

МЕТОДЫ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

А.И. ЛИТВИН-ПОПОВИЧ

Рассматриваются методы вторичной обработки информации в радиолокационных системах вертикального зондирования атмосферы, учитывающие пространственно-временную инерционность среды распространения радиоволн. Приведенные методы позволяют снизить случайные погрешности оценивания динамических параметров атмосферы, что проиллюстрировано результатами имитационного моделирования.

Ключевые слова: вторичная обработка, радиолокационная метеорология, обработка временных рядов, имитационное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия радиолокационных систем вертикального зондирования атмосферы (РЛС ВЗ) основан на регистрации сигналов, рассеянных на атмосферных образованиях, коэффициент диэлектрической проницаемости которых отличен от среднего коэффициента диэлектрической проницаемости атмосферного воздуха [1]. Измерение параметров рассеянных сигналов позволяет оценить динамические параметры атмосферы, в частности направление и скорость ветра.

Вследствие наличия на входе приемного тракта РЛС шумов и помех, возникают случайные погрешности и промахи измерения скорости ветра. Оценка скорости ветра оказывается смещенной — её среднее значение отличается от истинного значения скорости ветра на некоторую величину Δv , то есть $v' = v + \Delta v$.

Многим потребителям метеорологической информации интересны оценки средних значений динамических параметров атмосферы. Такие оценки используются при анализе крупномасштабных метеорологических явлений, воздушных течений, в задачах расчета ветроэнергетических установок. Как правило, результаты измерений для этих целей усредняют за время в единицы секунд — десятки минут.

При осреднении оценок случайные погрешности снижаются: $\bar{v}' = \bar{v} + \Delta v / N$, где N — число независимых результатов измерений, использованных при осреднении. Дальнейшее снижение погрешностей может быть достигнуто за счет вторичной обработки полученных высотно-временных зависимостей динамических параметров атмосферы.

Атмосфера — инерционная среда, в связи с этим динамические параметры не могут изменяться мгновенно со временем или с высотой. Априорный учет этого свойства среды при разработке методов вторичной обработки и контроля качества результатов дает возможность снизить погрешности оценивания осредненного профиля скорости ветра, а также высотно-временных зависимостей скорости ветра.

1. МОДЕЛЬ ВЫСОТНО-ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА

Разработку и верификацию методов вторичной обработки высотно-временных зависимостей скорости ветра удобно проводить на имитационной модели. Разработка модели начинается с анализа параметров вариаций скорости, полученных по имеющимся результатам зондирования атмосферы. Графики на рис. 1...6 построены по массиву результатов зондирования тропосферы радиолокационной станцией дециметрового диапазона [1]. Суммарная продолжительность сеансов измерений превышает 100 часов, измерения проводились в различных погодных условиях в течение 2004-2007 гг. Высотный диапазон зондирования составлял 300...6000 метров.

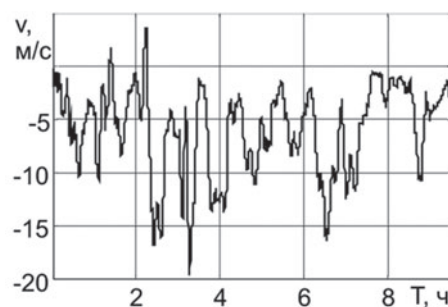


Рис. 1. Пример регистрации вариаций скорости ветра (высота 1200 метров, общее время регистрации 10 часов)

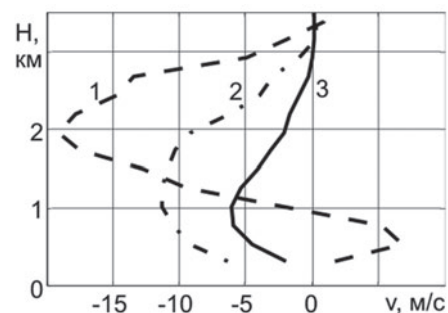


Рис. 2. Высотный профиль скорости ветра (время усреднения 1 минута (1), 5 минут (2), 2 часа (3))

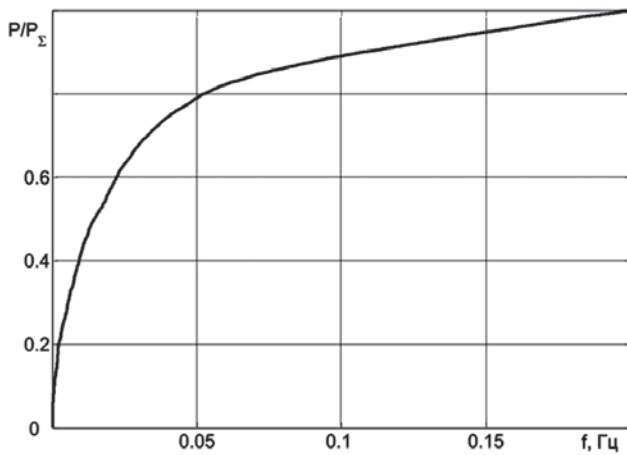


Рис. 3. Интегральное распределение энергии по спектру вариаций скорости ветра

Более 80% энергии вариаций сосредоточено в полосе 0...0.08 Гц (рис. 3). В дальнейшем разделим вариации скорости ветра на низко- и высокочастотные. Критерием разделения является распределение энергии по спектру вариаций. На рис. 4 показана автокорреляционная функция низкочастотных вариаций скорости ветра. Корреляционная функция имеет вид экспоненты.

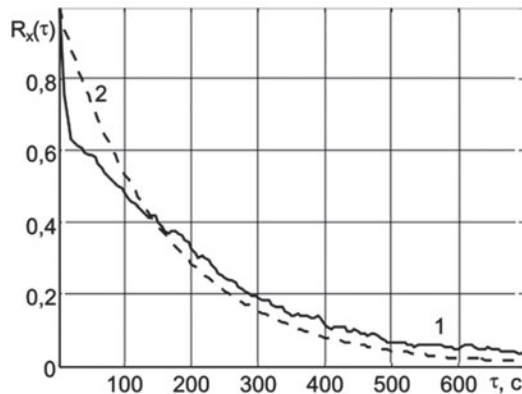


Рис. 4. Автокорреляционная функция вариаций скорости ветра (1 — построенная по данным зондирования, 2 — аппроксимация экспонентой)

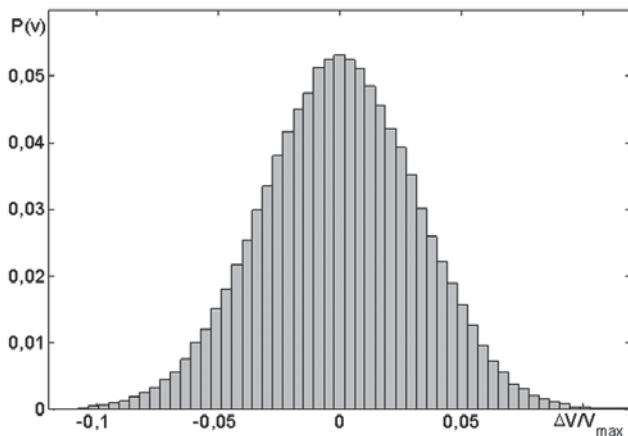


Рис. 5. Гистограмма распределения флуктуационной скорости ветра

На рис. 5 приведена гистограмма распределения высокочастотных вариаций скорости ветра.

Проверка по критерию Колмогорова-Смирнова показывает, что на уровне значимости 0.95 закон распределения флуктуационной (высокочастотной) составляющей вариаций скорости ветра — нормальный. Для моделирования можно принять, что зависимость скорости ветра от времени является экспоненциально-коррелированным узкополосным случайным процессом, на который накладывается белый шум, имитирующий высокочастотные флуктуации ветра, а также выбросы, имитирующие промахи измерений скорости ветра. Задача вторичной обработки результатов, таким образом, может быть сформулирована как выделение узкополосного экспоненциально-коррелированного случайного сигнала из его смеси с широкополосным некоррелированным шумом и импульсными помехами.

Значения динамических параметров атмосферы в соседних высотных слоях коррелированы. Взаимная корреляционная функция, полученная усреднением по имеющимся результатам измерений, показана на рис. 6. Функция корреляции по высоте также подобна экспоненте.

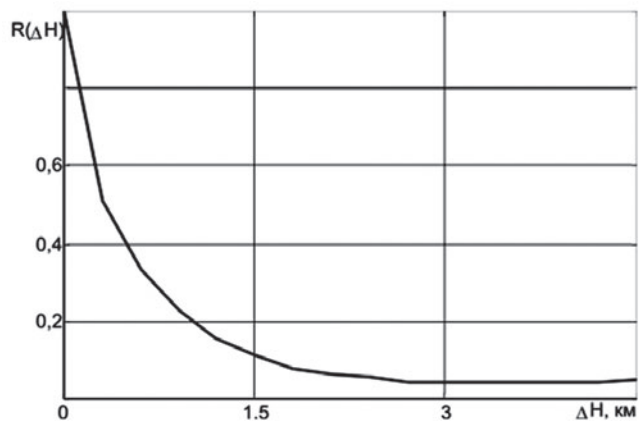


Рис. 6. Взаимная корреляционная функция скорости ветра в разных высотных слоях

Высотно-временное поле скорости ветра можно представить в виде $v = v_k + v_r$. Здесь v_k — двумерный экспоненциально-коррелированный случайный процесс, описывающий медленные вариации скорости ветра, а v_r — двумерный нормально распределенный случайный процесс (быстрые вариации скорости).

2. МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ

В данной статье рассматриваются следующие методы фильтрации, учитывающие высотно-временную инерционность атмосферных процессов:

1. Сглаживающий фильтр (СФ)
2. Медианный фильтр (МФ)
3. Фильтр полиномиальной регрессии (ФПР)
4. Адаптивный фильтр (АФ)
5. Вейвлет-шумоподаватель (ВШ)
6. Шумоподавление в базисе Фурье (ФШ) для временных зависимостей параметров.

Метод СФ заключается в применении фильтра нижних частот (фильтр «скользящего среднего») к реализации параметров атмосферы [2].

Частота среза фильтра выбрана в соответствии со спектром вариаций динамических параметров атмосферы. Метод МФ предполагает медианную фильтрацию реализаций параметров атмосферы. В методе ФПР проводится определение коэффициентов аппроксимирующего полинома методом наименьших квадратов. Метод АФ реализует адаптивный фильтр-шумоподаватель, причем опорным сигналом для него служит та же реализация параметров, только задержанная на время, меньшее интервала корреляции [2].

Шумоподавление в базисе Фурье и вейвлет-функций основано на обнулении коэффициентов разложения, меньших определенной пороговой величины [2-4]. Для узкополосных процессов, к которым относятся и обрабатываемые временные ряды, в пределах их полосы отношение сигнал/шум существенно выше, чем в среднем по диапазон частот. За счет этого, пороговой обработкой в частотной области можно получить выигрыш в отношении сигнал/шум $\Delta q \leq 10 \log(1/\Delta f)$, где Δf – относительная ширина полосы полезного сигнала (нормированная к частоте Найквиста [2]). Для обрабатываемых временных рядов величина $\Delta f \approx 0.4$, что дает предельный выигрыш порядка 3.9 дБ. Эта величина достижима лишь в том случае, если границы спектра полезного сигнала определены верно.

Для сглаживающих фильтров предельный выигрыш в соотношении сигнал/шум можно оценить как $\Delta q = 10 \log(1/F_{\max})$, где $F_{\max}$ – максимальная частота в спектре полезного сигнала. Поскольку в общем случае $F_{\max} \geq \Delta f$, то для данного метода ожидаемый выигрыш меньше, чем для методов шумоподавления в базисах Фурье и вейвлет-функций.

3. ПРОЦЕДУРА МОДЕЛИРОВАНИЯ

По имеющимся результатам зондирования был синтезирован фильтр нижних частот, квадрат АЧХ которого совпадает со спектром мощности вариаций скорости ветра. Реализации зависимостей $x(t)$ получены пропуском белого гауссового шума (БГШ) через этот фильтр. Далее проводилось суммирование реализаций с белым гауссовым шумом и импульсными помехами для получения заданных отношений сигнал/шум и сигнал/помеха. Для методов двумерной фильтрации процедура аналогична, только исходный шум представлен двумерным массивом, и процесс формируется двумерным фильтром нижних частот.

В качестве метрики, характеризующей близость исходной и отфильтрованной реализаций, принято среднеквадратическое отклонение (СКО):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - x'_i)^2},$$

где x и x' – соответственно, исходная и отфильтрованная реализации. Для упрощения интерпретации результатов, эта величина нормируется к СКО исходной зависимости:

$$\sigma(x - x') / \sigma(x).$$



Рис. 7. К пояснению процедуры имитационного моделирования

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЛЬТРОВ ОДНОМЕРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Эффективность применения процедур фильтрации, рассмотренных в статье, зависит от корректности выбора параметров фильтров. К таким параметрам относятся:

- Для сглаживающего и медианного фильтров, а также для фильтра полиномиальной регрессии и адаптивного фильтра – порядок.
- Для вейвлет-шумоподавателя и шумоподавателя в базисе Фурье – порог ограничения.

Оптимальные значения этих параметров могут быть определены с помощью метода имитационного моделирования. При этом используется следующий функционал качества:

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^N \sigma(\alpha, \gamma_i) / \max(\sigma(\gamma_i)). \quad (1)$$

В (1) приняты такие обозначения: α – искомый параметр, γ_i – i -е значение мешающего фактора (мощности аддитивного шума или импульсных помех), $\sigma(\alpha, \gamma_i)$ – значение среднеквадратического отклонения оценки реализации при параметре, равном α , и значении мешающего фактора γ_i , $\max(\sigma_i)$ – максимальное значение среднеквадратического отклонения оценки при γ_i . Процедура отыскания оптимальных значений параметров проводится путем минимизации функционала (1). Минимум функционала соответствует наименьшему значению отклонения оценки значения параметра от его истинной величины.

Зависимости функционала качества от параметров фильтров приведены на рис. 8...9 для рассмотренных в статье фильтров одномерных зависимостей. На рис. 6 приведены зависимости для фильтровых методов (СФ, МФ, ФПР, АФ), а на рис. 7 – для методов шумоподавления на базе процедур спектрального анализа. Рис. 6а, 7а приведены для аддитивной шумовой помехи, а 6б, 7б – для импульсных помех.

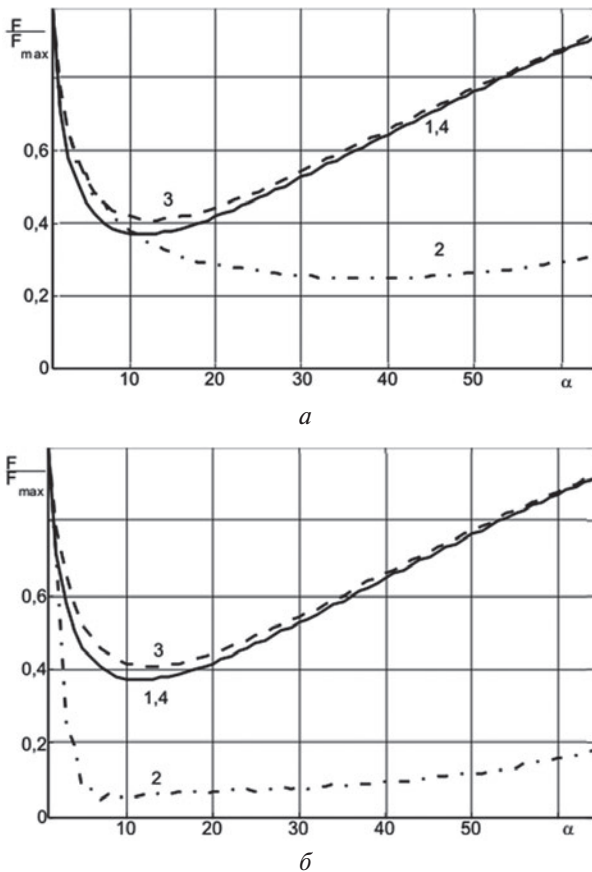


Рис. 8. Зависимость функционала качества работы системы от порядка фильтра:

1 – СФ, 2 – МФ, 3 – ФПР, 4 – АФ

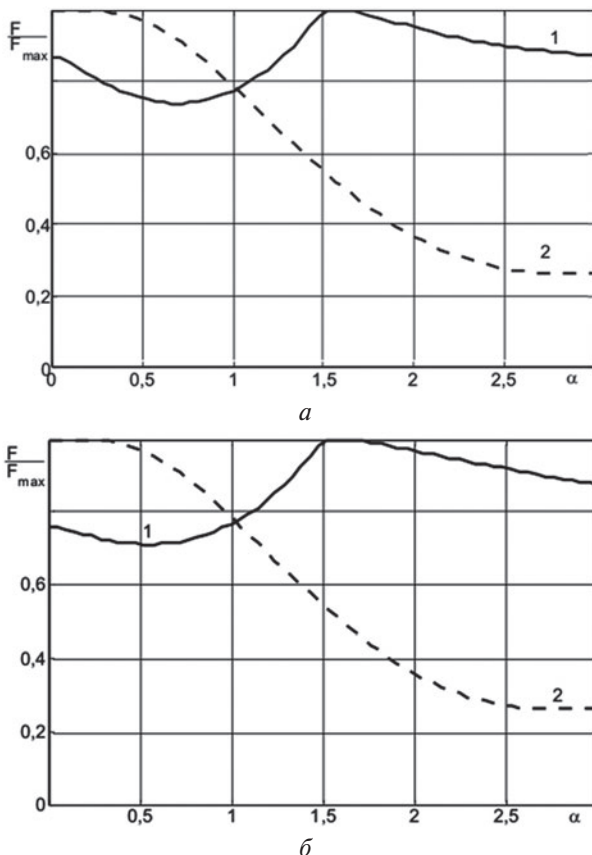


Рис. 9. Зависимость функционала качества работы системы от порога, устанавливаемого в методах ВШ (1) и ФШ (2)

По результатам моделирования определены следующие оптимальные значения параметров для случая помехи вида аддитивного белого гауссова шума: СФ – порядок фильтра 12, МФ – размер окна 38 отсчетов, ФПР – порядок фильтра 15, АФ – порядок фильтра 12, ВШ – порог 0.7, ФШ – порог 2.75. При этом для разных методов фильтрации чувствительность к изменению параметров неодинакова.

Для случая аддитивных импульсных помех оптимальные значения параметров следующие: СФ – порядок фильтра 12, МФ – размер окна 7 отсчетов, ФПР – порядок фильтра 13, АФ – порядок фильтра 12, ВШ – порог 0.52, ФШ – порог 2.81.

5. ФИЛЬТРЫ ДВУМЕРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Рассмотренные в предыдущем разделе фильтры учитывают лишь временную инерционность параметров среды. Рассмотрим следующие методы фильтрации высотно-временных зависимостей динамических параметров атмосферы:

1. Двумерный сглаживающий фильтр (СФ2).
2. Двумерный медианный фильтр (МФ2).
3. Двумерный фильтр полиномиальной регрессии (ФПР2).
4. Двумерный вейвлет-шумоподаватель (ВШ2).
5. Двумерный шумоподаватель в базисе Фурье (ФШ2).
6. Двумерный шумоподаватель, основанный на дискретно-косинусном преобразовании (ДШ2).

Действие данных методов аналогично рассмотренным ранее одномерным, с той лишь разницей, что используются двумерные сигналы и процедуры фильтрации и анализа двумерных сигналов.

По аналогии с методами одномерной фильтрации, необходимо определить оптимальные параметры данных фильтров. Для этого используем ранее описанную имитационную модель, расширив ее на двумерный сигнал с экспоненциальной функцией корреляции по обоим измерениям (по времени и по высоте, соответственно).

Оптимизацию проводим по ранее приведенной формуле функционала качества (1). При этом среднеквадратическое отклонение определяется как:

$$\sigma(x - x') = \sqrt{\frac{1}{(T-1)(H-1)} \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H (x(t, h) - x'(t, h))^2}.$$

Зависимость функционала качества от параметров фильтров приведена на рис. 10-11. На рис. 10 приведены зависимости для фильтровых методов (СФ2, МФ2, ФПР2), а на рис. 11 – для методов шумоподавления на базе процедур спектрального анализа. Рис. 10а, 11а приведены для аддитивной шумовой помехи, а 10б, 11б – для импульсных помех.

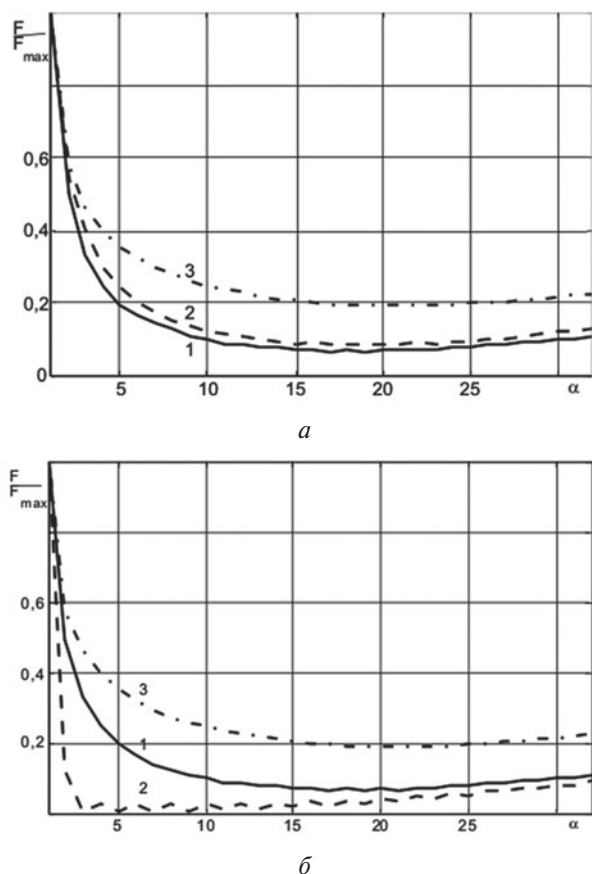


Рис. 10. Зависимость функционала качества работы системы от порядка фильтра: 1 – СФ2, 2 – МФ2, 3 – ФПР2

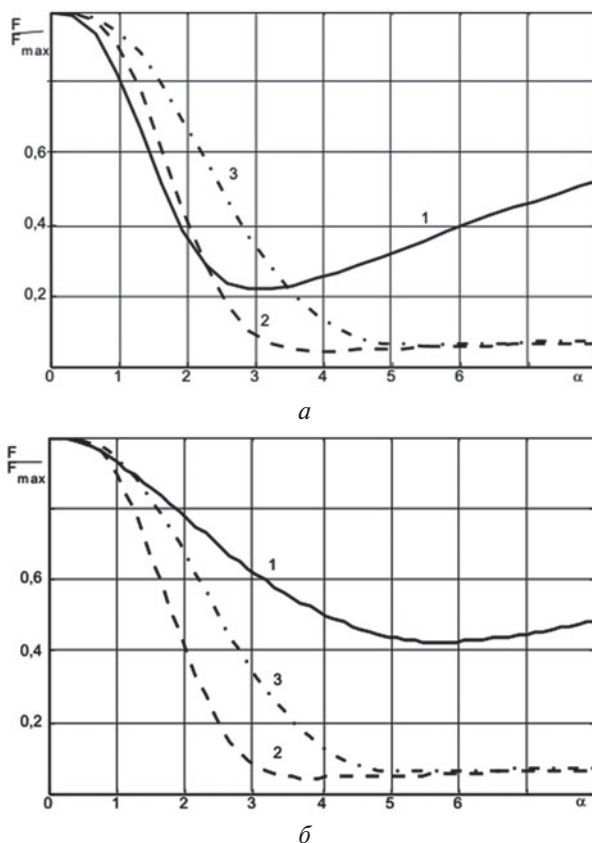


Рис. 11. Зависимость функционала качества работы системы от порога, устанавливаемого в методах ВШ2 (1), ФШ2 (2) и ДШ2 (3)

По результатам моделирования оптимальные значения параметров для случая помехи вида аддитивного белого гауссова шума следующие: СФ2 – порядок фильтра 16, МФ2 – размер окна 16 отсчетов, ФПР2 – порядок фильтра 20, ВШ2 – порог 3.2, ФШ2 – порог 4, ДШ2 – порог 5.2. Чувствительность различных методов к изменению параметров неодинакова, экстремумы во многих случаях выражены слабо.

Для случая аддитивных импульсных помех получены следующие оптимальные значения параметров:

СФ2 – порядок фильтра 19, МФ2 – размер окна 3 отсчета, ФПР2 – порядок фильтра 20, ВШ2 – порог 5.58, ФШ2 – порог 3.93, ДШ2 – порог 5.46.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 12, 13 приведены результаты имитационного моделирования для всех методов фильтрации, рассматриваемых в статье. При этом методы фильтрации использованы с оптимальными значениями параметров, определенных в пп. 4-5. На рисунках приняты следующие обозначения: 1 – исходная зависимость (без фильтрации), 2 – СФ, 3 – МФ, 4 – ФПР, 5 – АФ, 6 – ВШ, 7 – ФШ.

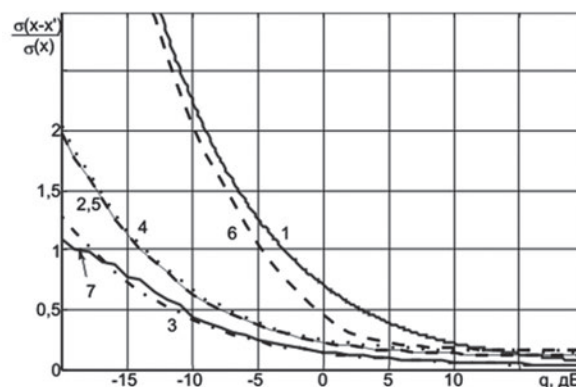


Рис. 12. Зависимость СКО оценки параметров среды от отношения сигнал/шум

Для широкополосной шумовой помехи наиболее эффективен метод ФШ (кривая 7). Также высокую эффективность показывает метод медианной фильтрации (кривая 3). Метод ВШ по результатам моделирования малоэффективен.

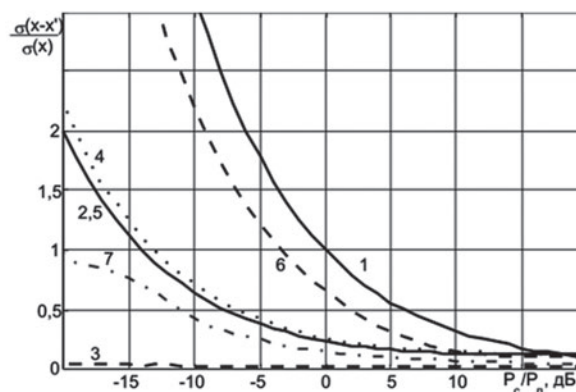


Рис. 13. Зависимость СКО оценки параметров среды от отношения мощности сигнал/помеха

Для подавления импульсных помех наиболее эффективен медианный фильтр.

Результаты моделирования для двумерных зависимостей приведены на рис. 14-15 (для аддитивного белого шума и импульсных помех, соответственно). Обозначения следующие: 1 – исходная зависимость (без фильтрации), 2 – СФ2, 3 – МФ2, 4 – ФПР2, 5 – ВШ2, 6 – ФШ2, 7 – ДШ2.

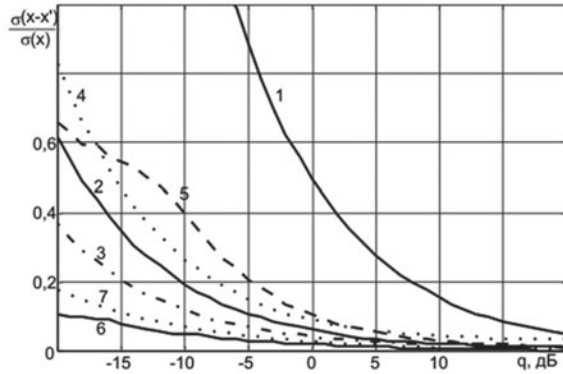


Рис. 14. Зависимость СКО оценки параметров среды от отношения сигнал/шум

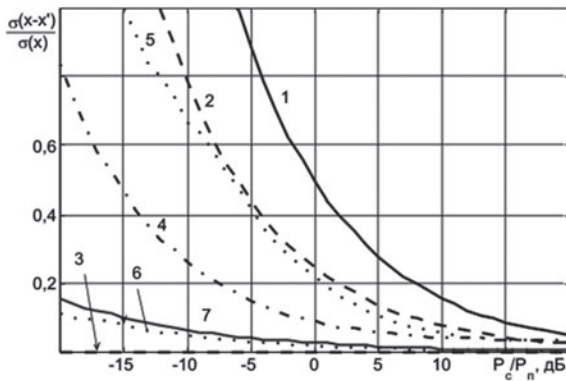


Рис. 15. Зависимость СКО оценки параметров среды от отношения сигнал/помеха

По результатам моделирования для двумерного сигнала на фоне нормального белого шума наиболее эффективным методом фильтрации является шумоподавление в базисе Фурье. Метод шумоподавления на базе дискретно-косинусного преобразования менее эффективен. Для импульсных помех наиболее эффективен метод медианной фильтрации.

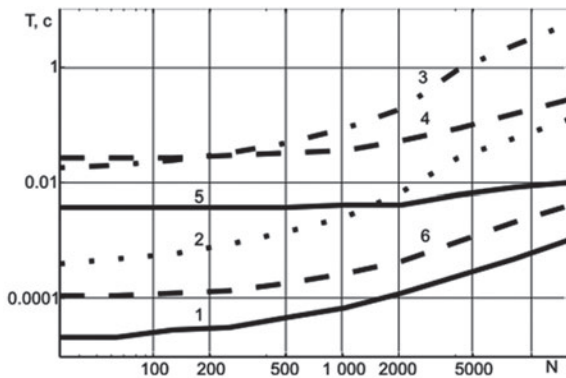


Рис. 16. Сравнение вычислительной эффективности методов фильтрации одномерных зависимостей (1 – СФ, 2 – МФ, 3 – ФПР, 4 – АФ, 5 – ВШ, 6 – ФШ)

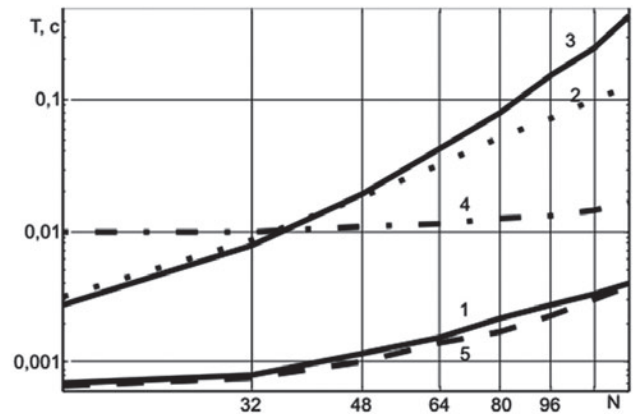


Рис. 17. Сравнение вычислительной эффективности методов фильтрации двумерных зависимостей (1 – СФ, 2 – МФ2, 3 – ФПР2, 4 – ВШ2, 5 – ФШ2)

По затратам вычислительных ресурсов из рассмотренных методов фильтрации наиболее предпочтительны СФ и ФШ.

ВЫВОДЫ

Проведенный сравнительный анализ методов фильтрации одномерных и двумерных зависимостей позволил сформулировать следующие выводы:

1. За счет учета и высотной, и временной инерционности атмосферы, методы двумерной фильтрации являются более эффективными по сравнению с одномерными аналогами.

2. Для подавления аддитивной шумовой помехи наиболее эффективным из рассмотренных является метод шумоподавления в базисе Фурье (ШФ, ШФ-2). Данный метод имеет достаточно высокую вычислительную эффективность.

3. Импульсные помехи наиболее полно подавляются медианным фильтром.

Автор хотел бы поблагодарить И.В.Галяса (БГУИР, г. Минск) за помощь в проведении расчетов.

Литература

- [1] *Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли* / Под общ. ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. 426 с.
- [2] *Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций. 2-е изд.* / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов и др. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005 – 768 с.: ил.
- [3] *Volker Lehmann and Gerd Teschke. Wavelet based methods for improved wind profiler signal processing. Ann. Geophysicae, 19, 825-836, 2001.*
- [4] *Strang, G.; T. Nguyen. Wavelets and filter banks, Wellesley-Cambridge Press, 1996.*
- [5] *Теория и практика вейвлет-преобразования. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. СПб.: ВУС, 1999. 204 с.*

Поступила в редколлегию 6.09.2011



Литвин-Попович Андрей Игоревич, канд. техн. наук, ассистент каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, метеорологическая радиолокация.

УДК 621.396.9: 551.508.855

Методи вторинної обробки в радіолокаційних системах вертикального зондування атмосфери / А.І. Литвин-Попович // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2011. Том 10. № 3. — С. 295-301.

В роботі розглянуто методи фільтрації висотно-часових залежностей динамічних параметрів атмосфери в радіолокаційних системах вертикального зондування. Показано можливість знизити похибки оцінювання динамічних параметрів атмосфери методами вторинної обробки інформації. Проведено порівняння низки

методів фільтрації за допомогою імітаційних моделей, що базуються на даних натурних радіолокаційних вимірювань.

Ключові слова: вторинна обробка, радіолокаційна метеорологія, обробка часових рядів, імітаційне моделювання.

Л. 17. Бібліогр.: 5 найм.

UDC 621.396.9: 551.508.855

Methods of data post-processing in radar wind profiling systems / A.I. Litvin-Popovitch // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2011. Vol. 10. № 3. — P. 295-301.

The paper considers methods of information post-processing in radar wind profiling systems taking into account the spatiotemporal persistence of a wave propagation medium. The presented methods allow to reduce random errors of estimating dynamic atmospheric parameters, which is illustrated by the results of simulation modelling.

Keywords: post-processing, radar meteorology, time series processing, simulation modelling.

Fig. 17. Ref.: 5 items.