

**МОДЕЛИ РАССЕЯННЫХ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ****Введение**

Принцип действия РЛС вертикального зондирования атмосферы (РЛС ВЗ) основан на регистрации сигналов, рассеиваемых турбулентными неоднородностями в импульсном объеме [1, 2]. Эти неоднородности формируются вследствие неоднородного нагрева подстилающей поверхности, а также из-за нестационарного характера воздушных течений, и увлекаются ветром. Таким образом, по доплеровскому сдвигу частоты сигнала, рассеянного неоднородностями, можно определить скорость ветра на соответствующей высоте. РЛС ВЗ обеспечивает измерение высотных профилей скорости ветра и радиолокационной отражаемости в пределах тропосферы, причем верхняя граница высотного диапазона зондирования ограничивается только энергетическим потенциалом системы [1].

Значения метеопараметров определяются в системе радиолокационного зондирования атмосферы по параметрам сигнала, рассеянного атмосферными неоднородностями. В связи с этим, процедура оценивания параметров сигнала (параметризация) в значительной степени определяет точность получаемых оценок метеопараметров.

Постановка задачи

Точность получаемых оценок параметров сигнала зависит от соотношений сигнал/шум и сигнал/помеха в приемном тракте, а также от того, насколько полно учтены свойства рассеянного сигнала при разработке и реализации метода оценивания его параметров. За счет использования априорной информации о структуре и свойствах модели формирования рассеянного сигнала, принятых при синтезе метода обработки, можно получить меньшую величину погрешностей оценивания параметров сигнала при прочих равных условиях. Вместе с тем, точность оценок для таких методов зависит от степени соответствия принятой модели реальным рассеянными сигналам.

Модели рассеянных сигналов

Поскольку в импульсном объеме присутствует множество неоднородностей, то рассеянный сигнал представляет собой суперпозицию отдельных отражений от каждой неоднородности в отдельности. С ростом времени наблюдения, в процесс формирования рассеянного сигнала включаются новые неоднородности, которые переносятся ветром и входят в область импульсного объема. Скорость их движения определяется векторной суммой скорости упорядоченного движения (средней скорости ветра на данной высоте) и случайных вариаций. Поскольку 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 [1]. Это подтверждается экспериментальными исследованиями – при интервале наблюдения, приближающемся к интервалу стационарности

$$T_k = 0,2 \lambda / \sigma_v, \quad (1)$$

где λ – длина волны, σ_v^2 – дисперсия скорости ветра в импульсном объеме), форма амплитудного спектра рассеянного сигнала близка к функции Гаусса [1, 3].

Помимо модели, описывающей рассеянный сигнал, основываясь на его осредненном амплитудном спектре, распространение получили авторегрессионная (АР) модель [4] и физическая модель [5, 6].

АР модель формирования рассеянных сигналов использует представление сигнала в виде отклика рекурсивного фильтра. На вход фильтра подается белый шум, а коэффициенты фильтра определяют корреляционные и частотные свойства формируемого сигнала. Формируемый сигнал описывается выражением

$$x_i = n_i + \sum_{j=1}^M x_{i-j} a_j \quad (2)$$

для модели порядка M , а его спектральная плотность мощности –

$$W(\omega) = \frac{\sigma_n^2}{f_0} \cdot \frac{1}{\left| 1 - \sum_{i=1}^M a_i e^{-j \cdot i \cdot \omega \cdot t} \right|^2} \quad (3)$$

Физическая модель (или модель «блестящих точек») формирует сигнал в виде суперпозиции отражений от каждой локальной неоднородности – то есть, в соответствии с физическими представлениями о процессе рассеяния радиоволны в атмосфере.

Методы параметризации рассеянных сигналов

Методы оценивания параметров рассеянных сигналов можно условно разделить на группы по степени их робастности, т.е. устойчивости к отклонениям свойств рассеянного сигнала от ожидаемых в модели. Наиболее робастными являются такие методы, которые используют минимальное количество априорной информации о сигнале – такие, как метод максимумов или метод моментов [1, 2]. Вместе с тем, недостаточное использование априорной информации, доступной при разработке системы, приводит к увеличению величины погрешностей в сравнении с оптимальными методами оценивания.

Для методов оценивания, которые используют более значительные объемы априорных данных, характерна жесткая привязка к конкретной модели формирования рассеянного сигнала. Так, для метода парных импульсов [7] это привязка к авторегрессионной модели, а для метода наименьших квадратов (МНК), описанного в [1, 2], – к модели рассеянного сигнала с гауссовым амплитудным спектром.

При уменьшении времени наблюдения предположение о гауссовой форме амплитудного спектра рассеянного сигнала может нарушаться. При малых количествах отражателей, участвующих в формировании рассеянного сигнала, центральная предельная теорема не действует, и закон распределения флуктуационной скорости ветра не является гауссовым. Вследствие этого, с уменьшением времени наблюдения, возрастает вероятность промахов измерений для методов параметризации, основанных на гауссовой модели амплитудного спектра рассеянного сигнала [6].

При времени накопления, много меньшем интервала стационарности рассеянного сигнала (1), достаточно часто регистрируются многомодовые спектры [1]. Для семейства методов МНК это приводит к увеличению минимальной невязки параметризации:

$$\varepsilon_1 = \min \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i - \Phi(f_0, i, \sigma_f)]^2 \right) \quad (4)$$

Для методов, основанных на АР модели, появление дополнительных мод спектра сигнализирует о необходимости изменения порядка модели. Аналогом невязки в этом случае может быть ошибка предсказания АР модели

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - x')^2 \quad (5)$$

Процедура моделирования

Точность оценок метеопараметров может быть определена путем проведения совместных измерений несколькими методами (аэрологическим зондированием, прямым контакт-

ным измерением, авиационными регистрациями, лидарным, радиоакустическим или акустическим зондированием). Вместе с тем, такой метод оценки имеет недостатки – прежде всего, наличие нескольких результатов, полученных разными системами, не дает ответа на вопрос о том, какой из этих результатов ближе к истинному значению параметра.

Другим методом оценивания точности получаемых оценок является имитационное моделирование [2, 3]. Этот метод позволяет проверить отдельные процедуры обработки, с применением модельных сигналов. Вместе с тем, результаты имитационного моделирования отображают характеристики реальной системы настолько точно, насколько выбранная модель отображает характеристики обрабатываемых сигналов.

Для оценивания точностных характеристик того или иного метода параметризации в связке соответствующей моделью рассеянных сигналов достаточно провести имитационное моделирование процесса обработки сигналов радиолокационной системой вертикального зондирования атмосферы [2 – 4]. При этом в качестве метрик погрешностей могут использоваться: среднее отклонение оценок M_1 , среднее по модулю отклонение оценок M_2 , среднеквадратическое отклонение оценок M_3 :

$$M_1(\alpha_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\alpha_{i,j} - \alpha'_{i,j}), \quad (6)$$

$$M_2(\alpha_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k |\alpha_{i,j} - \alpha'_{i,j}|, \quad (7)$$

$$M_3(\alpha_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\alpha_{i,j} - \alpha'_{i,j})^2, \quad (8)$$

где $\alpha_{i,j}$ – значение параметра α_i , заданное в модели для j -го цикла измерений, $\alpha'_{i,j}$ – соответствующее значение оценки этого параметра.

Вместе с тем, после проведения такого исследования остается открытым вопрос о применимости его результатов к реальным данным, получаемым при зондировании атмосферы на РЛС ВЗ. Для анализа точностных характеристик применительно к результатам зондирования рассмотрим следующий подход. По имеющимся регистрациям рассеянных сигналов, оценим отношение сигнал/шум q , значения центральной частоты f_0 и ширины спектра σ_f рассеянного сигнала, а также коэффициенты авторегрессионной модели a_i , невязку параметризации ε_1 (4) и ошибку предсказания АР модели ε_2 (5). Далее по этим данным, для каждой точки имеющихся записей проведем имитационное моделирование и сопоставим результаты, полученные на моделях, с данными зондирования. При этом используем следующие модели рассеянных сигналов:

- модель сигнала с амплитудным спектром, описываемым функцией Гаусса [1, 2];
- авторегрессионная модель (2) [3];
- физическая модель.

В дальнейшем будем обозначать их как модели 1 – 3, в соответствии с этим порядком перечисления. Применительно к модельным и натурным данным рассмотрим следующие методы параметризации:

- метод парных импульсов [5];
- метод наименьших квадратов [2].

Представление результатов

На рис. 1, 2 приведены результаты обработки и моделирования. При этом приняты такие обозначения: кривые 1 – 3 соответствуют результатам имитационного моделирования с использованием описанных моделей (1 – сигнал с АЧС в виде функции Гаусса, 2 – авторег-

рессионная модель первого порядка, 3 – физическая модель). Кривая 4 соответствует результатам обработки натуральных данных, полученных на РЛС ВЗ дециметрового диапазона [1].

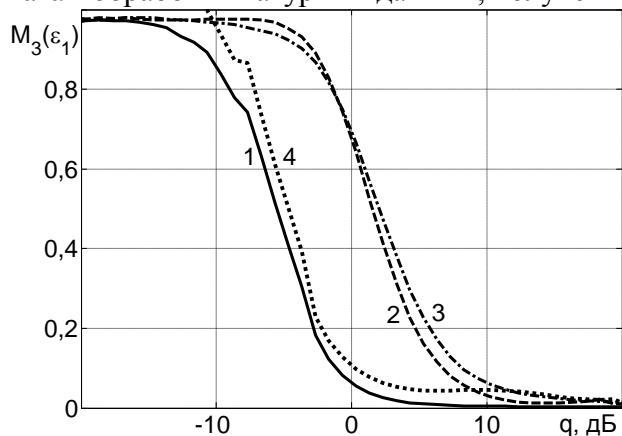


Рис. 1

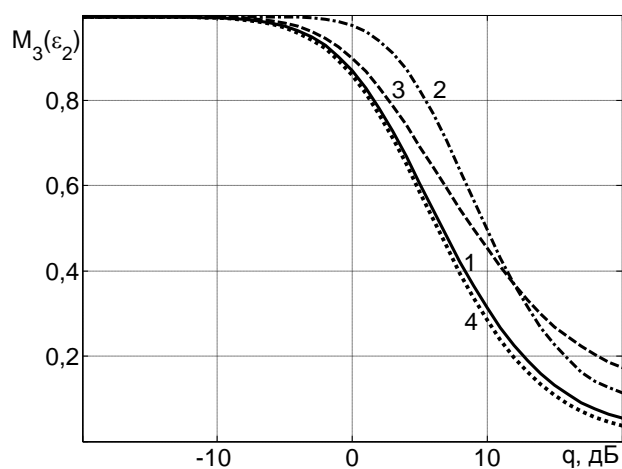


Рис. 2

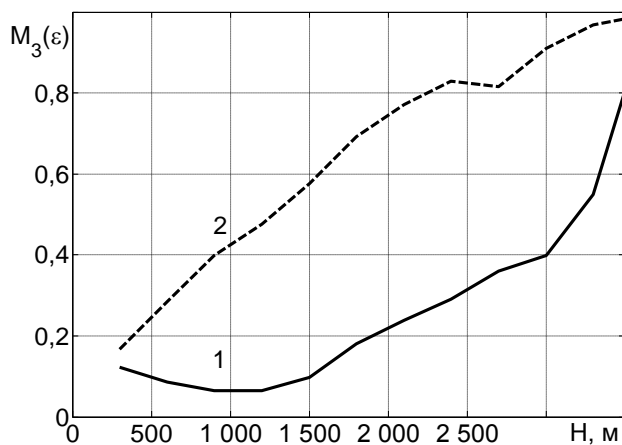


Рис. 3

На рис. 4 и 5 приведены результаты имитационного моделирования. При этом по данным натурального эксперимента формировались имитационные выборки, затем по ним оценивалась невязка параметризации МНК (рис. 4) и АР (рис. 5) и сопоставлялась с невязкой, полученной по натурным данным. Минимальное расхождение невязки для МНК (рис. 4) получено с гауссовой моделью (кривая 1), а для метода парных импульсов (рис. 5) – на различных высотах зондирования наименьшее расхождение обеспечивают физическая модель (кривая 3) и АР модель (кривая 2).

На рис.1 приведены зависимости СКО минимальной невязки параметризации методом наименьших квадратов (4) от отношения сигнал/шум. С ростом отношения сигнал/шум, минимальная невязка уменьшается. При этом при использовании гауссовой модели (кривая 1) получаемые результаты минимально отличаются от результатов, полученных по натурным данным (кривая 4). Авторегрессионная модель (кривая 2) и физическая модель (кривая 3) дают существенно отличающийся результат. Этот результат вполне ожидаем, так как используемый метод параметризации разработан в предположении о гауссовой форме спектра рассеянного сигнала.

Рассмотрим результат, полученный при параметризации рассеянного сигнала методом парных импульсов (рис. 2). При этом ход зависимостей сходен с приведенным на рис.1, и также минимальное различие натуральных и модельных данных получено для модели, основанной на представлении о гауссовом амплитудном спектре.

На рис. 3 приведены осредненные профили невязки для метода наименьших квадратов (кривая 1) и метода парных импульсов (АР модель первого порядка, кривая 2). Прямое сопоставление величин невязок не корректно, однако для обоих методов просматривается постепенное увеличение невязки с ростом высоты, что обусловлено уменьшением отношения сигнал/шум [1]. Аномальное повышение невязки для метода наименьших квадратов (кривая 1) при малых высотах зондирования связано с наличием земной помехи, что приводит к появлению дополнительной моды в спектре рассеянного сигнала.

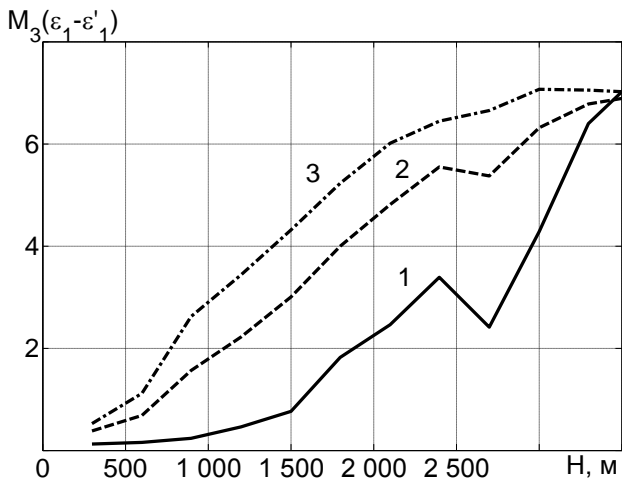


Рис. 4

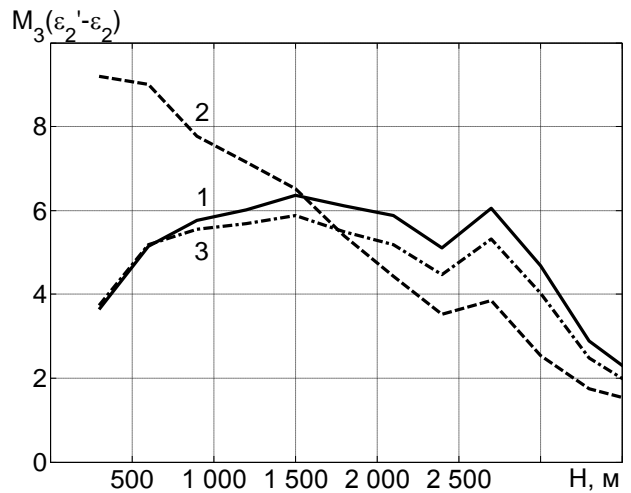


Рис. 5

На рис. 6 приведены зависимости СКО оценок скорости ветра, полученные при имитационном моделировании по результатам натурного эксперимента. Наименьшая расхождимость результатов наблюдается при использовании гауссовой модели рассеянного сигнала.

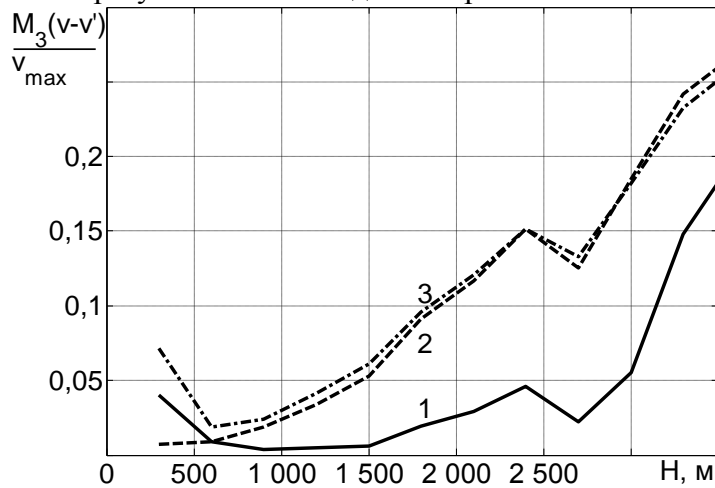


Рис. 6

Рассмотрим вопрос об оценивании числа отражателей, задействованных в формировании рассеянного сигнала. Из общих соображений понятно, что увеличение времени накопления рассеянного сигнала приводит к росту числа отражателей и соответственно способствует дальнейшему сглаживанию формы спектра рассеянного сигнала. При этом форма спектра рассеянного сигнала стремится к функции Гаусса.

Вместе с тем, для повышения степени соответствия модели рассеянному сигналу, регистрируемому в реальной системе, необходимо оценить характер зависимости числа отражателей от времени накопления.

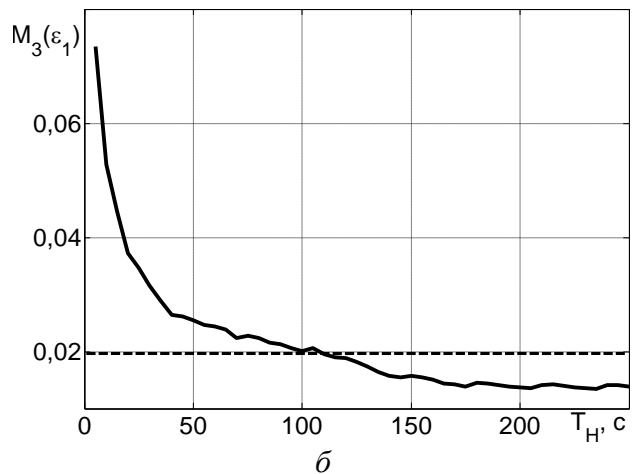
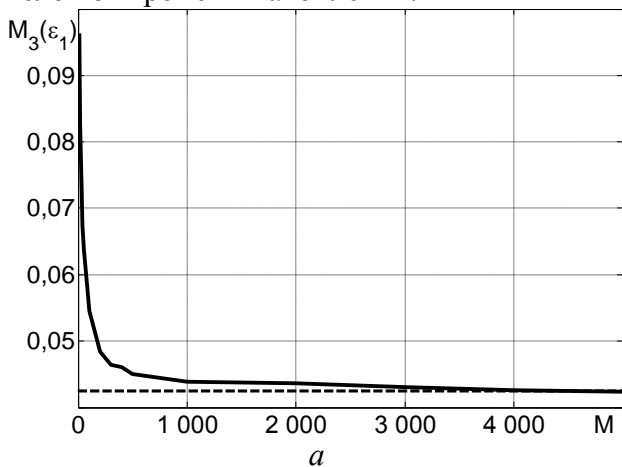


Рис. 7

На рис. 7, а приведена зависимость минимальной невязки параметризации (4) от числа отражателей, участвующих в формировании сигнала в физической модели. С ростом числа отражателей невязка уменьшается, стремясь к постоянному значению. Аналогичный характер имеет зависимость минимальной невязки от времени накопления, полученная по данным зондирования атмосферы РЛС ВЗ дециметрового диапазона [1] (рис. 7, б). При этом пунктирной линией обозначено значение невязки, полученное при использовании гауссовой модели рассеянного сигнала при прочих равных условиях.

Сопоставление графиков на рис. 7, а, б позволяет сделать следующие выводы:

- физическую модель можно считать основной при параметризации спектров рассеянных сигналов, полученных при времени накопления в единицы секунд, при этом число отражателей в модели имеет порядок нескольких сотен;
- при числе отражателей более 3000, принятом в рамках физической модели, результаты обеих моделей фактически совпадают;
- полученное в рамках сопоставления (рис. 7, б) значение невязки, более низкое для результатов натурального эксперимента, можно объяснить повышением отношения сигнал/шум за счет длительного накопления спектров рассеянных сигналов.

Выводы

Выбор модели рассеянных сигналов определяется параметрами имитируемой РЛС вертикального зондирования, в частности – интервалом накопления рассеянных сигналов. Для РЛС, использующих интервал накопления более нескольких секунд, наименьшие погрешности получены при использовании гауссовой модели рассеянного сигнала. С уменьшением времени накопления наименьшую погрешность обеспечивает физическая модель рассеяния. Авторегрессионная модель первого порядка, рассмотренная в данной работе, показала существенно худшие результаты, что может быть обусловлено значительным числом регистраций многомодовых сигналов, которые может эффективно описать модель более высокого порядка.

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. *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. 3. *Литвин-Попович, А.И.* Анализ состояния атмосферы на малых временных интервалах / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2010. – Т. 9, № 4. – С. 513-520. 4. *Тихонов, В.А.* Генерирование квадратурных составляющих случайного узкополосного аналитического сигнала на несущей частоте по заданным параметрам спектральной плотности мощности / В.А. Тихонов, О.В. Зубков, Г.И. Сидоров // *АСУ и приборы автоматки*. – 2003. – Вып. 124. – С. 18-22. 5. *Островитянов, Р.В.* Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М. : Сов. радио, 1980. – 232с. 6. *Литвин-Попович, А.И.* Обработка радиолокационных сигналов в параллельных вычислительных системах / А.И. Литвин-Попович // *Радиотехника*. – 2011. – Вып. 166. – С. 165-172. 7. *Довиак, Р.* Доплеровские локаторы и метеорологические наблюдения / Р. Довиак, Д. Зрнич – Л. : Гидрометеиздат, 1988. – 503 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 25.11.2013