

СИГНАЛЫ: ФОРМИРОВАНИЕ, ОБРАБОТКА И ПЕРЕДАЧА

УДК 621.396.9

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОМЕХИ В РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

А. И. ЛИТВИН-ПОПОВИЧ, В. Н. ОЛЕЙНИКОВ

В работе рассмотрены методы обработки рассеянных радиолокационных сигналов в станциях вертикального зондирования атмосферы, позволяющие снизить влияние земной помехи на точность оценивания метеопараметров. Предложен алгоритм подавления земной помехи, основанный на вейвлет-фильтрации. Представлены результаты численного моделирования, которые иллюстрируют эффективность применения разработанного алгоритма.

Processing methods of dispelled radar signals in stations of the vertical atmospheric sounding in-process are surveyed, permitting to lower the effect of the earth interference on the exactitude of meteorologic parameters estimation. The algorithm of inhibition of the earth interference, set up on wavelet percolation is offered. Results of numerical modeling which illustrate operational effectiveness of the designed algorithm are submitted.

ВВЕДЕНИЕ

К оперативности и точности оценивания метеопараметров современных средств метеорологического обеспечения авиации и экологического мониторинга предъявляются жесткие требования [1], включающие оценку средней скорости ветра за 3...5 минут с погрешностью не хуже 1м/с и направления ветра с погрешностью не хуже 10° в атмосферном приграничном слое. Эти требования не могут быть реализованы традиционными системами аэрологического зондирования. В последнее время в метеорологии для дистанционного бесконтактного определения параметров поля скорости ветра в тропосфере и нижней части стратосферы находят применение радиолокационные станции вертикального зондирования (РЛС ВЗ) (называемые в зарубежной литературе ветровыми профилометрами (wind profiler)). Анализ параметров сигналов, рассеянных на турбулентных неоднородностях атмосферы, позволяет получать в реальном масштабе времени высотное поле скорости ветра и интенсивности турбулентности.

1. ЗЕМНАЯ ПОМЕХА, МЕХАНИЗМ ЕЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ

Спектральная плотность мощности принятого сигнала содержит составляющую, обусловленную рассеянием излученного зондирующего импульса от движущихся с преобладающим ветром турбулентных неоднородностей коэффициента преломления атмосферы, а также компоненты, обусловленные шумами и помехами. При дальнейшей обработке из спектра отраженного сигнала удаляются помеховые компоненты, в том числе так называемая земная помеха (ЗП), обусловленная приемом по боковым лепесткам диаграммы направленности (ДН) антенны, отражений зонди-

рующих сигналов от земной поверхности и местных предметов. В антенне РЛС ВЗ часть энергии, рассеянная наземными объектами, попадает в боковые лепестки ДН антенны. Обычно радиолокационная отражательная способность наземных объектов, значительно выше отражательной способности атмосферных неоднородностей и гидрометеоров. В результате мощность ЗП на входе приемника РЛС соизмерима с мощностью полезного сигнала.

Формирование помеховых составляющих спектра отраженных сигналов иллюстрируется рисунком 1.

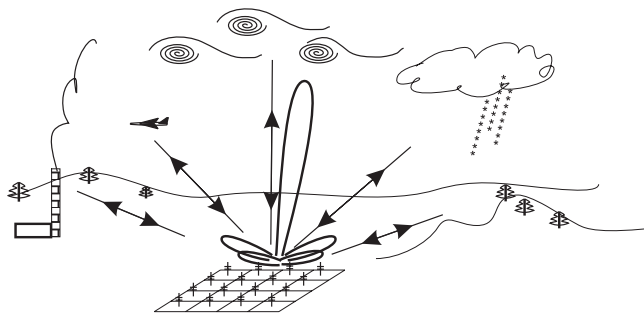


Рис. 1. Механизмы образования составляющих регистрируемого сигнала

По результатам экспериментальных измерений, спектр земной помехи симметричен относительно нулевой частоты. Ширина спектра земной помехи обычно существенно уже ширины спектра сигналов, рассеянных турбулентными неоднородностями. Уровень земной помехи для малых дальностей зондирования значительно (иногда на 20...40 дБ) превосходит уровень полезного сигнала. При квадратурной схеме обработки сигналов ширина компонент спектра земной помехи значительно меньше, чем для одноканальной схемы, вследствие устранения неоднозначности определения фазы принимаемого сигнала. Наличие в

спектральной плотности мощности (СПМ) рассеянного сигнала шумов и помех усложняет определение параметров сигнальной части спектра, вызывая смещение оценок доплеровского сдвига в сторону меньших абсолютных значений. Можно отметить, что мощность, отраженная от наземных объектов, образующих земную помеху, обратно пропорциональна четвертой степени расстояния до них (уравнение радиолокации), в то время как мощность отраженных от атмосферных неоднородностей сигнала меняется обратно пропорционально квадрату расстояния вследствие увеличения импульсного объема с ростом дальности [1]. Поэтому на высотах, приближающихся к максимальным высотам зондирования, влияние ЗП снижается. Для нижних высотных слоев, мощность ЗП значительно превышает мощность сигналов, рассеянных турбулентными неоднородностями. Типичный вид СПМ рассеянного сигнала при воздействии ЗП приведен на рис. 2. Видна составляющая на нулевой частоте, обусловленная отражением от неподвижных объектов и сигнальная компонента в диапазоне скоростей ветра ≈ -8 м/с. Здесь и далее положительный знак скорости означает движение к антенне РЛС.

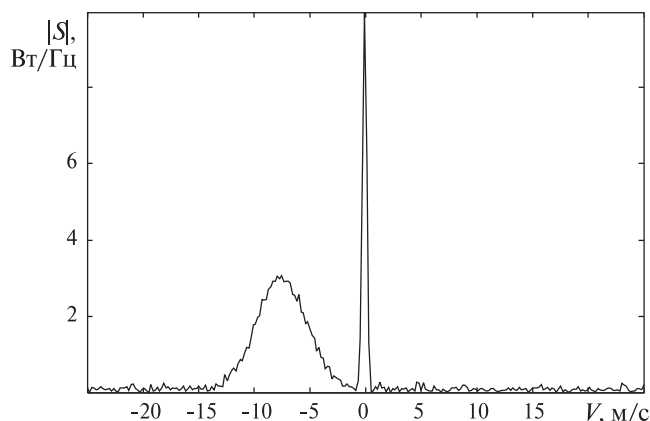


Рис. 2. Спектр принятой реализации, содержащий земную помеху и полезный сигнал

Радикальным методом борьбы с ЗП является применение защитных экранов (бленд), улучшающих коэффициент защитного действия антенны. Защитный экран способствует снижению уровня боковых лепестков ДН на 7-10 дБ, благодаря чему уменьшается влияние местных предметов на работу РЛС ВЗ. Поскольку уровень ЗП может существенно превосходить уровень сигналов, рассеянных турбулентными неоднородностями, применение защитных экранов не полностью устраняет проблему ЗП.

Возможно применение вспомогательной ненаправленной антенны для компенсации сигналов регистрируемых по боковым лепесткам ДН основной антенны. Этот метод требует дополнительного канала приемного устройства, что усложняет аппаратуру и алгоритмическое обеспечение РЛС.

Основными методами подавления земной помехи являются алгоритмические методы, среди них:

- Обнуление участка спектра, примыкающего к нулевой частоте, или замена этого участка спектра реализацией шума. Поскольку спектральная линия ЗП расширена на несколько частотных отсчетов, удаление центрального пика оставляет некомпенсированные боковые участки спектра ЗП, которые приводят к смещению оценок скорости ветра в сторону меньших абсолютных значений.

- Формирование шаблона ЗП по данным длительных наблюдений. При этом предполагается, что спектр ЗП относительно стабилен, что не всегда справедливо. Наличие полезного сигнала, а также импульсных помех и мешающих отражений искажает оценку спектра ЗП. Кроме того, параметры ЗП различны для разных высотных слоев и направлений зондирования, что приводит к необходимости формировать набор шаблонов.

- Применение режекторных фильтров, настроенных на подавление сигналов нулевой частоты. Данный метод эффективен в случае неперекрывающихся спектров ЗП и полезного сигнала, однако требует применения КИХ-фильтров высоких порядков для обеспечения требуемой крутизны АЧХ в переходной полосе. Применяются также адаптивные фильтры, настраиваемые на обучающих выборках большой длины (предполагается, что ЗП за время выборки стационарна, в отличие от полезного сигнала). Полезный сигнал, присутствующий в обучающей выборке, приводит к отклонению коэффициентов фильтра от оптимальных значений. Кроме того, параметры ЗП не постоянны во времени, что приводит к необходимости периодически повторять процесс адаптации фильтра.

В настоящее время разрабатываются алгоритмы, использующие для спектрального анализа реализации длиной до 2^{10} – 2^{15} элементов [1]. Это позволяет использовать эффективные адаптивные фильтры для подавления земной помехи. Такие фильтры можно синтезировать на основе авторегрессионной (АР) модели, в основу которой положена корреляция отсчета случайного процесса в текущий момент времени с некоторым числом отсчетов в предыдущие моменты времени:

$$x_t = \sum_{j=1}^p \Phi_j x_{t-j} + a_t, \quad (1)$$

где Φ_j — коэффициенты модели АР, a_t — некоррелированные случайные отсчеты, p — порядок модели АР.

На основе такой модели синтезируются оптимальные фильтры подавления, согласованные не только по частоте и полосе спектра, но и по форме спектра случайного процесса. Структура фильтра подавления описывается выражением:

$$a_t = x_t - \sum_{j=1}^p \Phi_j x_{t-j}. \quad (2)$$

Здесь используется свойство модели АР минимизировать дисперсию процесса a_t , получаемого на выходе фильтра.

Коэффициенты Φ_j модели АР находятся по обучающей выборке (шаблону ЗП) с использованием алгоритма Левинсона-Дарбина [3]. Порядок модели p находится экспериментальным путём и обычно составляет 10–15.

По коэффициентам авторегрессии, рассчитанным для временного ряда сеанса зондирования, можно получить СПМ:

$$P(f) = 1 / \left| 1 - \sum_{i=1}^p \Phi_i \exp(-ji2\pi fT) \right|^2, \quad (3)$$

и использовать его для дальнейшего определения параметров ветрового режима атмосферы.

При обработке спектров наблюдается расширение спектральной линии ЗП на несколько частотных отсчётов.

В качестве шаблона спектра земной помехи можно применить функцию Гаусса или параболу. При этом понадобится оценить параметры функции-шаблона, обеспечивающие минимум среднеквадратичного отклонения шаблона от спектра ЗП, и затем использовать полученный шаблон для подавления ЗП. Подавление ЗП реализуется вычитанием функции-шаблона из выборочных спектров рассеянных сигналов. В этом случае некомпенсированные остатки спектральной составляющей земной помехи могут быть значительными, и вызванное ими смещение оценок скорости ветра может быть весьма существенным, приводя к снижению метрологических характеристик системы в целом.

Рассмотренные выше алгоритмические методы подавления ЗП имеют низкую эффективность в условиях перекрытия спектров полезного сигнала и ЗП. Это приводит к значительным погрешностям оценивания параметров спектра. Более совершенные методы обработки, одним из которых является вейвлет-фильтрация [2, 3], позволяют устранить эти недостатки.

2. ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТР ЗЕМНОЙ ПОМЕХИ

В настоящее время в станциях вертикального зондирования применяется структура блока первичной обработки сигналов, приведенная на рис. 3 [1, 4].

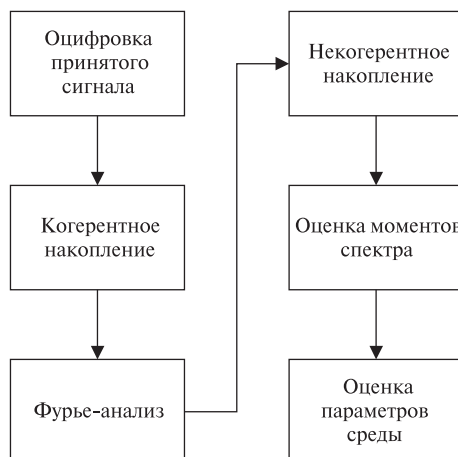


Рис. 3. Структурная схема устройства первичной обработки

Приведенная на рис. 3 структурная схема не содержит фильтров земной помехи. После процедуры когерентного накопления можно использовать вейвлет-фильтр, позволяющий эффективно подавить земную помеху. Структура возможного варианта вейвлет-фильтра показана на рис. 4.

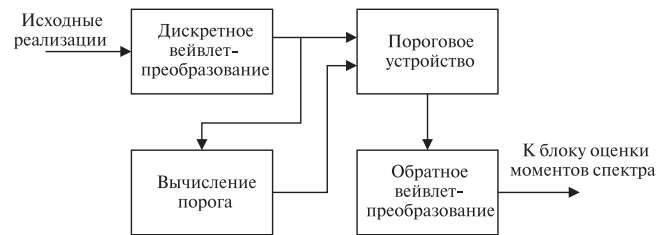


Рис. 4. Структурная схема нелинейного вейвлет-фильтра

Принцип действия вейвлет-фильтра основан на разложении сигнала в базисе вейвлет-функции [6] с последующим обнулением коэффициентов разложения, соответствующих помеховым составляющим [2, 3].

Рассмотрим особенности применения вейвлет-фильтра земной помехи с учетом следующих факторов:

- Вейвлеты приспособлены к анализу нестационарных процессов, обеспечивая эффективную локализацию как в частотной (масштабной), так и во временной области.
- Имеется значительное количество вейвлетов, что позволяет выбрать подходящий вейвлет для конкретной структуры сигнала на основании априорных данных.
- Коэффициенты вейвлет-разложения для широкого класса сигналов быстро уменьшаются с уменьшением масштаба.
- Быстрое вейвлет-преобразование по вычислительной сложности сравнимо с БПФ.

Для построения фильтра выбирается вейвлет, обеспечивающий представление земной помехи наименьшим возможным числом коэффициентов. Этим требованиям удовлетворяет один из вейвлетов семейства Добеши (DB) [5, 6]. Вейвлеты Добеши имеют наименьшую протяженность во времени (и соответственно, лучшую локализацию) для заданного числа разрывов, равную $2P-1$ для вейвлета с P разрывами. С увеличением порядка возрастает протяженность вейвлета во временной области, увеличивается количество коэффициентов и соответственно вычислительная сложность алгоритма. Для построения фильтра остановимся на вейвлете DB-2.

В основе вейвлет-фильтра лежит ограничение по заданному порогу коэффициентов вейвлет-разложения [6], присущих земной помехе. Для ограничения коэффициентов земной помехи может использоваться одна из двух стратегий — «мягкое» (рис. 5а) или «жесткое» (рис. 5б) ограничение. Жесткое ограничение более эффективно в отношении подавления земной помехи, но в большей степени искажает форму спектра рассеянного сигнала.

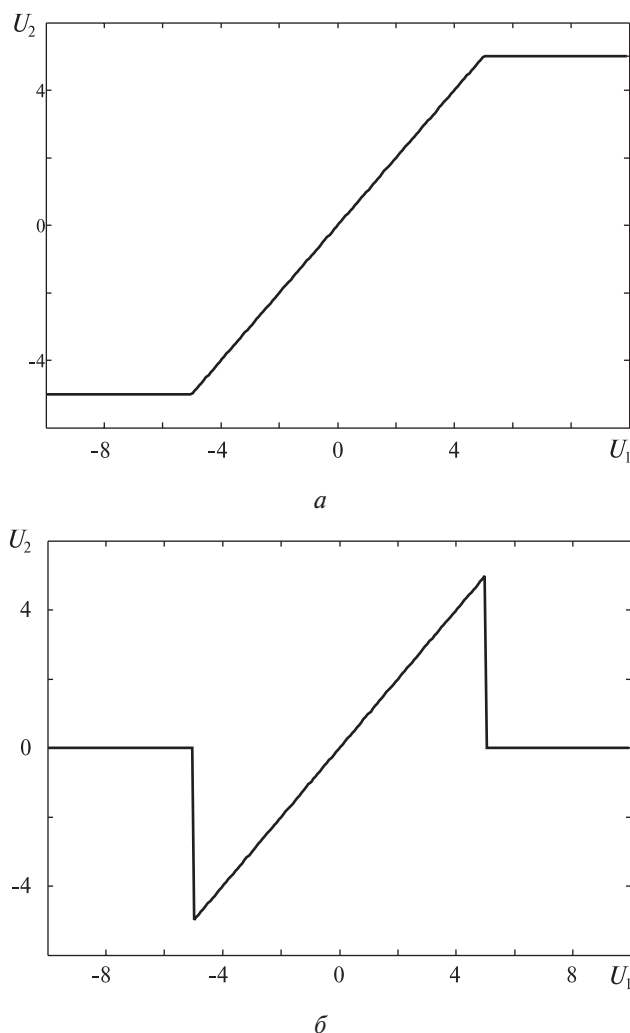


Рис. 5. Амплитудная характеристика «мягкого» (а) и «жесткого» (б) ограничителей

Для демонстрации смещения оценок центральной частоты под действием ЗП, было проведено математическое моделирование процесса параметризации спектра рассеянного сигнала, содержащего ЗП различной мощности. Результаты моделирования представлены на рис. 6 в виде графика зависимости СКО (среднеквадратичного отклонения) оценки скорости ветра от отношения мощности ЗП к мощности сигнала.

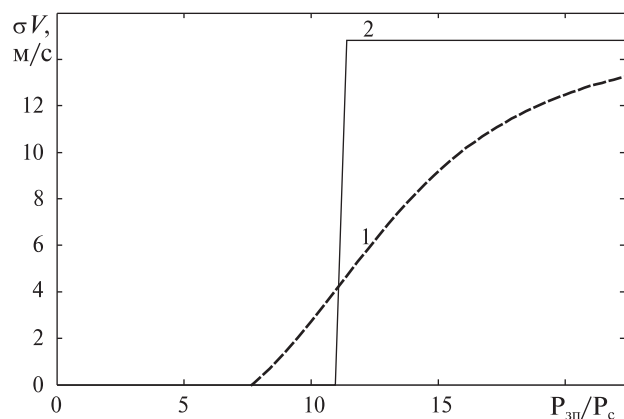


Рис. 6. Зависимость СКО оценки скорости ветра от отношения мощностей ЗП и сигнала (1 – метод моментов, 2 – МНК)

При значительных отношениях мощности ЗП к мощности полезного сигнала, что имеет место на малых высотах, смещение оценок скорости ветра приводит к выходу метрологических характеристик системы за пределы требований международной организации гражданской авиации (ICAO) [1], что ставит под сомнение эффективность применения подобной системы для метеобеспечения авиации на этапах взлета/посадки. Проблема ЗП актуальна и следует провести сравнительный анализ эффективности методов подавления ЗП.

Рассмотрим результат вейвлет-разложения модельного сигнала. На рис. 7 приведены результаты для случая модельного сигнала без земной помехи (1) и с земной помехой (2). Коэффициенты разложения изображены в порядке возрастания уровня разложения. В случае наличия в анализируемом сигнале ЗП, коэффициенты первого уровня разложения (коэффициенты детализации) [6] имеют повышенную дисперсию. Из проведенного анализа свойств коэффициентов разложения [2, 3] видно, что коэффициенты разложения рассеянного сигнала уменьшаются значительно медленнее с увеличением уровня разложения. Это позволяет выработать критерий различения сигнала и ЗП по дисперсии коэффициентов разложения. Уровень порога ограничения устанавливается в соответствии с дисперсией коэффициентов разложения на уровне 2.

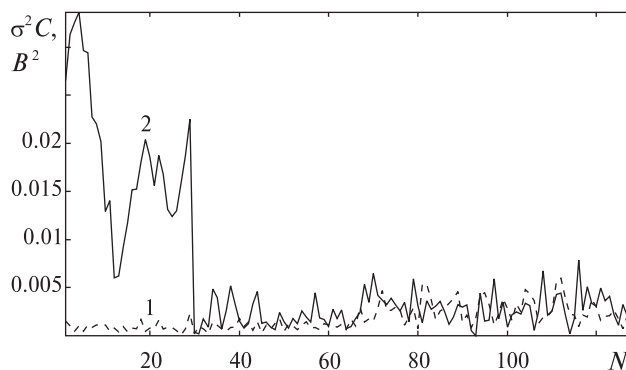


Рис. 7. Вейвлет-разложение модельного сигнала без ЗП (1) и с ЗП (2)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования эффективности работы алгоритмов подавления ЗП был применен метод имитационного моделирования. Модельный сигнал формировался в виде сигнала с амплитудным спектром, являющимся суммой СПМ рассеянного сигнала и СПМ ЗП, и фазовым спектром, равномерно распределенным от $-\pi$ до π [1, 3]. СПМ ЗП задавалась в виде функции Гаусса с математическим ожиданием, равным нулю, и малой дисперсией. К реализации, полученной в результате обратного преобразования Фурье, прибавлялся белый гауссовый шум. Отношение сигнал/шум в модели составляло 20дБ, спектральная ширина полезного сигнала 1,5 м/с, полный диапазон однозначного определения скорости ± 25 м/с, число отсчетов в выборке 256.

Рассмотрим сравнительные результаты подавления земной помехи, полученные для следующих методов:

- Метод обнуления участка спектра, соответствующего ЗП.
- Метод адаптивной режекции на основе АР модели. Оценивание коэффициентов фильтра производилось ковариационным методом [3].
- Метод вейвлет-фильтрации.

Спектр модельного сигнала приведен на рис. 8, на рисунках 9-11 приведены спектры сигналов, полученных различными методами фильтрации. Для каждого метода приведено два графика – для случая неперекрывающихся и перекрывающихся спектров ЗП и рассеянного сигнала.

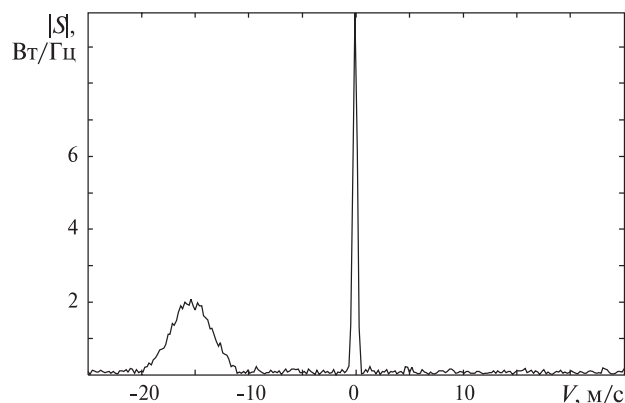


Рис. 8. Спектр модельного сигнала

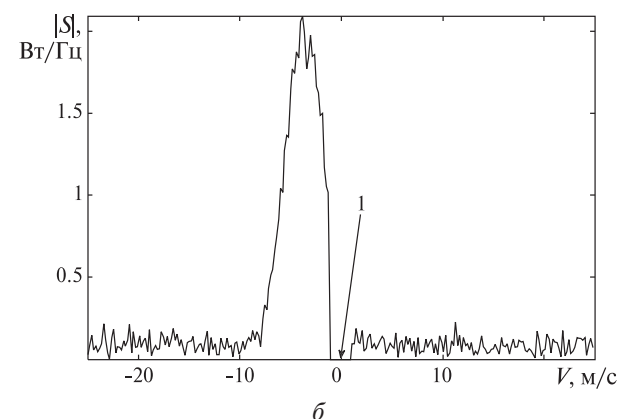
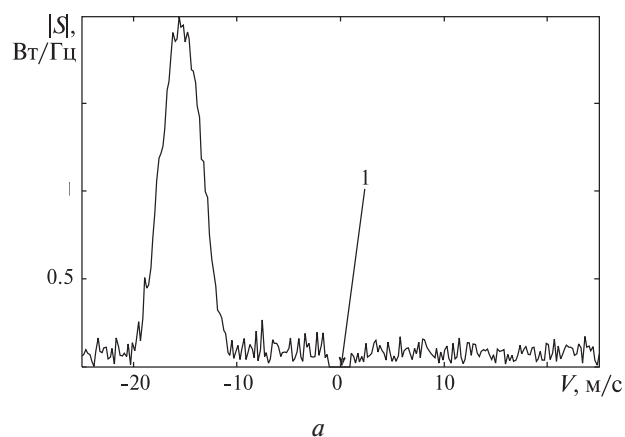


Рис. 9. Результат обнуления участка спектра рассеянного сигнала, соответствующего ЗП (стрелкой отмечен подвергнутый режекции участок спектра)

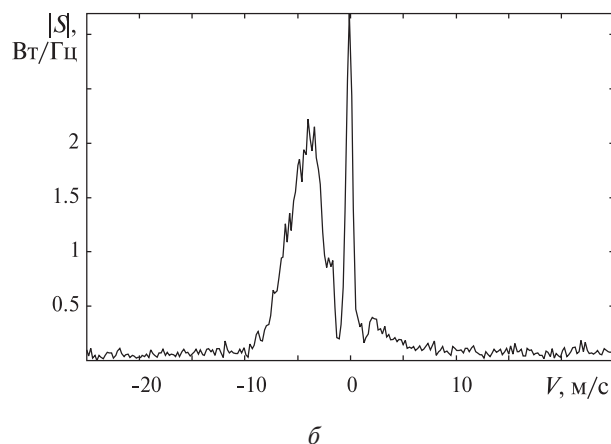
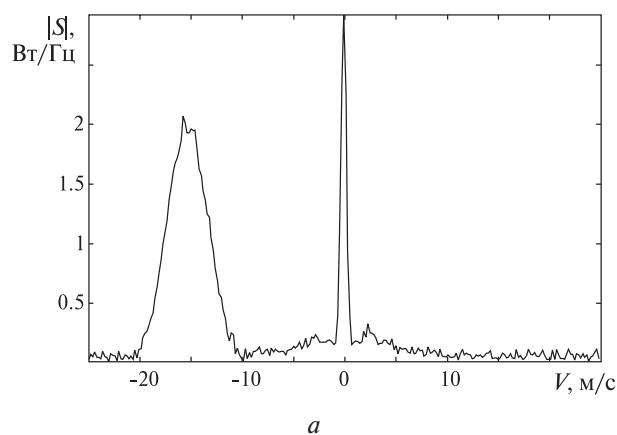


Рис. 10. Результат подавления ЗП адаптивным фильтром

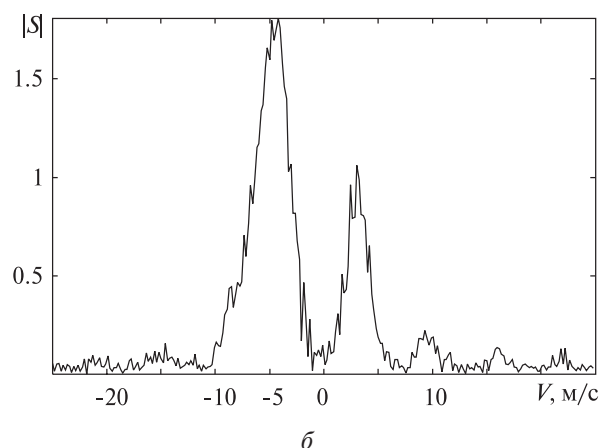
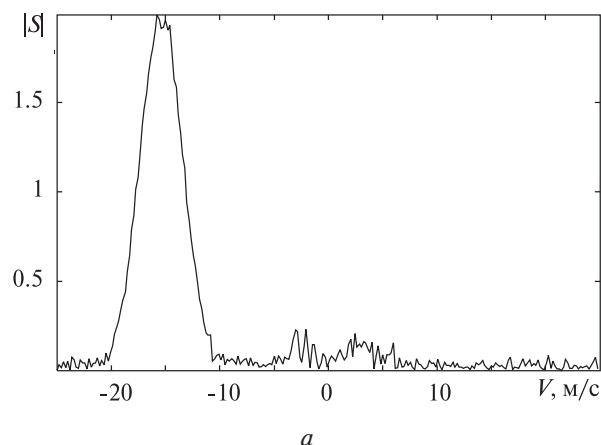


Рис. 11. Результат подавления ЗП вейвлет-фильтром

Для «обучения» адаптивного режекторного фильтра использовался набор реализаций, синтезированных в виде суммы сигнальной компоненты и ЗП, при этом отношение мощностей ЗП и сигнала составляло 10, доплеровский сдвиг частоты сигнала и центральная частота ЗП представляли собой случайные процессы, распределенные по нормальному закону, с математическим ожиданием $-0.25V_{\max}$ и 0, дисперсией $0.1 \cdot V_{\max}$ и $0.02 \cdot V_{\max}$ соответственно.

Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 12–16 (1 – исходный профиль, 2 – метод максимума, 3 – метод моментов, 4 – МНК с шаблоном в виде закольцованной функции Гаусса [7], 5 – МНК с шаблоном в виде функции Гаусса [1]). Моделирование проводилось в диапазоне однозначного определения скоростей, отношение сигнал/шум 20дБ. Результаты представлены в виде зависимости оценки скорости ветра от значения скорости, заданного в модели, по результатам обработки модельных данных.

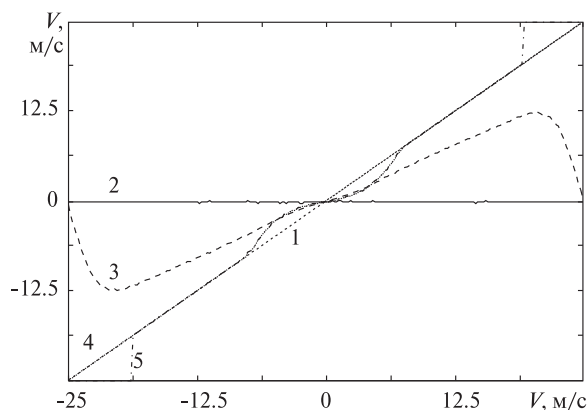


Рис. 12. Результат оценивания скорости ветра при наличии ЗП

Наличие земной помехи приводит к смещению оценок скорости ветра, в особенности при малых значениях заданной в модели скорости ветра. В случае оценивания методом максимума, оценка скорости ветра не соответствует действительности, поскольку главный максимум СПМ приходится на ЗП. Для остальных методов параметризации, эффект выражен не столь сильно, однако смещение оценок имеется и вызвано изменением координаты центра тяжести спектра за счет ЗП.

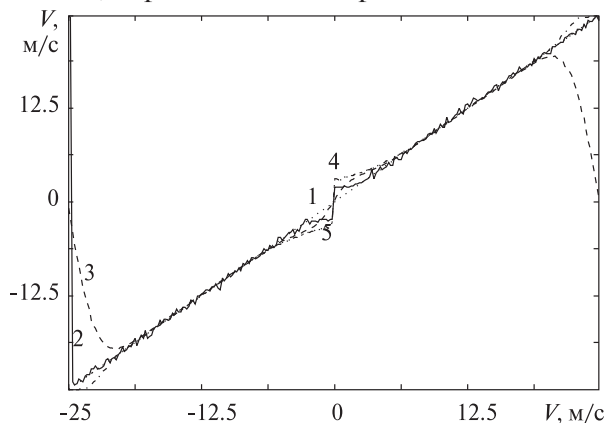


Рис. 13. Демонстрация эффективности обнуления ЗП в частотной области

При обнулении ЗП в частотной области, характер искажения оценок скорости ветра изменяется, однако искажение не исчезло. Это обусловлено неполным подавлением ЗП (имеются некомпенсированные остатки спектра ЗП).

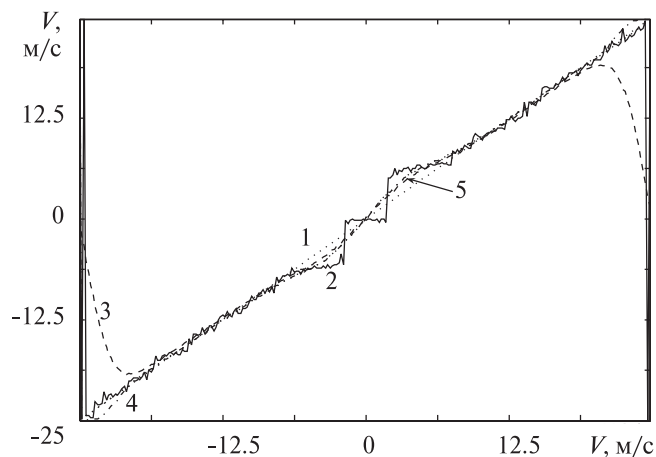


Рис. 14. Демонстрация эффективности адаптивного фильтра ЗП

Рассмотренный адаптивный фильтр не полностью подавляет ЗП, искажения наиболее заметны в области малых скоростей ветра. Это вызвано, во-первых, погрешностями процесса адаптации фильтра, обусловленными наличием в образцовом сигнале не только ЗП, но и сигнала, рассеянного на атмосферных неоднородностях, и, во-вторых, частотным перекрытием спектров ЗП и рассеянного сигнала. При этом адаптивный режекторный фильтр искажает форму спектра рассеянного сигнала, что приводит к погрешностям последующей параметризации.

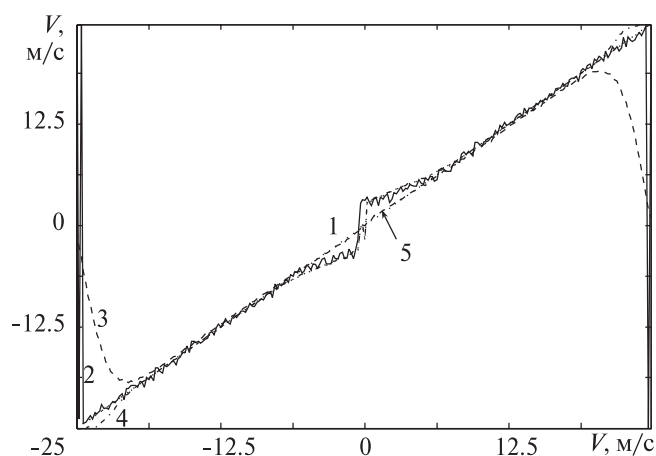


Рис. 15. Демонстрация эффективности вейвлет-фильтра ЗП

Для вейвлет-фильтра, рассмотренного в данной статье, характер искажения оценок отличен от ранее приводимых. Из рассмотренных методов, вейвлет-фильтр обеспечивает наименьшие искажения спектра рассеянного сигнала при его перекрытии со спектром ЗП, что приводит к снижению погрешностей параметризации.

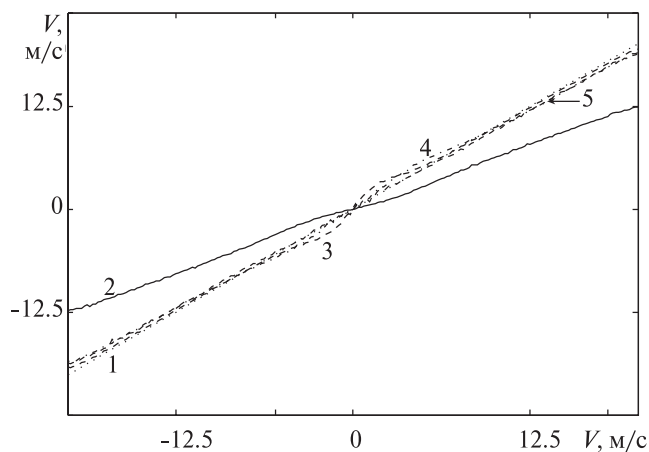


Рис. 16. Сравнение эффективности методов подавления ЗП (1 — исходный профиль, 2 — без фильтрации, 3 — обнуление ЗП, 4 — адаптивный фильтр, 5 — вейвлет-фильтр)

На рис. 16 приведены результаты параметризации спектров методом наименьших квадратов для случаев применения всех фильтров ЗП, рассматриваемых в статье. Наибольшую величину погрешностей можно наблюдать в случае отсутствия фильтрации ЗП, наименьшую — в случае применения вейвлет-фильтра. Адаптивный фильтр обеспечивает несколько худшие характеристики.

ВЫВОДЫ

Метод обнуления ЗП в частотной области малоэффективен, что вызвано тем, что спектр ЗП занимает несколько частотных отсчетов и подавляется не полностью. Рекомендовать этот метод к применению можно лишь для случаев, когда регистрируемая скорость ветра значительна, а земная помеха предельно узкополосна. Адаптивный фильтр более эффективен, однако искажает спектр рассеянного сигнала в случае его перекрытия по частоте со спектром земной помехи. Проведенный анализ результатов моделирования показал преимущества применения вейвлет-фильтра для подавления земной помехи в РЛС ВЗ, в особенности в случае частотного перекрытия спектров рассеянного сигнала и земной помехи, в сравнении с методами, основанными на адаптивной фильтрации. При этом рассмотренный алгоритм имеет сравни-

мую вычислительную сложность и может быть рекомендован к применению в системах цифровой обработки радиолокационных сигналов станций вертикального зондирования атмосферы, в том числе для приложений критичных к оперативности оценивания метеопараметров.

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] *Volker Lehmann and Gerd Teschke. Wavelet based methods for improved wind profiler signal processing. Ann. Geophysicae*, 19, 825-836, 2001.
- [3] *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.
- [4] *Strauch R. G. Data analyses techniques: spectral processing // Handbook for middle atmosphere program.* — Urbana, Illinois. — 1983. — Vol. 9. — P. 528-531.
- [5] *Strang, G.; T. Nguyen. Wavelets and filter banks*, Wellesley-Cambridge Press, 1996.
- [6] *Теория и практика вейвлет-преобразования.* Воробьев В.И., Грибунин В.Г. СПб: ВУС, 1999. 204 с.
- [7] *Мардиа К. Статистический анализ круговых наблюдений.* Перев. с англ. — М.: Наука, 1978. — 240 с.

Поступила в редколлегию 14.12.2008



Литвин-Попович Андрей Игоревич, аспирант кафедры РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: цифровая обработка радиолокационных сигналов.



Олейников Владимир Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: радиолокационные методы исследования атмосферных динамических процессов.