УДК 621.396.96: 551.501.815

А.И.ЛИТВИН-ПОПОВИЧ, канд. техн. наук

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, возможно 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 рассеянным 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

$$T_k = 0{,}2\,\lambda/\sigma_V, \qquad (1)$$

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

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

для модели порядка M, а его спектральная плотность мощности – выражением

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

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:

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

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

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left(x - x' \right)^2 . \tag{5}$$

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:

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

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

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

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:

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

1. метод парных импульсов [5];
2. 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 –

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

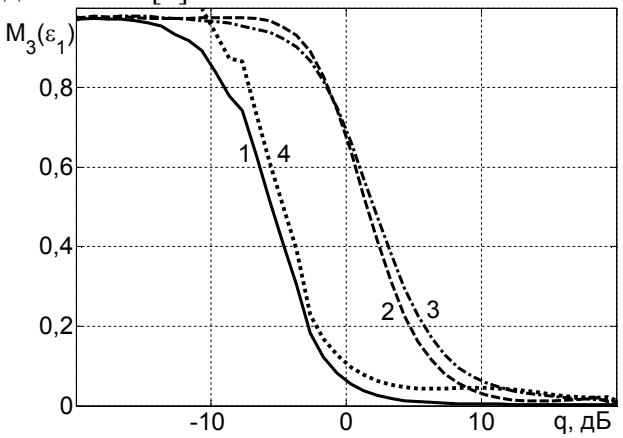

Рис. 1.

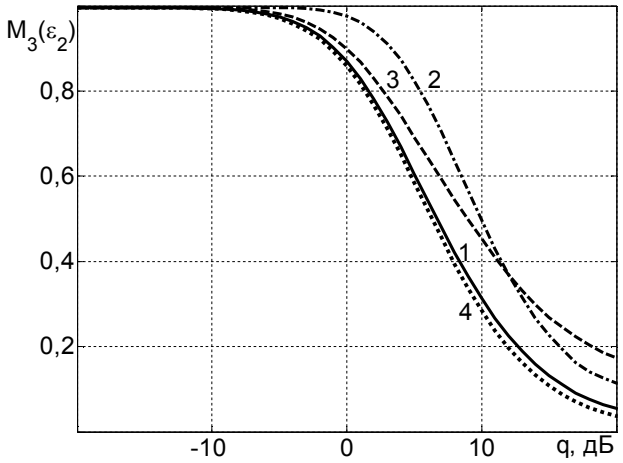

Рис. 2.

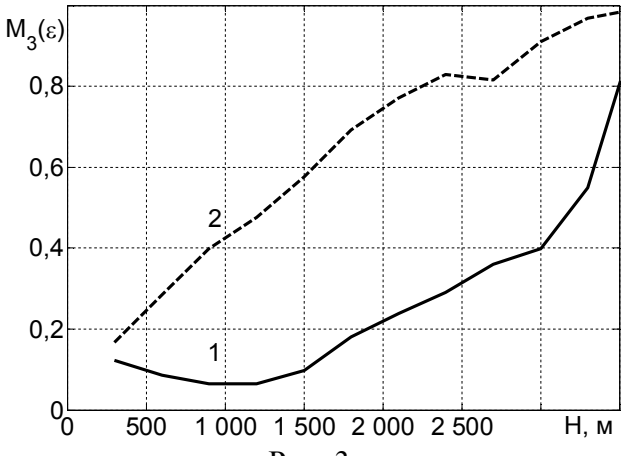

Рис. 3.

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 натурных 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.

На рис. 4 и 5 приведены результаты имитационного моделирования. При этом по данным натурного эксперимента формировались имитационные выборки, и 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).

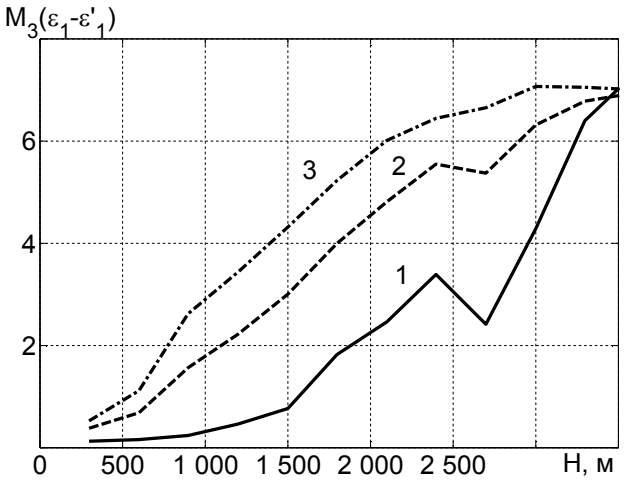

Рис. 4.

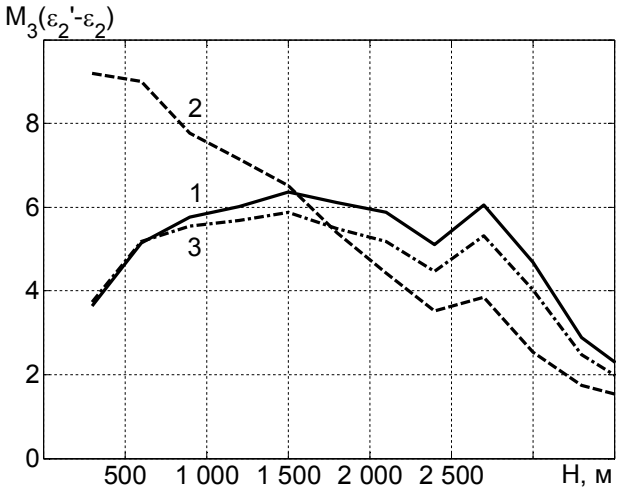

Рис. 5.

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

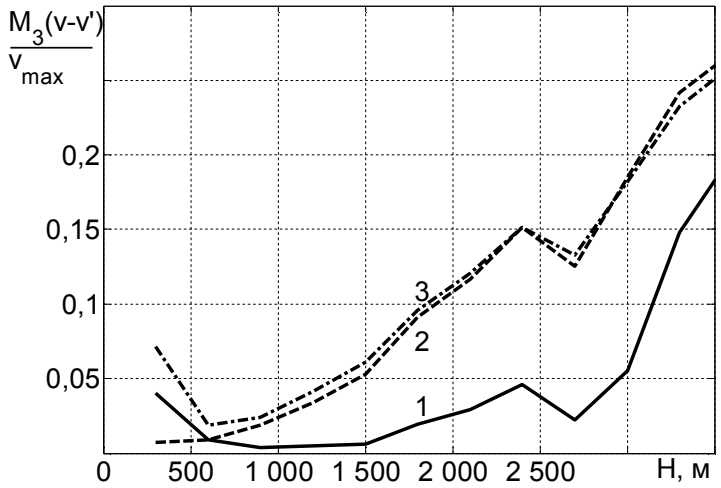

Рис. 6

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.

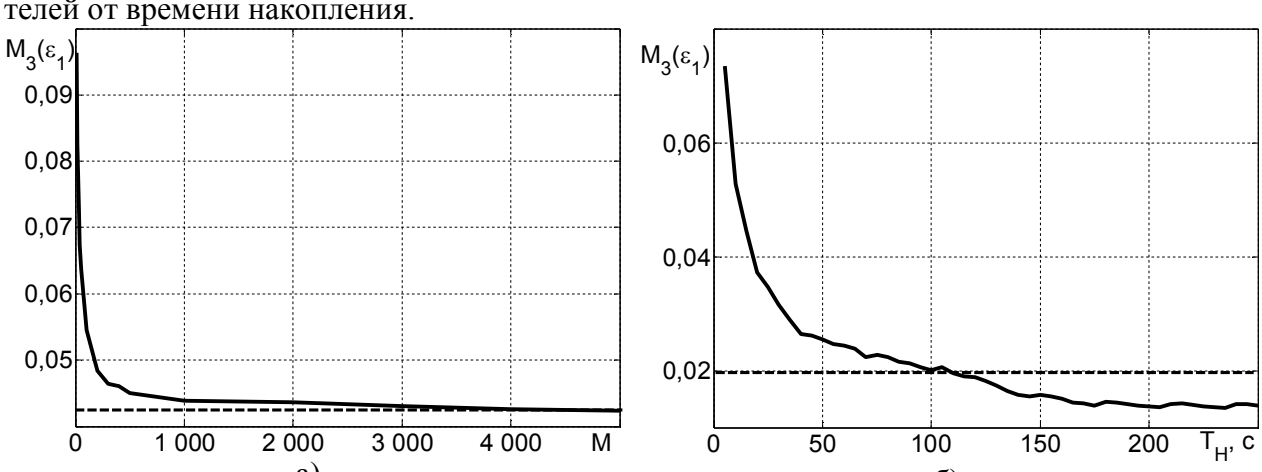

Рис. 7.

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 рисунках 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 обоих моделей фактически совпадают;
- полученное в рамках сопоставления (рис.7, б) значение невязки, более низкое для результатов натурного 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.

Литература:

1. *Дистанционные* методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли [Текст] / Под общ. ред. Б. Л. Кащеева, 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 [Текст] / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // Х.:ХНУРЭ, Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 152. – С. 49-52.

3. Литвин-Попович, А.И.. Анализ состояния атмосферы на малых временных интервалах [Текст] / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников, - Х.:ХНУРЭ, «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 [Текст] / В.А. Тихонов, О.В. Зубков, Г.И. Сидоров // Х.:ХНУРЭ, АСУ и приборы автоматики. 2003. Вып. 124. с. 18-22

5. Островитянов, Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. [Текст] / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. - М.: Сов.радио, 1980. - 232с.

6. Литвин-Попович, А.И.. Обработка радиолокационных сигналов в параллельных вычислительных системах [Текст] / А.И. Литвин-Попович // Х.:ХНУРЭ, Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2011. – Вып. 166. – С. 165-172.

7. Довиак, Р. Доплеровские локаторы и метеорологические наблюдения [Текст] / Р. Довиак, Д. Зрнич – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 503 с.