

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА МАЛЫХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛАХ

А.И. ЛИТВИН-ПОПОВИЧ, В.Н. ОЛЕЙНИКОВ

В работе рассматриваются особенности процедуры анализа данных радиолокационного зондирования атмосферы при времени когерентного накопления, существенно меньшем интервала стационарности рассеянных сигналов. Рассмотрен метод параметризации спектров, основанный на авторегрессионном спектральном оценивании.

Ключевые слова: радиолокационная метеорология, РЛС вертикального зондирования атмосферы, оценивание параметров рассеянных сигналов, параметризация спектров рассеянных сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

Работа РЛС вертикального зондирования атмосферы (РЛС ВЗ) основывается на рассеянии зондирующего сигнала турбулентными неоднородностями в импульсном объеме [1]. Появление неоднородностей связано с неравномерным прогревом атмосферы и подстилающей поверхности. РЛС ВЗ обеспечивает измерение высотного профиля скорости и направления ветра, а также высотн-временных зависимостей мощности рассеянного сигнала. Скорость ветра определяется по доплеровскому сдвигу частоты сигнала, полученного рассеянием зондирующей радиоволны.

Экспериментально установлено [2], что спектр сигнала, рассеянного турбулентными неоднородностями в импульсном объеме, может быть аппроксимирован функцией Гаусса при времени наблюдения, близком к интервалу стационарности атмосферных процессов $T_k = 0,2\lambda/\sigma_V$ (λ — длина волны, σ_V^2 — дисперсия скорости ветра в импульсном объеме). Ряд методов оценивания моментов спектров рассеянных сигналов основывается на предположении о гауссовидной форме спектра. В то же время, при более коротком времени накопления, проявляются особенности структуры неоднородностей в импульсном объеме. В связи с этим, при анализе результатов радиолокационного зондирования атмосферы с высоким временным разрешением, необходимо оценить применимость традиционных методов параметризации спектров рассеянных сигналов.

1. МОДЕЛИ РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

Модель рассеянного сигнала на интервале накопления порядка нескольких минут можно задать исходя из осредненного амплитудного спектра за этот временной интервал. При этом амплитудный спектр имеет форму функции Гаусса, причем центральная частота, ширина спектра и мощность задаются непосредственно [1-4].

Модель рассеянного сигнала для более коротких интервалов накопления должна учитывать неоднородность структуры рассеивающего объема. При зондировании, рассеяние радиоволн осуществляется каждой из неоднородностей, причем рассеянные сигналы суммируются в пространстве и

антенна регистрирует результат их суперпозиции. Каждая из неоднородностей переносится с преобладающим ветром и испытывает дополнительно флуктуации координат, вызванные турбулентным перемешиванием и тепловыми хаотическими процессами. При малом времени накопления, общее число рассеивающих неоднородностей в импульсном объеме относительно невелико, поэтому могут наблюдаться многомодовые и сильно флуктуирующие спектры. Каждый из максимумов спектральной плотности мощности (СПМ) рассеянного сигнала обусловлен отражением от точечной цели — турбулентной неоднородности. Таким образом, оценив по экспериментальным данным статистику параметров импульсного объема, можно создать модель, рассчитанную, в том числе, и на малое время накопления.

Авторегрессионная (АР) модель первого порядка [5, 6]

$$x(t) = n(t) + a_1 \cdot n(t-1), \quad (1)$$

где $n(t)$ — отсчеты нормального белого шума, формирует узкополосные сигналы с центральной частотой:

$$\omega_0 = \arg(a_1), \quad (2)$$

и шириной спектра

$$\Delta\omega = -2\ln|a_1|. \quad (3)$$

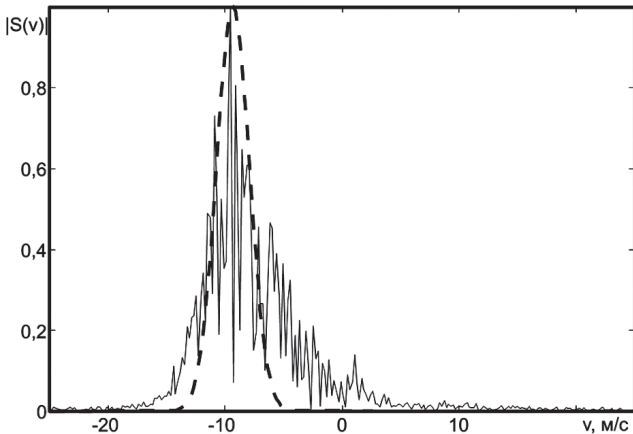
Рассеянный сигнал представляется в виде суммы отдельных реализаций x_i — сигналов, отраженных каждой неоднородностью отдельно. Каждая из реализаций формируется согласно (1), центральные частоты мод ω_0 нормально распределены относительно средней частоты Ω_0 , обусловленной переносом неоднородностей с преобладающим ветром. Среднеквадратическое отклонение величины ω от Ω_0 равняется $\Delta\omega$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

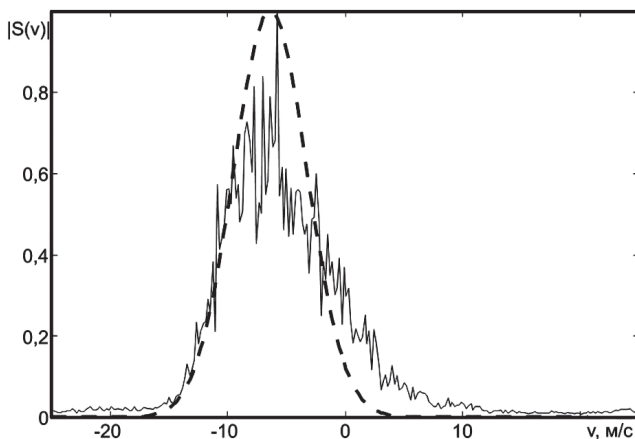
На рис. 1 приведены спектры рассеянных сигналов, полученные со временем накопления 10 секунд (а), 1 минута (б) и 5 минут (в). Пунктиром показан результат параметризации с аппроксимацией функцией Гаусса.

С ростом времени накопления, регистрируемая ширина спектра рассеянного сигнала возрастает

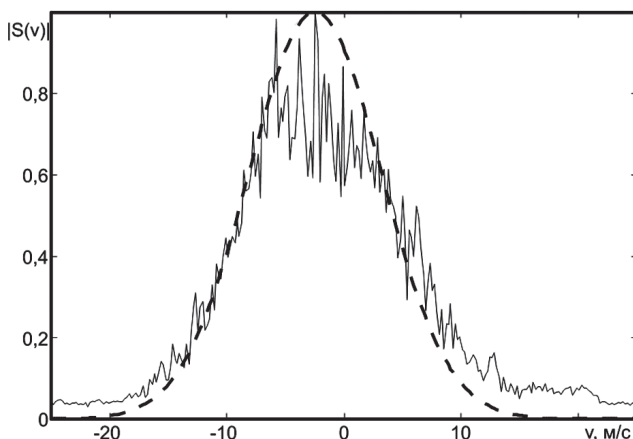
тает. Это вызвано изменением скорости ветра за время накопления. Таким образом, увеличение времени накопления приводит к потере информации о пульсационной составляющей скорости ветра. Также, при малом времени накопления форма спектра рассеянного сигнала не является гауссовой, что приводит к погрешностям оценки моментов спектра при параметризации спектра рассеянного сигнала методом наименьших квадратов с функцией Гаусса [3].



а



б



в

Рис. 1. Спектры рассеянного сигнала

3. МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ПАРАМЕТРИЗАЦИИ

Параметризация (оценивание моментов спектра рассеянного сигнала) возможна по спектру либо по реализации рассеянного сигнала [1, 7]. Наиболее распространенные методы параметризации используют спектр рассеянного сигнала. Следует отметить наиболее распространенные методы параметризации: метод максимумов, метод моментов и метод наименьших квадратов (МНК) [7]. Метод максимумов производит оценивание по наиболее интенсивному спектральному пику, а МНК использует шаблон в виде функции Гаусса. Применение этих методов параметризации для анализа рассеянных сигналов с малым временем накопления может приводить к промахам в измерениях.

Параметрические методы спектрального анализа, в частности, авторегрессионные методы и методы, основанные на анализе собственных чисел корреляционной матрицы сигнала, позволяют получать оценки некоторых параметров уже при спектральном анализе [4]. Это упрощает процедуру параметризации.

Сущность методов авторегрессионного спектрального анализа заключается в том, что анализируемый сигнал представляется как выход рекурсивного (БИХ) фильтра, на вход которого подан белый шум, а коэффициенты фильтра подобраны для максимальной близости параметров формируемого сигнала параметрам анализируемого сигнала [5, 6]. СПМ сигнала при этом описывается формулой:

$$W(\omega) = \frac{\sigma_n^2}{f_d} \cdot \frac{1}{|1 - a_1 e^{-j\omega T} - \dots - a_N e^{-jN\omega T}|^2}$$

для АР модели порядка N . Задача спектрального оценивания в этом случае сводится к определению таких коэффициентов a_i , которые обеспечивали бы наиболее близкую аппроксимацию анализируемого сигнала таким формирующим фильтром. Разработан ряд методов определения коэффициентов фильтра, в частности, ковариационный метод и метод Берга [5, 6].

Коэффициенты a_i могут быть оценены из выражения $a = R_X^{-1} \cdot p$, где R_X — корреляционная матрица рассеянного сигнала:

$$R_X = \begin{bmatrix} R_0 & \dots & R_{N-1} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{N-1} & \dots & R_0 \end{bmatrix},$$

а $p = [R_0 \ R_1 \ \dots \ R_{N-2} \ R_{N-1}]$ — первый столбец этой матрицы.

Для модели первого порядка, ограничиваются коэффициентом

$$a_1 = R_X(1) / R_X(0),$$

где $R_X(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot x(t - \tau) dt$ — автокорреляционная функция (АКФ) анализируемого сигнала.

Для дискретных сигналов интеграл заменяется суммой, а бесконечные пределы интегрирования переходят в суммирование по всей наблюдаемой реализации из N отсчетов: $R_x(i) = \sum_{j=1}^N x(i+j) \cdot x(j)$.

Поскольку при ограниченной длине реализации не все отсчеты АКФ могут быть вычислены, то применяют периодическое повторение реализации или дополнение ее нулями. Погрешность оценивания автокорреляционной функции и, соответственно, коэффициента авторегрессии, зависит от размера выборки. С ростом размера, дисперсия оценок снижается за счет усреднения по закону $1/N$.

Для АР моделей первого порядка, оценка центральной частоты и ширины спектра сигнала возможна из выражений (2-3). С ростом порядка, аналитическое выражение существенно усложняется [4]. Следует оценить наиболее вероятное число мод рассеянного сигнала, для определения необходимого порядка модели.

В цифровых системах обработки рассеянных сигналов РЛС ВЗ, обычно стадии спектрального анализа и параметризации полученных спектров разделены. Вместе с тем, для модели АР(1) возможно вычисление информативных параметров непосредственно по результату оценивания коэффициента авторегрессии a_1 , как и реализовано в разработанном методе параметризации на базе АР оценивания (метод ПАР).

Во многих РЛС вертикального зондирования атмосферы применяется схема дискретизации рассеянного сигнала в квадратурных каналах радиоприемного тракта [1]. В методе ПАР реализована работа именно в рамках такой схемы.

АКФ рассеянного сигнала является комплексной, поскольку используется комплексная форма записи рассеянного сигнала $s(t) = x_I + j \cdot x_Q$, где x_I и x_Q — соответственно, сигналы синфазного и квадратурного каналов. Оценивание АКФ реализовано в виде $R_x = F^{-1}(F(s)^2)$ [6], где F и F^{-1} — соответственно, прямое и обратное преобразования Фурье.

Центральная частота и ширина спектра узкополосного случайного процесса могут быть оценены по формулам (2-3), причем коэффициент авторегрессии a_1 вычисляется как $a_1 = R_x(1)/R_x(0)$. Частота определена в диапазоне $-0,5f_s \dots 0,5f_s$, где f_s — частота дискретизации рассеянного сигнала. Учитывая проводимую в РЛС ВЗ операцию когерентного накопления, получим для кратности когерентного накопления K частотный диапазон $f_0 = (-0,5f_s \dots 0,5f_s)/K$.

4. ПРОЦЕДУРА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РЛС ВЗ

При моделировании процесса параметризации спектров рассеянных сигналов использовались две модели рассеянных сигналов. Первая

из моделей описана в [2]. В этой модели формируется амплитудно-частотный спектр сигнала в соответствии с заданной центральной частотой и шириной спектра сигнала. Фазовый спектр рассеянного сигнала — случайный процесс, равномерно распределенный в диапазоне $0 \dots 2\pi$. Вторая модель рассеянного сигнала рассмотрена в разделе 1 данной статьи.

В дополнение к рассматриваемому методу ПАР, параметризация производилась методом максимумов, методом моментов, методом наименьших квадратов (МНК), а также циклическим методом моментов (ЦММ) и циклическим МНК (ЦМНК) [2].

Моделирование процесса параметризации спектров проведено для отношения сигнал/шум ($q = \sqrt{2E/N_0}$) в диапазоне от -20 до 20 дБ. Ширина спектра рассеянного сигнала $\sigma_V/v_{\max}$ изменяется в пределах от $0,02$ до $0,2$. Мерой погрешностей параметризации спектров рассеянных сигналов служит среднеквадратичное отклонение (СКО) оценок скорости ветра и спектральной ширины рассеянного сигнала от значений, заданных в модели:

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

$$\sigma(\sigma_V) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\sigma_V - \sigma'_V)^2}.$$

Результаты оценивания СКО приведены в относительных единицах — $\sigma(V)/V_{\max}$. При диапазоне однозначно определяемых скоростей ± 25 м/с, допустимое значение СКО 1 м/с соответствует $0,04V_{\max}$. В дальнейшем будем использовать это значение в качестве порогового.

5. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

По результатам исследований [7, 8] минимальные погрешности параметризации обеспечивает циклический метод наименьших квадратов. Кроме него, имитационное моделирование проведем с использованием метода моментов, поскольку он применяется в системах обработки сигналов многих существующих РЛС ВЗ [1]. Модель рассеянного сигнала соответствует описанной в [3].

В дальнейшем, примем следующие обозначения: ЦММ — циклический метод моментов, МНК — метод наименьших квадратов, ЦМНК — циклический метод наименьших квадратов, ПАР — параметризация авторегрессионным методом. Рассмотрим зависимость СКО оценки скорости ветра от отношения сигнал/шум при спектральной ширине $\sigma_V = 0,08V_{\max}$. Условные обозначения на графиках: 1 — метод максимумов, 2 — метод моментов, 3 — ЦММ, 4 — МНК, 5 — ЦМНК, 6 — ПАР, 7 — пороговая величина СКО.

Наименьшие погрешности параметризации спектров рассеянных сигналов обеспечивают методы ПАР и ЦМНК. Метод ЦММ несколько им

уступает. Метод моментов обеспечивает существенно худшие результаты.

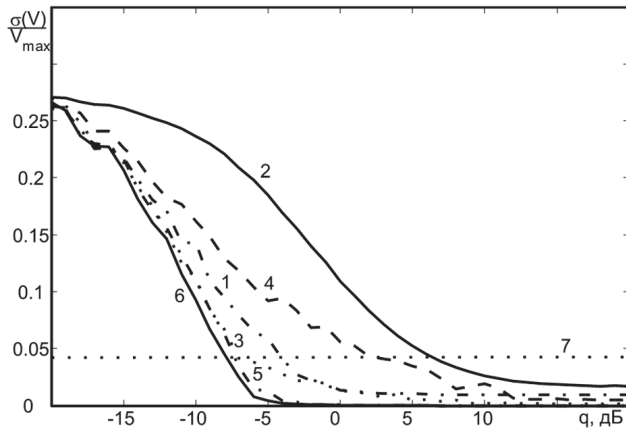


Рис. 2. Зависимость СКО от отношения сигнал/шум для размера реализации 64 точки

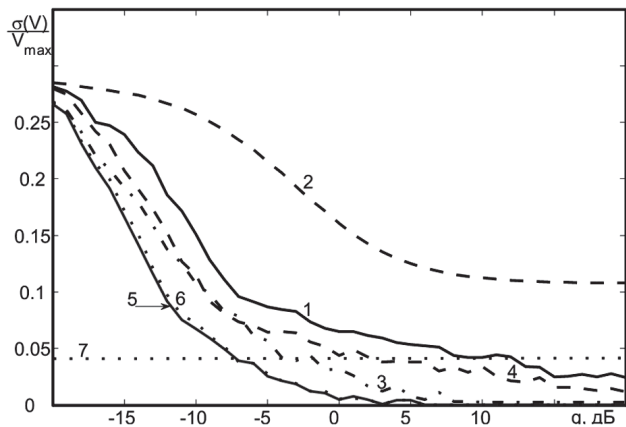


Рис. 3. Зависимость СКО от отношения сигнал/шум для размера выборки 256 точек

Методы ПАР и ЦМНК по итогам моделирования обеспечивают одинаковое СКО оценок скорости ветра.

Рассмотрим зависимость характеристик от размера выборки при параметризации. Размер выборки, наряду с высотным диапазоном, определяет оперативность получаемых оценок метеопараметров.

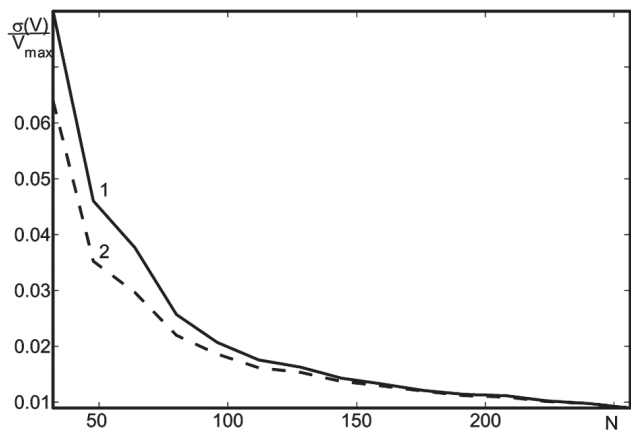


Рис. 4. Зависимость СКО оценок скорости ветра от размера выборки при $q = -3$ дБ (здесь и далее, 1 — ЦМНК, 2 — ПАР)

При малом размере выборки, метод ПАР обеспечивает меньшую СКО оценок скорости ветра по сравнению с методом ЦМНК. При этом метод ПАР имеет существенно меньшие вычислительные затраты. С увеличением размера выборки разница между методами уменьшается и имеет порядок погрешности вычислений при моделировании.

Введем пороговое отношение сигнал/шум $q_{\min}$ — минимальное значение отношения сигнал/шум, при котором погрешность параметризации равняется пороговому значению $0,04V_{\max}$. Рассмотрим зависимость порогового отношения сигнал/шум от размера реализации.

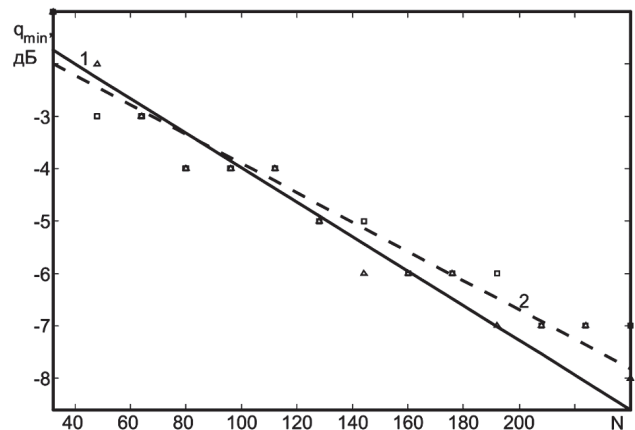


Рис. 5. Зависимость порогового отношения сигнал/шум от размера выборки

При малых размерах выборки, метод ПАР имеет незначительное преимущество перед ЦМНК. С ростом размера выборки ситуация изменяется на противоположную.

На рис. 6 приведена зависимость СКО оценки спектральной ширины от отношения сигнал/шум.

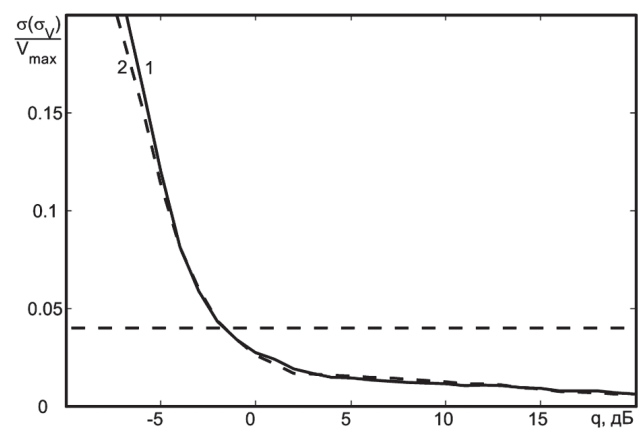


Рис. 6. Зависимость СКО оценки спектральной ширины от отношения сигнал/шум (1 — ЦМНК, 2 — ПАР)

Погрешность оценивания спектральной ширины методами ЦМНК (кривая 1) и ПАР (кривая 2) различается незначительно. Рассмотрим влияние значения спектральной ширины рассеянного сигнала на точность оценивания скорости ветра.

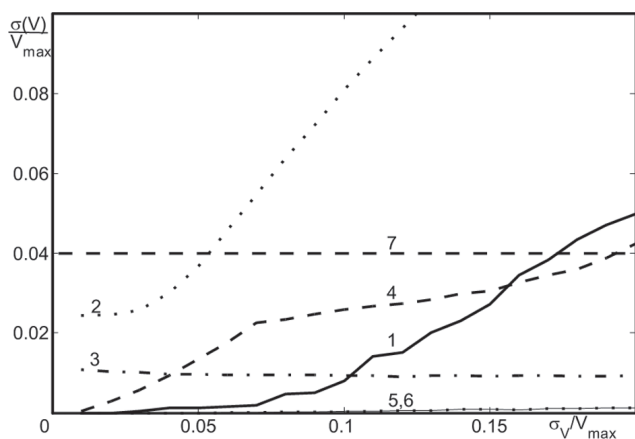


Рис. 7. Зависимость СКО от спектральной ширины, $q = 10$ дБ

Для метода моментов и МНК рост погрешности параметризации при больших значениях спектральной ширины вызван краевыми эффектами [2]. Зависимость смещения оценки скорости ветра от абсолютного значения скорости представлена на рис. 8.

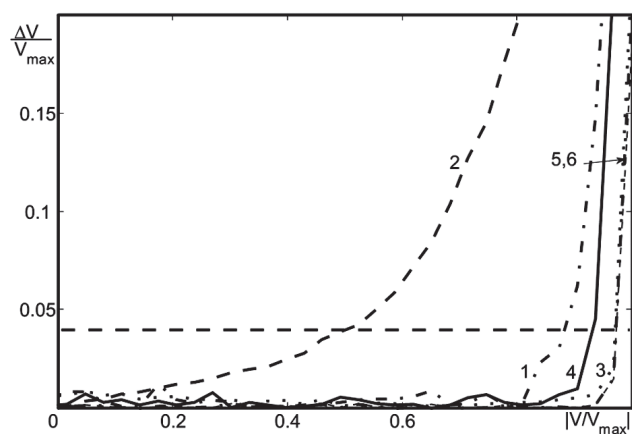


Рис. 8. Зависимость модуля смещения оценки скорости ветра от значения скорости ветра, заданного в модели, $q = 10$ дБ

Метод параметризации ПАР, как и циклический МНК и циклический метод моментов, не имеет существенных краевых эффектов. Наиболее выражены краевые эффекты при параметризации спектров рассеянных сигналов методом моментов. Отклонение оценки скорости в сторону меньших абсолютных значений обусловлены существованием шумовой составляющей в спектре. Примем предположение о том, что шум в канале приемного устройства — белый (поскольку полоса шума значительно превышает полосу пропускания радиоприемного устройства (РПРУ) РЛС ВЗ). В этом случае СПМ шумовой компоненты постоянна на всех частотах. Вычтя эту постоянную величину, можно ослабить краевые эффекты для метода моментов. Задача сводится к оценке значения средней спектральной плотности шума в полосе пропускания РПРУ при выключенном передатчике. Результаты моделирования приведены на рис. 9.

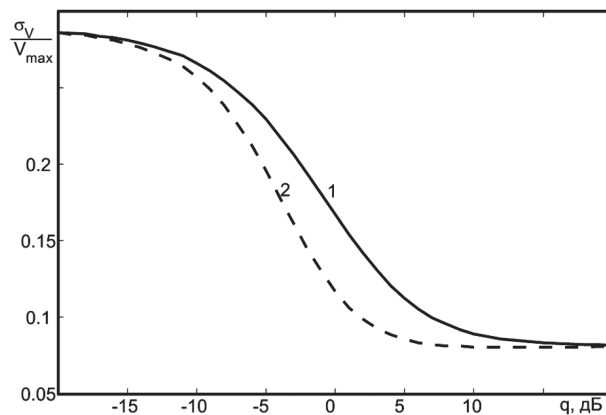


Рис. 9. Результаты моделирования параметризации (1 — метод моментов, 2 — модифицированный метод моментов)

При компенсации шумовой составляющей, то же значение погрешности параметризации спектров наблюдается при более низком отношении сигнал/шум. Получаемый таким образом выигрыш в отношении сигнал/шум достигает 3 дБ. Несмотря на это, погрешности метода моментов превышают пороговый уровень даже при значительном отношении сигнал/шум. Метод моментов с компенсацией шумовой составляющей, таким образом, может использоваться только для предварительной оценки моментов спектра рассеянного сигнала.

Обозначим кратность накопления, соответствующую диапазону однозначно определяемых скоростей $v_{\max}$, через N_1 ($v_{\max} = \frac{c^2}{2h_{\max}f_0N_1}$ [8]).

При уменьшении кратности когерентного накопления до N_2 , диапазон регистрируемых скоростей ветра расширится в N_1/N_2 раз, а соотношение сигнал/шум уменьшится на $\Delta q = 10 \log(\sqrt{N_2/N_1})$ [1]. Исходя из этого, можно использовать полученный энергетический выигрыш и расширить диапазон скоростей для снижения влияния краевых эффектов. Для примера на рис. 10 приведен результат моделирования для случая двукратного снижения кратности когерентного накопления.

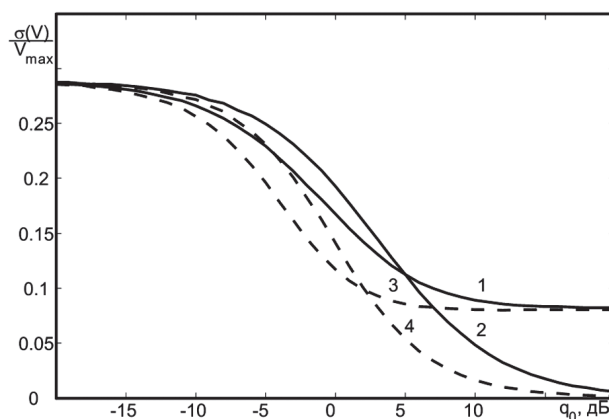


Рис. 10. Результаты моделирования параметризации (1 — метод моментов, 2 — модифицированный метод моментов, 3, 4 — те же методы при уменьшенной вдвое кратности когерентного накопления)

В результате компенсации шумовой составляющей и снижения кратности когерентного накопления, погрешности параметризации при отношениях сигнал/шум более 7 дБ соответствуют пороговому уровню. Таким образом, метод моментов может использоваться в системе метеообеспечения авиации. Вместе с тем, значения отношения сигнал/шум 7 дБ и более достижимы лишь в пределах атмосферного приграничного слоя.

Аналогичный метод может быть применен для снижения краевых эффектов при параметризации спектров другими методами. На рис. 11 приведена зависимость СКО оценки скорости ветра от времени когерентного накопления. Через T_0 обозначено время накопления, при котором диапазон однозначно определяемых скоростей соответствует диапазону скоростей ветра, заданных в модели.

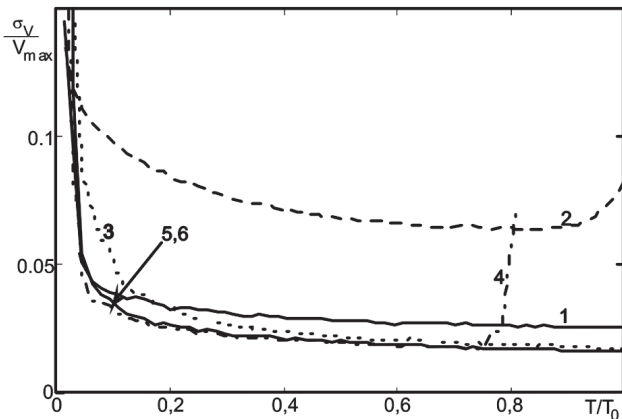


Рис. 11. Зависимость СКО оценки скорости ветра от кратности когерентного накопления при $\sigma_v = 0,08V_{max}$

Для метода моментов (кривая 2) и МНК (кривая 4) целесообразно уменьшать время когерентного накопления для снижения систематической погрешности, вызванной краевыми эффектами. В то же время, другие методы параметризации спектров не получают преимуществ от этого подхода. При дальнейшем снижении кратности накопления, потеря отношения сигнал/шум приводит к повышению флуктуационных погрешностей и, соответственно, суммарной погрешности параметризации спектров.

Поскольку степень влияния краевых эффектов на погрешность параметризации спектров рассеянных сигналов определяется шириной спектра рассеянного сигнала, рассмотрим зависимость оптимальной кратности когерентного накопления от спектральной ширины рассеянного сигнала. На рис. 12 приведена зависимость оптимальной кратности когерентного накопления от ширины спектра рассеянного сигнала при параметризации методом моментов (кривая 1) и МНК (кривая 2).

С увеличением ширины спектра рассеянного сигнала, краевые эффекты при параметризации

спектров рассеянных сигналов проявляются более существенно, и требуется значительно снижать кратность когерентного накопления. Снижение кратности накопления, в свою очередь, приводит к ухудшению отношения сигнал/шум и возрастанию флуктуационных погрешностей. Зависимость величины СКО от спектральной ширины для метода моментов и МНК приведена на рис. 13.

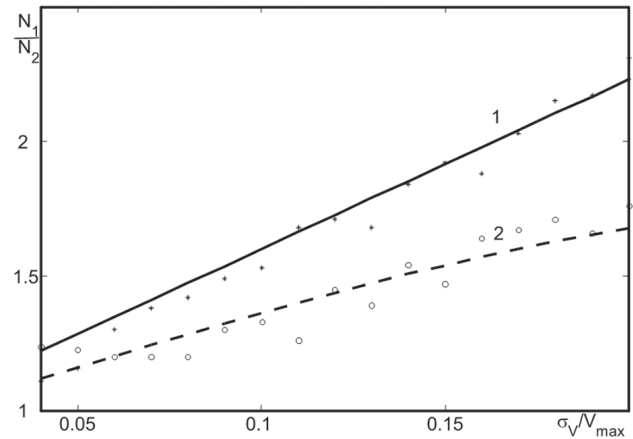


Рис. 12. Зависимость оптимальной кратности когерентного накопления от спектральной ширины рассеянного сигнала

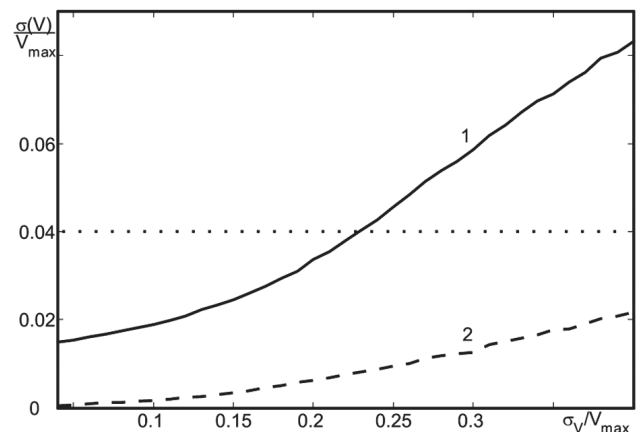


Рис. 13. Зависимость СКО оценки скорости ветра от спектральной ширины рассеянного сигнала

Параметризация МНК спектра рассеянного сигнала (кривая 2) обеспечивает нормируемый уровень погрешностей во всем диапазоне рассмотренных значений спектральной ширины, в то время как метод моментов — только для спектральной ширины, не превосходящей $\sim 0,2V_{max}$. При малых значениях измеряемых скоростей ветра это может оказаться недостаточным.

6. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ АВТОРЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

На малых временных интервалах, предположение о гауссовой форме спектра рассеянного сигнала не выполняется, и спектр обычно является многомодовым. Число мод определяется структурой рассеивающего объема. Наиболее

простой из моделей, применяемых для случаев малых времен накопления, является авторегрессионная модель (1) [4]. На рис. 14 приведен результат сопоставления СКО оценки скорости ветра методами ЦМНК (кривая 1) и ПАР (кривая 2) при использовании авторегрессионной модели рассеянного сигнала.

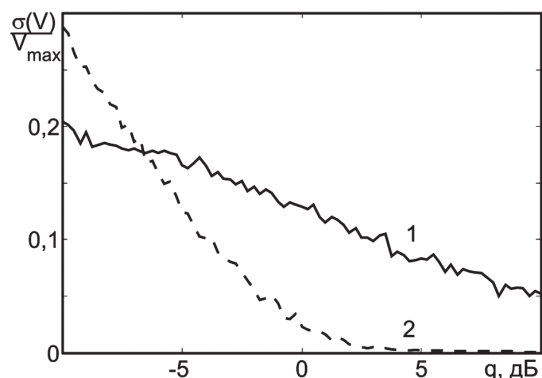


Рис. 14

В случае применения авторегрессионных моделей рассеянных сигналов, метод ПАР обеспечивает меньшую погрешность параметризации, поскольку именно на этой модели основан данный метод. Рассмотрим результаты параметризации спектров рассеянных сигналов при малых временах накопления обоими методами.

7. ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При фиксированном темпе выборки отсчетов из АЦП приемного тракта РЛС ВЗ, повышение временного разрешения может достигаться снижением кратности накопления либо уменьшением размера выборки [8]. Более эффективен второй путь, поскольку при таком решении не ухудшается отношение сигнал/шум. Системы цифровой обработки сигналов существующих РЛС ВЗ обычно используют метод обработки неперекрывающихся окон, то есть набор отсчетов, составляющих временное окно, используется только один раз. Поскольку изменения параметров атмосферы происходят непрерывно, а не дискретно (один раз за реализацию), то применение скользящего окна позволяет повысить временное разрешение анализа. Рассмотрим результаты обработки данных зондирования атмосферы при размере выборки 64 отсчета. Соседние выборки сдвинуты на 1 отсчет.

На рис. 15, кривая 1 — результат параметризации методом моментов, 2 — методом ПАР, 3 — ЦМНК. При малом времени накопления, метод ЦМНК не обеспечивает высокого временного разрешения, поскольку форма спектра рассеянного сигнала является негауссовой. Метод моментов и ПАР обеспечивают возможность измерения параметров короткопериодических вариаций скорости ветра. При этом метод ПАР является предпочтительным, поскольку метод моментов подвержен краевым эффектам (рис. 8, кривая 2).

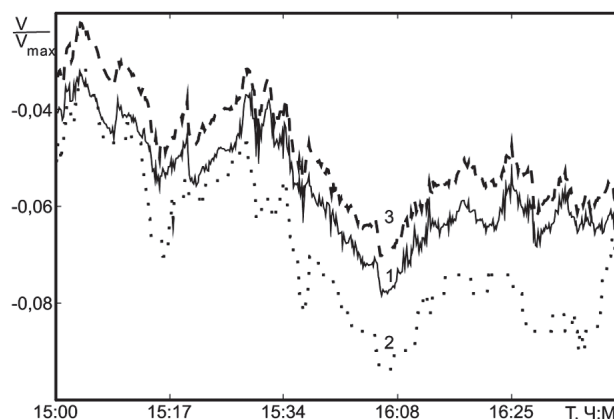


Рис. 15. Временная зависимость скорости ветра по данным радиолокационного зондирования атмосферы

Проведен анализ статистики, полученной при обработке результатов радиолокационного зондирования атмосферы. Доля измерений, отбракованных при контроле качества, составляет 0,7 % для метода моментов, 11,2 % для ЦМНК и 2,84 % для метода ПАР. Критерии отбраковки в процедуре контроля качества: изменение скорости ветра более чем на 1 м/с между соседними отсчетами. Объем выборки результатов — 256 тысяч значений, суммарное время измерений — 14 часов.

Метод ЦМНК имеет наибольший процент недостоверных результатов, что связано с промахами параметризации вследствие негауссовой формы спектра рассеянного сигнала. Малый процент отбракованных данных для метода моментов связан с его инерционностью, из-за которой выбросы оцениваемых параметров достаточно эффективно подавляются. Следует отметить, что из-за отсутствия опорных данных, полученных иным методом измерения, можно судить лишь о количестве промахов измерений, но не о величине погрешностей измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов модельных и натурных экспериментов позволил выявить следующее:

1. При времени накопления, значительно меньшем интервала стационарности атмосферных процессов, форма спектра рассеянного сигнала не является гауссовой. Вследствие этого, возрастают погрешности оценивания скорости ветра параметрическими методами, рассчитанными на гауссов спектр.

2. Метод параметризации на основе АР модели (метод ПАР) и метод моментов не основываются на предположении о гауссовой форме спектра, и обеспечивают меньшие погрешности при малом времени накопления. При этом метод ПАР предпочтительнее, в особенности при малом отношении сигнал/шум.

3. Метод ПАР, как и метод ЦМНК, не имеет краевых эффектов. Поэтому значение систематических погрешностей параметризации спектров этим методом не зависит от истинного значения скорости ветра.

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] Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские локации и метеорологические наблюдения. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 503 с.
- [3] Литвин-Попович А.И. Параметризация спектров рассеянных сигналов в РЛС вертикального зондирования атмосферы / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2008. — Вып. 152. — С. 49-52.
- [4] Тихонов В.А. Генерирование квадратурных составляющих случайного узкополосного аналитического сигнала на несущей частоте по заданным параметрам спектральной плотности мощности / Тихонов В.А., Зубков О.В., Сидоров Г.И. // АСУ и приборы автоматики. — 2003. — Вып. 124. — С. 18-22.
- [5] Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1990. — 584 с.
- [6] Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. — СПб.: Питер, 2006. — 751с.: ил.
- [7] Strauch R. G. Data analyses techniques: spectral processing // Handbook for middle atmosphere program. — Urbana, Illinois. — 1983. — Vol. 9. — P. 528-531.
- [8] Литвин-Попович А.И. Повышение эффективности цифровой обработки сигналов РЛС вертикального зондирования атмосферы / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // «Прикладная радиоэлектроника», 2008, том 7, № 4. — С. 400-403.

Поступила в редколлегию 24.09.2010



Литвин-Попович Андрей Игоревич, ассистент каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Научные интересы: цифровая обработка радиолокационных сигналов.



Олейников Владимир Николаевич, канд. техн. наук, профессор каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Научные интересы: радиолокационные методы исследования атмосферных динамических процессов.

УДК 621.396.9: 551.508.855

Аналіз стану атмосфери на малих часових інтервалах / А.І. Литвин-Попович, В.М. Олейніков // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2010. Том 9. № 4. — С. 513-520.

В роботі розглянуто особливості методів параметризації розсіяних сигналів РЛС ВЗ, що відносяться до малих часів спостереження. Проведено порівняльний аналіз методів параметризації. Показано недоліки розповсюдженої версії метода найменших квадратів.

Ключові слова: радіолокаційна метеорологія, РЛС вертикального зондування атмосфери, оцінювання параметрів розсіяних сигналів, параметризація спектрів розсіяних сигналів.

Лл.: 15. Бібліогр.: 8 найм.

UDC 621.396.9: 551.508.855

Analysis of atmospheric parameters with high time resolution / A.I. Litvin-Popovitch, V.N. Oleynikov // Applied Radio Electronics: Sci. Mag. — 2010. Vol. 9. № 4. — P. 513-520.

Methods for backscattered signal parameter estimation are discussed. Comparative analysis of these methods is provided, laying emphasis on their characteristics in high time resolution cases. Drawbacks of least-mean square methods for these cases are illustrated.

Keywords: radar meteorology, radar wind profiler, backscattered signal parameter estimation, parameterization of backscattered signal spectra.

Fig. 15. Ref.: 8 items.