

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.А. ТИХОНОВ, д-р физ.-мат. наук,  
В.В. ВОРОНИН, А.А. СУПРУН, канд. техн. наук*

## **ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ СИГНАЛА ПРИ АДАПТИВНОМ ПОДАВЛЕНИИ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ**

### **Введение**

Системы акустического зондирования атмосферы (САЗ) являются недорогим и оперативным средством дистанционного мониторинга нижней атмосферы. На протяжении ряда лет САЗ применяются для решения научно-практических задач метеорологии, таких как определение скорости ветра, температуры, влажности атмосферы на заданной высоте в заданные моменты времени. Основным фактором, ограничивающим эффективность работы систем акустического зондирования, является внешний шум, принимаемый антенной.

Используемые ранее средства и методы защиты от помех содаров (звукозащитные бленды, укрытия различного рода) имеют ряд недостатков: большие габаритные размеры и вес, сложность транспортировки, недостаточная степень защиты от помех, попадающих в главный и боковой лепестки диаграммы направленности. Все это в значительной степени влияет на качественные показатели системы в целом.

Предпосылки развития акустического зондирования атмосферы заложены трудами советских ученых в 1940 – 1960 гг. Теория рассеяния звука на турбулентности впервые была предложена в 1941 г. А.М. Обуховым [1] и получила дальнейшее развитие в работах В.И. Татарского [2], А.С. Моница [3] и экспериментально проверена М.А. Калистратовой [4]. В России работы по исследованию акустических волн выполняются в институтах Российской академии наук – Институте оптики атмосферы, Институте радиотехники и электроники, Институте физики атмосферы, а в Украине – в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) [5 – 7].

Анализ результатов экспериментов по исследованию влияния нормального белого шума и коррелированной стационарной помехи на оценку центральной частоты позволяет сделать следующие выводы:

- влияние помехи типа белого шума на оценку центральной частоты незначительно и при усреднении по спектрам практически устранимо;
- наличие одномодовой коррелированной помехи смешивает оценку центральной частоты полезного сигнала в сторону частоты моды помехи;
- возможность разрешения сигнала и помехи зависит от разности частот их мод, длины реализации и длины применяемого окна. Даже при хорошем разрешении сигнала и помехи, на оценку центральной частоты существенное влияние оказывает наличие коррелированной помехи;
- влияние помехи растет с уменьшением ширины ее спектра;
- проведенные исследования указывают на необходимость разработки и использования эффективных методов борьбы с коррелированными случайными помехами.

Помехи, действующие на САЗ, нестационарные во времени, часто быстро меняют свой спектр. Их статистические характеристики зависят: от типа источника помех, характера движения источника (например, взлет, посадка, рулежка самолета), от его удаленности до приемных антенн САЗ и других факторов. Поэтому для подавления помех необходимо применять эффективные адаптивные фильтры [8].

### **Синтез обесцвечивающего РФ фильтра**

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, для эффективного подавления помех целесообразно использовать решетчатые фильтры (РФ). Поиск методов рекуррентного вычисления коэффициентов авторегрессии (АР) привел к разработке алго-

ритма Левинсона – Дарбина. Алгоритм Левинсона – Дарбина для действительного сигнала можно представить в виде [9]

$$K^k = \Phi_k^k = - \left( R_k + \sum_{i=1}^{k-1} \Phi_1^{k-1} R_{k-1} \right) / (\sigma_a^{k-1})^2, \quad k = 2 \div p$$

$$\Phi_i^k = \Phi_i^{k-1} + \Phi_k^k \Phi_{k-i}^{k-1}, \quad 1 \leq i \leq k-i$$

$$(\sigma_a^k)^2 = \left( 1 - |\Phi_k^k|^2 \right) (\sigma_a^{k-1})^2,$$

где  $\Phi_i^p$  – коэффициенты АР модели  $p$ -го порядка,  $K^k$  – коэффициенты усиления (отражения)  $k$ -го звена РФ,  $R_k$  – значения функции корреляции сигнала,  $(\sigma_a^p)^2$  – значения дисперсии ошибки прямого предсказания. Инициализация алгоритма описывается соотношениями

$$\Phi_1^1 = -R_1/R_0, \quad (\sigma_a^1)^2 = \left( 1 - |\Phi_1^1|^2 \right) R_0.$$

Алгоритм Левинсона – Дарбина позволяет также получить структуру РФ.

Работа фильтра описывается выражениями

$$a_t^k = a_t^{k-1} - K^{k-1} d_{t-1}^{k-1}, \quad (1)$$

$$d_t^k = d_{t-1}^{k-1} - K^{k-1} a_t^{k-1}, \quad (2)$$

где  $d_t^k$  – ошибка обратного предсказания на выходе  $k$ -го звена РФ. Для действительного сигнала справедливы соотношения

$$(\sigma_a^k)^2 = (\sigma_d^k)^2.$$

Уравнения (1) и (2) дают возможность получить структуру обеляющего решетчатого фильтра (РФ)  $p$ -го порядка, изображенную на рис. 1. При поступлении сигнала на вход фильтра на выходе каждого звена появляются ошибки предсказания вперед и назад.

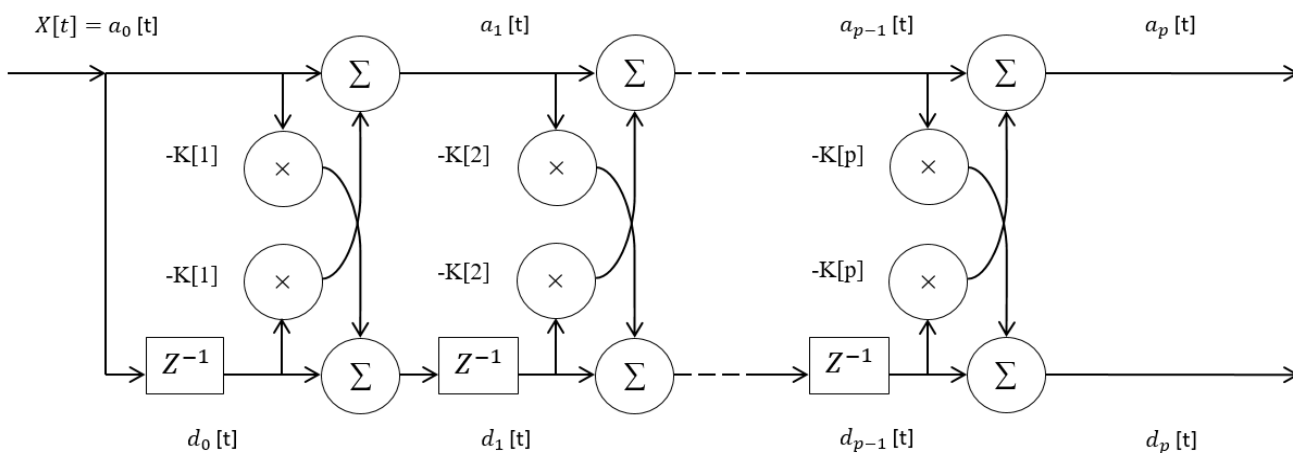


Рис. 1

РФ, коэффициенты отражения которого определяются с помощью алгоритма Левинсона – Дарбина, минимизируют дисперсию ошибки предсказания. Это важное свойство РФ используется для целей подавления коррелированных акустических помех.

Решетчатая структура фильтра предсказания по методу наименьших квадратов определяется статистиками второго порядка входного сигнала. На практике помеховые акустиче-

ские сигналы, как правило, нестационарные и имеют меняющиеся во времени статистики. В подобных случаях процесс вычисления коэффициентов фильтра предсказания приходится часто повторять, следя за изменяющимися спектрально-корреляционными свойствами помех. Эта задача предсказания временного ряда без предварительного знания его корреляционных свойств называется адаптивным предсказанием. Для РФ были получены блочные и пошаговые методы адаптивного предсказания. В данной работе исследуется пошаговый адаптивный алгоритм на основе РФ с помеховым каналом при работе с имитационными акустическими помехами системы САЗ.

Основные достоинства РФ проявляются при адаптивной фильтрации. Скорость адаптации РФ превосходит скорость адаптации авторегрессионного фильтра прямой реализации. Это объясняется тем, что РФ приводит к ортогонализации входного сигнала и некоррелированности оценок коэффициентов отражения.

В устройствах подавления шумов для извлечения информации используется сумма информационного сигнала и помехи, а также опорный или помеховый канал с шумом. Рекурсивный метод наименьших квадратов для связанных процессов обеспечивает очень быстрое отслеживание или адаптацию при подавлении помехи.

Когда один процесс

$$y_t = Y_t - x_t, \quad (3)$$

где  $Y_t$  – смесь коррелированной помехи  $x_t$  и сигнала, необходимо оценить по данным наблюдения за связанным с ним процессом

$$X_t = x_t + e_t, \quad (4)$$

где  $e_t$  – белый шум, то можно объединить эти процессы в один процесс и обработку его реализовать с помощью РФ. Аддитивный белый шум  $e_t$  в помеховом канале влияет на уровень коррелированности сигналов в обоих каналах, который связан также с различием амплитудно-частотных характеристик при прохождении сигнала в информационном и помеховом каналах, наличием дополнительных шумов в этих каналах.

### Экспериментальные исследования оценки частоты сигнала в условиях помех

При работе САЗ важное значение имеет точность оценки частоты отраженного сигнала при воздействии акустических помех. По доплеровскому сдвигу частоты отраженного сигнала в САЗ определяют скорость ветра в приземных слоях атмосферы. В данной работе методом имитационного моделирования оценивалась средняя частота пика спектральной плотности мощности (СПМ) полезного сигнала при воздействии коррелированных помех. Для подавления коррелированной помехи использовался адаптивный РФ. Для адаптации РФ применялся алгоритм на основе градиентного спуска. Частота пика спектра определялась по АР параметрической оценке СПМ ковариационным методом [9]. Параметрическая оценка СПМ сигнала вычислялась по формуле

$$P(f) = D_a \left| 1 - \sum_{i=1}^p \Phi_i e^{-ji2\pi fT} \right|^2, \quad (5)$$

где  $D_a$  – дисперсия ошибки предсказания,  $\Phi_i$  – коэффициенты АР анализируемого сигнала. Коэффициенты АР были получены методом наименьших квадратов, применительно к задаче линейного предсказания, с помощью системы уравнений Юла – Уокера. В помеховом канале присутствовала коррелированная помеха и аддитивный белый шум (4), в информационном канале присутствовал оцениваемый полезный сигнал и та же аддитивная помеха (3). Полученные оценки усреднялись по 100 экспериментам. Имитационный полезный сигнал и коррелированная помеха получен с помощью формирующих АР фильтров с заданными частотами пиков, методом, описанным в [10].

В таблице представлены выборочные оценки частоты пика сигнала и среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки при отсутствии помехи и шума в зависимости от длины выборки при трех различных ширинах полос сигнала. Задаваемая частота пика сигнала во всех экспериментах составляла 5000 Гц. Погрешность возникала как при генерации имитационного сигнала ограниченной длины, так и в процессе оценивания частоты пика сигнала по параметрической СПМ. Данные, приведенные в таблице, показывают, что в диапазоне длин выборок от 100 до 1300 отсчетов, оценка средней частоты пика примерно одинакова. С ростом ширины полосы сигнала и с уменьшением длины выборки растет значение среднего квадратического отклонения, что представляется естественным. Таким образом, можно полагать, что применяемый метод генерации сигнала и оценка частоты пика сигнала, дают довольно точный результат и не влияют на полученные далее оценки частоты пика сигнала в присутствии помех и белого шума.

Длина выборки	100	300	500	700	900	1100	1300
Ширина полосы	50	50	50	50	50	50	50
Оценка частоты	4998	5001	5004	5001	5000	5001	5001
СКО	67	23	15	12	10	10	10
Ширина полосы	200	200	200	200	200	200	200
Оценка частоты	5005	5007	5005	5002	5000	5003	5001
СКО	88	40	27	26	22	17	15
Ширина полосы	500	500	500	500	500	500	500
Оценка частоты	5004	5001	5008	5003	4999	5000	5001
СКО	135	65	44	39	37	28	31

При отсутствии белого шума в помеховом канале, помехи в обоих каналах сильно коррелированы и могут быть полностью компенсированы. Наличие белого шума снижает взаимную корреляцию этих помех, что приводит к неполной компенсации помех и, как следствие, к ошибкам в оценивании частоты пика сигнала. График, представленный на рис. 2, демонстрирует влияние отношения помеха-белый шум в децибелах на величину взаимной корреляции помех в информационном и помеховом каналах. Как показали эксперименты, снижение уровня корреляции помех в обоих каналах приводит к росту ошибок при оценивании частоты пика сигнала.

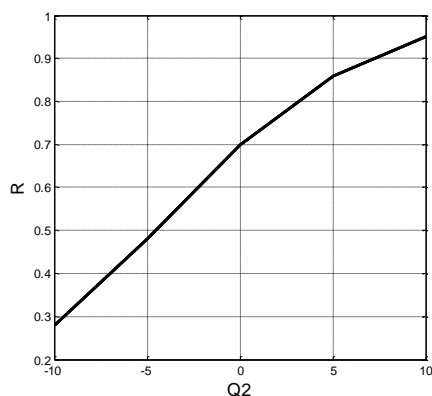


Рис. 2

В следующей серии экспериментов оценивалась частота полезного сигнала и влияние на нее уровня белого шума в помеховом канале относительно мощности помехи. Снижение уровня шума приводит к росту взаимной корреляции помех в информационном и помеховом каналах, а следовательно, ведет к росту подавления помехи. При росте подавления помехи точность оценивания частоты сигнала возрастает.

Для повышения точности оценивания частоты полезного сигнала не учитывались значения оценок частоты, превышавших отклонение частот от среднего значения оценки частоты сигнала 5000 Гц на 500 Гц. Такие отклонения считались выбросами и при оценках игнорировались. Таким образом, не учитывались значительные порывы ветра, которые с большой

вероятностью могли оказаться фиктивными, связанными с ошибками измерения в процессе параметрической оценки СПМ.

На рис. 3 представлены результаты оценки частоты полезного сигнала при воздействии шума в помеховом канале при частотах пиков СПМ сигнала 5000 Гц и помехи 4000 Гц, 1 – при отношении сигнал-помеха  $Q_1=10$  дБ, 2 – при отношении сигнал-помеха  $Q_1=0$  дБ, 3 – при отношении сигнал-помеха  $Q_1= -5$  дБ. Как видно из графика на рис. 4, с ростом уровня белого шума в помеховом канале точность оценки средней частоты сигнала снижается. Для генерации сигнала и получения оценки частоты использовалась выборка длиной 100 отсчетов. Частота помехи во всех экспериментах составляла 4000 Гц, а ее ширина полосы 300 Гц. Частота полезного сигнала равнялась 5000 Гц, а ширина полосы полезного сигнала была 200 Гц.

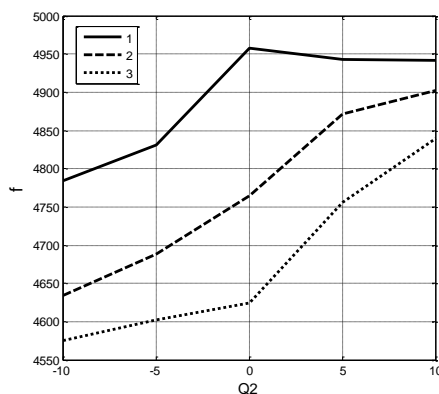


Рис. 3

На рис. 4 представлены результаты оценки частоты полезного сигнала при воздействии шума в помеховом канале при частоте пика сигнала 5000 Гц, помехи 4000 Гц, 1 – при ширине полосы помехи 50 Гц, 2 – при ширине полосы помехи 300 Гц, 3 – при ширине полосы помехи 500 Гц. В этой серии экспериментов исследовалось влияние ширины полосы помехи на точность оценки частоты пика сигнала. Длина выборки составляла 100 отсчетов, ширина полосы сигнала 200 Гц. Как видно из рис. 5, с ростом ширины полосы помехи, точность оценки средних частот увеличивалась. Однако на точность оценки частоты полезного сигнала больше влиял уровень белого шума в помеховом канале.

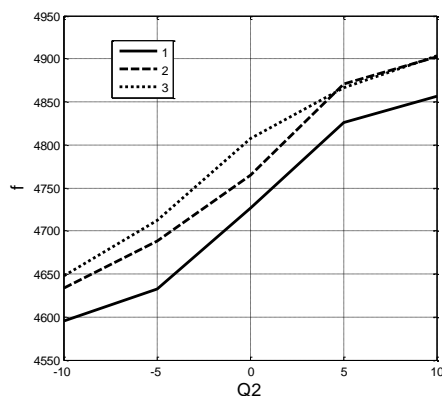


Рис. 4

Исследовалось также влияние частоты помехи на оценку частоты полезного сигнала. Результаты экспериментов показаны на рис. 5, где представлены результаты оценок частоты полезного сигнала при воздействии шума в помеховом канале: 1 – при частоте пика помехи 4500 Гц, 2 – при частоте пика помехи 4000 Гц, 3 – при частоте пика помехи 3500 Гц. Длина выборки 100, отношение сигнал-помеха 0 дБ. С ростом отличия частот помехи и сигнала и снижении отношения помеха-шум точность оцениваемой частоты сигнала снижается. Отметим, что при частоте помехи 3500 с ростом  $Q_2$  точность оценки частоты полезного сигнала

растет. Но это вызвано снижением количества учитываемых результатов оценивания из-за ограничения оценок частоты полезного сигнала, превышавших отклонение частот от среднего значения оценки частоты сигнала 5000 Гц на 500 Гц. Для малых  $Q_2$  частота полезного сигнала оценивалась по 92 экспериментам при  $Q_2=-5$ , и по 40 экспериментам при  $Q_2=-10$ . Все остальные результаты экспериментов не учитывались. Поэтому с ростом  $Q_2$  влияние помехи в 3500 Гц было меньшим, чем для частот 4000 и 4500 Гц.

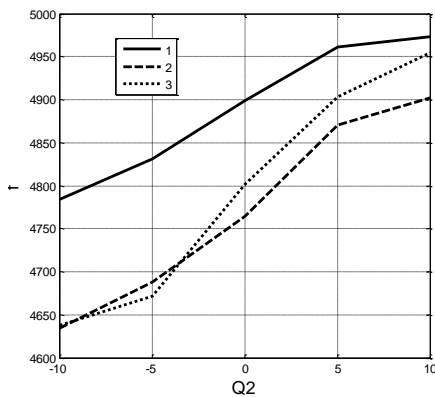


Рис. 5

## Выводы

Применение адаптивных РФ значительно снижает влияние помех на оценку частоты пика полезного сигнала в системах акустического зондирования. Так, без использования фильтра при отношениях сигнал-помеха  $Q_1=0$  дБ и помеха-шум  $Q_2=10$  дБ, частоты помехи 4000 Гц оценка средней частоты полезного сигнала по ста экспериментам составила 4670 Гц, а СКО – 132 Гц. При этом учитывались только 40 из 100 результатов оценивания частоты. Остальные оценки частоты были вне ширины полосы в 500 Гц. При подавлении помехи РФ были получены оценки частоты со средним значением 4902 Гц с СКО 122 Гц. Таким образом, в САЗ целесообразно использовать адаптивные фильтры для подавления помех наряду с аппаратными техническими решениями в виде звукозащитных бленд и различного рода звукопоглощающих устройств.

### Список литературы:

1. Обухов А.М. О рассеянии звука в турбулентном потоке // Докл. АН СССР. 1941. Т. 30. С. 611.
2. Татарский В.И. К теории распространения звуковых волн в турбулентном потоке // ЖЭТФ. 1953. Т. 25. С. 74.
3. Монин А.С. некоторые особенности рассеяния звука в турбулентной атмосфере // Акуст. журн. 1961. Т. VII, вып. 4. С. 457 – 461.
4. Калистратова М.А. Экспериментальное исследование рассеяния звуковых волн в атмосфере // Тр. Ин-та физики атмосферы (ИФА) АН СССР. 1962. №4 С. 203 – 256.
5. Kartashov V.M., Babkin S.I., Kushnir M.V. and Oleinikova E.I. Formation of empirical and methodical Foundations of the Fields of Atmosphere Radioacoustic Sounding Systems // Telecommunications and Radio Engineering. New York. 2015. Vol. 74, №15. P.1391-1407.
6. Kartashov V. M., Tikhonov V. A. , Voronin V. V. Features of construction and application of complex systems for the atmosphere remote sounding// Telecommunications and Radio Engineering. New York. 2017. Vol. 76, №8. P.743-749.
7. Карташов В.М., Тихонов В.А., Олейников В.Н. и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
8. Адаптивные фильтры ; пер. с англ. под ред. К.Ф.Н. Коуэна, П.М. Гранта. Москва : Мир, 1988. 392 с.
9. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва : Мир, 1990. 584 с.
10. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V. and Tymoshenko L.P. Complex model of random signal in problems of acoustic sounding of atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. New York. 2016. Vol. 75, №20. P.1885-1892.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.05.2019