

7. Корченко А.Г., Построение систем защиты информации на нечетких множествах. Теория и практические решения [Текст] / Корченко А.Г. – К.: “МК-Пресс”, 2006. – 320с. (ил. Монография).
8. Петров А.А. Методы защиты информации в сетях общего пользования. [Текст] / Петров А.А. // Вісник СНУ ім. В.Даля. – 2008. - №126. – С. 81-86.
9. Чекатков А.А., Хорошко В.А. Методы и средства защиты информации. – К.: Изд-во Юниор, 2003. – 504 с.
10. Термінологічний довідник з питань технічного захисту інформації [Текст] / Коженевський С.Р., Кузнецов Г.В., Хорошко В.О., Чирков Д.В. / За ред. проф. В.О. Хорошка. – К.: ДУІКТ, 2007. – 365 с.

Розглянуто методи зниження погрешностей, викликаних пасивними перешкодами, в системах радіолокацій вертикального зондування атмосфери. Розглянуті методи дозволяють понизити систематичні погрешності оцінювання динамічних параметрів атмосфери, що проілюстровано результатами імітаційного моделювання

Ключові слова: земна перешкода, вертикальне зондування атмосфери

Рассмотрены методы снижения погрешностей, вызванных пассивными помехами, в радиолокационных системах вертикального зондирования атмосферы. Рассмотренные методы позволяют снизить систематические погрешности оценивания динамических параметров атмосферы, что проиллюстрировано результатами имитационного моделирования

Ключевые слова: земная помеха, вертикальное зондирование атмосферы

Methods for ground clutter suppression in signal processing systems of radar wind profilers have been discussed. Comparative analysis of different methods is provided, effectiveness of an estimation correction method is illustrated

Keywords: ground clutter, radar wind profilers

УДК 621.396.96:551.508.855

МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОМЕХИ В РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

А. И. Литвин-Попович

Кандидат технических наук, ассистент*

Контактный тел.: 068-432-93-36

E-mail: andrey_res@ukr.net

С. В. Юдин

Аспирант*

Контактный тел.: (057) 764-48-22, 066-745-80-04

E-mail: udin@ukr.net

*Кафедра радиоэлектронных систем

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

Метод радиолокационного измерения скорости ветра основан на регистрации сигналов, рассеянных неоднородностями коэффициента диэлектрической проницаемости атмосферы [1,2]. Измерение параметров рассеянных сигналов позволяет оценить динамические параметры атмосферы, в частности направление и скорость ветра. Оценивание параметров рассеянного сигнала (параметризация) производится чаще всего по его спектральной плотности мощности (СПМ).

СПМ рассеянного сигнала содержит составляющую, обусловленную движением излученного зондирующего импульса от движущихся с преобладающим ветром турбулентных неоднородностей коэффициента преломления атмосферы, а также компоненты, обу-

словленные шумами и помехами. Среди помех, регистрируемых приемным устройством РЛС ВЗ, наибольшее влияние на величину погрешностей измерений оказывает земная помеха (ЗП). ЗП представляет собой отражения зондирующих сигналов от земной поверхности и местных предметов, регистрируемые по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС. Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) наземных объектов, значительно больше ЭПР атмосферных неоднородностей. В результате мощность ЗП на входе приемника РЛС превосходит мощность полезного сигнала на 20...40 дБ. Особенно это проявляется на малых высотах зондирования. Мощность ЗП обратно пропорциональна четвертой степени расстояния до отражающих объектов, в то время как мощность сигнала, отраженного от атмосферных неоднородностей меняется

обратно пропорционально квадрату расстояния [1]. Поэтому на высотах, приближающихся к максимальным высотам зондирования, влияние ЗП снижается.



Рис. 1. Структурная схема процесса обработки рассеянных сигналов

Наличие в СПМ рассеянного сигнала шумов и помех усложняет определение параметров сигнальной части спектра, вызывая смещение оценок доплеровского сдвига в сторону меньших абсолютных значений [1,3]. Для ослабления этого эффекта используют фильтры пассивных помех и дополнительные процедуры коррекции и контроля качества получаемых результатов.

2. Модели земной помехи

Земная помеха (ЗП) регистрируется по боковым лепесткам ДН антенны РЛС ВЗ. Поскольку отражения от местных объектов являются одним из существенных мешающих факторов для большинства радиолокационных систем, за время развития радиолокационной техники были проведены значительные объемы работ по анализу характеристик этих помех. Наиболее часто используются гауссова (1), экспоненциальная (2) и степенная (3) модели амплитудно-частотного спектра (АЧС) ЗП [4].

$$S(v) = \exp\left(-\frac{v^2}{2 \cdot \sigma_v^2}\right) \quad (1)$$

$$S(v) = \frac{\beta}{2} \exp(-\beta \cdot |v|) \quad (2)$$

$$S(v) = \frac{n \sin(\pi/n)}{2\pi v_c} \cdot \frac{1}{1 + (|v|/v_c)^n} \quad (3)$$

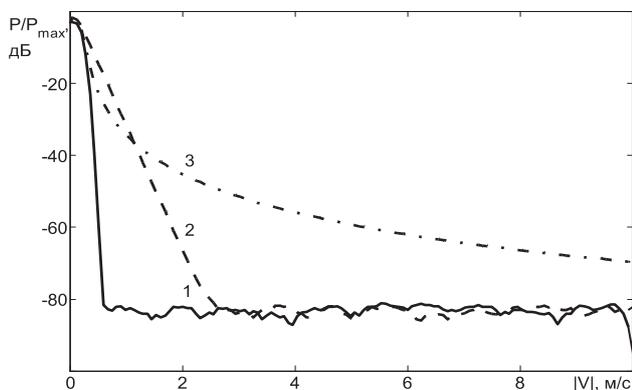


Рис. 2. АЧС модельных реализаций ЗП

На рис. 2 приведены спектры модельных реализаций ЗП, в соответствии с формулами (1 – 3) для динамического диапазона приемного устройства 80 дБ. По мере сужения динамического диапазона РПРУ, характеристики реализаций, получаемых по всем трем моделям, сходятся. При динамическом диапазоне РПРУ 50 дБ и менее, разница становится соизмеримой с погрешностью расчетов при имитационном моделировании. Формирование модельных реализаций ЗП по заданной форме АЧС может проводиться путем обратного преобразования Фурье от модельного спектра земной помехи [5]. При этом фазо-частотный спектр (ФЧС) ЗП принимается равномерно распределенной случайной величиной в диапазоне $-\pi \dots \pi$.

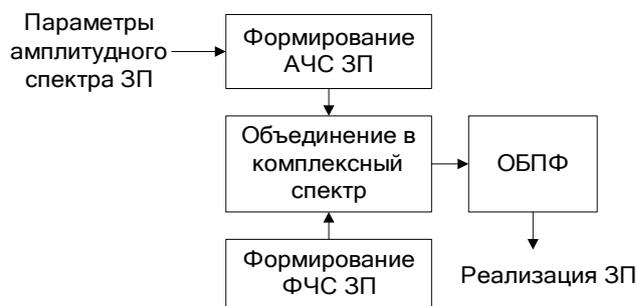


Рис. 3. Структурная схема процесса формирования имитационных выборок земной помехи по заданным параметрам

Для моделирования ЗП необходимо оценить параметр модели – ширину спектра ЗП (σ_v в формуле 1). Оценивание ширины спектра ЗП может проводиться путем анализа характеристик выборок рассеянных сигналов с той части высотного диапазона зондирования, где влиянием рассеянного сигнала можно пренебречь.

Оценка параметров спектров ЗП производилась по выборкам, полученным в ходе зондирования атмосферы с помощью РЛС ВЗ дециметрового диапазона, разработанной в Харьковском национальном университете радиоэлектроники [1]. Использовались выборки с высотного слоя зондирования 300...600 метров, выборка содержала 7664 реализации рассеянного сигнала. Был проведен спектральный анализ и параметризация амплитудных спектров земной помехи. Гистограммы и функции распределения полученных оценок центральной частоты и ширины спектра земной помехи показаны на рис. 4.

Анализ выборок, полученных при диапазоне однозначного определения ± 25 м/с, показал, что спектр ЗП центрирован около значения скорости - 0.001 (0,025 м/с), среднеквадратическое отклонение 0.003657 (0,1 м/с). Средняя ширина спектра составляет 0.01 (0,25 м/с). Проверка закона распределения произведена по критерию Колмогорова-Смирнова. На уровне значимости 95%, закон распределения

центральной частоты ЗП описывается нормальным распределением, а закон распределения ширины спектра – логнормальным. Таким образом, искомым параметр модели ЗП $\sigma_v = \Delta v / 2 = 0.005v_{max}$.

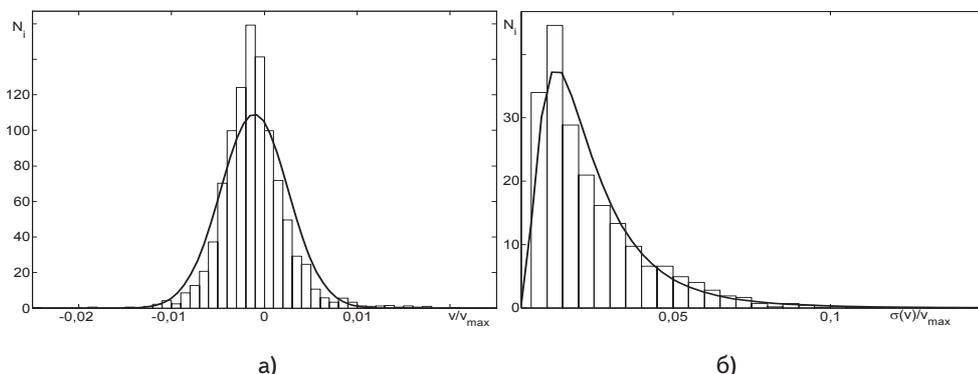


Рис. 4. Функция распределения а) центральной частоты ЗП, б) ширины спектра ЗП

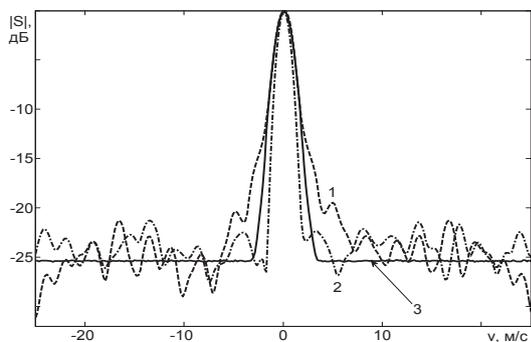


Рис. 5. Результаты моделирования земной помехи (график 1 – осредненный спектр ЗП по результатам зондирования, 2 – модель спектра ЗП, полученная по одиночной реализации, 3 – модель осредненного спектра ЗП)

3. Моделирование процесса обработки рассеянных сигналов

В данной работе используются две метрики погрешностей: среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки и среднее по модулю отклонение (СМО) оценки. Обозначим через ψ истинное значение оцениваемого параметра, через ψ' - получаемую оценку, а через N – число измерений. Тогда, среднеквадратическое отклонение оценки

$$\sigma(\psi) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\psi - \psi')^2}, \tag{4}$$

а среднее по модулю отклонение

$$M(\psi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\psi - \psi'|. \tag{5}$$

Примем следующие обозначения. Пусть ϵ - предельно допустимое отклонение оценки параметра ψ , то есть предполагается, что

$$M(\psi) \leq \epsilon. \tag{6}$$

Вследствие погрешностей и промахов измерений, выражение (6) в общем случае выполняется не для всех результатов, а для некоторой их доли

$$D(\epsilon) = \frac{n\{M(\psi) \leq \epsilon\}}{N}. \tag{7}$$

Величина, обратная $D(\epsilon)$ (7), показывает выраженную в процентах вероятность промахов при измерениях, для заданного предельного отклонения оценки:

$$C(\epsilon) = \frac{100}{D(\epsilon)}. \tag{8}$$

Также введём следующие обозначения. Под пороговым значением $\mu_{пор}$ мешающего фактора $\mu = P_{ЗП} / P_c$ будем понимать такое его значение, при которой для данного метода параметризации и данного метода фильтрации, погрешность оценивания искомого параметра равна ϵ . Под энергетической эффективностью $\Delta\mu$ будем понимать разницу в интенсивности мешающего фактора, при которой уровень погрешностей остается постоянным при переходе от одного метода обработки к другому.

В данной работе производится обработка рассеянных сигналов с использованием следующих методов параметризации спектров [1,5,6]:

1. Метод максимумов,
2. Метод моментов,
3. Циклический метод моментов,
4. Метод наименьших квадратов (МНК),
5. Циклический МНК,
6. Метод парных импульсов.

4. Методы подавления земной помехи

В статье рассматриваются следующие методы подавления земной помехи:

1. Фильтровый метод,
2. Метод нечеткой классификации ЗП,
3. Метод вейвлет-фильтрации

Режекторный фильтр, используемый для подавления ЗП в фильтровом методе, синтезирован по осредненным спектральным характеристикам земной помехи, полученным в результате обработки результатов измерений (раздел 1). Метод нечеткой классификации для подавления ЗП описан в [7], а вейвлет-фильтры ЗП – в [2,3].

Метод нечеткой классификации описывает разбиение многомерного пространства признаков принадлежности принятого сигнала к земной помехе. Для подавления ЗП в РЛС ВЗ методом нечёткой классификации используются характерные признаки ЗП, для которых строятся функции принадлежности, описывающие характерный вид спектра ЗП.

Из описания признаков спектральной характеристики ЗП выделены четыре параметра спектра, по которым производится классификация: модули первой $\alpha_1(f) = |S'(f)|$, и второй $\alpha_2(f) = |S''(f)|$ производной спектра описывают скорость нарастания и спада спектральной плотности мощности; модуль частоты описывает степень отклонения от нулевой частоты доплеровского сдвига $\alpha_f(f) = |f|$; параметр $\alpha_s(f) = |S(f) - S(-f)|$ описывает симметричность спектра относительно нулевой частоты.

В результате процедур фазификации и композиции [8] получается общая функция принадлежности спектра к спектру земной помехи, которая используется для подавления ЗП.

5. Коррекция систематических погрешностей

Рассмотрим процедуру параметризации спектров рассеянных сигналов в присутствии ЗП. Обозначим процедуру оценивания параметра через P , значение оценки параметра ψ - через ψ' .

Таким образом, $\psi' = P(\psi, \mu)$.

В общем случае, влияние шума и помех приводит к тому, что $\psi' \neq \psi$. Путем имитационного моделирования, можно сформировать сигналы с заданным значением параметра ψ , и подвергнуть их обработке, получив соответствующие значения оценок ψ' . Значения оценок связаны с истинным значением параметра следующим соотношением:

$$\psi' = F(\psi, \mu) + \xi, \tag{9}$$

где F - некоторая функция, а ξ - случайная величина. Функция F описывает систематические погрешности оценивания, а ξ - случайные погрешности, вызванные шумами.

Величина случайных погрешностей зависит от отношения сигнал/шум $q = \sqrt{2E/N_0}$, где E - энергия рассеянного сигнала, а N_0 - спектральная плотность мощности шума. При отношениях сигнал/шум $q \gg 1$, влиянием случайных погрешностей можно пренебречь. При этом, $\psi' \cong F(\psi, \mu)$.

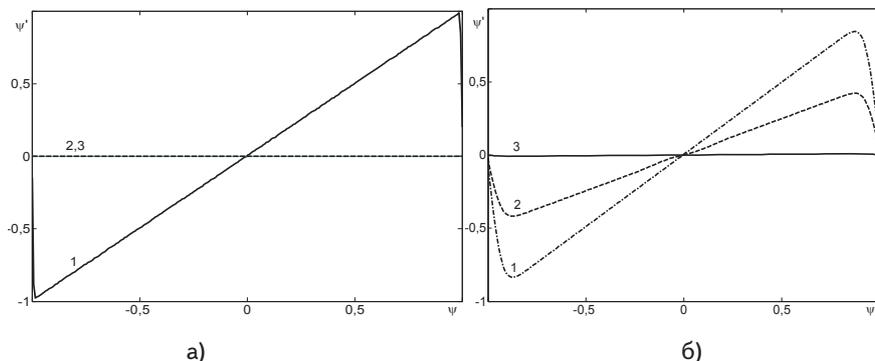


Рис. 6. Примеры функций $F(\psi, \mu)$, построенные для метода максимумов (а) и метода моментов (б), ($\mu = -30$ дБ (кривая 1), 0 дБ (кривая 2) и 10 дБ (кривая 3))

Аналитическое выражение для функции F отсутствует, однако можно аппроксимировать эту функцию полиномом степени N :

$$F(\psi) \Big|_{\mu = \text{const}} = a_1 \psi^N + a_2 \psi^{N-1} + \dots + a_N \psi + a_{N+1},$$

или

$$\psi' = \sum_{i=1}^{N+1} a_i \psi^{N-i+1}. \tag{10}$$

Решением задачи аппроксимации в данном случае будет набор коэффициентов $a_1 \dots a_{N+1}$ для каждого значения интенсивности мешающего фактора μ .

При этом, в процессе измерений нам известны коэффициенты $a_1 \dots a_{N+1}$, и значение оценки искомого параметра ψ' . Определить истинное значение ψ можно из уравнения (10), переписав его в виде

$$\sum_{i=1}^{N+1} a_i \psi^{N-i+1} - \psi' = 0. \tag{11}$$

Для уравнений степени 1...4 есть аналитические решения, решение уравнений более высокой степени целесообразно осуществлять численно.

6. Результаты моделирования

На рис. 7...8 представлены результаты имитационного моделирования процесса обработки рассеянных сигналов. На рис. 7а приведены результаты параметризации спектров рассеянных сигналов без какой-либо фильтрации, всеми рассмотренными в статье методами (кривая 1 – метод максимумов, 2 – метод моментов, 3 – циклический метод моментов, 4 – МНК, 5 – циклический МНК, 6 – метод парных импульсов).

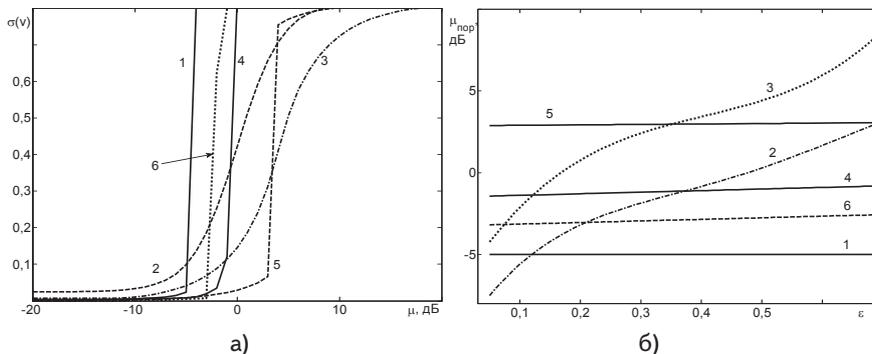


Рис. 7. Зависимость а) СКО оценок скорости ветра от интенсивности ЗП б) энергетической эффективности методов параметризации

С ростом мощности земной помехи, погрешности оценивания возрастают. При этом, для метода максимумов, метода парных импульсов и методов наименьших квадратов характерен пороговый эффект, в то время как для методов моментов характерно плавное увеличение погрешностей. Зависимость пороговой интенсивности ЗП от значения порога приведена на рис. 8, для случая параметризации всеми рассматриваемыми методами

без какой-либо фильтрации. По этому критерию, наиболее эффективны методы наименьших квадратов и циклический метод моментов. Зависимость энергетической эффективности методов параметризации приведена на рис. 7б. Результаты показаны относительно метода максимумов (кривая 1 – метод моментов, 2 – циклический метод моментов, 3 – МНК, 4 – циклический МНК, 5 – метод парных импульсов).

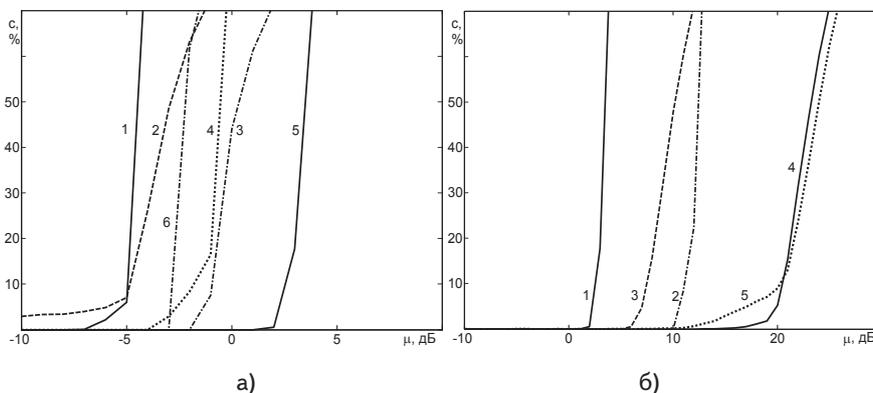


Рис. 10. а) Зависимость процента промахов от интенсивности ЗП при $\epsilon = 0.05$, б) Вероятность промахов в измерениях при пороговом значении $\epsilon = 0.05$

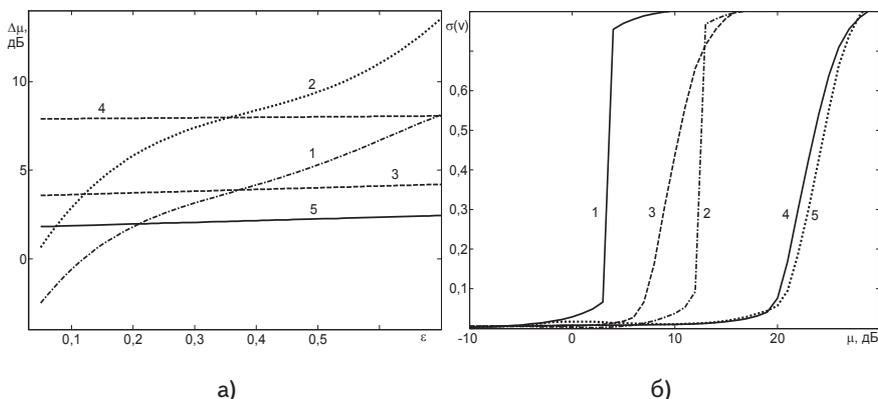


Рис. 8. Зависимость а) пороговой интенсивности ЗП от значения порога, б) СКО оценок скорости ветра от мощности ЗП

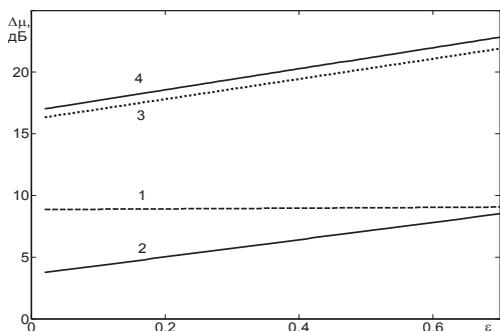


Рис. 9. Оценка энергетической эффективности для циклического метода наименьших квадратов, с использованием различных процедур фильтрации

На рис. 8-9 приведены зависимость СКО оценок скорости ветра от мощности ЗП, и оценка энергетической эффективности для циклического метода наименьших квадратов, с использованием различных процедур фильтрации (кривая 1 – без какой-либо фильтрации, 2 – с фильтром нечеткой классификации, 3 – с режекторным фильтром, 4 – с вейвлет-фильтром с мягким ограничением, 5 – с вейвлет-фильтром с жестким ограничением).

Наиболее эффективными оказываются вейвлет-фильтры (кри-

вые 3-4 на рис. 9), обеспечивая $\Delta\mu$ порядка 17 дБ относительно случая отсутствия фильтрации. Энергетическая эффективность для процедуры нечеткой классификации (кривая 1) составляет 9 дБ, для режекторного фильтра (кривая 2) – 4 дБ. Зависимость энергетической эффективности от порогового значения приведена на рис. 9.

На рис. 10а приведена зависимость вероятности промахов от интенсивности ЗП, для случая отсутствия фильтрации. Аналогично результатам, приведенным на рис. 7, наибольшее

пороговое значение мощности ЗП допустимо для циклического метода наименьших квадратов.

На рис. 10б приведены вероятностные характеристики оценки скорости ветра для этого метода параметризации совместно с различными процедурами фильтрации ЗП.

Рассмотрим результаты применения метода коррекции систематических погрешностей оценивания скорости ветра, вызванных влиянием ЗП (раздел 4). На рис. 11-12 приведены сравнительные вероятностные характеристики оценок, полученные без фильтрации (кривая 1 на каждом из рисунков), с применением соответствующего фильтра ЗП (кривая 2), а также комбинацией фильтра и процедуры коррекции (кривая 3). Результаты для метода нечеткой классифика-

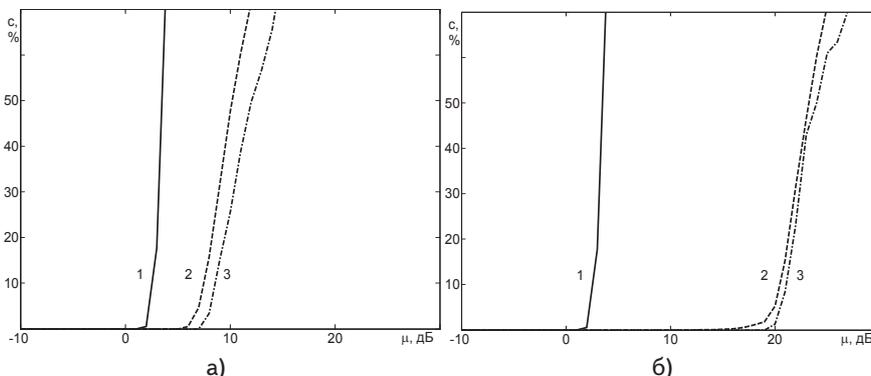


Рис. 11. Результаты коррекции оценок для а) режекторного фильтра, б) вейвлет-фильтра с мягким ограничением

ции не приводятся, т.к. коррекция не обеспечивает выигрыша в энергетической эффективности.

Коррекция оценок скорости ветра обеспечивает повышение энергетической эффективности фильтра на 1...3 дБ для режекторного фильтра, на 1...4 дБ для вейвлет-фильтра с мягким ограничением и на 1...2,5 дБ для вейвлет-фильтра с жестким ограничением, в зависимости от принятого порогового значения. В случае отсутствия фильтрации, средний показатель $\Delta\mu$ составляет: 0 дБ для метода максимумов, -0.15 дБ для метода наименьших квадратов, 0.4 дБ для циклического метода наименьших квадратов, -0.12 дБ для метода парных импульсов. Для метода моментов и циклического метода моментов, коррекция обеспечивает значительно больший выигрыш.

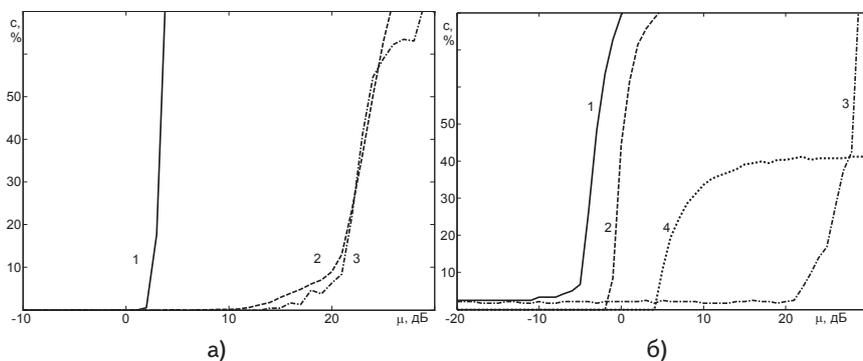


Рис. 12. Результаты коррекции оценок для вейвлет-фильтра с жестким ограничением

На рис. 12 приведены статистические характеристики оценок скорости ветра для метода моментов и циклического метода моментов (кривые 1 и 2), и те же характеристики после коррекции оценок (кривые 3 и 4, соответственно).

Большая эффективность метода коррекции оценок применительно к методам моментов обусловлена более плавным нарастанием погрешностей с увеличением мощности ЗП, по сравнению с другими рассмотренными методами параметризации.

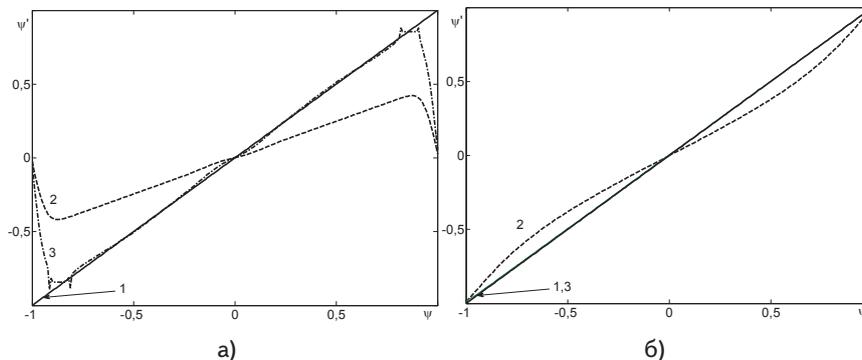


Рис. 13. Результат параметризации для а) метода моментов, б) циклического метода моментов

На рис. 13 приведены результаты оценивания скорости ветра при $\mu=10$ дБ методом моментов и циклическим методом моментов (кривая 1 – истинная зависимость, 2 – результат параметризации, 3 – скорректированная зависимость). Наличие ЗП вызывает смещение оценок скорости ветра в сторону меньших по модулю значений, и коррекция не полностью исправляет эту систематическую погрешность.

7. Выводы

Анализ результатов моделирования позволил сформулировать следующие выводы:

1. Наиболее устойчивы в условиях воздействия земной помехи оценки, полученные циклическим методом наименьших квадратов.
2. Из рассмотренных методов фильтрации земной помехи, метод вейвлет-фильтрации обеспечивает наименьшие погрешности оценивания скорости ветра.
3. Метод коррекции оценок скорости ветра, основанный на полиномиальной регрессии, не позволяет полностью компенсировать систематические погрешности, вызванные земной помехой, но может повысить эффективность существующих фильтров на 1...3 дБ.

Литература

1. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли [Текст] / Е. Г. Прошкин, М. Ф. Лагутин и др. ; Под общ. ред. Б. Л. Кашеева . Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. – 426 с.
2. Литвин-Попович А.И. Применение вейвлет-фильтрации для подавления земной помехи в РЛС вертикального зондирования атмосферы [Текст] / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // «Прикладная радиоэлектроника», 2008, том 7, №1, С.30-36.
3. Volker Lehmann and Gerd Teschke. Wavelet based methods for improved wind profiler signal processing. Ann. Geophysicae, 19,825-836, 2001.
4. Billingslay J.B. Low-angle radar land clutter. Measurements and empirical models. / J.Barrie Billingslay – NY:William Andrew Publishing, 2002. – 719p.
5. Литвин-Попович А.И. Параметризация спектров сигналов в радиолокационных станциях вертикального зондирования атмосферы. [Текст] / А.И.Литвин-Попович, В.Н.Олейников. // Радиотехника, 2008, вып. 152, С. 49-52.
6. Довиак Р. Доплеровские локаторы и метеорологические наблюдения. [Текст] / Р. Довиак, Д. Зрнич – Л.: Гидрометеониздат, 1988. 503 с.
7. Юдин С.В. Подавление земной помехи в РЛС вертикального зондирования методом нечеткой классификации [Текст] / С.В.Юдин, А.И.Литвин-Попович, В.Н.Олейников // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 160. – С. 165-170.
8. Нечеткие множества и теория возможностей [Текст] / Под ред. Ягера Р.– М. Радио и связь, 1986.–408 с.