

НОВЫЕ АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛЧМ-СИГНАЛОВ

Тутыгин В.С., к.т.н., доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, vs4141@mail.ru

Шедов С.В., аспирант кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, sergey@shedov.ru

Южаков А.В., программист, yuzhakov@bk.ru

Ключевые слова: ЛЧМ-сигнал, обнаружение, оценка параметров, адаптивные алгоритмы, быстрое преобразование Фурье, оптимальная фильтрация.

Введение. Постановка задачи

Одной из важнейших задач цифровой обработки сигналов является обнаружение информативного сигнала в потоке данных, искаженных шумами и помехами, и определение его параметров. Для этого применяются различные методы, такие как временная фильтрация (накопление), оптимальная частотная фильтрация, прямое и обратное преобразование Фурье, корреляционный анализ [1].

При решении конкретной задачи – обнаружения и определения параметров (амплитуды, центральной частоты, ширины полосы) спутникового ЛЧМ-сигнала, мы имеем дело с потоком мгновенных спектров ЛЧМ-сигнала, полученных с помощью БПФ. Предполагается, что в каждом спектре (кадре), содержащем N (например, 128) дискретных значений, содержится шумовой фон и может содержаться одно или несколько дискретных информативных значений, принадлежащих ЛЧМ-сигналу (см. рис.1).

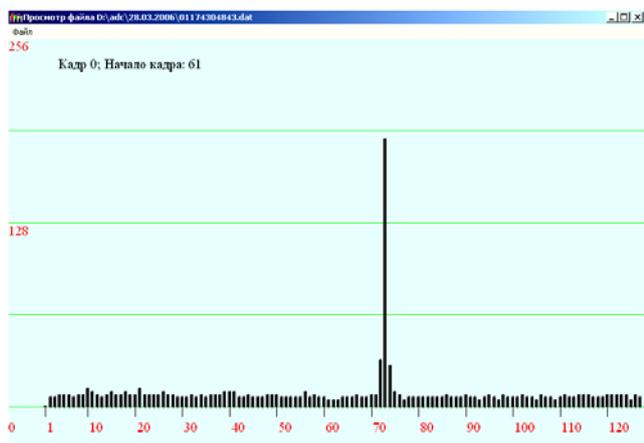


Рис. 1. Мгновенный частотный спектр, содержащий фрагмент ЛЧМ-сигнала.

Количество информативных значений в кадре зависит от скорости изменения частоты и временной длительности ЛЧМ-сигнала, времени получения мгновенного частотного спектра и частотного разрешения спектроанализатора,

Рассмотрены новые подходы к решению задачи обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигналов, основанные на использовании адаптивных алгоритмов обработки потоков спектров, полученных с помощью БПФ, включающие новые алгоритмы автоматического определения уровня шумов в потоке спектров, компенсации структурно-детерминированной помехи и использования алгоритма оптимизации для определения параметров ЛЧМ-сигнала с применением аппроксимации ЛЧМ-сигнала специальной функцией.

выполняющего операцию БПФ. Частотное разрешение в спектре определяет точность, с которой могут быть вычислены ширина спектра и центральная частота ЛЧМ-сигнала, а количество дискретных значений в спектре при данном частотном разрешении – ширину частотного диапазона, в котором производится обнаружение ЛЧМ-сигнала по его мгновенному спектру. Так, например, если частотное разрешение составляет 2 МГц, а количество дискретных значений равно 128 (см. рис.1), то ширина частотного диапазона, в котором производится обнаружение ЛЧМ-сигналов, составит 256 МГц.

Один ЛЧМ-сигнал занимает некоторую полосу частот, поэтому он порождает M последовательных кадров, содержащих информативные значения. Значение M зависит как от ширины полосы частот H ЛЧМ-сигнала, так и от ширины полосы частот h в мгновенном спектре, полученном с помощью БПФ, а именно: $M = H/h$. Количество последовательных кадров, содержащих информативные значения, может быть определено также как отношение временной длительности ЛЧМ-сигнала к временной длительности, в течение которой производится вычисление мгновенного частотного спектра с помощью БПФ. Так, например, если временная длительность излучения одного ЛЧМ-сигнала составляет 40 мкс, а получение одного мгновенного частотного спектра занимает 4 мкс, то $M = 10$. ЛЧМ-сигналы излучаются с некоторой периодичностью во времени, поэтому после каждых M кадров, содержащих информативные значения, следует P кадров, содержащих только шумовой фон.

Требуется решить задачу обнаружения и определения параметров спутникового ЛЧМ-сигнала в условиях присутствия структурно-детерминированных (станционных) помех и флуктуационного шума, свойства которых априори не известны. При приеме сигналов на фоне структурно-детерминированной помехи и флуктуационного шума основными процедурами являются компенсация структурно-

детерминированной помехи и фильтрация шума [2]. Сложность задачи обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигнала связана еще и с тем, что сигнал станционной помехи может быть ошибочно принят за ЛЧМ-сигнал.

Использование для решения задачи обнаружения оптимальных фильтров, в частности фильтра Колмогорова-Винера, возможно и целесообразно в том случае, если ширина полосы ЛЧМ-сигнала и статистические свойства флуктуационного шума априори известны, а структурно-детерминированная помеха отсутствует.

Снижение эффективности фильтра Колмогорова-Винера при наличии структурно-детерминированных помех вызвано тем, что ЛЧМ-сигнал получается путем накопления M мгновенных спектров. В результате такого накопления амплитуда структурно-детерминированной помехи возрастает в M раз, тогда как амплитуда элементов ЛЧМ-сигнала не возрастает. Таким образом, отношение сигнал/шум в реконструированном ЛЧМ-сигнале ухудшается в M раз.

Обнаружение информативных сигналов в потоке спектров

Известный способ обнаружения информативных сигналов в потоке спектров основан на детектировании превышения амплитудой дискретных значений порогового уровня – уровня шума. Нами установлено, что оптимальный уровень шума может быть определен автоматически при условии, что максимально возможная ширина полосы частот ЛЧМ-сигнала может быть предварительно оценена.

Изучение большого количества реальных спектров, полученных нами с помощью комплекса аппаратуры приема и регистрации спутниковых сигналов, показали, что фоновый шум в любом из спектров (кадров), независимо от того, присутствует или нет в нем ЛЧМ-сигнал или какая-либо помеха, занимает не менее 90% от общего спектрального диапазона кадра. Предлагаемая нами методика автоматического определения порога шума, основана на построении амплитудной гистограммы Q кадров и определения порога шума как уровня отсечения 90% площади амплитудной гистограммы. В общем случае уровень отсечения должен быть установлен на уровне $(100-K)\%$, если ЛЧМ-сигнал в совокупности с сигналом помехи большой амплитуды, соизмеримой с амплитудой ЛЧМ-сигнала, занимает $K\%$ от общего спектрального диапазона кадра.

На рис. 2 показан пример амплитудной гистограммы, построенной в результате статистической обработки 100 последовательных кадров из массива, содержащего 64000 кадров, и показан определенный автоматически порог шума.

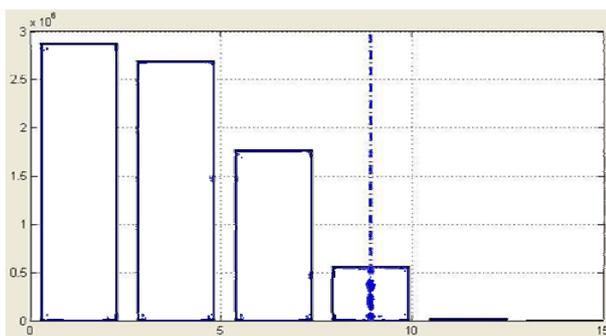


Рис. 2. Пример амплитудной гистограммы 100 последовательных кадров (штрих-пунктирная линия показывает автоматически определенный порог шума).

Известным способом реконструкции ЛЧМ-сигнала по полученным мгновенным M спектрам является суммирование этих M кадров (спектров). Определение параметров ЛЧМ-сигнала производится по реконструированному спектру. Если априори девиация частоты (ширина полосы) и скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала или временная длительность излучения одного ЛЧМ-сигнала не известны, то количество суммируемых кадров M выбирается исходя из максимально возможной девиации частоты или максимальной временной длительности излучения одного ЛЧМ-сигнала.

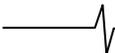
Недостатком этого известного способа обнаружения является то, что кроме информативных значений, принадлежащих ЛЧМ-сигналу, в кадре могут содержаться отдельные одиночные дискретные значения станционной помехи такой же или большей амплитуды, чем информативные. Поскольку информативная линия в одном кадре может быть и одна, дискретные значения, принадлежащие ЛЧМ-сигналу и узкополосной станционной помехе, неотличимы. Это приводит к ошибкам обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигнала. Кроме того, при разбиении потока спектров на следующие одна за другой группы, содержащие по M спектров в группе, возможен пропуск ЛЧМ-сигнала за счет того, что в состав M спектров группы попадет лишь часть ЛЧМ-сигнала.

Анализ ЛЧМ-сигналов спутника показал, что эффективность решения задачи обнаружения и определения его параметров может быть существенно повышена при использовании адаптивных алгоритмов обработки потока мгновенных спектров. В результате было установлено, что:

- Кажущийся случайным сигнал в мгновенных спектрах при отсутствии спутникового ЛЧМ-сигнала в действительности содержит шумоподобную систематическую составляющую, являющуюся структурно-детерминированной помехой, вызванной излучением посторонних источников радиосигнала и неидеальностью исполнения аппаратных элементов спектроанализатора. Вычислить этот «нулевой» спектр практически невозможно, но можно определить его экспериментально с некоторой случайной погрешностью и скомпенсировать при обработке.

- Определение оптимального порогового уровня отсечения шумов и помех можно произвести автоматически, учитывая, что ЛЧМ-сигналы и сигналы станционной помехи занимают лишь небольшую часть (обычно не более 10%) диапазона частот, представленных в спектре.

- Обнаружить и определить параметры ЛЧМ-сигнала можно более надежно и точно, если вместо обычно используемого последовательного суммирования M спектров и последующего определения центральной частоты ЛЧМ-сигнала, по принципу положения сигнала максимальной амплитуды в спектре, применить суммирование $2M$ спектров. При этом начало диапазона каждой последующей накапливаемой группы спектров следует смещать относительно конца предыдущей назад на M значений, а для определения центральной частоты ЛЧМ-сигнала применить сплайн-интерполяцию, передискретизацию и аппроксимацию накопленного спектра специальной функцией.



- Улучшить отношение сигнал/шум в полученном путем накопления спектров ЛЧМ-сигнале можно с помощью адаптивного алгоритма, суть которого заключается в выделении стационарной помехи непосредственно в каждой группе накапливаемых спектров путем усреднения только тех спектров в группе, которые не содержат линий ЛЧМ-сигнала. Для обнаружения таких спектров предлагается вычислять матрицу коэффициентов корреляции R_{ij} каждого из i спектров с каждым j , за исключением $i = j$, где $i, j = 1..S$, усреднение коэффициентов корреляции по столбцам (т.е. вычисление среднего значения коэффициента корреляции данного спектра со всеми остальными), сравнение средних значений коэффициентов корреляции с пороговым значением, усреднение (с целью получения спектра стационарной помехи) только тех спектров, среднее значения коэффициента корреляции которых больше порогового значения.

Спектр стационарной помехи (шумоподобную систематическую составляющую) можно получить и путем усреднения «пустых» спектров, не содержащих элементов ЛЧМ-сигнала. Учитывая, что количество P «пустых» спектров, следующих за M спектрами, содержащими элементы ЛЧМ-сигнала, в 10-20 раз больше M , спектр стационарной помехи можно вычислить путем усреднения P спектров. То, что в состав этих P спектров могут попасть элементы ЛЧМ-сигнала, не приводит к сколько-нибудь значительной ошибке определения спектра стационарной помехи, т.к. при усреднении амплитуда элементов ЛЧМ-сигнала уменьшится в 10-20 раз (рис. 3А, Б). Такой подход имеет то преимущество, что автоматически вычитаются сигналы сосредоточенной стационарной помехи, в том числе и тогда, когда ширина полосы ЛЧМ-сигнала и помехи совпадают, поэтому нет необходимости определять наличие такой помехи заранее и реализовать какой-либо способ борьбы с такими помехами. На рис. 3А, Б показан результат накопления M спектров и результат обработки рис.3В, Г (вычитания стационарной помехи). Видно, что в обработанном спектре сосредоточенная стационарная помеха скомпенсирована, а распределенная стационарная помеха значительно ослаблена.

Спектральные линии ЛЧМ-сигнала могут появиться в одной группе из $2M$ мгновенных спектров, если M спектров, которые занимает ЛЧМ-сигнал, находятся в начале или в конце группы из $2M$ накапливаемых спектров, или в двух последовательных группах в противном случае, причем в одной из этих групп ЛЧМ-сигнал будет представлен полностью. Это гарантирует обнаружение и правильное определение параметров ЛЧМ-сигнала в любом случае.

Для более точного, чем при использовании БПФ, определения центральной частоты сигнала в условиях зашумленности и других особенностей спектров нами предложен FSA -алгоритм (*Fourie–Spline–int erpolation– Approximation*) [3], который эффективен, например, при обнаружении и идентификации параметров зашумленных сигналов эхо-сигналов спектрометров ядерного магнитного резонанса. Задача обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигнала отличается от упомянутой тем, что один ЛЧМ-сигнал содержится не в одном мгновенном спектре, а в нескольких. Кроме того, в мгновенных спектрах обычно содержится сигнал узкополосной и широкополосной помех, сравнимый по амплитуде с ЛЧМ-сигналом. При решении задачи обработки потоков мгновенных спектров, содержащих ЛЧМ-сигнал, нами предложен в [4] и описан в [5] модифицированный FSA -алгоритм ($MFSA$ -алгоритм), в котором поток спектров (кадров) разбивается на группы по $S = 2M$ кадров в каждой группе, производится суммирование (накопление) S кадров каждой группы, номер кадра P_{i+1} начала каждой последующей группы вычисляется как $P_i + S - M$, последующей аппроксимацией накопленных спектров (кадров) аналитической функцией

$$f(x) = a * e^{-\left(\frac{|x-b|}{c}\right)^d}$$

значения параметров a, b, c, d которой находятся методом оптимизации. Найденное таким образом значение параметра b определяет центральную частоту ЛЧМ-сигнала.

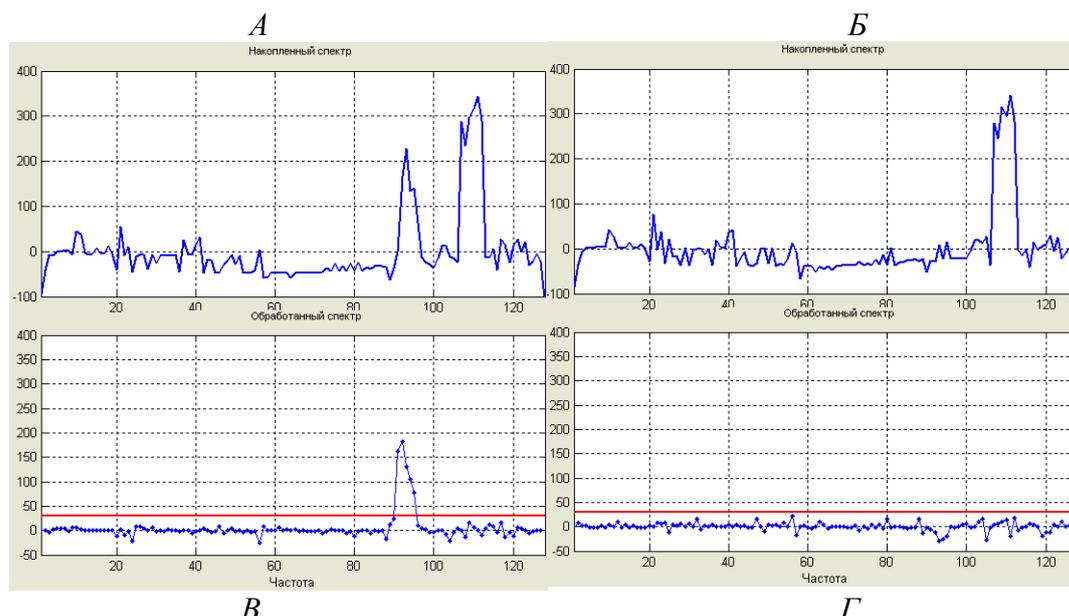


Рис. 3. Накопленный частотный спектр, содержащий реальный ЛЧМ-сигнал, распределенную и сосредоточенную стационарную помеху (А), только стационарную помеху (Б) и те же спектры после вычитания стационарной помехи (В, Г). $M = 10$, $P = 100$.

Функция именно такого вида хорошо соответствует широкополосным ЛЧМ-сигналам. Параметр a определяет амплитуду, b – положение центральной частоты спектра, c – крутизну фронта и спада, d – степень острровершинности (плосковершинности). Ширина аппроксимирующего сигнала H на уровне половины амплитуды, выраженная в количестве интервалов дискретизации частоты в спектре, может быть вычислена, как следует из предыдущего выражения, из уравнения:

$$e^{-\left(\frac{H/2}{c}\right)^d} = 0.5$$

Отсюда получим: $H = 2c^{\frac{1}{d}} \sqrt{\ln 2}$

Отсутствие ложного обнаружения, т.е. принятие сигнала помехи, отличающегося по ширине полосы частот от ЛЧМ-сигнала, за ЛЧМ-сигнал, достигается за счет того, что при $H < H_1$ или $H > H_2$, (H_1 и H_2 представляют собой минимальную и максимально возможную ширину полосы H обнаруживаемого ЛЧМ-сигнала) в качестве результата аппроксимации принимается $f(x) = 0$.

Краткое описание MFSA-алгоритма:

1) Начальные установки значений $S, M, H, H_1, H_2, i = 0, P_0 = -M$. $M \geq H/h$, где H – максимальная ожидаемая ширина полосы частот ЛЧМ-сигнала, h – ширина полосы частот в мгновенном спектре БПФ.

2) Вычисление начального номера кадра i -той группы кадров $P_{i+1} = P_i + S - M$.

3) Накопление $S = 2M$ ($M \geq H/h$, где H – полоса частот ЛЧМ-сигнала, h – ширина полосы частот в мгновенном спектре БПФ) последовательных мгновенных спектров (кадров) из последовательного потока спектров.

4) Выполнение сплайн-интерполяции и передискретизации для накопленного спектра $Y[j], j = 1..M$, с увеличением количества точек массива в K раз. В результате получим массив частотного спектра $Z(p), p = 1..S, S = N * K$. Количество точек в этом

массиве больше в K раз, чем в массиве $Y[j]$.

5) Вычисление начального приближения значения b путем вычисления значения положения максимума накопленного спектра.

6) Аппроксимация центрированного числового массива $Z(p)$ аналитической зависимостью

$$f(p) = a * e^{-\frac{|p-b|}{c}^d}$$

путем нахождения численных значений коэффициентов a, b, c, d методом оптимизации по алгоритму Гаусса-Зейделя с фиксированным количеством шагов по принципу минимизации суммы квадратов отклонений функций $z(p)$ и $f(p)$:

$$\sum_{p=1}^S \varepsilon_p^2 = \sum_{p=1}^S ((z(p) - \bar{z}) - f(p))^2$$

7) Вычисление значения f центральной частоты в ЛЧМ-сигнале:

$$f = F_0 + h_1 b / K, \text{ если } H_2 > 2c^{\frac{1}{d}} \sqrt{\ln 2} > H_1,$$

где F_0 – начальная частота спектрального диапазона в спектре БПФ;

h_1 – шаг дискретности по частоте в спектре БПФ (частотное разрешение спектроанализатора);

H_1, H_2 – минимальная и максимальная возможная ширина диапазона частот обнаруживаемого ЛЧМ-сигнала;

8) Инкремент i и переход к п.2, если $2c^{\frac{1}{d}} \sqrt{\ln 2} \leq H_1$ или $2c^{\frac{1}{d}} \sqrt{\ln 2} \geq H_2$.

Точность определения основной частоты при использовании предложенного MFSA-алгоритма зависит от значений K и тем выше, чем больше значения K , однако, если анализируемый сигнал зашумлен, существенное увеличение точности определения частоты происходит при увеличении K лишь до некоторого предела. В частности, при соотношении сигнал/шум до 1/1, $K = 10$, как показали наши исследования, оказывается наилучшим выбором по критерию точность/время анализа.

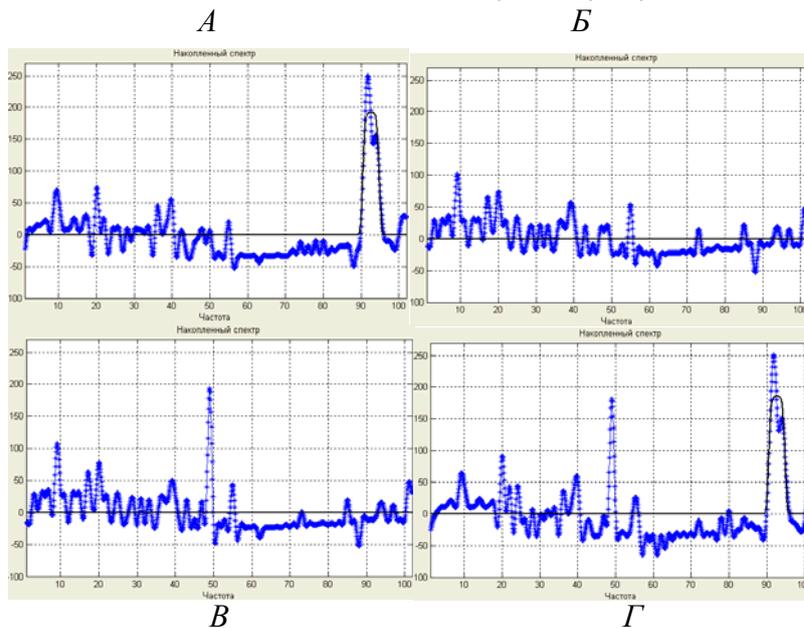


Рис. 4. Примеры обнаружения ЛЧМ-сигнала при использовании MFSA-алгоритма. В накопленных спектрах (кадрах) присутствует зашумленный ЛЧМ-сигнал (А), только шум, (Б), только шум и узкополосный сигнал помехи большой амплитуды, (В), зашумленный ЛЧМ-сигнал и узкополосный сигнал помехи большой амплитуды (Г).



На рис.4А-Г приведены примеры результатов обработки потока мгновенных спектров, полученных в результате быстрого преобразования Фурье ЛЧМ-сигналов спутника. Пунктирной линией показан накопленный спектр, сплошной – аппроксимирующая функция, полученные в программе обнаружения и определения параметров дискретизованного ЛЧМ-сигнала [4], реализующей MFSA-алгоритм. Параметры обработки: $M = 10, S = 20$.

Наличие ярко выраженного максимума аппроксимирующей функции (рис. 4А) показывает наличие ЛЧМ-сигнала и позволяет определить центральную частоту более точно, чем по максимуму амплитуды. Отсутствие выраженного максимума аппроксимирующей функции (Рис. 4Б, В) указывает на отсутствие в анализируемых кадрах ЛЧМ-сигнала. Наличие выраженного максимума аппроксимирующей функции (Рис. 4Г) указывает на присутствие в анализируемых кадрах ЛЧМ-сигнала и позволяет определить центральную частоту.

Для улучшения отношения сигнал/шум в полученном, путем накопления спектров, ЛЧМ-сигнале предлагается новый адаптивный алгоритм [6] обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигнала, обеспечивающий компенсацию стационарной помехи.

Новый алгоритм обнаружения

Описание адаптивного алгоритма:

1) Начальные установки значений $M, H, i = 1, P_0 = -M, M \geq H/h$, где H - полоса частот ЛЧМ-сигнала, h – ширина полосы частот в мгновенном спектре БПФ.

2) Вычисление начального номера кадра i -той группы кадров $P_{i+1} = P_i + S - M$.

3) Накопление $S = 2M$ последовательных мгновенных спектров (кадров) из последовательного потока спектров, $M \geq H/h$, где H - ширина полосы частот ЛЧМ-сигнала, h - ширина полосы частот в мгновенном спектре БПФ:

$$Z = \sum_{j=1}^S X_j,$$

где X_j – j -й спектр, (одномерный массив) содержащий N дискретных значений сигнала.

4) Вычисление матрицы размерностью $S * S$ коэффициентов корреляции R_{ij} (нормализованную функцию ковариации) каждого из S спектров с остальными, $i, j = 1..S$,

$$R_{ij} = \frac{\text{cov}(X_i, X_j)}{\sqrt{D[X_i]} * \sqrt{D[X_j]}}$$

где $D[X_i], D[X_j]$ – дисперсии i -того и j -того спектров.

5) Суммирование коэффициентов корреляции в матрице по столбцам и усреднение, т.е. вычисление среднего значения коэффициентов корреляции для каждого спектра с остальными $S - 1$ спектрами:

$$\bar{R}_i = \left(\sum_{j=1}^S R_{ij} \right) - R_{ii}, i = 1..S.$$

6) Суммирование спектров, среднее значение коэффициента корреляции которых больше порогового значения L , и усреднение (получение усредненного спектра стационарной помехи Y):

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^S X_i * \text{sign}(\bar{R}_i - L)}{\sum_{i=1}^S \text{sign}(\bar{R}_i - L)}, L = \frac{\bar{R}_{i_{\max}} + \bar{R}_{i_{\min}}}{2}.$$

7) Получение результирующего спектра ЛЧМ-сигнала W путем вычитания из накопленных по п.3 спектров усредненной суммы спектров стационарной помехи по п.6 умноженной на S :

$$W = Z - Y * S$$

где W, Z, Y – одномерные массивы размерностью N .

8) Инкремент i и переход к п.2.

В табл. 1 приведен пример вычисленной матрицы коэффициентов корреляции R_{ij} группы из 20 спектров реальных сигналов спутника, в спектрах с 9 по 19 содержатся частотные линии ЛЧМ-сигнала. Номер столбца таблицы – i , номер строки – j .

Таблица 1

1,00	0,97	0,55	0,25	0,41	0,39	0,40	0,39	0,39	0,40	0,39	0,40	0,39	0,39	0,40	0,38	0,39	0,34	0,40	0,38
0,97	1,00	0,67	0,39	0,45	0,36	0,40	0,38	0,39	0,41	0,39	0,38	0,39	0,38	0,41	0,38	0,38	0,35	0,39	0,38
0,55	0,67	1,00	0,93	0,65	0,41	0,43	0,43	0,43	0,45	0,44	0,42	0,42	0,42	0,41	0,41	0,43	0,42	0,42	0,42
0,25	0,39	0,93	1,00	0,62	0,35	0,37	0,37	0,38	0,40	0,36	0,36	0,37	0,36	0,36	0,35	0,36	0,37	0,37	0,36
0,41	0,45	0,65	0,62	1,00	0,76	0,80	0,80	0,79	0,89	0,78	0,76	0,78	0,80	0,85	0,79	0,81	0,77	0,79	0,90
0,39	0,36	0,41	0,35	0,76	1,00	0,90	0,92	0,90	0,79	0,88	0,87	0,88	0,91	0,74	0,90	0,90	0,91	0,86	0,80
0,40	0,40	0,43	0,37	0,80	0,90	1,00	0,94	0,94	0,84	0,95	0,91	0,92	0,93	0,79	0,93	0,94	0,94	0,94	0,82
0,39	0,38	0,43	0,37	0,80	0,92	0,94	1,00	0,95	0,84	0,92	0,96	0,93	0,93	0,81	0,92	0,95	0,95	0,94	0,82
0,39	0,39	0,43	0,38	0,79	0,90	0,94	0,95	1,00	0,82	0,93	0,96	0,97	0,93	0,81	0,94	0,93	0,95	0,96	0,83
0,40	0,41	0,45	0,40	0,89	0,79	0,84	0,84	0,82	1,00	0,81	0,80	0,82	0,81	0,93	0,81	0,83	0,83	0,82	0,89
0,39	0,39	0,44	0,36	0,78	0,88	0,95	0,92	0,93	0,81	1,00	0,92	0,90	0,92	0,79	0,91	0,94	0,95	0,90	0,82
0,40	0,38	0,42	0,36	0,76	0,87	0,91	0,96	0,96	0,80	0,92	1,00	0,94	0,91	0,80	0,94	0,94	0,94	0,94	0,81
0,39	0,39	0,42	0,37	0,78	0,88	0,92	0,93	0,97	0,82	0,90	0,94	1,00	0,94	0,82	0,93	0,92	0,93	0,95	0,81
0,39	0,38	0,42	0,36	0,80	0,91	0,93	0,93	0,93	0,81	0,92	0,91	0,94	1,00	0,81	0,93	0,93	0,94	0,92	0,83
0,40	0,41	0,41	0,36	0,85	0,74	0,79	0,81	0,81	0,93	0,79	0,80	0,82	0,81	1,00	0,80	0,81	0,80	0,81	0,92
0,38	0,38	0,41	0,35	0,79	0,90	0,93	0,92	0,94	0,81	0,91	0,94	0,93	0,93	0,80	1,00	0,92	0,94	0,94	0,85
0,39	0,38	0,43	0,36	0,81	0,90	0,94	0,95	0,93	0,83	0,94	0,94	0,92	0,93	0,81	0,92	1,00	0,94	0,94	0,84
0,34	0,35	0,42	0,37	0,77	0,91	0,94	0,95	0,95	0,83	0,95	0,94	0,93	0,94	0,80	0,94	0,94	1,00	0,92	0,81
0,40	0,39	0,42	0,37	0,79	0,86	0,94	0,94	0,96	0,82	0,90	0,94	0,95	0,92	0,81	0,94	0,94	0,92	1,00	0,83
0,38	0,38	0,42	0,36	0,90	0,80	0,82	0,82	0,83	0,89	0,82	0,81	0,81	0,83	0,92	0,85	0,84	0,81	0,83	1,00

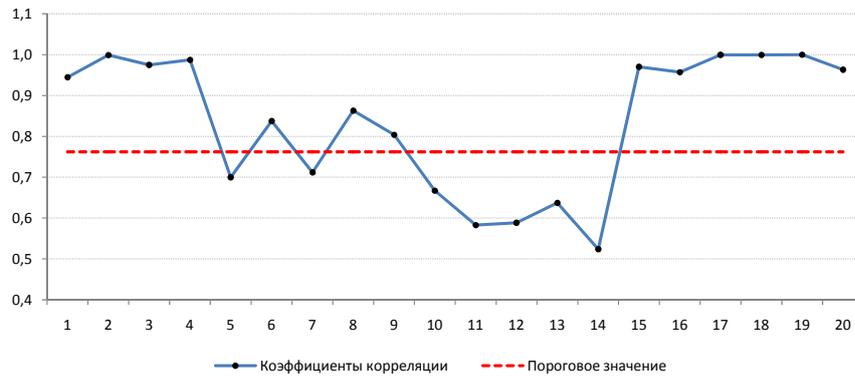


Рис. 5. Среднее значения коэффициента корреляции i -того спектра со всеми остальными и пороговый уровень

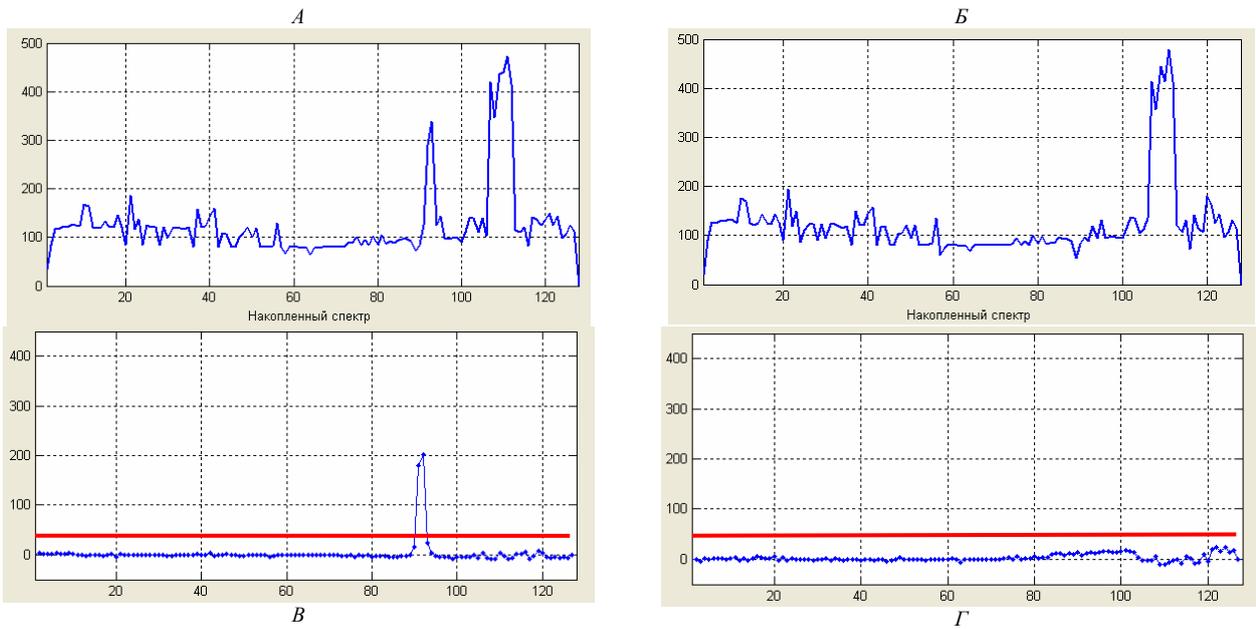
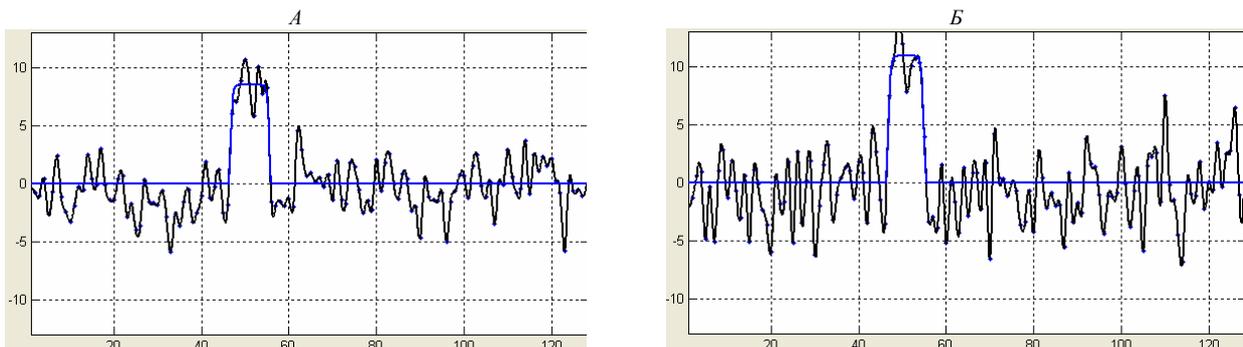


Рис. 6. Результат накопления 20 последовательных мгновенных спектров без вычитания стационарной помехи (А, Б) и после вычитания стационарной помехи при использовании адаптивного алгоритма (В, Г).

На рис. 5 приведен график среднего значения коэффициента корреляции i -того спектра со всеми остальными и пороговый уровень. На рис. 6 А, Б приведены примеры накопленных спектров без обработки и после обработки. С учетом того, что в данном случае $M = 10$, $h = 0.6$, ширина полосы частот ЛЧМ-сигнала H составляет $10 * 0.6 = 6$ линий дискретизированного спектра.

По анализу рис.6 видно, что в результате вычитания шумоподобной стационарной помехи с помощью предлагаемого адаптивного алгоритма, стационарная помеха,

распределенная по всей полосе частот, ослаблена в несколько раз, а сосредоточенная стационарная помеха большой амплитуды полностью скомпенсирована. При отсутствии в накапливаемых спектрах элементов ЛЧМ-сигнала в результате применения предлагаемого адаптивного алгоритма стационарная помеха компенсируется полностью (см. рис. 6Г) и уменьшается флуктуационная помеха (которая в реальном сигнале всегда присутствует), благодаря чему уменьшается вероятность ложного обнаружения ЛЧМ-сигнала.



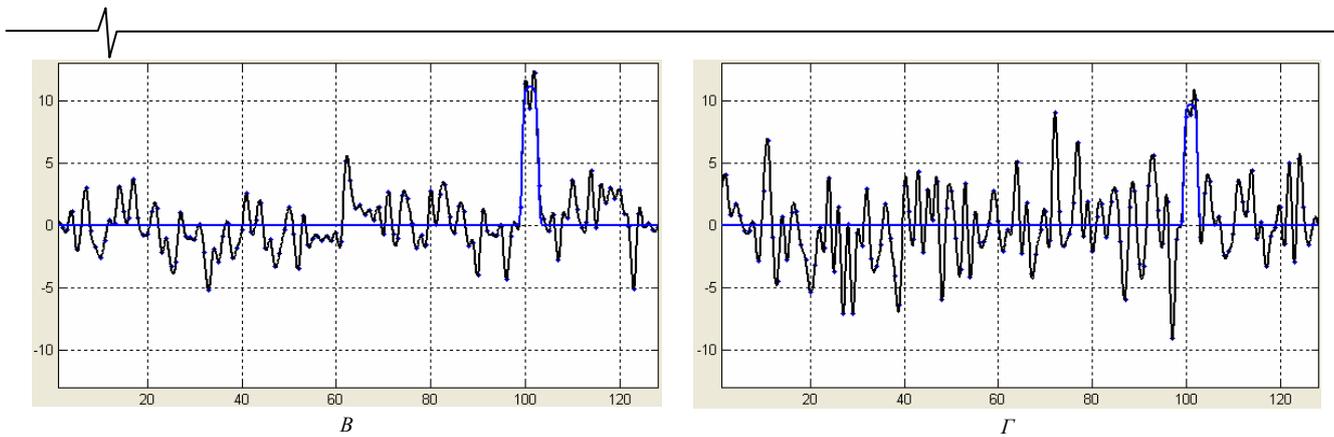


Рис. 7. Пример модельного накопленного и обработанного ЛЧМ-сигнала различной ширины с белым шумом (А, В) и нормально распределенным шумом (Б, Г). Амплитуда модельного сигнала – 10. Для генерации белого гауссовского и нормально распределенного шума использованы функции *wgn* и *randn* MATLAB.

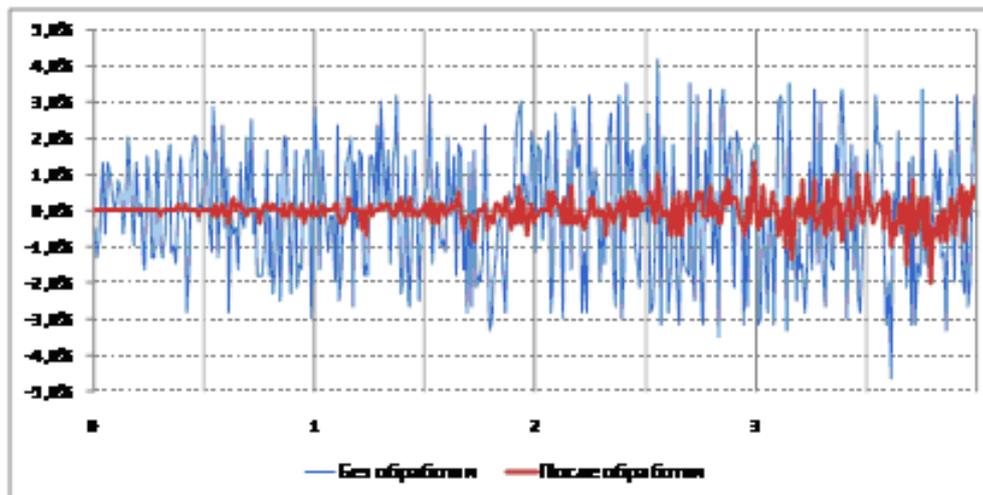


Рис. 8. Зависимость случайной относительной погрешности определения центральной частоты ЛЧМ-сигнала от отношения СКО флуктуационного шума к амплитуде исходного ЛЧМ-сигнала при использовании БПФ (А) и после дополнительной цифровой обработки по предлагаемому алгоритму ФСА (Б). Закон распределения шума – нормальный. Ширина полосы ЛЧМ-сигнала – 5% от диапазона частот.

Таблица 2

	Вид сигнала	Сигнал/шум	Фильтры	
			Фильтр Колмогорова-Винера	Адаптивный фильтр
Возможность обнаружения ЛЧМ-сигнала	Широкополосный сигнал	2/1	да	да
		2/3	да	да
		1/2	нет	да
	Узкополосный сигнал	2/1	да	да
		1/1	нет	да
Механизм компенсации структурно-детерминированной помехи			нет	да
Возможность определения параметров ЛЧМ-сигнала			нет	да
Время обработки одного ЛЧМ-сигнала			100 мкс	4 сек

Сходимость используемого алгоритма оптимизации Гаусса-Зейделя к истинным значениям параметров ЛЧМ-сигнала проверена путем моделирования. В качестве модели частотного спектра ЛЧМ-сигнала нами был взят прямоугольный сигнал, соответствующий идеальному незашумленному спектру. Искусственное зашумление сигнала производилось как белым гауссовским, так и нормально распределенным шумом. На рис 7 приведен пример результатов, полученных с помощью программы моделирования в среде *MATLAB*.

Оценка точности определения параметров сигнала производилась путем статистической обработки заданных в модели и вычисленных с помощью описанного алгоритма обработки параметров зашумленного модельного сигнала. Полученная таким путем случайная погрешность определения центральной частоты ЛЧМ-сигнала представлена на рис. 8.

Произведенное сравнение эффективности предлагаемого нами адаптивного алгоритма обнаружения ЛЧМ-сигнала в условиях шумов с алгоритмом обнаружения, реализованном в оптимальном фильтре Колмогорова-Винера, показали, что предлагаемый алгоритм более эффективен при наличии станционных помех и ЛЧМ-сигналов малой длительности (менее пяти линий в спектре). Сравнительные характеристики эффективности фильтра Колмогорова-Винера и предлагаемого адаптивного фильтра (алгоритма обработки) представлены в таблице 2.

Приведенные в статье примеры обработки выполнены на реальных спутниковых ЛЧМ-сигналах, полученных нами с помощью комплекса приема и обработки спутниковых сигналов на базе акустооптического спектроанализатора, ПЗС-преобразователя последовательного типа, модуля АЦП (40 МГц, 8 бит), модуля цифровой обработки на базе ПЛИС *ACEXIK EPK307C144-1* и модуля скоростного ввода потоков данных *PCI7300A*.

Описанные алгоритмы обработки данных реализованы в среде *MATLAB*.

Заключение

Выполненная нами обработка реального ЛЧМ-сигнала спутника, содержащего весьма значительный объем данных (64 000 кадров), и модельных сигналов, подобных спутниковым ЛЧМ-сигналам, с использованием предложенных адаптивных алгоритмов позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенные адаптивные алгоритмы обеспечивают надежное обнаружение ЛЧМ-сигнала, в том числе и в случае, когда одновременно с ЛЧМ-сигналом присутствует распределенная и сосредоточенная станционная помеха.

2. Уменьшение помех в спутниковом ЛЧМ-сигнале может быть выполнено путем предложенного способа определения оптимального уровня порога отсека, основанного на построении амплитудной гистограммы данных в потоке спектров.

3. Предложенные адаптивные алгоритмы полностью исключают ошибочное принятие сигнала станционной помехи за ЛЧМ-сигнал.

4. Предложенные адаптивные алгоритмы могут успешно использоваться для обнаружения ЛЧМ-сигналов,

если отношение сигнал/шум в накопленном сигнале для станционной и флуктуационной помехи не менее 1:3 и 1:1 соответственно.

5. Хотя алгоритм разрабатывался и был проверен для решения конкретной задачи, он может быть применен путем настройки параметров для обнаружения и определения параметров других спутниковых широкополосных сигналов по их частотным спектрам.

6. Предложенные адаптивные алгоритмы обработки зашумленного ЛЧМ-сигнала автоматически подстраиваются под шумоподобную систематическую составляющую помехи, поскольку автоподстройка производится на реальном принимаемом спутниковом сигнале непосредственно перед началом рабочего измерения.

7. Полученные нами как путем моделирования, так и при обработке реальных зашумленных сигналов спутника, имеющих весьма большой объем, показали, что при использовании предложенных новых адаптивных алгоритмов дополнительной цифровой обработки спектров, полученных с помощью БПФ, могут быть значительно улучшены возможности обнаружения зашумленных ЛЧМ-спутниковых сигналов и повышена точность определения их параметров.

Литература

1. Ж. М а к с. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х томах. М.: Мир, 1983.
2. А. С. К о т о у с о в, А.К. М о р о з о в. Оптимальная фильтрация сигналов и компенсация помех. –М.: Горячая линия – Телеком, 2008.
3. В. С. Т у т ы г и н, С.В.Ш е д о в. Программа частотного анализа дискретизированного сигнала. Свид. Роспатента об официальной Гос. регистрации №2007613363 от 09.10.2007.
4. В.С.Тутыгин, С.В.Шедов Программа обнаружения и идентификации параметров дискретизированного ЛЧМ-сигнала. Свид. Роспатента об официальной Гос. регистрации № 2009615691 от 13.10.2009.
5. В. С. Т у т ы г и н, С. В. Ш е д о в. Новые алгоритмы обнаружения и определения параметров зашумленных сигналов. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009, № 5(86). С. 64 – 72.
6. В.С.Тутыгин, С.В.Шедов. Программа оптимального обнаружения ЛЧМ – сигнала. Свид. Роспатента об официальной Гос. регистрации № 2010611782 от 28.05.2010.

NEW ADAPTIVE ALGORITHMS FOR DETECTION AND PARAMETERS DEFINITION OF LFM-SIGNALS

Tutygin V.S., Shedov S.V., Yuzhakov A.V.

New approach to the decision of a problem of detection and parameters definition noised LFM – signals based on addition processing of the spectra, received by means of fast Fourier Transform procedure included new algorithms of automatic noise level detection, structure-determined noise compensation and using of optimization for LFM – signals parameters detection with approximation of detecting signal by special function are considered.