

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Радиолокационные станции вертикального зондирования атмосферы (РЛС ВЗ) [1] в настоящее время стали штатным оборудованием национальных метеорологических служб, всего в мире эксплуатируется более 200 РЛС этого типа, используемых научно-исследовательскими организациями, национальными метеослужбами и университетами. В ряде стран и регионов (США, Япония, ЕС) развернуты сети РЛС ВЗ.

Согласно [2], сети РЛС ВЗ обеспечивают техническую надежность на уровне 98 процентов и достоверность результатов на уровне 70 процентов в высотном слое до 6-7 километров летом и до 3-4 километров зимой (для японской метеорологической сети). Неполное покрытие высотного диапазона и наличие пропусков данных подтверждает актуальность исследований в области дальнейшего усовершенствования систем обработки сигналов РЛС ВЗ.

Обработка сигналов в станциях вертикального зондирования осуществляется путем параметризации спектров сигналов, принятых с отдельных высотных уровней. Параметризация предполагает оценку первых трех моментов спектра – доплеровского сдвига частоты зондирующего сигнала, ширины спектра и мощности рассеянного сигнала. В станциях вертикального зондирования, информативными параметрами являются скорость ветра, степень турбулизованности воздушной среды и отражаемость, вычисляемые соответственно из оцененного доплеровского сдвига частоты, ширины спектра и мощности рассеянных сигналов.

Смещение оценок информативных параметров возможно вследствие воздействия земной помехи, тепловых шумов, излучений других радиоэлектронных средств и импульсных помех промышленного и естественного происхождения.

В зависимости от вида функции стоимости ошибок измерения [3], параметризация может быть реализована методом максимумов, методом моментов или методом наименьших квадратов.

Задача параметризации спектров в системах с цифровой обработкой сигналов, рассеянных атмосферными неоднородностями, имеет особенность, заключающуюся в циклическом характере спектра сигнала. Это явление вызвано дискретизацией сигналов при аналого-цифровом преобразовании [4]. Дополнительным фактором, увеличивающим влияние краевых эффектов в системах обработки сигналов РЛС ВЗ, является прореживание реализаций при когерентном накоплении, приводящее к снижению результирующей частоты дискретизации и соответственно, уменьшению периода повторения копий спектра исходного процесса в составе спектра дискретного сигнала. Для уменьшения влияния краевых эффектов при параметризации спектров сигналов необходимо внести изменения в традиционные алгоритмы обработки спектров.

Метод моментов в классической формулировке записывается так [1]:

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

В случае циклического спектра, метод моментов обеспечивает смещенные оценки центральной частоты (и соответственно скорости ветра). Для устранения этого недостатка, можно ограничить диапазон однозначного определения скоростей либо внести изменения в методику обработки спектров. Ограничение диапазона однозначно определяемых скоростей приводит к снижению отношения сигнал/шум и увеличению флуктуационных погрешностей оценок, поскольку обеспечивается уменьшением кратности когерентного накопления.

Представим спектр в полярной системе координат, тогда координаты центра масс спектра записываются как [5]:

$$\bar{c} = E(\rho \cdot \cos \theta), \quad \bar{s} = E(\rho \cdot \sin \theta) \quad (2)$$

(здесь и далее E – оператор среднего значения). Для определения полярных координат центра масс запишем:

$$\bar{\theta} = \arctg(\bar{s}/\bar{c}), \quad \bar{\rho} = \sqrt{\bar{s}^2 + \bar{c}^2} \quad (3)$$

Таким образом, математическое ожидание угловой координаты центра масс равно:

$$\bar{\theta} = \arctg\left(\frac{E(\rho \cdot \sin \theta)}{E(\rho \cdot \cos \theta)}\right) \quad (4)$$

а дисперсия угловой координаты центра масс запишется как

$$D_{\theta} = E[(\theta_i - \bar{\theta})^2] = \arctg\left(\frac{E((\rho - \bar{\rho})^2 \cdot \sin((\theta - \bar{\theta})^2))}{E((\rho - \bar{\rho})^2 \cdot \cos((\theta - \bar{\theta})^2))}\right) \quad (5)$$

Метод наименьших квадратов (МНК) подразумевает определение параметров функции-шаблона, при которых средний квадрат невязки шаблона с выборочным спектром имеет минимальное значение. Поскольку скорости точечных отражателей в импульсном объеме независимы, а число точечных отражателей велико, результирующий закон распределения скорости сходится к нормальному при увеличении времени накопления в силу центральной предельной теоремы [1,3]. Поэтому в качестве шаблона логично применить функцию Гаусса. Тогда невязка параметризации записывается так:

$$e(f_0, \Delta f) = \sum_{i=1}^N [x(i) - \exp(-\frac{(i - f_0)^2}{2 \cdot \Delta f^2})]^2 \quad (6)$$

Аналогично методу моментов, МНК также имеет краевые эффекты. Для их устранения необходимо заменить функцию Гаусса, описывающую линейное нормальное распределение, на функцию, описывающую нормальное распределение на окружности [5]:

$$f(\theta, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(\theta + 2\pi k)^2}{\sigma^2}) \quad (7)$$

Или, в виде ряда Фурье:

$$f(\theta, \sigma) = \frac{1}{2\pi} \cdot (1 + 2 \sum_{p=1}^{\infty} (\exp(-\sigma^2 / 2))^{p^2} \cdot \cos(p\theta)) \quad (8)$$

тогда невязка параметризации запишется так:

$$e(f_0, \Delta f) = \sum_{i=1}^N [x(i) - \frac{1}{2\pi} \cdot (1 + 2 \sum_{p=1}^K \rho^{p^2} \cdot \cos(p\theta))]^2 \quad (9)$$

Сравнение предлагаемых методик параметризации с традиционными производилось путем имитационного моделирования. В отличие от аналогичных работ, моделирование производилось для всего диапазона скоростей, чтобы учитывать влияние краевых эффектов.

Модель рассеянного сигнала формировалась в частотной области из амплитудно-частотного спектра в форме гауссианы с заданной спектральной шириной и центральной частотой. Фазо-частотный спектр представляет собой равномерно распределенный на интервале $-\pi \dots \pi$ случайный процесс [3]. Переход во временную область осуществлялся путем обратного преобразования Фурье и добавления белого гауссового шума до получения требуемого отношения сигнал/шум. Моделирование проводилось для следующих условий: диапазон скоростей ветра ± 25 м/с, спектральная ширина рассеянного сигнала 0.5...10 м/с с шагом 0.5 м/с, отношение сигнал/шум -10...+20 дБ. Среднеквадратичное отклонение (СКО) оценок вычислялось по формуле

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i' - x_i)^2}{N-1}} \quad (10)$$

где x_i' - оценка параметра X , x_i - истинное значение параметра X , N - объем выборки моделирования.

Результаты имитационного моделирования приведены на рисунках 1-8. Обозначения: 1 - метод максимума, 2 - метод моментов, 3 - циклический метод моментов, 4 - МНК (6), 5 - циклический МНК (9), 6 - предельное время параметризации для оперативного оценивания параметров, 7 - предельное время параметризации для оценивания средних параметров. q - отношение сигнал/шум, σ_V - СКО оценки скорости ветра, ΔV - оценка спектральной ширины. Спектральная ширина полезного сигнала 1.5 м/с.

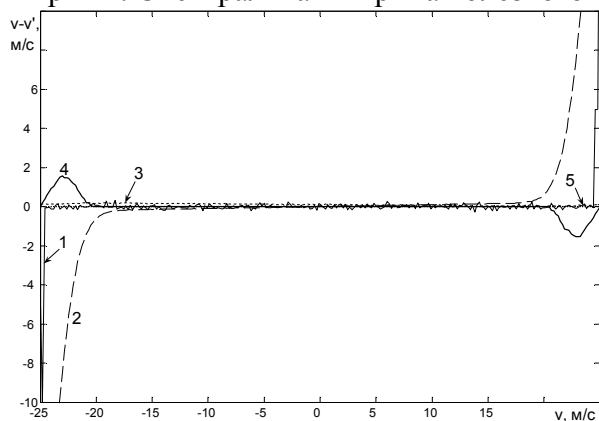


Рисунок 1 – Зависимость ошибки оценки скорости ветра от истинного значения скорости ветра.

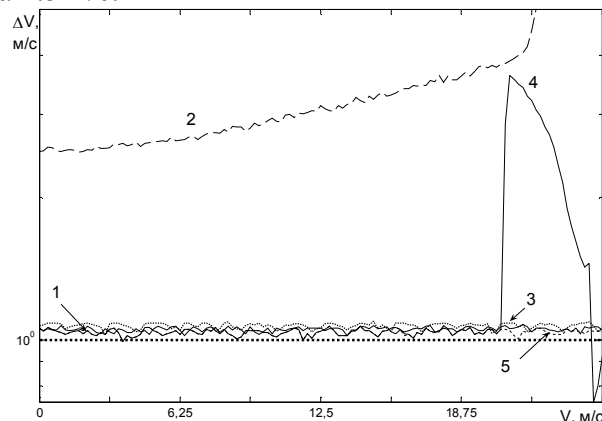


Рисунок 2 – Зависимость оценки спектральной ширины от истинного значения скорости ветра.

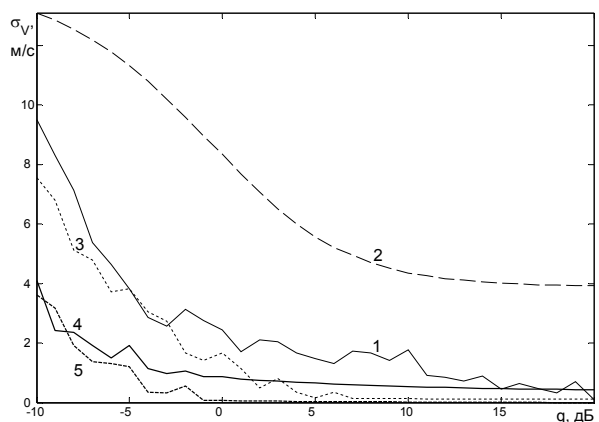


Рисунок 3 – Зависимость СКО оценки скорости ветра от отношения сигнал/шум для полного диапазона однозначно определяемых скоростей.

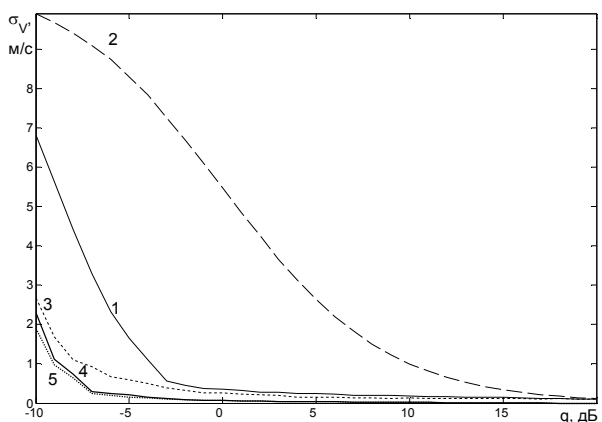


Рисунок 4 – Зависимость СКО оценки скорости ветра от отношения сигнал/шум для центральной части диапазона однозначно определяемых скоростей ($\pm 0.75 \cdot V_{MAX}$).

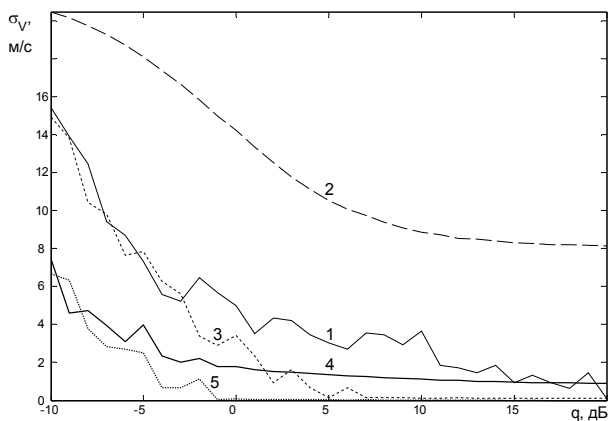


Рисунок 5 – Зависимость СКО оценки скорости ветра от отношения сигнал/шум для краев диапазона однозначно определяемых скоростей $(\pm(0.75...1) \cdot V_{MAX})$.

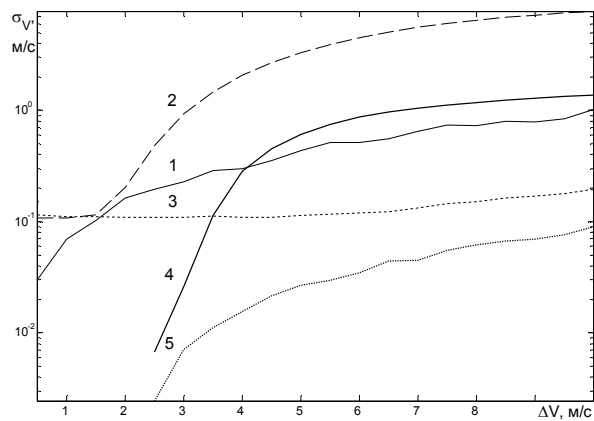


Рисунок 6 – Зависимость СКО оценки скорости ветра от спектральной ширины полезного сигнала. $q=20$ дБ.

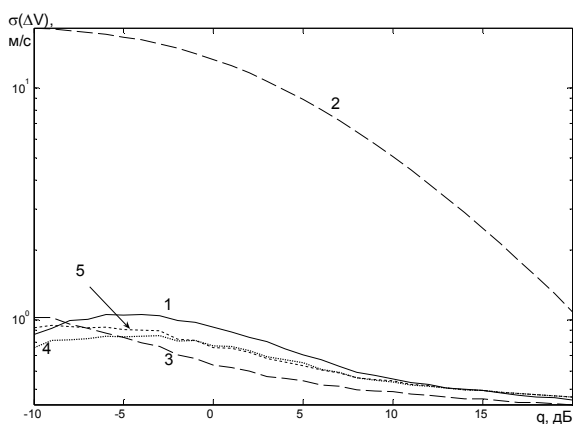


Рисунок 7 – Зависимость СКО оценки спектральной ширины полезного сигнала от отношения сигнал/шум.

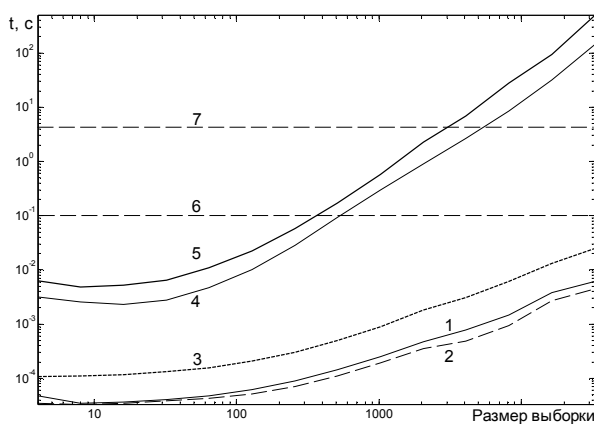


Рисунок 8 - Зависимость скорости выполнения от размера выборки.

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что метод моментов, имеет значительный уровень погрешностей на краях диапазона измеряемых доплеровских сдвигов. Предложенные в данной работе методы параметризации обеспечивают значительное снижение систематической погрешности оценивания параметров спектров рассеянных сигналов при больших по модулю значениях доплеровского сдвига. Следует особо отметить метод МНК с циклической гауссианой (9), как обеспечивающий наименьшую остаточную ошибку параметризации. При этом предлагаемые методы (в особенности циклический метод моментов) имеют достаточно высокую вычислительную эффективность для приложений оперативного оценивания параметров спектров рассеянных сигналов.

Список литературы:

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. Отчет с резолюциями и рекомендациями. Комиссия по основным системам всемирной метеорологической ассоциации. // 23 февраля - 3 марта 2005г., тринадцатая сессия. ВМО № 895, ISBN 92-63-40985-4.
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.:ил.
4. Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций. 2-е изд. / А.И.Солонина, Д.А.Улахович, С.М.Арбузов и др. – СПб.:БХВ-Петербург, 2005 – 768с.:ил.
5. Мардиа К. Статистический анализ круговых наблюдений. Перев. с англ. М.:Наука, 1978.