

а u -е поле коэффициентов разложения —

$$\hat{p}_u = Q^T \left(\sum_{i=1}^V M_i^T (B^T B)^{-1} B^T \hat{p}_u e_i^T \right) R.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блэйхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов.— М.: Мир, 1989.
2. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применения.— М.: Наука, 1968.

Поступила в редакцию 19 декабря 1990 г.

УДК 621.396.95 : 521.32

А. Г. ОГАНЕСЯН, И. Б. ЧАЙКОВСКИЙ

(Львов)

КЕПСТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ МОРСКИХ ЛЬДОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЛИНЕЙНОГО ПРЕДСКАЗАНИЯ

Введение. Работа радиолокационных измерителей толщины льда (РЛ ИТЛ) основана на временном разделении сигналов от верхней и нижней поверхностей льда, т. е. определении взаимного временного сдвига, который несет информацию о толщине льда. Сложность состоит в том, что радиопрозрачность морских льдов ограничена метровым диапазоном волн и для улучшения разрешения нельзя использовать наносекундные импульсы. Кепстральные методы цифровой обработки отраженного сигнала позволяют в какой-то мере преодолеть это препятствие [1, 5].

Кепстр мощности определяется выражением [1]

$$C_n = |\text{ДПФ}(\ln(|\text{ДПФ}(S_n)|^2))|^2, \quad (1)$$

в котором S_n — отраженный сигнал, преобразованный в дискретную форму; $\text{ДПФ}(\cdot)$ — дискретное преобразование Фурье; $P_n = |\text{ДПФ}(S_n)|^2$ — спектр мощности; $L_n = \ln P_n$ — логарифмический спектр мощности (лог-спектр). Вычислительная процедура (1) содержит два ДПФ, которые обычно вычисляются с помощью быстрого алгоритма (БПФ). Вторичное применение БПФ не позволяет с необходимой точностью определять задержки, так как разрешающая способность в кепстральной области определяется полосой пропускания приемника и известные методы ее повышения здесь непригодны из-за того, что логспектр непериодического сигнала имеет бесконечную протяженность. Кроме того, временные окна, дважды используемые при вычислении кепстра, также не позволяют получать необходимое разрешение. Наконец, сверточные компоненты, появляющиеся при преобразованиях Фурье, приводят к возникновению в кепстре ложных линий, затрудняя извлечение из него достоверной информации о задержке.

Для устранения аналогичных сложностей при обработке изображений, речевых и некоторых иных сигналов вторичное БПФ заменялось моделированием логспектра методом линейного предсказания. Естественно было проверить эту же методику при обработке отраженных морскими льдами сигналов. Для этой цели может быть использован рекурсивный фильтр Винера, предназначенный для предсказания очередного отсчета стационарного временного ряда по настоящему и прошлым значениям этого ряда и оценке спектральной плотности мощности. Если отраженный сигнал задан набором отсчетов логспектра мощности L_n , то предсказание на один отсчет имеет вид

$$\hat{L}_n = - \sum_{k=1}^p a_k L_{n-k}, \quad (2)$$

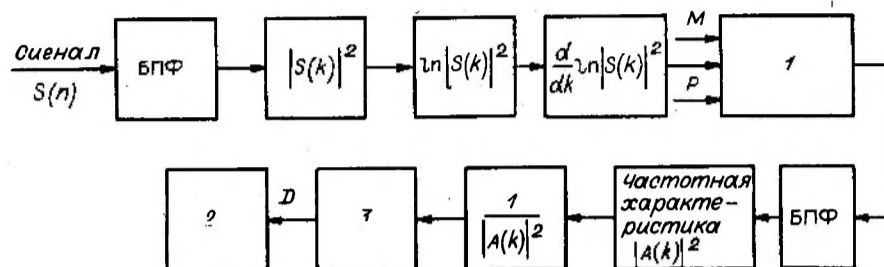


Рис. 1. Блок-схема цифровой обработки сигналов на ЭВМ:
 1 — линейный цифровой фильтр предсказания ошибки, заданный набором коэффициентов;
 2 — статистический анализ; 3 — выделение задержки и вычисление толщины льда

где a_k — коэффициенты предсказывающего фильтра; p — порядок фильтра, а ошибка предсказания равна

$$e_n = L_n - \hat{L}_n. \quad (3)$$

Существует несколько способов определения коэффициентов предсказывающего фильтра: автокорреляционный, корреляционный [2], а также метод на основе лестничного фильтра, который и использован в этой работе.

Можно ожидать, что последовательность ошибок предсказания будет почти некоррелированной с равномерным спектром мощности. Из этого следует, что предсказывающий фильтр подавляет влияние сложного анализируемого сигнала и создает на выходе последовательность ошибок предсказания. Спектральная плотность мощности анализируемой последовательности равна

$$P_n = K/|A_n|^2, \quad (4)$$

где K — коэффициент усиления; $A_n = \text{БПФ}(a_k)$ — частотная характеристика предсказывающего фильтра. Таким образом, задача спектрального анализа логспектра отраженного сигнала сводится к синтезу фильтра.

Линейное предсказание выполняется на ограниченном количестве данных, поэтому для получения статистически устойчивых оценок полезно использование принципа максимальной энтропии [3]. Этот принцип разработан для стационарных процессов, и применение его для анализа логспектра мощности отраженного морским льдом сигнала (который в общем случае нельзя считать стационарным) требует предварительного устранения тренда. Этого можно достигнуть дифференцированием. Блок-схема изложенного алгоритма показана на рис. 1. Программа определения коэффициентов предсказывающего фильтра составлена на основе [4].

Имитационные испытания. Для оценки возможностей алгоритма проводились эксперименты с сигналами цифрового имитатора при отношениях сигнал/шум 50—190 дБ и толщинах морского льда в пределах 0,1—2,0 м, задаваемых датчиком случайных коррелированных чисел, распределенных по закону Рэлея. В качестве зондирующих сигналов использовались радиоимпульсы

$$X(iT) = (1 - \exp(-0,1iT)) \exp(-0,1iT) \sin(0,5iT), \quad (5)$$

где T — период дискретизации, равный 0,24 нс (морской лед — среда диспергирующая, поэтому необходимо задавать абсолютные значения частоты или времени), $i = 0, 1, \dots, 255$. Исследования проводились с двумя зондирующими сигналами разной длительности. Работоспособность алгоритма оценивалась по среднеквадратичной погрешности измерений толщины льда

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d_{i0})^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d_{i0}) \right)^2, \quad (6)$$

где d_i и d_{i0} — измеренное и истинное значения толщины льда соответственно, поскольку истинная толщина льда известна. В случае же реальных сигналов такой информации нет. Чтобы улучшить достоверность сравнительного анализа результатов имитационных и натуральных испытаний, необходим способ устранения сбоев, пригодный в обоих случаях. Использовался следующий прием: результат каждого независимого измерения толщины льда сравнивался со средневзвешенной величиной

$$D_n = \sum_{i=0}^n d_i V_i / \sum_{i=0}^n V_i, \quad (7)$$

где $V_i = W^i$ — экспоненциальная весовая функция, и если

$$d_n - D_n > 0,5D_n, \quad (8)$$

то фиксировался сбой и текущее измерение d_n заменялось на D_n . Одновременно вычислялось и относительное количество сбоев. Имитационные эксперименты позволили определить оптимальные параметры алгоритма: пороговое значение потенциала F_n , при котором резко увеличиваются погрешность измерений (под потенциалом, точнее, энергетическим потенциалом понимается отношение мощности передатчика к мощности шумов на выходе приемника, вычисленное за период повторения сигнала), число отсчетов сигналов M , порядок фильтра p . На рис. 2 показаны зависимости погрешности σ от потенциала F для двух зондирующих сигналов разной длительности. Виден резкий рост погрешности при уменьшении потенциала ниже 90—100 дБ. Для нахождения оптимального числа отсчетов проводились имитационные исследования при фиксированных значениях $F = 100$ дБ и порядке фильтра $p = 12$, результаты которых приведены на рис. 3. Оказалось, что зависимость погрешности от количества отсчетов в сигнале имеет минимум, равный при выбранных параметрах 48. Аналогично определялся оптимальный порядок предсказывающего фильтра, который оказался равным 12 (рис. 4). Во всех случаях минимальная погрешность измерений составляет 12—15% и соответствует точности измерений толщины льда другими методами [5].

Летные испытания. В 1985 г. при полетах в Арктике на борту самолета выполнялась запись сигналов, отраженных морскими льдами раз-

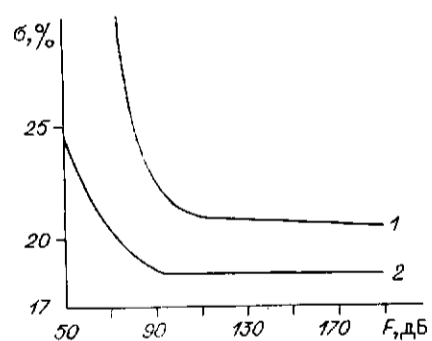


Рис. 2. Графики зависимостей среднеквадратичной погрешности σ от потенциала F для двух зондирующих сигналов разной длительности: 20 (кривая 1) и 5 мс (2)

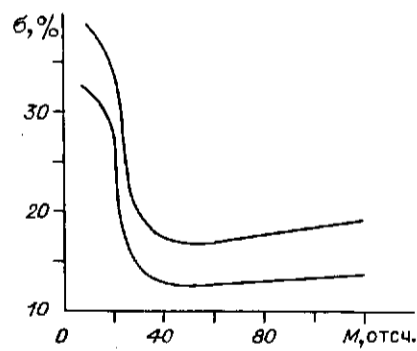


Рис. 3. Графики зависимостей среднеквадратичной погрешности от числа отсчетов входных данных (логарифмического спектра мощности сигнала) для двух зондирующих сигналов разной длительности

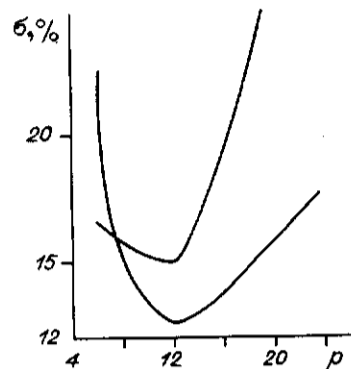


Рис. 4. Графики зависимостей σ от ρ для двух зондирующих сигналов разной длительности

личных типов и толщины. Запись велась в аналоговой форме на магнитную ленту. Сигналы с этих лент в дальнейшем перезаписывались уже в цифровой форме на другие магнитные ленты, которые обрабатывались в стационарных условиях вычислительного центра.

В отличие от обработки сигналов цифрового имитатора методика оценки результатов обработки реальных сигналов иная. Это связано с тем, что истинная толщина льда

неизвестна, так как нет бортовых образцовых РЛ ИТЛ. Реальное распределение толщины льда на трассе полета можно получить бурением в отдельных точках и непосредственным измерением мерной линейкой. Однако работа эта в условиях Арктики очень трудоемка. Поэтому для оценки среднеквадратичной погрешности использован квазисинхронный метод, разработанный в [6], который позволяет обходиться без бурения. Эта методика основана на достаточно сильной корреляции соседних измерений толщины льда, поскольку за время между двумя зондирующими сигналами (1/300 с) самолет с РЛ ИТЛ перемещается на незначительное расстояние. Толщина льда за столь малый промежуток почти не изменится, т. е. истинные значения d_{i0} и d_{i0+1} можно считать практически одинаковыми. В [6] доказано, что в этом случае среднеквадратичная погрешность измерения равна среднеквадратичному значению последовательности $\Delta d_i = d_i - d_{i+1}$.

Полеты выполнялись над участками припая с относительно ровной поверхностью. Толщина льда во время полета оценивалась гидрологами визуально. Обработка сигналов рассмотренным выше алгоритмом показала довольно сильное отличие полученных результатов от других методов обработки и визуальных оценок. Например, участок ровного припая со средней толщиной около 1,2 м после вывода на ЭВМ профиля трассы оказывался довольно торосистым, и оценка погрешности методом соседних отсчетов составляла примерно 30%. Анализ кенстров реальных сигналов показал, что причина состоит в следующем. В отличие от кенстральных функций моделей сигналов с четко выраженными всплесками, соответствующими заданной толщине, кенстры реальных сигналов имеют несколько максимумов, маскирующих истинный. Многопиковый характер кенстров объясняется тем, что в пределах площадки, формирующей отраженный сигнал, практически всегда имеются неровности, дающие боковые отражения. Можно было ожидать, что положение в кенстре пиков отражений от неровностей нерегулярно, тогда как положение информационного пика, соответствующего нижней поверхности льда, должно быть более стабильным на ограниченном отрезке трассы. По этой причине накопление кенстральных функций должно привести к усилению информационных пиков и подавлению побочных [7]. Эксперимент полностью подтвердил это предположение. Применялось экспоненциальное накопление кенстров с эффективным количеством 20, соответствующим коэффициенту обратной связи накопителя, равному 0,954. Накопление существенно улучшило различимость информационного пика в кенстре отраженного сигнала (рис. 5) и снизило оценку погрешности с 30 до 2—4%. Улучшения результатов при изменении количества накапливаемых кенстров более 20 не наблюдалось.

Разработанные алгоритмы и программы применялись при обработке сигналов на ЭВМ ЕС-1022 с быстродействием $8 \cdot 10^4$ опер./с. Среднее время между поступлением сигнала на обработку (считывание его с носителя на магнитной ленте) и выдачей значения толщины льда составляет примерно 4 с, что явно неприемлемо для работы в реальном вре-

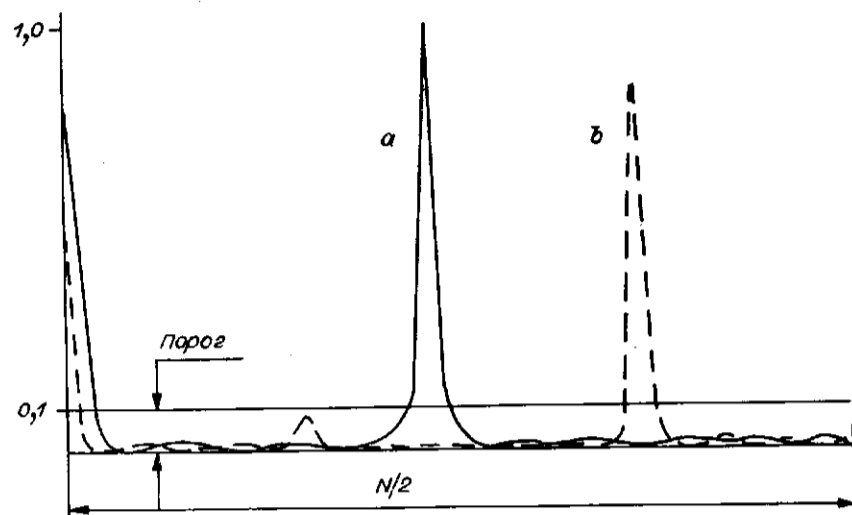


Рис. 5. Кепстры сигналов, отраженных ото льдов разной толщины:
 a — 0,8 м; b — 1,28 м

мени. Применение предложенных алгоритмов на борту летательного аппарата будет реализовано в бортовой ЭВМ на микропроцессорах. Поэтому допустимое быстродействие и необходимый объем оперативной памяти требуют специального рассмотрения.

ВЫВОДЫ

Использование линейного предсказания при формировании кепстра отраженного морскими льдами сигнала значительно уменьшает помехи и улучшает различимость информационного пика. Однако при этом положение информационного пика сдвигается и выигрыша в точности измерений практически не наблюдается. Существенный выигрыш в точности появляется, если одновременно используется накопление кепстра отраженного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чайлдере Д. Дж., Скивнер Д. П., Кемерейт Р. И. Кепстр и его применение при обработке данных // ТИИЭР.— 1977.— 65, № 10.
2. Макхол Дж. Линейное предсказание // ТИИЭР.— 1975.— 63, № 4.
3. Джейнс Э. Т. О логическом обосновании методов максимальной энтропии // ТИИЭР.— 1982.— 70, № 9.
4. Marple L. A new autoregressive spectrum analysis algorithm // IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Proc.— 1980.— ASSP-28, № 4.— P. 441.
5. Богородский В. В., Боярский В. И., Оганесян А. Г. Автоматическая радиолокационная диагностика морских льдов и снежных покровов // Материалы семинара «Атмосфера — Океан — Космос».— М.: АН СССР, 1984.
6. Богородский В. В., Оганесян А. Г. О погрешности методики летных испытаний радиолокационных измерителей толщины льда // ЖТФ.— 1985.— 55, № 6.— (Препр.; 78).
7. Богородский В. В., Оганесян А. Г. О сглаживании показаний радиолокационных измерителей толщины льда: Труды ААШИ.— Л.: Гидрометеоздат, 1985.— Т. 395.

Поступила в редакцию 5 декабря 1988 г.