

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2478213

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (ФГБОУ ВПО "СПбГПУ") (RU)*

Автор(ы): *Тутыгин Владимир Семёнович (RU)*

Заявка № 2011118449

Приоритет изобретения **17 октября 2011 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 марта 2013 г.**

Срок действия патента истекает **17 октября 2031 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов





**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ(21)(22) Заявка: **2011118449/28**, 17.10.2011(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.10.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **17.10.2011**(45) Опубликовано: **27.03.2013** Бюл. № 9(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **SU 1352390 A1**, 15.11.1987. **SU 1619191 A1**, 07.01.1991. **UA 51214 A1**, 15.11.2002. **RU 2017162 C1**, 30.07.1994. **US 5995914 A1**, 30.11.1999. **US 7369961 B2**, 06.05.2008. **DE 10113786 A1**, 24.10.2002.

Адрес для переписки:

**195251, Санкт-Петербург, ул.
Политехническая, 29, ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (ФГБОУ ВПО "СПбГПУ"), отдел интеллектуальной и промышленной собственности**

(72) Автор(ы):

Тутыгин Владимир Семёнович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (ФГБОУ ВПО "СПбГПУ") (RU)

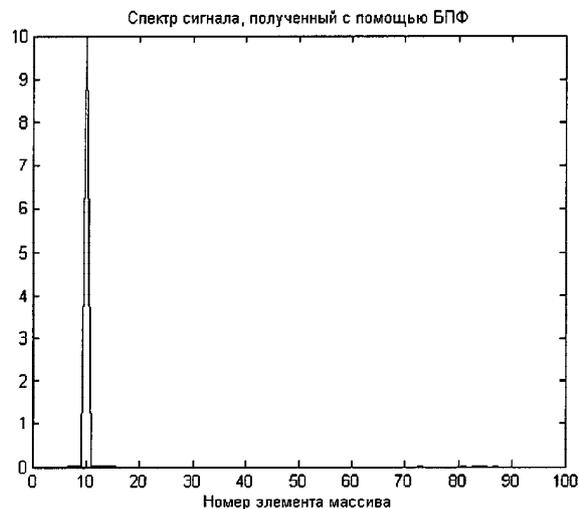
(54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано в спектрометрии. Способ измерения частоты сигнала предполагает прием сигнала с последующим аналого-цифровым преобразованием, выполнение быстрого преобразования Фурье, преобразование числового массива во временной области в числовой массив в частотной области, определение номера j_{\max} элемента числового массива, соответствующего максимальной амплитуде сигнала в частотной области, определяющего приближенное значение количества периодов сигнала в интервале наблюдения, создание $2k+1$ эталонных сигналов во временной области, по форме соответствующих исходному массиву во временной области, количество периодов которых смещают по отношению к количеству

периодов исходного сигнала на $j_{\max}*(s/k-1)*b$, где $s=0, 1, 2, \dots, 2k$, где коэффициент b определяет размер окрестности, $b=0 \dots 1$ вблизи приближенного количества периодов сигнала j_{\max} в интервале наблюдения, вычисление коэффициентов корреляции $2k+1$ эталонных сигналов с исходным, аппроксимацию зависимости коэффициентов корреляции $2k+1$ эталонных сигналов с исходным сигналом от номера m в частотной области $KK[m]$, где $m=j_{\max}+j_{\max}*(s/k-1)*b$, передискретизацию на основе найденной аппроксимирующей зависимости с увеличением количества элементов массива в R раз, т.е. формирование массива $KK1[m_1]$, где $m_1=j_{\max}+j_{\max}*(s_1/(k*R)-1)*b$, $s_1=0, 1, \dots, 2k*R$, R - коэффициент передискретизации больше 1, нахождение элемента $m_{1\max}$ числового массива, соответствующего максимальному значению коэффициента корреляции $KK1$. Значение

$m_{1\max}$ принимают за уточненное значение количества периодов исходного сигнала вместо j_{\max} . Повторяют далее все предыдущие операции обработки сигнала, уменьшая каждый раз величину b , определяющую размер окрестности вблизи найденного количества периодов сигнала в интервале наблюдения. После достижения требуемой точности приближения оценки положения центра отраженного сигнала вычисляют значение частоты $f = m_{1\max} / (N \cdot dt)$. Техническим результатом заявленного изобретения является повышение точности измерений. 5 ил.



Фиг. 1

RU 2 4 7 8 2 1 3 C 2

RU 2 4 7 8 2 1 3 C 2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION(21)(22) Application: **2011118449/28, 17.10.2011**(24) Effective date for property rights:
17.10.2011

Priority:

(22) Date of filing: **17.10.2011**(45) Date of publication: **27.03.2013 Bull. 9**

Mail address:

**195251, Sankt-Peterburg, ul. Politehnicheskaja,
29, FGBOU VPO "Sankt-Peterburgskij
gosudarstvennyj politehnicheskij universitet"
(FGBOU VPO "SPbGPU"), otdel intellektual'noj i
promyshlennoj sobstvennosti**

(72) Inventor(s):

Tutygin Vladimir Semenovich (RU)

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovaniya "Sankt-
Peterburgskij gosudarstvennyj politehnicheskij
universitet" (FGBOU VPO "SPbGPU") (RU)**

(54) SIGNAL FREQUENCY MEASUREMENT METHOD

(57) Abstract:

FIELD: measurement equipment.

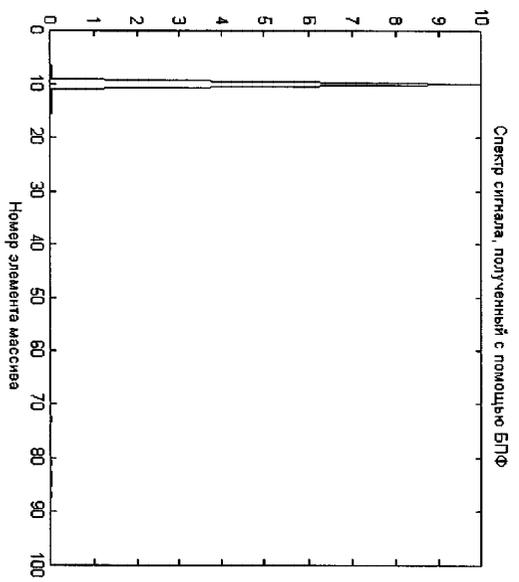
SUBSTANCE: signal frequency measurement method involves signal reception with further analogue-to-digital conversion, quick Fourier transformation, transformation of numerical massif in time area to numerical massif in frequency area, determination of j_{max} number of numerical massif element, which corresponds to maximum signal amplitude in frequency area, determines approximate value of the quantity of signal periods at observation interval, creation of $2k+1$ reference signals in time area, which correspond as to the shape to initial massif in time area, the quantity of periods of which are offset in relation to the quantity of initial signal periods by $j_{max} \cdot (s/k-1) \cdot b$, where $s=0,1,2, \dots, 2k$, where coefficient b determines the neighbourhood size, $b=0 \dots 1$ near approximate quantity of signal periods j_{max} at observation interval, calculation of correlation coefficients $2k+1$ of reference signals with initial one, approximation of ratio of correlation coefficients $2k+1$ of reference signals and initial signal from number

m in frequency area $KK[m]$, where $m=j_{max}+j_{max} \cdot (s/k-1) \cdot b$, oversampling based on the determined approximating dependence with increase in the quantity of massif elements by R times, i.e. formation of massif $KK1[m_1]$, where $m_1=j_{max}+j_{max} \cdot (s_1/(k \cdot R)-1) \cdot b$, $s_1=0,1, \dots, 2k \cdot R$, R - oversampling coefficient of more than 1, determination of element m_{1max} of numerical massif, which corresponds to maximum value of correlation coefficient $KK1$. Value m_{1max} is accepted as a specified value of the quantity of reference signal periods instead of j_{max} . Then, all the previous signal processing operations are repeated, thus decreasing each time the value b that determines the neighbourhood size near the determined quantity of signal periods at observation interval. After the required approximation accuracy of evaluation of reflected signal centre position is achieved, frequency value $f=m_{1max}/(N \cdot dt)$ is calculated.

EFFECT: higher measurement accuracy.

5 dwg

R U 2 4 7 8 2 1 3 C 2



Фиг. 1

R U 2 4 7 8 2 1 3 C 2

Изобретение относится к области измерительной техники и может быть использовано в спектрометрии для определения частоты несущей эхо-сигнала спектрометра.

Известен способ измерения частоты сигнала [патент РФ №2008149062]. Способ заключается в измерении длительности периода T_x следования сигналов и в последующем определении частоты f_x как величины, обратной периоду, причем для измерения периода T_x используют двоичный счетчик, в котором в процессе измерения каждого периода T_x в диапазоне от $T_{x\min}$ до $T_{x\max}$ получают соответствующие числа N_T , предварительно очищают число n_{\min} младших разрядов этого счетчика, обеспечивающих измерение минимального периода $T_{x\min}$ с погрешностью дискретности, не превышающей δT , определяют частоту $f_{cч}$ заполнения счетчика с учетом величины $T_{x\min}$ и числа $N_{TK\min}$, получаемого в счетчике при измерении $T_{x\min}$, определяют общее число n_{\max} разрядов счетчика, исходя из величины максимального периода измеряемой частоты, отличается тем, что задают значение частоты $f_{cч}$, округленное в сторону увеличения до ближайшей величины $f_{cч} = 2^Q * 10^6$ Гц, где Q - целое положительное или отрицательное число, подают числа N_{TK} , получаемые после окончания периода T_x в n_{\min} младших разрядах счетчика, на адресные входы постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), в ячейках памяти которого хранятся предварительно записанные числа $N_{ПЗУ}$, пропорциональные соответствующим значениям f_c частоты сигналов. При выполнении условия $n_{\min} < n_{изм} \leq n_{\max}$, $n_{изм} = n_{\min} + m_1$ или $n_{\min} \leq n_{изм} < n_{\max}$, $n_{изм} = n_{\max} - m_2$ производят m_1 или m_2 сдвиг числа N_{TK} в сторону младших или старших разрядов. Запоминают число m_1 или m_2 проведенных сдвигов и определяют частоту f_{x1} или f_{x2} исследуемых сигналов.

Известен способ измерения частоты сигнала, выбранный за прототип [Цифровой спектральный анализ и его приложения. С.Л.Марпл-мл. М.: Мир, 1990, - 584 с.]. Способ основан на выполнении быстрого преобразования Фурье (БПФ). Измерение частоты сводится к определению количества периодов K сигнала с помощью БПФ на интервале наблюдения $N * dt$, где N - количество отсчетов, а dt - интервал дискретности измерения, и последующему вычислению частоты сигнала по формуле $f = K / (N * dt)$. Разрешение по частоте df , т.е. абсолютная погрешность результата измерения частоты, равно $1 / (N * dt)$ или, что то же, f / K , отсюда относительная погрешность определения частоты $\delta f = 1 / K$. Таким образом, погрешность определения частоты этим известным способом может быть значительной, если количество периодов сигнала в интервале наблюдения мало. В частности, эхо-сигналы спектрометров содержат очень малое количество периодов, менее 10 [В.И.Тарханов, В.С.Тутыгин. Приборный комплекс для поиска и исследования сигналов ЯМР в магнитоупорядоченных веществах. Журнал «Научное приборостроение», 2003, том 13, №1], поэтому погрешность определения частоты достигает 10% и более. Погрешность будет еще больше, если сигнал будет зашумлен. Таким образом, недостаток известного способа определения частоты - недостаточно высокая точность.

Задачей изобретения является повышение точности измерения частоты сигнала.

Предложен способ измерения частоты сигнала, который включает прием сигнала с последующим аналого-цифровым преобразованием, быстрое преобразование Фурье, преобразующее числовой массив во временной области в числовой массив в частотной области, определение номера j_{\max} элемента числового массива, соответствующего максимальной амплитуде сигнала в частотной области, определяющего приближенное значение количества периодов сигнала в интервале наблюдения, создание $2k+1$

эталонных сигнала во временной области, по форме соответствующих исходному массиву во временной области, количество периодов которых смещают по отношению к количеству периодов исходного сигнала на $j_{\max} * (s/k-1) * b$, где $s=0, 1, 2, \dots, 2k$, где коэффициент b определяет размер окрестности, $b=0 \dots 1$ вблизи приближенного количества периодов сигнала j_{\max} в интервале наблюдения, вычисление коэффициентов корреляции $2k+1$ эталонных сигналов с исходным, аппроксимацию зависимости коэффициентов корреляции $2k+1$ эталонных сигналов с исходным сигналом от номера m в частотной области $KK[m]$, где $m=j_{\max} + j_{\max} * (s/k-1) * b$, выполнение передискретизации на основе найденной аппроксимирующей зависимости с увеличением количества элементов массива в R раз, т.е. формирование массива $KK1[m_1]$, где $m_1 = j_{\max} + j_{\max} * (s_1/(k*R)-1) * b$, $s_1=0, 1, \dots, 2k*R$, R - коэффициент передискретизации больше 1, нахождение элемента $m_{1\max}$ числового массива, соответствующего максимальному значению коэффициента корреляции $KK1$. Значение $m_{1\max}$ принимают за уточненное значение количества периодов исходного сигнала вместо j_{\max} . Повторяют далее все предыдущие операции обработки сигнала, уменьшая каждый раз величину b , определяющую размер окрестности вблизи найденного количества периодов сигнала в интервале наблюдения. После достижения требуемой точности приближения оценки положения центра отраженного сигнала вычисляется значение частоты $f = m_{1\max} / (N * dt)$.

Отличительными существенными признаками предлагаемого способа является обработка исходного сигнала, в результате чего частота сигнала определяется точно как при целом, так и при не целом количестве периодов, а при наличии шума в несколько раз с большей точностью, чем при использовании известного способа, основанного на использовании БПФ. Идея предлагаемого способа измерения частоты сигнала заключается в том, что значение центра j_{\max} сигнала в частотной области, определенное с помощью БПФ [фиг.1] по принципу положения максимума амплитуды сигнала в частотной области и вычисленного на его основе значения количества периодов сигнала во временной области, используется только в качестве грубой оценки (начального приближения) количества периодов. Для получения более точного значения количества периодов производится формирование во временной области $2k+1$ эталонных сигналов, соответствующих по форме исходному сигналу [фиг.2], но имеющих другое количество периодов, а именно со сдвигом $j_{\max} * (s/k-1) * b$, где $s=0, 1, 2, \dots, 2k$, значение b задается с учетом возможной погрешности приближенного значения количества периодов в интервале от 0 до 1. Например, $b=0.1$, если погрешность оценки приближенного значения количества периодов не превышает 10%, $k=3$, если погрешность оценки приближенного значения количества периодов не превышает 10%, если возможна ошибка грубой оценки до 90%, то задают значения $b=0.9$ и $k=25$. Далее вычисляют коэффициенты корреляции исходного анализируемого сигнала со всеми эталонными $KK[m]$, $m = j_{\max} + j_{\max} * (s/k-1) * b$, m отражает количество периодов измеряемого сигнала, в общем случае нецелое, находят с помощью аппроксимации непрерывную функциональную зависимость $F(m)$, соответствующую массиву $KK[m]$, выполняют передискретизацию на основе найденной функциональной зависимости $F(m)$ для массива $KK[m]$ с увеличением количества элементов массива в R раз, т.е. формирование массива $KK1[m_1]$, где $m_1 = j_{\max} + j_{\max} * (s_1/(k*R)-1) * b$, $s_1=0, 1, 2, \dots, 2k*R$, R - коэффициент передискретизации, например, равный 10, находят элемент массива $m_{1\max}$, соответствующий максимальному значению коэффициента корреляции $KK1$. Значение $m_{1\max}$ принимают за уточненное (в общем случае нецелое) количество периодов сигнала. Упомянутая

функция $F(m)$ имеет вид параболы, обращенной вершиной вверх как в случае незашумленного, так и зашумленного сигнала, что и позволяет определить количество периодов сигнала более точно. При наличии шума форма функции сохраняется, уменьшается лишь абсолютное значение максимума. Процесс уточнения значения количества периодов итерационно повторяется, вначале итерации в качестве начального приближения используется уточненное значение $m_{1\max}$, полученное в результате предыдущей итерации. Повторение операций обработки прекращают после достижения требуемой точности приближения оценки значения количества периодов сигнала, которую оценивают по величине разности между вычисленными значениями количества периодов в результате текущего и предыдущего приближений. После этого вычисляют значение частоты как $f = m_{1\max} / (N * dt)$, где dt - шаг дискретности по времени при измерении сигнала. В результате будет получено значение количества периодов и частоты с меньшей погрешностью в R раз, чем разрешение по частоте при использовании БПФ. Кроме того, при зашумленности отраженного сигнала, значение частоты сигнала предлагаемым способом будет получено в несколько раз более точно по сравнению с известным способом. Таким образом, совокупность отличительных признаков необходима и достаточна для решения поставленной задачи.

Схема устройства для возможной реализации предлагаемого способа измерения частоты сигнала представлена на фиг.3. Устройство включает 1 - генератор синхронизирующих импульсов СИ1 и СИ2, 2 - источник сигнала, 3 - аналого-цифровой преобразователь, 4 - счетчик адреса оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), 5 - ОЗУ, 6 - вычислитель. На фиг.4 приведена временная диаграмма синхронизирующих импульсов СИ1 и СИ2. На фиг.5 приведена блок-схема алгоритма работы вычислителя 6.

Пример реализации предлагаемого способа в устройстве фиг.3

Генератор синхронизирующих импульсов 1 вырабатывает синхронизирующий импульс СИ1, который производит сброс счетчика адреса записи в ОЗУ и запускает источник сигнала 2. С момента формирования синхронизирующего импульса СИ1 начинается формирование синхроимпульсов СИ2 генератором 1, аналого-цифровое преобразование ожидаемого входного сигнала с помощью аналого-цифрового преобразователя 3 и запись результатов преобразования в оперативное запоминающее устройство 5 по адресу, задаваемому адресным счетчиком 4. При этом будет зафиксировано N дискретных отсчетов сигнала. Далее вычислитель 6 производит чтение и обработку зарегистрированного и хранящегося в оперативном запоминающем устройстве 5 дискретизированного сигнала в соответствии с алгоритмом, представленным на фиг.5. Действия обработки выполняются в следующем порядке:

1. Производят чтение зарегистрированного в оперативном запоминающем устройстве 5 входного сигнала, представленного в виде набора из N отсчетов.

2. Производят быстрое преобразование Фурье, в результате чего формируют массив частотного спектра в виде набора из N чисел.

3. Определяют номер элемента j_{\max} массива частотного спектра, которому соответствует максимальное значение. Этот номер j_{\max} является грубой оценкой количества периодов сигнала.

4. Создают $2k+1$ эталонных сигналов по форме соответствующих исходному, количество периодов эталонных сигналов смещают по отношению к исходному на величину $j_{\max} * (s/k-1) * b$, где $s=0, 1, 2, \dots, 2k$, b - постоянный коэффициент, задаваемый от 0 до 1 в зависимости от величины возможной ошибки грубой оценки количества

периодов сигнала, например, $b=0.1$, если возможная ошибка равна 10%, при этом $k=3$. Если возможна ошибка до 90%, то задают значение $b=0.9$, при этом $k=25$.

Коэффициент $b=0\dots 1$ определяет размер окрестности вблизи количества периодов входного сигнала. В этой окрестности будут находиться значения количества периодов эталонных сигналов.

5. Вычисляют коэффициенты корреляции эталонных сигналов с исходным. Результат представляется в виде числового массива, содержащего $2k+1$ элементов, каждому элементу соответствует число $m=j_{\max}+j_{\max} \cdot (s/k-1) \cdot b$ и значение коэффициента корреляции $KK[m]$.

6. Производят аппроксимацию зависимости коэффициентов корреляции эталонных сигналов с исходным $KK(m)$ от числа m , которое определяет значения количества периодов эталонных сигналов $m=j_{\max}+j_{\max} \cdot (s/k-1) \cdot b$.

7. Производят передискретизацию на основе найденной аппроксимирующей зависимости $F(m)$ для массива $KK[m]$ с увеличением количества элементов массива в R раз, т.е. формируют массив $KK1[m_1]$, где $m_1=j_{\max}+j_{\max} \cdot (s_1/(k \cdot R)-1) \cdot b$, $s_1=0, 1, 2, \dots, 2k \cdot R$, R - коэффициент передискретизации, например, равный 10.

8. Определяют значение $m_{1\max}$ массива $KK1[m_1]$, которому соответствует максимальное значение коэффициента корреляции $KK1$. Значение $m_{1\max}$ принимают за уточненное количество периодов исходного сигнала.

9. Повторяют далее все предыдущие операции обработки сигнала, начиная с п.4, уменьшая каждый раз величину b , определяющую размер окрестности вблизи приближенного значения количества периодов сигнала, в качестве приближенного значения количества периодов сигнала выбирают значение $m_{1\max}$, определенное в п.8. Повторение операций обработки прекращают после достижения требуемой точности оценки количества периодов исходного сигнала, точность оценивают по величине разности между вычисленными значениями количества периодов в результате текущего и предыдущего приближений.

10. Вычисляют значение частоты $f=m_{1\max}/(N \cdot dt)$, где $m_{1\max}$ - уточненное количество периодов исходного сигнала, dt - шаг дискретности по времени при измерении сигнала.

Способ обеспечивает увеличение точности измерения количества периодов и частоты сигнала в несколько раз за счет многократного повторения операций обработки сигнала с одновременным уменьшением размера окрестности вблизи приближенного значения количества периодов анализируемого сигнала.

Формула изобретения

Способ измерения частоты сигнала, включающий аналого-цифровое преобразование сигнала и измерение количества периодов сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье, отличающийся тем, что определяют номер j_{\max} элемента числового массива, соответствующего максимуму сигнала в частотной области, создают $2k+1$ эталонных сигналов, по форме соответствующих исходному, количество периодов каждого смещают по отношению к количеству периодов исходного сигнала на величину $j_{\max} \cdot (s/k-1) \cdot b$, где $s=0, 1, 2, \dots, 2k$, s - номер эталона, k - коэффициент больший или равный 3, b - постоянный коэффициент от 0 до 1, определяющий размер окрестности вблизи приближенного значения количества периодов измеряемого сигнала, вычисляют коэффициенты корреляции эталонных сигналов с исходным, производят аппроксимацию зависимости коэффициентов корреляции $2k+1$ эталонных сигналов с исходным $KK[m]$, где $m=j_{\max}+j_{\max} \cdot (s/k-1) \cdot b$, производят передискретизацию на основе найденной аппроксимирующей зависимости

для массива $KK[m]$ с увеличением количества элементов массива в R раз, формируют массив $KK1[m_1]$, где $m_1 = j_{max} + j_{max} \cdot (s_1 / (k \cdot R) - 1) \cdot b$, $s_1 = 0, 1, 2, \dots, 2k \cdot R$, R - коэффициент передискретизации, больший 1, определяют значение m_{1max} массива $KK1[m_1]$, которому соответствует максимальное значение коэффициента корреляции $KK1$, значение m_{1max} принимают за уточненное количество периодов исходного сигнала, далее повторяют операции обработки сигнала с одновременным уменьшением коэффициента b , определяющего размер окрестности вблизи приближенного значения количества периодов сигнала, после чего вычисляют значение частоты $f = m_{1max} / (N \cdot dt)$, где m_{1max} - уточненное количество периодов исходного сигнала, dt - шаг дискретности по времени при измерении сигнала.

15

20

25

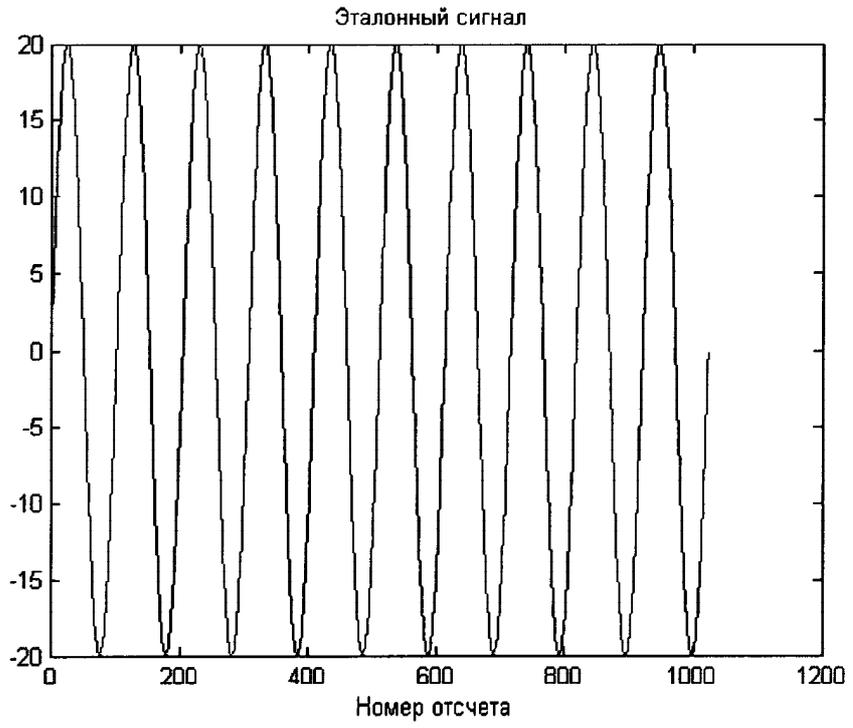
30

35

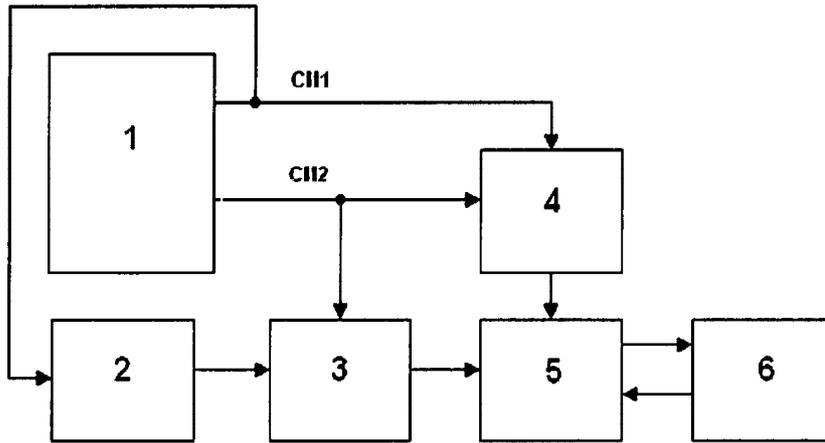
40

45

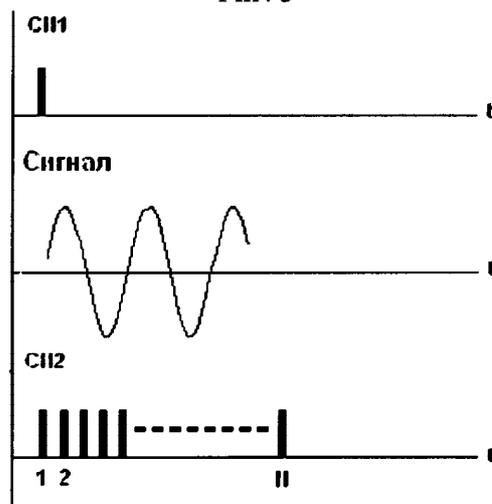
50



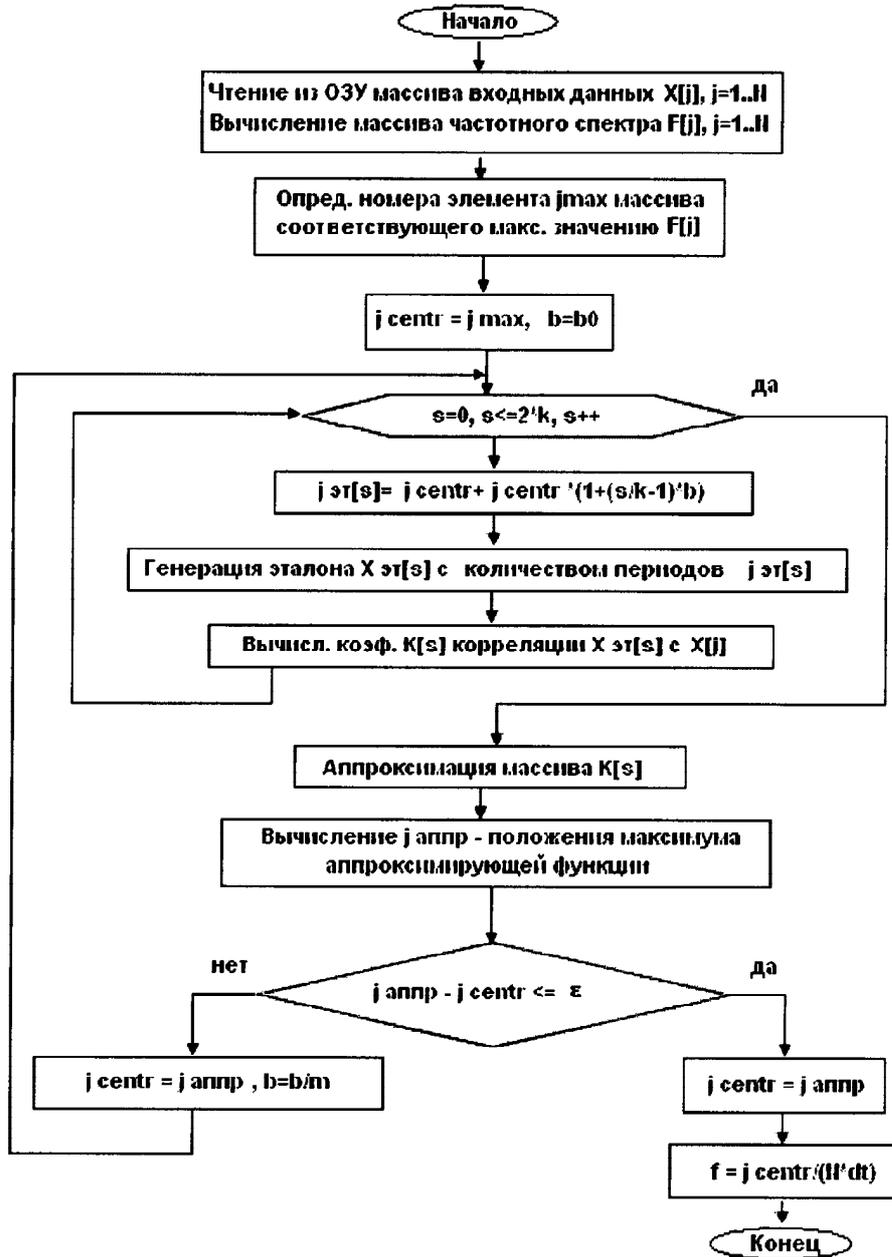
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5