

УДК 621.391:551.510.535.

СПОСОБ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НАКЛОННОГО ЛЧМ-ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Е.С. Патронова, Ю.К. Свешников

METHOD FOR PROCESSING SIGNALS OF THE IONOSPHERE OBLIQUE CHIRP SOUNDING

E.S. Patronova, Yu.K. Sveshnikov

Рассмотрена актуальность методов зондирования ионосферы с применением ЛЧМ-сигналов и оперативного прогноза условий распространения радиоволн.

Дан способ построения и обработки ионограмм наклонного зондирования ионосферы. Приведены алгоритмы формирования спектра свертки ЛЧМ-сигнала, очистки ионограммы от аддитивных помех, разделения треков и лучей распространения сигнала зондирования. Проведен анализ влияния параметров обработки, таких как размерность быстрого преобразования Фурье, параметр усреднения, тип оконной функции, на конечные результаты обработки сигналов зондирования ионосферы.

Обоснована перспективность рассмотренного способа обработки. Представлены ионограммы наклонного зондирования ионосферы, полученные на радиотрассе Кипр–Омск.

The actuality of methods of the ionosphere sounding using the chirp signals and operative forecast of conditions of radio wave propagation is considered.

The method for constructing and processing ionograms of the ionosphere oblique sounding is considered. The algorithms for forming the spectrum of the chirp signal convolution, removing an additive noise, separation of tracks and paths of the sounding signal propagation are presented. The analysis of the influence of the processing parameters such as the length of the fast Fourier transform, parameter of averaging, type of the window function on the final results of the sounding signal processing is performed.

The prosperity of the considered method for processing is substantiated. The results of the ionosphere oblique sounding obtained on the Cyprus–Omsk radio channel are submitted.

Введение

Специфика связи в условиях КВ-диапазона определяется временными и пространственными изменениями в ионосферных структурах. При этом усредненные ежемесячные прогнозы не позволяют эффективно выбирать оптимальную частоту передачи/приема, поскольку изменения в ионосфере определяются временем суток [1].

В последнее время в области зондирования ионосферы системы с применением ЛЧМ-сигналов стали вытеснять системы с применением импульсных сигналов за счет значительного снижения требуемой мощности излучения (с 40 кВт до 10 Вт) [1]. Энергетический выигрыш ЛЧМ-ионозондов по сравнению с импульсными объясняется большой базой ЛЧМ-сигналов.

В данной статье рассматриваются алгоритмы обработки сигналов наклонного ЛЧМ-зондирования и построения ионограмм, а также проводится анализ влияния основных параметров обработки сигналов на качество результирующих ионограмм.

Дешифратор ионограмм наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы

Дешифратор ионограмм – устройство обработки сигналов, предназначенное для нахождения спектра свертки ЛЧМ-сигнала и его подробного анализа. Под ионограммой понимается зависимость амплитуды и задержки распространения радиоволны от ее частоты.

Входными данными для дешифратора ионограмм является сигнал свертки, представляющий собой произведение принимаемого и эталонного ЛЧМ-сигналов. Дешифратор ионограмм осуществляет быстрое преоб-

разование Фурье, преобразование сигнала к матричному виду, а также следующие процедуры:

- Разделение мод принятого сигнала распространения. Следы разделяемых мод на ионограмме в дальнейшем будем называть треками, а соответствующие ионограммы – ионограммами с разделением на треки.
- Определение зон в частотном диапазоне, отличающихся количеством лучей в точке приема. Ионограммы, полученные в результате выполнения данной процедуры, будем называть ионограммами с разделением на лучи.
- Отображение ионограмм.

Для построения ионограммы необходимо преобразовать данные таким образом, чтобы в дальнейшем рассчитать спектр свертки ЛЧМ-сигнала в зависимости от времени. Для этого исходная последовательность амплитуд сигнала зондирования, представленная в виде вектора, разбивается на последовательности или векторы меньшей длины $X_l(n)$, где $0 \leq l \leq [N/N_{\text{БПФ}}]$, N – количество отсчетов входного сигнала свертки, $N_{\text{БПФ}}$ – длина быстрого преобразования Фурье (БПФ). Далее каждый вектор X_l умножается на определенную весовую функцию (Хэмминга, Блэкмана, Блэкмана-Харриса) и вычисляется его спектр. Для сокращения трудоемкости нахождения спектра используется алгоритм БПФ [2].

Далее спектры векторов X_l объединяются в матрицу амплитуд A , число строк которой равно $N_{\text{БПФ}}/2$, а число столбцов $[N/N_{\text{БПФ}}]+1$. На данном этапе используется алгоритм усреднения данной матрицы по времени с целью увеличения отношения сигнал/шум. При этом каждые $K_{\text{ав}}$ столбцов матрицы A (число $K_{\text{ав}}$ столбцов – параметр усреднения) суммируются и нор-

мируются относительно $K_{ав}$. Результатом усреднения является матрица \mathbf{B} размером $N_{БПФ}/2 \times m$.

Далее необходимо выделить и отделить треки КВ-трассы друг от друга и определить, какой области частот и времени соответствует каждый из них. Для этого нужно преобразовать полученную ранее матрицу к такому виду, чтобы максимально «очистить» ее от значений, относящихся к помехам.

Алгоритм очистки от помех состоит из нескольких этапов. На первом этапе производится предварительная очистка от помех с помощью метода, называемого методом максимальных амплитуд с применением правила трех сигма. В результате применения этого алгоритма получаем матрицу \mathbf{F} .

Второй этап включает в себя алгоритм очистки по плотности и заключается в том, что полученная матрица значений \mathbf{F} разбивается на большое количество более мелких матриц \mathbf{F}_{lk} . Далее формируется матрица \mathbf{P} плотности распределения ненулевых значений амплитуды в каждой из матриц \mathbf{F}_{lk} . При значениях плотности распределения, меньших среднего значения матрицы \mathbf{P} , область матрицы \mathbf{F} , соответствующая рассматриваемой матрице \mathbf{F}_{lk} , заполняется нулевыми значениями. Таким образом, формируется матрица \mathbf{G} , содержащая значения свертки сигнала зондирования, очищенные от помех.

Полученная матрица \mathbf{G} включает в себя все треки. Теперь возникает задача отделить их друг от друга. Разделение треков производится в частотно-временной плоскости. Для разделения на треки используется разрешение по оси частот ΔF ($\Delta F \leq 1/\tau_{min}$, где τ_{min} – минимальная задержка между смежными треками) и разрешение по оси времени ΔT ($\Delta T \geq 1/f_{st}$, где f_{st} – ширина предполагаемых стационарных и промышленных помех).

Далее каждое из значений матрицы \mathbf{G} обособляется в отдельные векторы для частот, моментов времени и амплитуд в соответствии с принадлежностью их к интервалам ΔF и ΔT . Полученные в результате обособления векторы представляют собой данные для построения ионограмм с разделением на треки. Количество полученных векторов равно количеству треков распространения.

Анализ многолучевого распространения осуществляется по шкале времени. При этом нужно учесть, что в случае однолучевого распространения сигнал занимает некоторую полосу ΔF_b частот (ширина трека). Значения, соответствующие конкретному временному значению, записываются в одноименные строки матриц амплитуд и частот по принадлежности их к различным интервалам ΔF_b . Затем по количеству полученных строк матриц определяется количество лучей для этого временного отсчета. Соответствующие ему значения амплитуд и частот заносятся в матрицы, предназначенные для данного количества лучей.

Далее ось значений частоты свертки ЛЧМ-сигнала преобразуется в ось задержки, а ось времени – в ось частот.

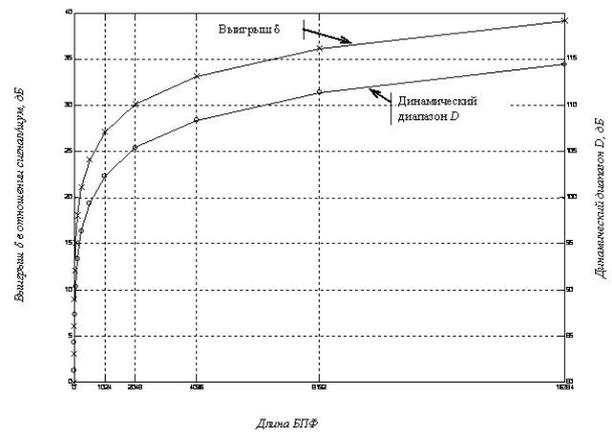


Рис. 1. График зависимостей динамического диапазона D от длины БПФ и выигрыша в отношении сигнал/шум от длины БПФ.

Выбор параметров обработки ЛЧМ-сигнала зондирования

Одним из параметров, влияющих на качество получаемой ионограммы, является размерность БПФ.

Оценим, как влияет изменение размерности БПФ на отношение сигнал/шум.

Предположим, что в канале связи действует аддитивная помеха в виде белого гауссова шума, а энергия сигнала при вычислении БПФ не зависит от его длины. При этом будем считать, что вычисление БПФ выполняется без применения оконной функции.

Применение БПФ с длиной $N_{БПФ}$ обеспечивает выигрыш δ в отношении сигнал/шум по сравнению с БПФ с длиной 2 и изменение динамического диапазона D ЛЧМ-приемника в соответствии с графиками, представленными на рис. 1, выражения для этих параметров можно получить из [3] и [4].

Проанализировав полученные зависимости $\delta(N_{БПФ})$ и $D(N_{БПФ})$, можно увидеть, что с увеличением параметра $N_{БПФ}$ на участке $N_{БПФ} > 8192$ выигрыш в отношении сигнал/шум и динамический диапазон ЛЧМ-приемника увеличиваются незначительно, по сравнению с участком $N_{БПФ} < 8192$. При этом количество операций БПФ изменяется, как $N_{БПФ} \log_2(N_{БПФ})$, т.е. с увеличением параметра $N_{БПФ}$ трудоемкость вычислений растет быстрее, чем эффективность, достигаемая при этом. Поэтому в реальных устройствах оптимальным значением длины БПФ можно считать величину не более 16384.

На отношение сигнал/шум также влияют такие параметры, как весовая функция и параметр усреднения.

Рассмотрим случай, когда составляющие полезного сигнала в смежных каналах БПФ не оказывают влияния друг на друга. Тогда при использовании оконной функции с коэффициентами $\{w\}$ для величины δ в соответствии с [4] нетрудно получить формулу:

$$\delta = 10 \lg \left(\frac{\left(\sum_{i=0}^{N_{\text{эфб}}-1} w(i) \right)^2}{2 \sum_{i=0}^{N_{\text{эфб}}-1} w^2(i)} \right). \quad (1)$$

Оценим влияние параметра $K_{\text{ав}}$ усреднения на отношение сигнал / шум.

Для более простого случая, когда на рассматриваемом интервале напряжение сигнала постоянно, отношение сигнал/шум можно выразить следующей формулой

$$h = K_{\text{ав}} \frac{u_c^2}{D_{\text{ш}}}, \quad (2)$$

где u_c – напряжение сигнала,
 $u_{\text{ш}}$ – напряжение шума,

$$D_{\text{ш}} = \frac{\sum_{i=1}^{K_{\text{ав}}} u_{\text{ш}}^2(i)}{K_{\text{ав}}} \text{ – дисперсия отсчетов шума.}$$

При этом значение параметра усреднения ограничено размером матрицы \mathbf{A} и необходимым разрешением по частоте результирующей ионограммы.

Ионограммы, полученные при испытании ЛЧМ-приемника

На рис. 2 представлена ионограмма ЛЧМ-сигнала зондирования, полученная на радиотрассе Кипр–Омск. На рис. 3 – та же ионограмма, подвергнутая обработке, с разделением на треки. На рис. 4 – та же ионограмма, подвергнутая обработке, с разделением лучей распространения.

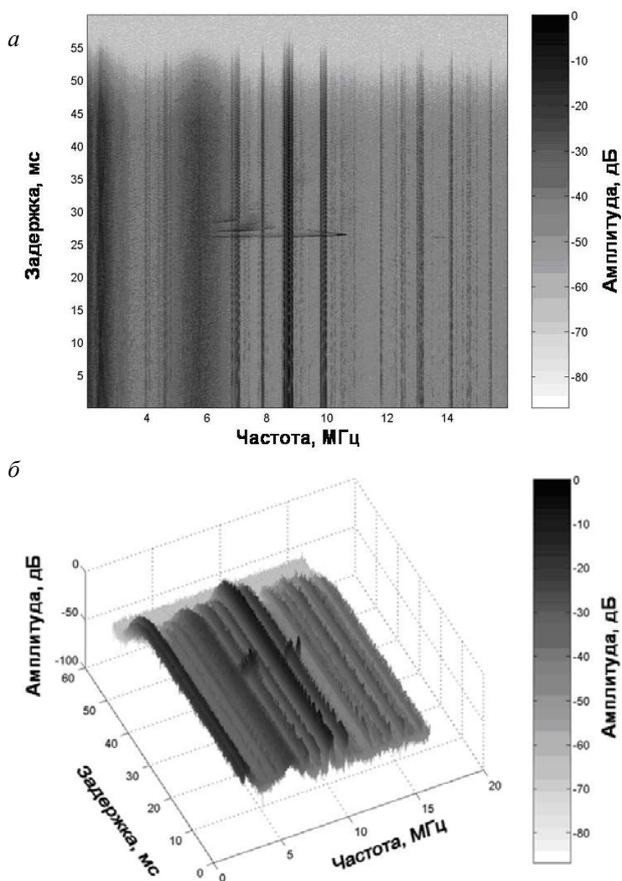


Рис. 2. Пример ионограмм наклонного ЛЧМ-зондирования, полученной на радиотрассе Кипр–Омск: *a* – двумерная (*a*) и трехмерная (*b*).

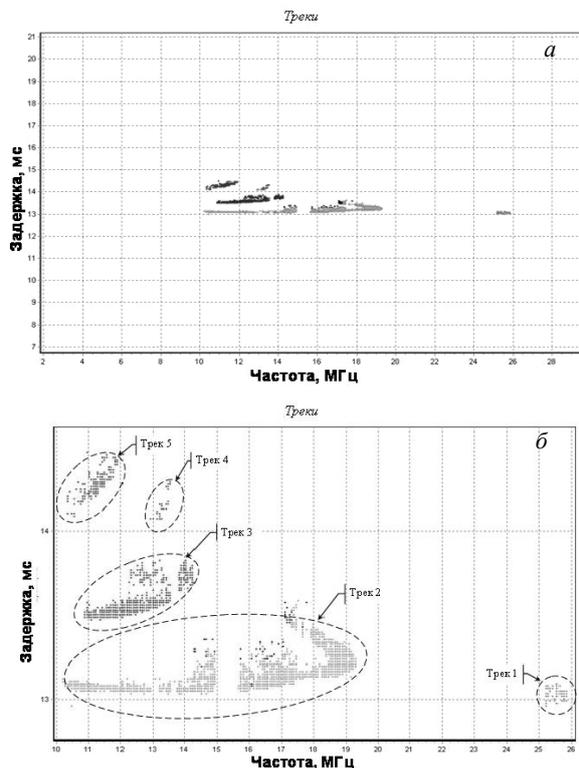


Рис. 3. Пример обработанной ионограммы наклонного ЛЧМ-зондирования с разделением на треки, полученной на радиотрассе Кипр–Омск: *a* – общий вид ионограммы, *b* – ионограмма в увеличенном масштабе.

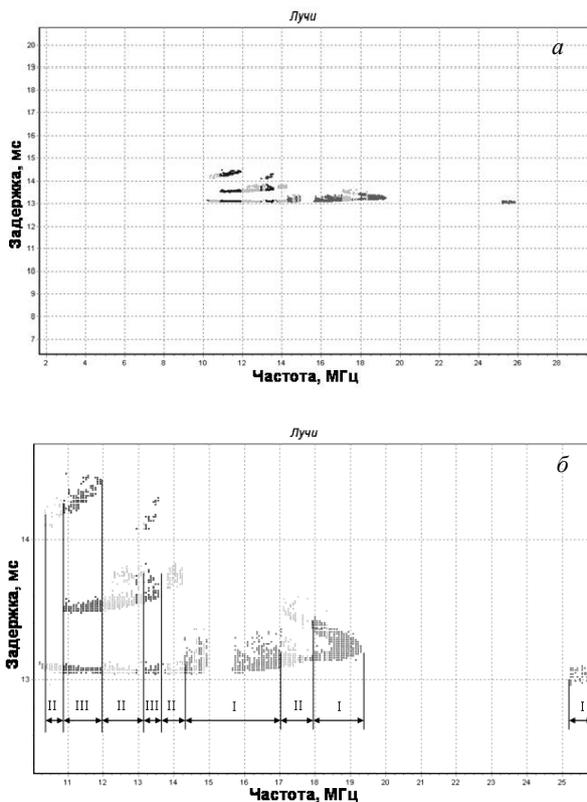


Рис. 4. Пример ионограммы наклонного ЛЧМ-зондирования с разделением лучей, полученной на радиотрассе Кипр–Омск: *a* – общий вид ионограммы, *b* – ионограмма в увеличенном масштабе (I – область ионограммы с однолучевым распространением, II – с двухлучевым распространением, III – с трехлучевым распространением).

Заключение

В данной работе выполнена оценка влияния основных параметров обработки на качество построения ионограммы; основным критерием этой оценки является выигрыш δ в отношении сигнал/шум.

Для проверки рассмотренного алгоритма дешифрирования ионограмм был разработан и изготовлен макет цифрового приемника. С помощью данного ЛЧМ-приемника были получены ионограммы на радиотрассах Кипр–Омск и Инскип–Омск. В данной работе приведены ионограммы наклонного ЛЧМ-зондирования, полученные на радиотрассе Кипр–Омск: ионограмма после выполнения БПФ и усреднения, ионограмма с разделением на треки и ионограмма с разделением на лучи.

Приведенные экспериментальные данные показали перспективность описанного метода обработки сигналов ЛЧМ-зондирования, в котором были решены задачи первичной обработки (обнаружение сигнала свертки и увеличение отношения сигнал/шум) и конечной обработки (выделение треков и определение зон с различной многолучевостью).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А., Рябова Н.В., Шумаев В.В. Основы радиотехнических систем ДКМ-диапазона: Учеб. пособие. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. 204 с.
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.
3. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Советское радио, 1970. 728 с.
4. Глинченко А.С. Цифровая обработка сигналов: Учеб. пособие: Ч. 2. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. 184 с.
5. Побережский Е.С. Цифровая обработка сигналов и некоторые проблемы построения КВ приемников с цифровым гетеродином. 1974. 16 с. (депонированная рукопись).

*Омский научно-исследовательский институт приборостроения,
Омск.*