I.РАДІОЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.38

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В ДИНАМИКЕ

А.И.Вершина, А.Г.Маркин

Рассматриваются пути повышения эффективности определения функций чувствительности при моделировании радиоэлектронных схем в динамике при значительном количестве варьируемых параметров. Получены формулы, позволяющие решать эту задачу.

Розглядаються шляхи підвищення ефективності визначення функції чутливості при моделюванні радіоелектронних схем у динаміці при значній кількості варіативних параметрів. Отримано формули, що дозволяють вирішувати цю задачу.

Presented are the ways for increasing the efficiency of determining functions of sensitivity while semi-lating radio-electronic networks in dynamics for many variables parameters. Obtained formulas the solution of this problem.

ВВЕДЕНИЕ

Определение функций чувствительности в динамике, под которыми понимаются значения изменяющихся во времени частных производных выходных переменных по параметрам элементов, представляет собой довольно трудоемкую задачу, связанную с многократным интегрированием систем нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Необходимость нахождения функций чувствительности связана с решением задач оптимизации, надежности, допусков и т.д.. Это определяет актуальность нахождения методов повышения эффективности определения функций чувствительности для динамических процессов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Радиоэлектронная схема описывается системой нелинейных алгебро-дифференциальных уравнений

$$F(\dot{x}, x, p) = 0, \qquad (1)$$

где x и $\dot{x}$ - вектор-столбец неизвестных переменных и их производных по времени; p - параметры элементов радиоэлектронной схемы.

Производная по параметрам запишется следующим образом:

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{x}}\frac{\partial}{\partial p}\dot{x} + \frac{\partial F}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial F}{\partial p} = 0. \qquad (2)$$

Представим производную $\frac{\partial}{\partial p}\dot{x}$ в виде

$$\frac{\partial}{\partial p}\dot{x} = \frac{\partial}{\partial p}\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial x}{\partial p}\right), \qquad (3)$$

отсюда, переходя к конечным приращениям, можно записать

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial x}{\partial p}\right) \approx \frac{\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} - \frac{\partial x_i}{\partial p}}{\Delta t} = \frac{1}{h}\left(\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} - \frac{\partial x_i}{\partial p}\right), \qquad (4)$$

где $h = \Delta t$.

После подстановки в выражение (2) получим

$$\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\left(\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} - \frac{\partial x_i}{\partial p}\right) + \frac{\partial F_i}{\partial x}\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} + \frac{\partial F_i}{\partial p} = 0 \qquad (5)$$

или

$$\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} - \frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_i}{\partial p} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} + \frac{\partial F_i}{\partial p} = 0. \qquad (6)$$

Отсюда

$$\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} = \frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_i}{\partial p} - \frac{\partial F_i}{\partial p}; \qquad (7)$$

$$\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} = \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_i}{\partial p} - \frac{\partial F_i}{\partial p}\right). \qquad (8)$$

Данное выражение представляет собой неявный одношаговый метод интегрирования для определения функций чувствительности.

Ограничим набор выходных переменных элементами вектора x и рассмотрим эффективность алгоритмов вычислений в зависимости от количества выходных переменных и варьируемых параметров.

Для одного варьируемого параметра организация процесса вычисления функций чувствительности по всем

выходным переменным не представляет особых трудностей и осуществляется одновременно с процессом интегрирования в динамике. При этом используется разложение матрицы $\frac{1}{h_i}\frac{\partial F}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F}{\partial x}$ на треугольные, получаемое на последней итерации Ньютона, и трудоемкость расчета по одному варьируемому параметру определяется прямым и обратным ходом решения систем линейных алгебраических уравнений. Такому подходу соответствует метод моделей чувствительности [1-3].

При росте числа варьируемых параметров объем вычислений растет пропорционально их количеству.

Представим выражение (8) в развернутом виде

$$\begin{aligned}
\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} &= \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_i}{\partial p}-\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p}= \\
&= -\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p}+ \\
&+\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\left(\frac{1}{h_{i-1}}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_{i-1}}{\partial x}\right)^{-1}\times \\
&\times\left(\frac{1}{h_{i-1}}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_{i-1}}{\partial p}-\frac{\partial F_{i-1}}{\partial p}\right)= \\
&= -\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p}- \\
&-\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\left(\frac{1}{h_{i-1}}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_{i-1}}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial p}- \\
&-\ldots-\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\times\ldots\times \\
&\times\frac{1}{h_1}\frac{\partial F_1}{\partial \dot{x}}\left(\frac{\partial F_0}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_0}{\partial p}. \qquad (9)
\end{aligned}$$

Это выражение можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} &= \\
&= -\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\left(\frac{\partial F_i}{\partial p}-\right. \\
&-\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\left(\frac{1}{h_{i-1}}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_{i-1}}{\partial x}\right)^{-1}\left(\frac{\partial F_{i-1}}{\partial p}-\right. \qquad (10) \\
&\left.\left.-\frac{1}{h_{i-1}}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial \dot{x}}\left(\frac{\partial F_{i-1}}{\partial p}-\ldots-\frac{1}{h_1}\frac{\partial F_1}{\partial \dot{x}}\left(\left(\frac{\partial F_0}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_0}{\partial p}\right)\ldots\right)\right)\right).
\end{aligned}$$

Отсюда видно, что для определение функции чувствительности одной выходной переменной по всем варьируемым параметрам процесс вычислений может быть организован следующим образом:

- находится строка обратной матрицы $\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}$, которая соответствует выходной переменной;

- производные $\frac{\partial F_i}{\partial p}$ умножаются на соответствующие элементы этой строки и запоминаются в векторе формирований функций чувствительности;

- строка обратной матрицы умножается на матрицу $\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}$;

- полученная после умножения строка умножается на матрицу $\left(\frac{1}{h_{i-1}}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial \dot{x}}+\frac{\partial F_{i-1}}{\partial x}\right)^{-1}$ и т.д.

Такой подход соответствует определению функций чувствительности методом присоединенных схем, которому, как это было отмечено в [3], присущи значительные вычислительные затраты, так как для определения функций чувствительности в момент $t = t_i$, необходимо производить расчеты в обратном масштабе времени для каждой интересующей нас временной точки. Несмотря на это, для практики более предпочтительно эффективно определять функцию чувствительности по всем варьируемым параметрам сразу.

На основании изложенного, поиск путей повышения эффективности методов определения функций чувствительности по многим варьируемым параметрам является актуальной задачей при исследовании динамических процессов в радиоэлектронных схемах.

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

1. Рассмотрим случай, когда исследуемая схема содержит только реактивные элементы. Ему соответствует нулевое значение $\frac{\partial F}{\partial x}$ и выражение (2) может быть записано следующим образом:

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{x}}\frac{\partial}{\partial p}\dot{x}+\frac{\partial F}{\partial p}=0, \qquad (11)$$

отсюда с учетом (4) и (8) получим

$$\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p}=\frac{\partial x_i}{\partial p}-\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p}, \qquad (12)$$

так как

$$\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}=E, \qquad (13)$$

где E - единичная матрица.

Выражение (12) показывает, что для схемы, представленной только реактивными элементами, определение функции чувствительности по всем варьируемым параметрам не представляет сложности, так как функции чувствительности можно определять в процессе получения значений выходных переменных в очередной временной точке. При этом, в соответствии с интересующими нас выходными переменными, определяются нужные строки обратной матрицы $\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\right)^{-1}$.

2. Для радиоэлектронной схемы, в которой нет реактивных элементов, формула для определения функций чувствительности совпадает с выражением, используемым для статических режимов:

$$\frac{\partial x}{\partial p} = \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F}{\partial p}. \qquad (14)$$

В динамике, однако, присутствует время как независимый параметр.

Целесообразность применения того или иного метода определения функции чувствительности для этого случая подробно рассмотрены в работе [4].

3. Трудоемкость вычислений функций чувствительности по всем варьируемым параметрам с использованием выражения (10) представляет значительные трудности.

Рассмотрим возможность упрощения вычислений.

Из выражения (8) можно записать

$$\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} = \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_i}{\partial p} - \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p}. \qquad (15)$$

Первое слагаемое может рассматриваться как составляющая функции чувствительности, зависящая от функций чувствительности предыдущих шагов, а второе - составляющая функции чувствительности, определяемая текущим шагом.

В отличие от схемы, которая содержит только реактивные элементы и первая составляющая у которой представлена функцией чувствительности предыдущего шага одной независимой переменной, для общего случая первая составляющая зависит от функций чувствительности всех независимых переменных. Это и создает трудности вычислений по всем варьируемым параметрам, так как отсутствует возможность ограничиваться определением только части выходных переменных.

Преобразуем (15) следующим образом:

$$\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} = \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_i}{\partial p} - \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p} =$$

$$= \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\left[\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right) - \frac{\partial F_i}{\partial x}\right]\frac{\partial x_i}{\partial p} -$$

$$-\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p} =$$

$$= \frac{\partial x_i}{\partial p} - \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial x}\frac{\partial x_i}{\partial p} - \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p}. \qquad (16)$$

Если выполняется условие

$$\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial x}\frac{\partial x_i}{\partial p} \ll \frac{\partial x_i}{\partial p}, \qquad (17)$$

то при расчетах можно использовать выражение

$$\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} \approx \frac{\partial x_i}{\partial p} - \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p}. \qquad (18)$$

4. Во многих случаях вполне приемлемой является оценка значений функций чувствительности с точностью до 20-50%, а иногда достаточно знать только порядок этой величины. Это делает обоснованным поиск приближенных выражений для вычисления функций чувствительности по многим варьируемым параметрам.

Естественно предположить, что наибольший вклад в значение первой составляющей функции чувствительности в момент времени $t = t_{i+1}$ вносит составляющая функции чувствительности предыдущего шага в момент времени $t = t_i$.

Пренебрежем влиянием $\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p}$, тогда выражение (9) для функции чувствительности будет иметь вид

$$\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} \approx -\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p} -$$

$$-\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\left(\frac{1}{h_{i-1}}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_{i-1}}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial p}. \qquad (19)$$

Хотя оценка погрешности использования данного выражения и условия, при которых результат не будет превышать заданной погрешности, в данном случае не рассматривается, такой подход может дать определенный эффект. Однако для использования этой формулы необходимо сохранить результаты предыдущего шага, включающие в себя производные $\frac{\partial F_{i-1}}{\partial p}$ и разложение матрицы схемы предыдущего шага $\frac{1}{h_{i-1}}\frac{\partial F_{i-1}}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_{i-1}}{\partial x}$ на треугольные, что не совсем удобно.

5. По-видимому, для некоторых радиоэлектронных схем влияние предыдущих шагов может быть незначительным и тогда выражение (18) можно ограничить

только вторым слагаемым:

$$\frac{\partial x_{i+1}}{\partial p} \approx -\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p}. \qquad (20)$$

6. Рассмотрим произведения $\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\frac{\partial x_i}{\partial p}$ и $\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial p}$, представляющие собой составляющие функции чувствительности, зависящие от предыдущих шагов и определяемые только текущим шагом. При определении значений функции чувствительности одной выходной переменной по всем параметрам сначала найдем соответствующую строку обратной матрицы $\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}$. В первом случае нужно умножить ее на матрицу $\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}$, а затем на матрицу $\frac{\partial x_i}{\partial p}$, а во втором - на матрицу $\frac{\partial F_i}{\partial p}$. Строка обратной матрицы в общем случае содержит почти все ненулевые элементы и в то же время матрица $\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}$ в зависимости от количества и схемы включения реактивных элементов может иметь большое число нулевых столбцов. В результате произведение будет представлять собой матрицу строку, у которой множество нулевых элементов. Произведение этой строки на матрицу $\frac{\partial x_i}{\partial p}$ позволяет сделать вывод о зависимости функции чувствительности интересующей нас выходной переменной от функций чувствительности только некоторых независимых переменных, которым соответствуют ненулевые значения. Если количество ненулевых элементов незначительно, то можно в дополнение к интересующей нас выходной переменной находить функции чувствительности только соответствующих независимых переменных и этим существенно повысить эффективность расчетов без упрощения алгоритма.

В случае, если искомая выходная переменная совпадает с ненулевой переменной, расчет также не требует дополнительных затрат и трудоемкость сравнима с применением метода моделей.

7. Упрощение алгоритма можно производить тогда, когда мы игнорируем переменными в связи с малыми их значениями. Оценка этих значение требует дополнительных исследований, однако как показывают расчеты на этот процесс можно влиять выбором шага интегрирования

Представляет интерес случай, когда получаемая строка не содержит ни одного нулевого элемента. Это бывает тогда, когда, например, каждый узел исследуемой схемы содержит реактивный элемент. В принципе, все схемы можно рассматривать с этих позиций. Тогда выбор шага позволяет сделать реактивную составляющую сколь угодно большой. В результате мы будем иметь дело с формулой (18).

Действительно, рассмотрим выражение

$$R = \left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}, \qquad (21)$$

для которого можно записать

$$\left(\frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F_i}{\partial x}\right)\cdot R = \frac{1}{h_i}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}. \qquad (22)$$

Умножим правую и левую часть на h_i:

$$\left(\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + h_i\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)\cdot R = \frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}, \qquad (23)$$

откуда

$$R = \left(\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} + h_i\frac{\partial F_i}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}. \qquad (24)$$

Перейдем к пределу, при $h_i \to 0$:

$$\lim_{h_i \to 0} R = \left(\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\right)^{-1}\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}} = E. \qquad (25)$$

После подстановки в (15) получим (18). Естественно, необходимо, чтобы существовала обратная матрица $\left(\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}}\right)^{-1}$.

8. По-видимому, в общем случае, имеет смысл разбиения задачи определения функций чувствительности на подзадачи, одна из которых позволяет получать приемлемый результат с использованием выражения (18), вторая даст удовлетворительный результат по формуле (20), а для оставшихся функций чувствительности использовать метод моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отмечена актуальность поиска методов определения функций чувствительности по многим варьируемым параметрам при исследовании динамических процессов в радиоэлектронных схемах. Получены выражения (12,14, 18,20), которые могут быть использованы при решении

данной задачи, избежав интегрирования в обратном масштабе времени, которое присуще методу присоединенных схем, и в то же время определять за один дополнительный просчет функцию чувствительности одной выходной переменной по всем варьируемым параметрам.

ВЫВОДЫ

Поиск путей определения функций чувствительность по многим параметрам в динамических режимах в общем случае представляет собой трудоемкую задачу. Однако учет особенностей исследуемых радиоэлектронных схем (схемы, содержащие только реактивные элементы, либо схемы, в которых реактивные элементы отсутствуют) может в некоторых случаях существенно снизить затраты и сделать сравнимыми с расчетами в статических режимах (12, 14, 18, 20).

Так как во многих случаях требования к погрешности определения значений функций чувствительности довольно низки, то может быть использована приближенная формула (19), полученная из предположения, что основной вклад в значение функции чувствительности вносит ближайшая временная точка.

В общем случае, целесообразно поставить задачу разбиения функций чувствительности на подмножества, элементы которых целесообразно рассчитывать по одному из приведенных выражений и только некоторые из функций чувствительности определять методом моделей.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. *Петренко А.И.* Основы автоматизации проектирования. - К.: Техніка, 1982. - 295 с.
2. *Петренко А.И., Семенков О.И.* Основы построения систем автоматизированного проектирования - К.: Вища школа. Головное изд-во, 1984. - 296 с.
3. *Петренко А.И., Власов А.И., Тимченко А.П.* Табличные методы моделирования электронных схем на ЭЦВМ - К.: Вища школа, 1977. - 192 с.
4. *Вершина А.И., Кузьмина Л.В.* Определение функций чувствительности в статике// "Радіоелектроніка, інформатика, управління". - Запоріжжя: ЗДТУ. - 2000. - №1. - с.9-12.

УДК 621.391.26

ВЕСОВЫЕ ФУНКЦИИ ДЛЯ МАЛОТОЧЕЧНЫХ ДПФ В СИСТЕМАХ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Ю.Л.Мейстер, Д.М.Пиза

Проанализированы характеристики фильтров радиолокационных сигналов, построенных на основе малоточечных ДПФ, при взвешивании временной выборки некоторыми известными "классическими" функциями окон. Выявлена неэффективность этих функций при малоточечных ДПФ. Показано, что специально сконструированные функции окон для малоточечных ДПФ обладают значительно лучшими характеристиками.

Проаналізовано характеристики фільтрів радіолокаційних сигналів, побудованих на основі малоточкових ДПФ, за зважування часової вибірки деякими відомими "класичними" функціями вікон. Виявлено неефективність цих функцій для малоточкових ДПФ. Показано, що спеціально сконструйовані функції вікон для малоточкових ДПФ мають значно кращі характеристики.

The radar signals filters characteristics built on the basis of the small-numbered DFTs have been analized when weighing a temporal sample by some known "classic" functions of windows. There has been revealed an ineffectiveness of these functions with the small-numbered point DFTs. It's shown that the small-numbered point DFTs possess considerably better characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимальная процедура обработки радиолокационных сигналов включает в себя определение корреляционного интеграла [1], т.е. вычисление взаимокорреляционной функции между принятой смесью полезного сигнала и помех и "портретом" (образом) излученного сигнала. Причем в силу неизвестности параметров сигнала обработка проводится для каждого элемента дальности (эквивалентно скользящему стробированию приемника) в каждом из набора доплеровских фильтров.

Вычислитель корреляционного интеграла для одиночного радиоимпульса, при аналогово-цифровом преобразовании на радио- или промежуточной частоте, формирующий одновременно и квадратурные составляющие сигнала, рассмотрен в [2]. Для оптимальной обработки последовательно с ним должен быть включен когерентный накопитель пачечного сигнала, как показано на рисунке 1, где S и C - квадратурные составляющие сигнала. Штриховой линией показан фильтр сжатия, входящий в состав оптимального приемника в случае применения сложных сигналов с внутриимпульсной модуляцией.

В связи с неизвестностью фазового сдвига, когерентный накопитель пачечного сигнала строится в виде набора фильтров, перекрывающих диапазон межпериодных фазовых сдвигов (доплеровских частот). Набор доплеровских фильтров может быть реализован на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) как, например, в [3].