

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОВ РАССЕЯННЫХ СИГНАЛОВ В РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

Радиолокационные методы исследования атмосферы позволяют в реальном времени контролировать тонкую пространственно-временную структуру метеорологических полей в атмосфере, существенно дополняя стандартные метеорологические измерения. Одним из перспективных методов дистанционного зондирования атмосферы является метод вертикального радиолокационного зондирования, который позволяет получать вертикальные профили метеорологических величин. Системы дистанционного зондирования атмосферы на основе радиолокационных станций вертикального зондирования (РЛС ВЗ) обеспечивают высокую оперативность, широкий пространственный охват и меньшую стоимость проведения измерений по сравнению с контактными системами измерения.

Особенности спектров сигналов обрабатываемых в радиолокационных станциях вертикального зондирования

Для получения информации о динамике атмосферных движений методом вертикального зондирования используется явление отражения электромагнитных волн от турбулентных образований в ясном небе [1]. Временное положение рассеянного сигнала и сдвиг по частоте, обусловленный эффектом Доплера, позволяют получить информацию о высоте и скорости перемещения атмосферных неоднородностей. Анализ параметров рассеянных сигналов позволяет получать в реальном масштабе времени высотно-временное поле скорости ветра и интенсивности турбулентности.

Спектральная плотность мощности (СПМ) принятого сигнала в РЛС ВЗ содержит сигнальную составляющую, обусловленную рассеянием излученного зондирующего импульса от движущихся с преобладающим ветром турбулентных неоднородностей коэффициента преломления атмосферы, рис. 1 – позиция 1, а также компоненты, обусловленные земной помехой – позиция 2, и шумами приемного тракта – позиция 3.

Сигнал земной помехи (ЗП) формируется элементами земной поверхности на удалении, соответствующем высоте зондирования. Ширина спектра ЗП обычно существенно уже ширины спектра сигналов, рассеянных турбулентными неоднородностями. Уровень ЗП для малых дальностей зондирования значительно, иногда на 20 – 40 дБ, превосходит уровень полезного сигнала. При квадратурной схеме обработки сигналов ширина компонент спектра ЗП значительно меньше, чем для одноканальной схемы, вследствие устранения неоднозначности определения фазы принимаемого сигнала. Вследствие ограниченной длины реализации для спектрального анализа спектр ЗП растекается на несколько частотных отсчетов. К такому же эффекту приводит и наличие медленно перемещающихся целей, отражения от которых воспринимаются по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны. Наличие в спектральной плотности мощности рассеянного сигнала

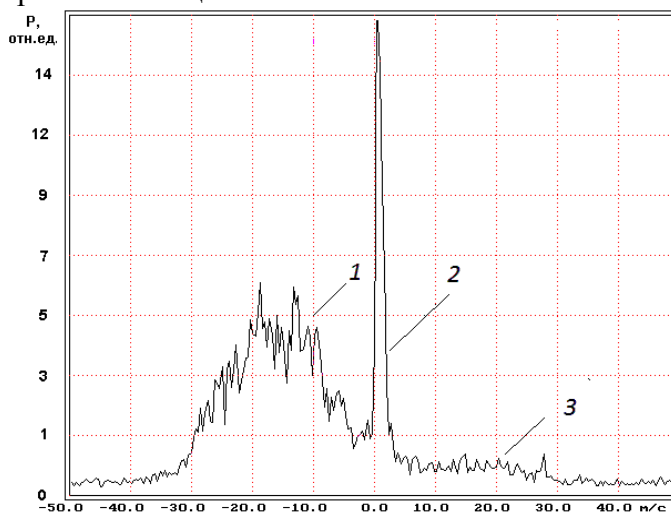


Рис. 1

шумов и помех усложняет определение параметров сигнальной части спектра, вызывая смещение оценок доплеровского сдвига в сторону меньших абсолютных значений. Отражение от местных предметов практически когерентно и медленно меняется во времени. Мощность, отраженная от наземных объектов, образующих земную помеху, обратно пропорциональна четвертой степени расстояния до них, в то время как мощность отраженных от атмосферных неоднородностей сигналов 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.

Модель сигнала на входе в радиолокационной станции вертикального зондирования

Сигнал на входе РЛС ВЗ формируется как отражение от совокупности элементарных «целей», сосредоточенных в пределах импульсного объема, ограниченного диаграммой направленности РЛС и пространственной протяженностью зондирующего импульса. Поскольку в импульсном объеме присутствует множество неоднородностей, то рассеянный сигнал представляет собой суперпозицию отдельных отражений от каждой неоднородности в отдельности. Так как случайные колебания скорости отдельных отражателей независимы, то с увеличением их числа закон распределения флуктуационной компоненты зарегистрированной РЛС ВЗ скорости ветра стремится к нормальному закону в силу центральной предельной теоремы. Утверждение о гауссовой СПМ рассеянного сигнала справедливо при времени накопления более нескольких секунд, что подтверждают экспериментальные результаты. Пример регистрации СПМ рассеянного сигнала, полученных с временем накопления сигнала 4 с, приведен на рис. 2, а, с временем накопления 200 с на рис. 2, б. Данные получены на РЛС ВЗ дециметрового диапазона ХНУРЭ [1].

Ширина спектра ЗП оценивается путем анализа характеристик выборок рассеянных сигналов с нижних высотных слоев. Проведенные исследования подтвердили соответствие гауссовой модели ЗП результатам измерений [2]. Параметры оценивались по выборкам, полученным в ходе зондирования атмосферы на РЛС ВЗ дециметрового диапазона [1]. Анализ выборок, полученных при диапазоне однозначного определения ± 50 м/с, показал, что спектр ЗП центрирован около нулевого значения скорости и имеет ширину $\Delta\nu = 0.0158\nu_{\max}$.

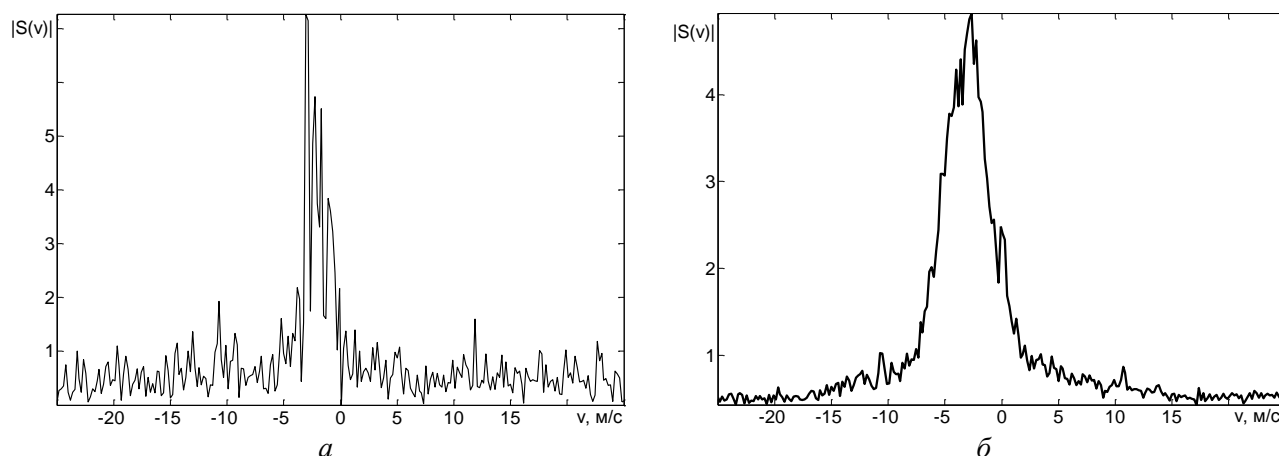


Рис. 2

При рассмотрении рассеянного сигнала на интервалах времени, превосходящих время существования неоднородностей в атмосфере, можно использовать упрощенную математическую модель рассеянного сигнала, исходя из осредненных параметров наблюдаемых выборок в натурном эксперименте. Амплитудный спектр модели сигнала рассеянного на турбулентных неоднородностях коэффициента преломления атмосферы формируется в виде функции Гаусса с заданными параметрами, а фазовый спектр представляет собой равномер-

но распределенный на интервале $-\pi \dots \pi$ случайный процесс. СПМ ЗП задается в виде функции Гаусса с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией, определенной на основе экспериментальных данных. Переход во временную область осуществляется путем обратного преобразования Фурье от комплексного спектра. Для формирования помехового компонента сигнала к реализации, полученной в результате обратного преобразования Фурье, добавляется белый гауссовый шум.

Методы оценки параметров спектров сигналов рассеянных на атмосферных неоднородностях

Информативными параметрами сигнала в системах дистанционного зондирования атмосферы являются первые три момента спектра: мощность рассеянного сигнала, доплеровский сдвиг, спектральная ширина. Смещение оценок информативных параметров возможно вследствие воздействия ЗП, тепловых шумов, помех индустриального и естественного происхождения. В зависимости от вида функции стоимости ошибок измерения [3], параметризация может быть реализована методом максимумов, методом моментов или методом наименьших квадратов.

Наиболее простым в реализации методом параметризации спектров сигналов рассеянных на атмосферных неоднородностях является метод максимума. Он подразумевает оценку центральной частоты по положению максимального пика спектра, и оценку спектральной ширины по количеству отсчетов, превысивших порог. Этот метод имеет существенный недостаток – чувствительность к мощным узкополосным помехам, которые могут быть приняты за полезный сигнал, и привести к промахам в оценке доплеровского сдвига.

Метод моментов заключается в оценивании моментов спектра случайного процесса по выборке:

$$P' = \sum_{i=1}^N y_i, \quad f_0' = \frac{1}{P'} \sum_{i=1}^N i \cdot y_i, \quad \sigma' = \sqrt{\frac{1}{P'} \cdot \sum_{i=1}^N y_i \cdot (i - f_0')^2}.$$

Мощные узкополосные помехи, например ЗП, приводят к смещению оценок скорости ветра, однако этот эффект для метода моментов выражен значительно слабее по сравнению с методом максимума.

Параметрические методы основаны на подборе параметров модели, при котором достигается минимум меры расхождения модельных данных с реальными. Наиболее распространенным методом из этой категории является метод наименьших квадратов (МНК). В МНК осуществляется минимизация функции:

$$e(f_0, \Delta f) = \sum_{i=1}^N [y(i) - g(i, f_0, \Delta f)]^2, \quad (1)$$

где g – применяемая модель. В качестве модели для МНК применяется функция Гаусса. Функция Гаусса имеет два параметра, которые определяют положение ее центра и ширину, то есть решение оптимизационной задачи непосредственно дает искомые результаты. Целевая функция параметризации спектра рассеянного сигнала МНК (исходный спектр в виде функции Гаусса) представлена на рис. 3.

Для минимизации целевой функции могут быть использованы различные методы. Наиболее прост в реализации метод прямого перебора всех возможных значений параметров с последующим выбором тех значений, которые обеспечивают минимальную невязку модели с выборочным спектром. Более перспективными являются методы оптимизации, при этом используются прямые методы (метод Нелдера – Мида, метод покоординатного спуска) и косвенные методы (градиентные, в частности метод наискорейшего спуска и его модификации) [4].

Можно выделить разновидности мешающих факторов, приводящих к систематическим погрешностям при параметризации спектров рассеянных сигналов :

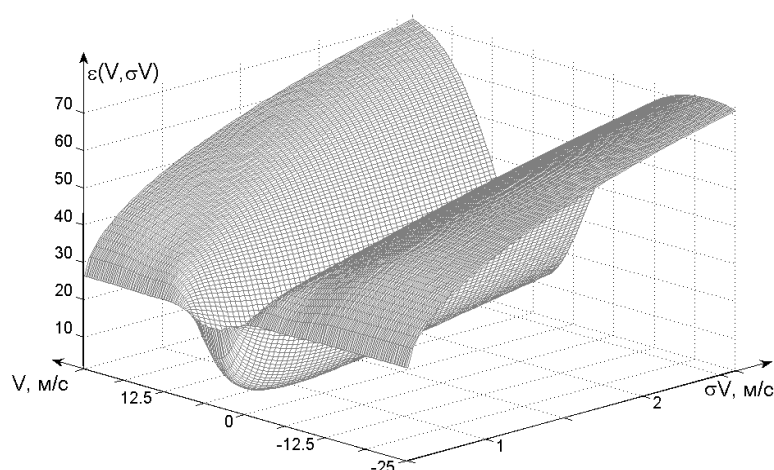


Рис. 3

- мешающие отражения от земной поверхности проявляются в виде интенсивной частотной составляющей на нулевой частоте и приводят к смещению оценки скорости ветра в сторону меньших по модулю значений;

- краевые эффекты при параметризации проявляются в виде смещения оценки скорости ветра в сторону меньших по модулю значений.

Алгоритмические методы подавления земной помехи в спектре рассеянного сигнала

Параметризация спектра сигнала производится после удаления ЗП из спектра рассеянного сигнала. Основными алгоритмическими методами подавления ЗП являются:

- замена участка спектра, примыкающего к нулевой частоте реализацией шума;
- формирование массива шаблонов ЗП путем усреднения большого числа спектров рассеянных сигналов для разных высотных слоев и направлений зондирования;
- применение режекторных фильтров, настроенных на подавление сигналов нулевой частоты, метод эффективен в случае неперекрывающихся спектров ЗП и полезного сигнала (метод вейвлет-фильтрации, метод адаптивной режекции на основе авторегрессионной модели).

Для подавления земной помехи наиболее эффективным из рассмотренных методов оказался метод вейвлет-фильтрации [5]. Принцип действия вейвлет-фильтра основан на разложении сигнала в базисе вейвлет-функции с последующим обнулением коэффициентов разложения, соответствующих помеховым составляющим. На рис. 4 приведены: 1 – результаты вейвлет-разложения модели сигнала для случая модели сигнала без ЗП, 2 – для случая модели сигнала с ЗП. Коэффициенты разложения изображены в порядке возрастания уровня разложения. При наличии в анализируемом сигнале ЗП коэффициенты первого уровня разложения [6] имеют повышенную дисперсию. Из проведенного анализа свойств коэффициентов разложения 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.

Для исследования эффективности работы алгоритмов подавления ЗП был применен метод имитационного моделирования, использовалась рассмотренная ранее модель со следующими параметрами: отношение сигнал/шум 20 дБ, спектральная ширина полезного сигнала 1,5 м/с, полный диапазон однозначного определения скорости ± 25 м/с. На рис.5 приведены результаты параметризации спектров рассеянных сигналов, соответствующих диапазону скоростей ветра ± 25 м/с, методом наименьших квадратов для случаев применения всех рассматриваемых фильтров подавления ЗП (1 – исходный профиль, 2 – без фильтрации, 3 – обнуление ЗП, 4 – адаптивный фильтр авторегрессионный фильтр, 5 – вейвлет-фильтр).

Наибольшую величину погрешностей можно наблюдать при отсутствия фильтрации ЗП, наименьшую – в случае применения вейвлет-фильтра. Анализ результатов моделирования показал преимущества применения вейвлет-фильтра для подавления земной помехи в РЛС

ВЗ, особенно в случае частотного перекрытия спектров рассеянного сигнала и земной помехи, в сравнении с методами, основанными на адаптивной фильтрации.

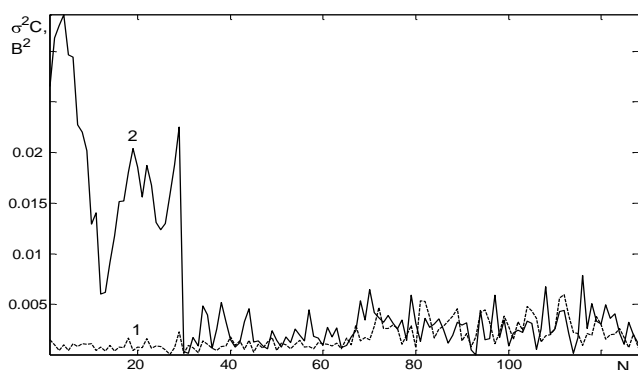


Рис. 4

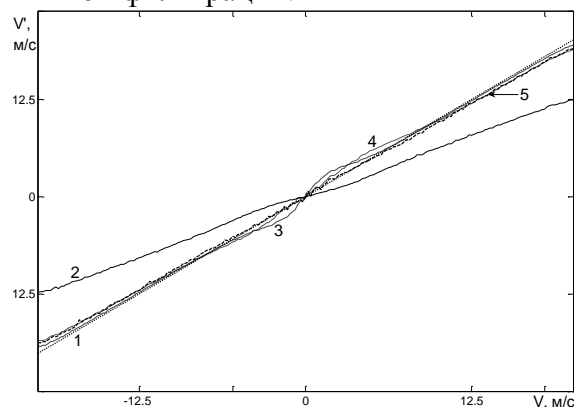


Рис. 5

Краевые эффекты при параметризации спектров сигналов, рассеянных атмосферными неоднородностями

Параметризация спектров сигналов, рассеянных атмосферными неоднородностями, имеет особенность, заключающуюся в циклическом характере спектра сигнала, когда величина доплеровского смещения приближается к половине частоты дискретизации $\pm f_{\text{диск}}/2$. В этом случае спектральный максимум смещается к краю частотной оси и часть спектральных составляющих циклически переходит на частоты $\mp f_{\text{диск}}/2$. Диапазон однозначно определяемых скоростей РЛС определяется через диапазон однозначно определяемых доплеровских сдвигов, составляющий $f_{\text{д}} = -1/T \dots 1/T$, где T – период повторения зондирующих импульсов.

Повышение отношения сигнал/шум в РЛС ВЗ достигается методом когерентного накопления, при этом для уменьшения флуктуационных погрешностей применяются максимально возможная кратность накопления и наиболее узкий диапазон измеряемых скоростей ветра, что приводит к возрастанию систематических погрешностей, вызванных краевыми эффектами. Снижение погрешностей параметризации спектров возможно следующими путями:

- применением методов параметризации, нечувствительных к краевым эффектам;
- выбором кратности накопления, при которой краевые эффекты для максимальных значений измеряемых скоростей ветра проявляются несущественно.

В случае использования циклического спектра, метод моментов обеспечивает смещенные оценки центральной частоты.

Представим спектр в полярной системе координат, тогда координаты центра масс спектра записываются как [7]:

$$\bar{c} = E(\rho \cdot \cos \theta), \quad \bar{s} = E(\rho \cdot \sin \theta)$$

(здесь и далее E – оператор среднего значения). Полярные координаты центра масс определяются выражением

$$\bar{\theta} = \arctg(\bar{s}/\bar{c}), \quad \bar{\rho} = \sqrt{\bar{s}^2 + \bar{c}^2}$$

Математическое ожидание угловой координаты центра масс

$$\bar{\theta} = \arctg \left(\frac{E(\rho \cdot \sin \theta)}{E(\rho \cdot \cos \theta)} \right)$$

Метод наименьших квадратов подвержен краевым эффектам, поскольку в целевой функции (1) не учитывается явление подмены частот, вызванное прореживанием реализаций

во время когерентного накопления. Вследствие этого явления ось частот «зацикливается» и возникает неоднозначность определения доплеровских сдвигов и, соответственно, скоростей ветра.

В связи с этим, модель спектра для параметризации удобно формировать в полярных координатах, в «намотанном» виде [7, 8]. Намотанное нормальное распределение определяется выражением

$$f(\theta, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(\theta + 2\pi k)^2}{\sigma^2}\right)$$

или в виде ряда Фурье:

$$f(\theta, \sigma) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(1 + 2 \sum_{p=1}^{\infty} (\exp(-\sigma^2 / 2))^{p^2} \cdot \cos(p\theta)\right).$$

Влияние краевых эффектов при параметризации спектров рассеянных сигналов исследовалось путем имитационного моделирования с использованием рассмотренной ранее модели. При моделировании рассеянный сигнал формировался в диапазоне скоростей ± 25 м/с. Среднеквадратичное отклонение (СКО) оценок вычислялось по формуле

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i' - x_i)^2}{N - 1}}$$

где x_i' – оценка параметра X ; x_i – истинное значение параметра X ; N – объем выборки моделирования.

Исследовалась зависимость среднего смещения оценки скорости ветра от истинного значения скорости ветра для рассмотренных методов параметризации. Результаты моделирования представлены на рис. 6 для следующих параметров рассеянного сигнала: отношение сигнал/шум 10 дБ, спектральная ширина рассеянного сигнала 2.5 м/с.

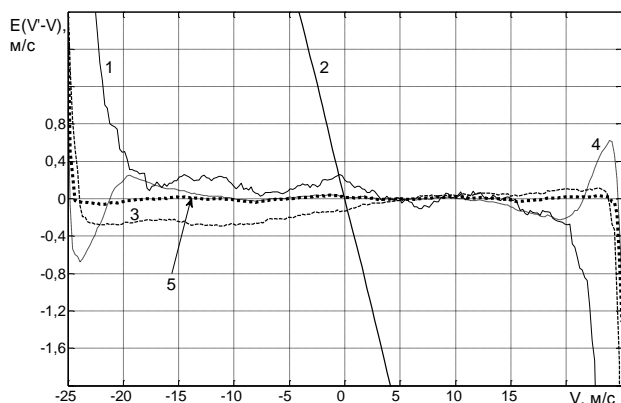


Рис. 6

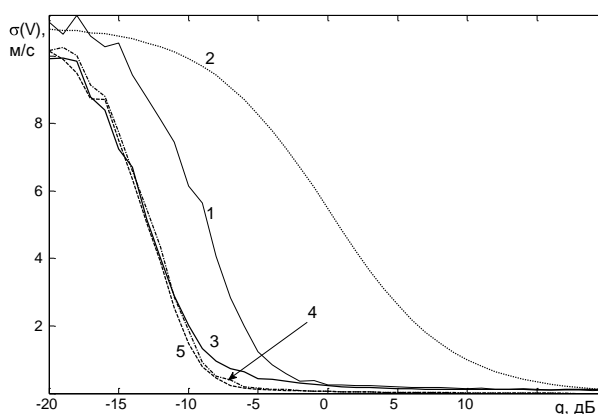


Рис. 7

Здесь приняты следующие обозначения: 1 – метод максимума, 2 – метод моментов, 3 – циклический метод моментов, 4 – МНК, 5 – циклический МНК. Также исследованы зависимости СКО оценки скорости от отношения с/ш при фиксированной спектральной ширине рассеянного сигнала, равной 2,5 м/с, результаты которого представлены на рис. 7, обозначения методов параметризации аналогичны обозначениям для рис. 6.

Результаты исследования зависимости скорости выполнения параметризации спектра от размера выборки представлены на рис. 8.

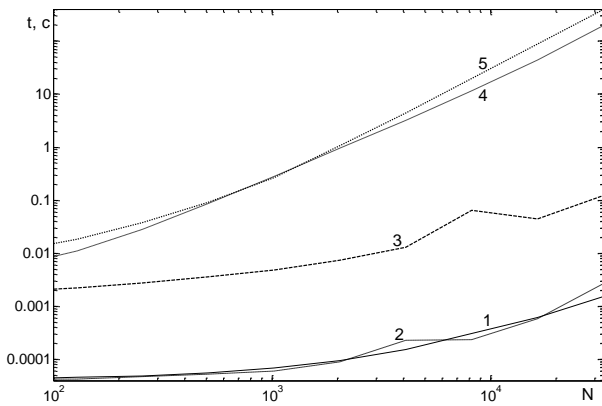


Рис. 8

Анализ полученных результатов показывает, что метод моментов имеет значительные краевые эффекты и обеспечивает приемлемые характеристики лишь при достаточно высоких отношениях сигнал/шум. Метод наименьших квадратов с шаблоном в виде функции Гаусса подвержен существенным краевым эффектам, и для его применения следует существенно расширять диапазон однозначно определяемых скоростей путем снижения кратности когерентного накопления. Метод МНК с циклической гауссианой обеспечивает наименьшую остаточ-

ную ошибку параметризации.

Из рассмотренных методов параметризации наилучшие метрологические характеристики обеспечивает циклический метод наименьших квадратов. Циклический метод моментов уступает ему, однако имеет значительно более низкую вычислительную сложность, что позволяет применять его для предварительной оценки метеопараметров.

Заключение

Рассмотрены методы оценки параметров спектра сигнала, рассеянного от турбулентных неоднородностей, получаемых с помощью РЛС ВЗ. На основе разработанной модели сигнала методом имитационного моделирования исследованы характеристики точности результатов оценки скорости ветра. В результате анализа определены доминирующие причины искажения оценок скорости ветра и промахов измерений. Применение методов параметризации, использующих представление спектров в полярных координатах, позволяет устранить краевые эффекты.

Предложены мероприятия по снижению влияния краевых эффектов при параметризации спектров и мешающих отражений от земной поверхности.

Список литературы. 1. *Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли*; под ред. Б.Л. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. – Харьков: ХНУРЭ, 2002. – 425 с. 2. *Barrie Billingslay, J. Low-angle radar land clutter. Measurements and empirical models* / NY: William Andrew Publishing, 2002. – 719р. 3. *Тихонов, В.И., Харисов, В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с. 4. *Бахвалов, Н.С.* Численные методы. – М.: Наука, 1975. – 630 с. 5. *Теория и практика вейвлет-преобразования* / В.И. Воробьев, В.Г. Грибунин. – СПб.: ВУС, 1999. – 204с. 6. *Литвин-Попович, А.И.* Применение вейвлет-фильтрации для подавления земной помехи в РЛС вертикального зондирования атмосферы / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Т. 7, №1. – С.30-36. 7. *Мардиа, К.* Статистический анализ круговых наблюдений; пер. с англ. – М.: Наука, 1978. – 239 с. 8. *Литвин-Попович, А.И.* Параметризация спектров рассеянных сигналов в РЛС вертикального зондирования атмосферы / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // Радиотехника. – 2008. – Вып. 152. – С. 49-52.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 18.04.2017