптимизируемых параметров; $F(X, t)$ – вектор невязок

$$F(X, t) = [y(X, t_1) - \varphi(t_1), y(X, t_2) - \varphi(t_2), \dots, y(X, t_N) - \varphi(t_N)]^T, \quad (10)$$

представляющий собой разность между отсчётами аппроксимирующей функцией $y(X, t)$ и заданной последовательностью отсчётов сигнала $\varphi(t)$ радиолитии. Как видно, функционал (9) в отличие от функционала (5), характеризует не среднюю, а суммарную стоимостную оценку вектора невязок. Аппроксимирующая функция имеет вид

$$y(X, t) = A_0 + \sum_{k=1}^K A_k \cos(\omega_k t) + \sum_{k=1}^K B_k \sin(\omega_k t). \quad (11)$$

Компонентами вектора X оптимизируемых параметров являются амплитуды A_0, A_k, B_k и частоты ω_k , т.е. $X = (A_0, A_1, B_1, \omega_1, A_2, B_2, \omega_2, \dots, A_K, B_K, \omega_K, \dots, A_n, B_n, \omega_n)$. В нашем случае N – число отсчётов функции; $n = 3K+1$ – количество оптимизируемых параметров аппроксимирующей функции.

Якобиан функции $F(X, t)$ имеет вид

$$(J(X))_{ij} = \frac{\partial F_i(X, t)}{\partial x_j}, \quad i = \overline{1, N}; j = \overline{1, n}, \quad (12)$$

а вектор градиента целевой функции $J(X)$

$$G(X) = \frac{\partial J(X)}{\partial X} = 2J(X)^T F(X, t),$$

где

$$\frac{\partial J(X)}{\partial x_j} = 2 \sum_{i=1}^N \frac{\partial F_i(X, t)}{\partial x_j} F_i(X, t), \quad j = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Матрица Гессе $H(X)$ для $J(X)$ определяется через $H(X) = \partial^2 J(X) / \partial X^2$, (j, l) -й элемент которой вычисляется по формуле:

$$\frac{\partial^2 J(X)}{\partial x_j \partial x_l} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial F_i(X, t)}{\partial x_j} \frac{\partial F_i(X, t)}{\partial x_l} + F_i(X, t) \frac{\partial^2 F_i(X, t)}{\partial x_j \partial x_l} \right)$$

и с учётом (13) выразим

$$H(X) = J(X)^T J(X) + Q(X), \quad (14)$$

где $Q(X) = \sum_{i=1}^N F_i(X, t) H_i(X)$, здесь $H_i(X)$ матрицы Гессе для каждой $F_i(X, t)$.

Используя эффективные специальные методы нелинейной оптимизации методом наименьших квадратов такой, как метод Ньютона-Рафсона [9], видим, что он использует как градиент функции $G(x)$, так и Гессиан $H(X)$. Для известного k -го приближения X_k новое приближение находится путём решения системы линейных уравнений

$$H(X_k) h_k = -G(X_k)$$

относительно h_k , тогда новое приближение параметров находится из выражения

$$X_{k+1} = X_k + h_k.$$

Однако, из-за сложности вычисления производных второго порядка реальных сигналов, на практике метод Ньютона-Рафсона реализовать сложно. Кроме того, возрастают вычислительные затраты и при определении вторых производных в $Q(x)$, наблюдаются эффекты, вызванные накоплением ошибок при вычислениях вторых производных, а при попадании в «овражную область» возникает релаксация вокруг локального минимума, приводящая к заикливанию алгоритма. Для повышения надёжности и устойчивости поиска эффективного минимума рекомендуется сформировать такие направления и величину шага при переходе из одной области локального минимума в другую область локального минимума, сканируя их в процессе поиска с запоминанием предыдущих, и последующим выбором среди них наименьшего минимума – миниморумума.

Прежде всего, рекомендуется использовать метод Гаусса-Ньютона, в котором матрица Гессе хорошо аппроксимируется матрицей $H(X) \approx J(X)^T J(X)$ [7], тогда направление спуска h_k определяют из решения системы линейных уравнений

$$J(X_k)^T J(X_k) h_k = -J(X_k)^T F(X_k, t), \quad (15)$$

и новое приближение к оптимальному решению вычисляют по формуле:

$$X_{k+1} = X_k + \alpha_k h_k, \quad (16)$$

а коэффициент α_k определяет величину оптимального шага в направлении спуска h_k и может быть определен в результате одномерной оптимизации

$$\alpha_o = \arg \min_{\alpha > 0} \{J(X + \alpha h)\}.$$

Такая операция называется линейным поиском и может быть выполнена различными алгоритмами одномерного поиска [7, 10]. При некоторых условиях алгоритм Гаусса-Ньютона даёт квадратичную сходимость, несмотря на то, что не используется информация о вторых производных функции. Проблемы со сходимостью возникают, если начальное приближение выбрано относительно далеко от оптимального значения. Для преодоления

этих трудностей использован метод Левенберга-Маркуарда [9], согласно которому направление поиска h_k находится при решении системы алгебраических уравнений:

$$(J(X_k)^T J(X_k) + \lambda_k I)h_k = -J(X_k)^T F(X_k, t), \quad (17)$$

где λ_k – скаляр, который задаёт и направление параметра h_k ; I – единичная матрица размера $n \times n$. В процессе моделирования установлено, что в зависимости от значения параметра λ проявляются следующие эффекты:

1) если для всех $\lambda > 0$ матрица коэффициентов положительно определена, то h_k – это направление спуска;

2) для больших значений λ вычисление h_k , $h_k \approx -\frac{1}{\lambda} G(x_k)$, соответствует направлению наискорейшего спуска, что обеспечивает быструю сходимость, когда текущая итерация находится далеко от оптимального решения;

3) если λ очень маленькая величина, то направление поиска совпадает с направлением поиска метода Гаусса-Ньютона, что является хорошим шагом на конечном этапе итераций. Если оптимизируемые параметры будут близки к оптимальным значениям, мы будем иметь квадратичную сходимость в конце итерационного процесса.

Таким образом, с помощью параметра λ можно управлять вычислительным процессом. Основная сложность в реализации алгоритма Левенберга-Маркуарда заключалась в стратегии изменения параметра λ на каждой итерации. В процессе моделирования рекомендовано для определения λ использовать подход, реализованный в пакете программ nlsq [8]. Принятый в данном методе подход реализации заключается в оценке относительной нелинейности функции $J(X)$ на основе применения линейно прогнозируемых сумм квадратов $J_p(X_k)$ и кубически интерполируемой оценки минимума для $J_k(X^*)$.

Линейно прогнозируемые суммы квадратов $J_k^p = \sum_{i=1}^m (F_k^p)_i^2$ рассчитываются для функции $F_k^p = F_{k-1} + J_{k-1} h_{k-1}$, а член $J_k(X^*)$ определяется из кубической интерполяции точек $J_k(X)$ и $J_{k-1}(X)$. Из данной интерполяции так же рассчитывается параметр длины шага α^* , представляющий собой оценку шага по направлению к минимуму. Если J_k^p будет больше, чем $J_k(X^*)$, то λ снижается, в противном случае – увеличивается. Разница между значениями J_k^p и $J_k(X^*)$ представляет собой меру эффективности метода Гаусса-Ньютона и степени линейности задачи. Далее, после корректировки λ , определяется новое направление поиска h_k . Затем в направлении h_k длина шага принимается равной единицы и выполняется процедура линейного поиска. Процедура линейного поиска обеспечивает выполнение условия $J_k < J_{k-1}$ для каждой основной итерации, и данный метод становится методом спуска. Такой подход дает возможность определять величину λ_k на каждом шаге итераций, в том числе и в «овражных областях», исключая заикливание в локальных минимумах.

Исследование разработанного алгоритма для оценки спектра КСО радиолиний использовался реальный сигнал радиолинии [2], записанный в wav-файл, которые могут обрабатываться инструментальными средствами системы MATLAB+Simulink. Для выделения интересующего интервала сигнала использовалась графическая среда SPTool, позволяющая просматривать графики сигналов в различных масштабах в зависимости от времени или номеров отсчёта. Последнее важно для определения интервала отсчётов сигнала, которое будет использоваться при оценке параметров спектра. Так как среда SPTool работает с mat-файлами сигналов, которые являются бинарными и представлены во внутреннем формате MATLAB. Поэтому для работы в графической среде SPTool необходимо преобразовать сигнал в формате wav-файла в формат mat-файла. Задача решалась на ПК с процессором Intel Celeron 853 МГц, 384 МБ ОЗУ; операционная система Windows XP.

Результаты моделирования представлены на рис.1, где исходный, подвергаемый обработке, сигнал представлен фрагментом сигнала, произвольно вырезанный из реализации в виде выборки в диапазоне от 55250 до 55357 отсчётов (сплошная линия), и аппроксимирующая функция (крестики); в таблице 1 приведены расчётные оптимизируемые параметры, а в таблице 2 – характеристики алгоритма.

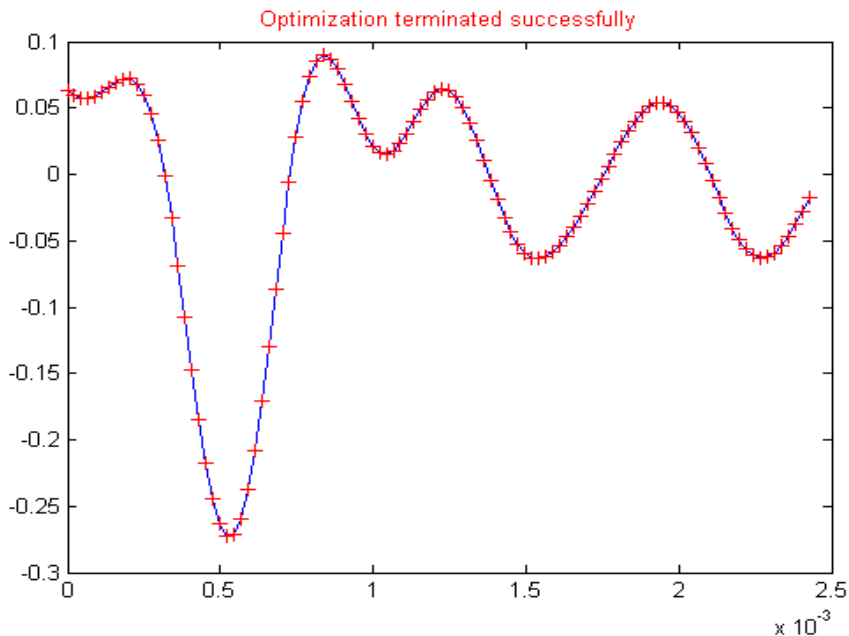


Рисунок 1 – Графики исходного сигнала и аппроксимирующего методом Левенберга-Макуарда параметры сигнала

Таблица 1

Оптимизируемые параметры		
$A_0 = -0,0126$		
$A_1 = 0,0065$	$B_1 = -0,0132$	$p_1 = 0,3463$
$A_2 = -0,0173$	$B_2 = -0,0276$	$p_2 = 0,3026$
$A_3 = 0,0004$	$B_3 = -0,0362$	$p_3 = 0,0690$
$A_4 = 0,0682$	$B_4 = -0,0017$	$p_4 = 0,1263$
$A_5 = -0,0400$	$B_5 = 0,0310$	$p_5 = 0,2474$
$A_6 = 0,0578$	$B_6 = 0,0259$	$p_6 = 0,1635$

Таблица 2

Характеристики алгоритма			
Количества расчётов функции	Количество итераций	Ошибка $\bar{\delta}$	Время решения, сек
5206	225	$4,4511 \cdot 10^{-5}$	1,7661

Как видно из результатов моделирования, сходимость алгоритма при минимизации модифицированным методом Левенберга-Марквардта для обработки произвольно вырезанных из реализации интервалов сигнала и определения оптимального числа гармоник спектра КСО осуществляется за большое количество итераций и, следовательно, время решения оказывается большим. Несмотря на то, что время решения не превышает время принятия решения, это всё же та плата за достижение линейчатого спектра и безопасности сообщений радиотрасс, которая облегчает задачу распознавания объекта радиотрасс по сигнатуре принятого или обнаруженного сигнала. Повысить скорость реализации алгоритма можно за счёт распараллеливания вычислительных процессов на каждом шаге итераций и перехода на новую элементную базу – сигнальные цифровые процессоры [11-13].

Выводы

1. Задача определения линейчатого спектра КСО сложных сигналов радиолиний и его аппроксимирующей функции может быть решена оптимизационными методами как косвенной, так и нелинейной оптимизации.

2. Моделированием в системе MATLAB+Simulink среди всех доступных оптимизационных методов установлен наиболее подходящий метод Левенберга-Марквардта, обеспечивающий хорошую сходимость по определению оптимального количества гармоник спектра КСО.

3. Метод Левенберга-Марквардта модифицирован для спектрально-временной обработке любого фрагмента сигнала из реализации радиолинии в реальном масштабе времени по определению оптимального спектра КСО с требуемой точностью и за время, не превышающее регламентное время принятия решения по распознаванию объекта радиолиний по сигнатуре принятого или обнаруженного сигнала.

4. Анализ характеристик разработанного по определению оптимального спектра КСО и аппроксимирующей функции обрабатываемого сигнала в реальном масштабе времени показывает, что повышение быстродействия алгоритма может быть достигнуто за счёт распараллеливания вычислительных операций.

5. Для реализации алгоритма по определению совокупности параметров специального спектра КСО рекомендуется разработать специализированные процессоры с распараллеливанием вычислений, либо использовать процессоры цифровой обработки сигналов на базе платформы, имеющей VLIW-инструкции распараллеливания вычислений.

Список использованной литературы

1. Бозиев М.Ш. Спектральный анализ коротких сообщений радиолиний / М.Ш. Бозиев // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. - №2. - С. 79-84.
2. Изделие Р-749У. Пояснительная записка к сравнительной характеристике существующего изделия к модернизированному. – Служебная информация специализированного предприятия «Гранит».
3. Голденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов / Л.М. Голденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. – М.: Сов. Радио, 1990.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб: Питер, 2002. – 608 с.
5. Аттетков А.В. Методы оптимизации: уч. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – [2-е изд.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.
6. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: практическое руководство / пер. с англ. Т. Шуп. – М.: Мир, 1982. – 238 с.
7. Химмельблаум Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблаум. – М: Изд-во «МИР», 1975. – 534 с.
8. Optimization Toolbox™ 4 User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>.
9. Madsen K. Methods for nonlinear least squares problems / K. Madsen, N.B. Nielsen, and O. Tingleff // Technical Report. Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, 2004.
10. Уайлд Д. Дж. Методы поиска экстремума / Д. Дж. Уайлд. – М.: Наука, 1967. – 268 с.
11. Шпаковский Г. И. Программирование для многопроцессорных систем в стандарте MPI / Г.И. Шпаковский, Н.В. Серикова. – Минск: БГУ, 2002. – 323 с.
12. Охрименко В. Особенности архитектуры сигнальных процессоров / В. Охрименко // Электронные компоненты и системы. - 2001. - № 8. - С. 3-11.
13. Чернов В. Процессоры цифровой обработки сигналов компании Texas Instruments. / В. Чернов // Компоненты и Технологии. – 2005. - №6. – С. 128-133.

Надійшла до редакції:
26.04.2013

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

А.А. Зорі, Г.В. Мокрий, М.Ш. Бозієв

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Оптимізаційний алгоритм обробки сигналів радіоліній у реальному часі. Розглядається оптимізаційний метод визначення лінійчатого спектру кінцевих реалізацій сигналу і його апроксимуючої функції. Приводиться модифікований алгоритм одного з оптимізаційних методів для спектрально-тимчасової обробки довільного фрагмента сигналу з реалізації радіолінії в реальному масштабі часу за визначенням оптимального спектру з необхідною точністю і за час, що не перевищує регламентний час ухвалення рішення по розпізнаванню об'єкту радіолінії. Для прискорення швидкодії обчислень за визначенням набору сукупностей спектру КСО рекомендується розробити спеціалізовані процесори з розпаралелюванням обчислень, або процесори цифрової обробки сигналів на базі платформи, що мають VLIW-інструкції розпаралелювання обчислень.

Ключові слова: сигнал, спектр відрізка, апроксимуюча функція, оптимізація, алгоритм, реалізація, параметри.

A.A. Zori, G.V. Mokryy, M.Sh. Boziev

Donetsk National Technical University

The Optimization Algorithm for Signal Processing of Radio Links in Real Time. The paper considers the problem of line spectrum determination of the complex signals of radio and its approximation function, which is solved by using optimization methods as indirect and nonlinear optimization. When a complex radio signal $\varphi(t)$ is approximated, defined by sequence of N equally spaced samples $\{\varphi_i\}$, as the objective function to evaluate the optimal approximation of the received radio signal and its approximating function $y(X, t)$ we chose mean square form in the form of the total cost of residuals vector estimate, which is the difference between the readings of the approximating function $y(X, t)$ and a given sequence of signal samples $\varphi(t)$ of the link. The purpose of optimization is to determine the minimum number of harmonics, not necessarily orthogonal, forming a continuous process of $\varphi(t)$ inside the time interval. The components of the vector of parameters to be optimized $X=(A_0, A_1, B_1, \omega_1, A_2, B_2, \omega_2, \dots, A_K, B_K, \omega_K, \dots, A_n, B_n, \omega_n)$ is the amplitude A_0, A_K, B_K and frequency ω_K , and $n = 3K + 1$ is the number of optimized parameters of the approximating function. To achieve the minimum of the functional the optimization problem is solved, including the $3K + 1$ nonlinear equations.

To investigate the effectiveness of minimizing the functional, oriented to the real signals of radio, modeling was done in MATLAB + Simulink, which implements a variety of algorithms for solving systems of nonlinear equations and optimization for large-scale tasks. Among all the available optimization methods the most appropriate method is Levenberg-Marquardt algorithm, which provides a good convergence to determine the optimal number of harmonics spectrum. The Levenberg-Marquardt algorithm is modified spectral time processing of any fragment of the radio signal in real time to determine the optimal spectrum with the required accuracy and time, not exceeding the time of the decision for recognizing an object by radio link or the received signature of the detected signal.

Keywords: signal, spectrum of segment, approximating function, optimization, algorithm, realization, parameters.