

**АВТОРЕГРЕССИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ
В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ****Введение**

Разработка мониторинга атмосферы в интересах авиации, экологии, радиосвязи, радиолокации привела к созданию дистанционных неконтактных методов зондирования атмосферы. Одним из перспективных методов дистанционного зондирования является акустический метод, основанный на зондировании атмосферы акустическими волнами и определении параметров атмосферы по параметрам сигнала, рассеянного атмосферными неоднородностями [1].

Современной тенденцией развития антенной техники систем акустического зондирования атмосферы (САЗ) является переход от одиночных облучателей с громоздкими звукопоглощающими укрытиями к фазированным акустическим антенным решеткам (ФАР) [2 – 4]. Это позволяет значительно расширить функциональные возможности систем акустического зондирования, уменьшить их габаритные размеры, повысить мобильность. Важное преимущество систем с ФАР – возможность реализации адаптивной пространственной избирательности, позволяющей формировать минимум диаграммы направленности в направлении помехи, что позволяет существенно повысить помехозащищенность систем акустического зондирования. На сегодняшний день существует ряд зарубежных систем акустического зондирования с ФАР и электронным управлением лучом диаграммы направленности. Адаптивные методы пространственно-временной обработки сигналов в них практически не используются. Разработка методов и средств адаптации систем акустического зондирования атмосферы к изменяющейся метеорологической и помеховой обстановке является актуальной научно-прикладной задачей современной теории и техники акустического зондирования [3 – 5].

Модели авторегрессии (АР) эффективно используются для описания дискретных случайных процессов. Параметрические методы спектрального оценивания на основе коэффициентов АР широко применяются для анализа и обработки узкополосных сигналов. Достоинством модели АР является ее конструктивность, заключающаяся в возможности синтеза простым способом алгоритмов обработки случайных процессов. Коэффициенты модели АР помехи являются коэффициентами усиления синтезируемых обесцвечивающих фильтров предсказания. Модель АР позволяет осуществлять оптимальную фильтрацию сигнала на фоне коррелированной помехи.

В работе построены модели АР и проанализированы параметрические спектры акустических помех, имеющих место при работе САЗ в условиях функционирования аэропорта. Особое внимание уделено синтезу АР фильтров предсказания для подавления помех. Рассчитаны коэффициенты подавления АР фильтрами предсказания акустических помех, создаваемых самолетами.

Синтез обесцвечивающего АР фильтра

В уравнении АР текущий дискретный отсчет сигнала представляется взвешенной суммой предыдущих с некоторыми коэффициентами веса [6]:

$$x[t] = \sum_{j=1}^p \Phi[j]x[t-j] + a[t], \quad (1)$$

где $\Phi[j]$ – коэффициенты АР, $a[t]$ – некоррелированные случайные отсчеты, p – порядок модели АР. Величина

$$\tilde{x}[t] = \sum_{j=1}^p \Phi[j]x[t-j],$$

называется предсказанием случайной величины. Разность между текущим значением отсчета и его предсказанием называется ошибкой предсказания

$$a[t] = x[t] - \tilde{x}[t]. \quad (2)$$

Величина $a[t]$ характеризует максимальную точность предсказания текущего отсчета, а ее статистические свойства определяют выбор порядка модели АР.

Построение АР модели случайного процесса сводится к нахождению коэффициентов АР и определению порядка модели p . Умножив правую и левую части (1) на $x[t-i]$ и усреднив, можно получить полную систему $p+1$ уравнений Юла – Уокера

$$R[i] - \sum_{j=1}^p \Phi[j]R[j-i] = 0, \quad i = 1 \div p, \quad (3, a)$$

$$R[0] - \sum_{j=1}^p \Phi[j]R[j] = D_a, \quad (3, б)$$

где D_a – дисперсия ошибки предсказания.

Параметрическая оценка спектральной плотности мощности (СПМ) на основе АР модели сигнала рассчитывается с помощью выражения [7]

$$P(f) = D_a \left| 1 - \sum_{i=1}^p \Phi[i]e^{-ji2\pi fT} \right|^2. \quad (4)$$

Выражение (4) широко используется в параметрическом методе спектрального оценивания случайных процессов. В качестве параметров, полностью характеризующих спектральную оценку случайного процесса, выступают коэффициенты АР и порядок модели. Параметрическое спектральное оценивание обладает рядом достоинств по сравнению с традиционными методами спектрального оценивания (коррелограммным и периодограммным). К ним относятся, в частности: более высокое спектральное разрешение при использовании коротких выборок, отсутствие боковых лепестков.

На рис. 1 представлен обеляющий АР фильтр предсказания прямой реализации, алгоритм действия которого описывается выражением (2). Он состоит из линий задержки, усилителей с коэффициентами усиления $-\Phi[j]$, $1 \leq j \leq p$ и сумматора. Ошибки предсказания на выходе этого фильтра будут отчетами белого шума, а точнее некоррелированным процессом. Дисперсия ошибки предсказания на выходе фильтра будет иметь минимальное значение, если коэффициенты АР найдены из уравнения Юла – Уокера (3, а, б).

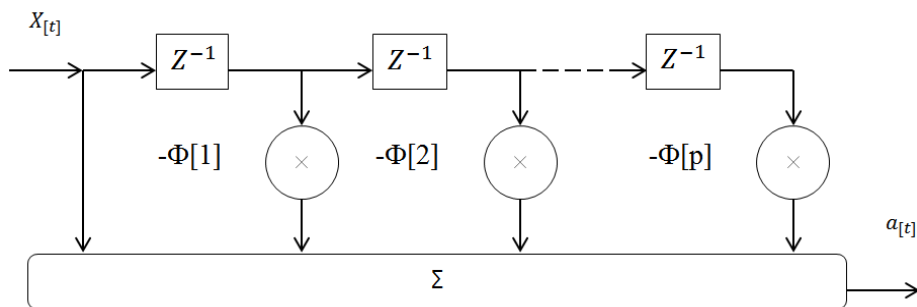


Рис. 1

АР фильтр предсказания выполняет функцию обеляющего фильтра. На вход фильтра подается коррелированный сигнал помехи, а на выходе получают белый шум. Принцип работы этого фильтра совпадает с работой череспериодного компенсатора помех, осуществляющего череспериодное вычитание. Достоинством АР фильтра предсказания является многократное взвешенное вычитание, учитывающее форму СПМ входного сигнала помехи.

Звуковые помехи в системах акустического зондирования атмосферы характеризуются значительным разнообразием. Спектральный состав помех, часто представляющих аддитивную смесь колебаний от различных источников, может быть сложным. В ряде практически важных случаев содар должен обеспечивать надежные измерения в условиях сильных помех, например, в аэропортах вблизи взлетно-посадочных полос, возле автотрасс, при шуме дождя и грозových раскатах [4, 5].

Спектральный анализ и подавление помех

Рассмотрим некоторые статистические характеристики мощных акустических помех, создаваемых самолетами в районе аэропорта. Качество работы обеляющего фильтра существенно зависит от точности статистической модели помехи. Это условие эквивалентно точности параметрической оценки СПМ (4), которая определяется коэффициентами АР. Анализ точности модели оценивался качественно, по соответствию СПМ, полученных параметрическим и коррелограммным методами. Выборки сигналов для всех помех имели длину 10000 отсчетов, оцифрованных с частотой дискретизации 22050 Гц. Длительность выборки составляла 0,45 с, так что на этом интервале можно полагать, что сигнал стационарен. Длина корреляционной функции составляла 150 отсчетов. Порядок АР модели оценивался по минимуму дисперсии ошибки предсказания. Коэффициенты АР модели рассчитывались в соответствии с уравнение Юла – Уокера (3, а), так как к спектральным оценкам в данном исследовании не предъявлялись повышенные требования по разрешению и устойчивости.

На рис. 2 показаны оценки СПМ, полученные коррелограммным (рис. 2, а) и параметрическим (рис. 2, б) методами для шума лайнера Boeing 707. Как видно из графика СПМ на рис. 2, а, б спектр характеризуется множеством пиков, наиболее мощный из которых расположен вблизи нулевой частоты. При большом количестве пиков необходимо выбирать высокий порядок АР модели. Параметрическая оценка СПМ рассчитана по коэффициентам модели АР 34-го порядка. Сравнение графиков показывает, что расположение на оси частот основных пиков у обеих оценок совпадает.

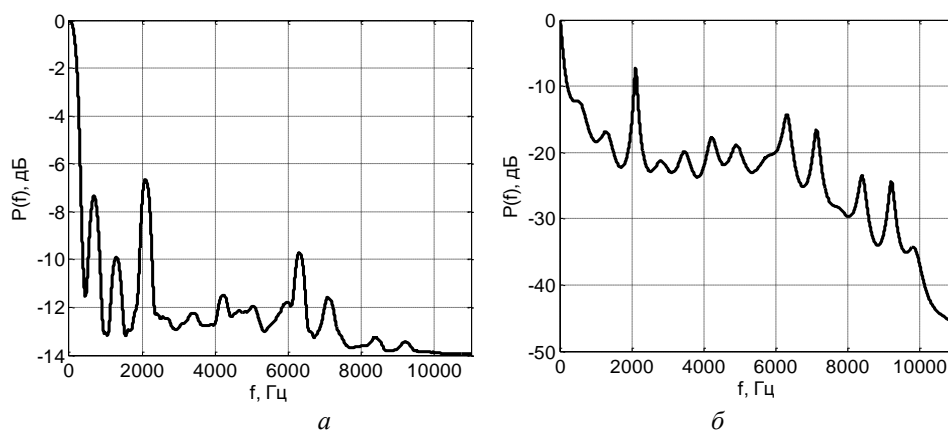


Рис. 2

Несколько иной вид имеют оценки СПМ, полученные коррелограммным (рис. 3, а) и параметрическим (рис. 3, б) методами для шума лайнера Boeing 737, которые представлены на рис. 3. Параметрический спектр получен с использованием модели АР (8). Он имеет три явно выделенных пика на частотах близких к частотам пиков СПМ, полученных коррелограммным методом.

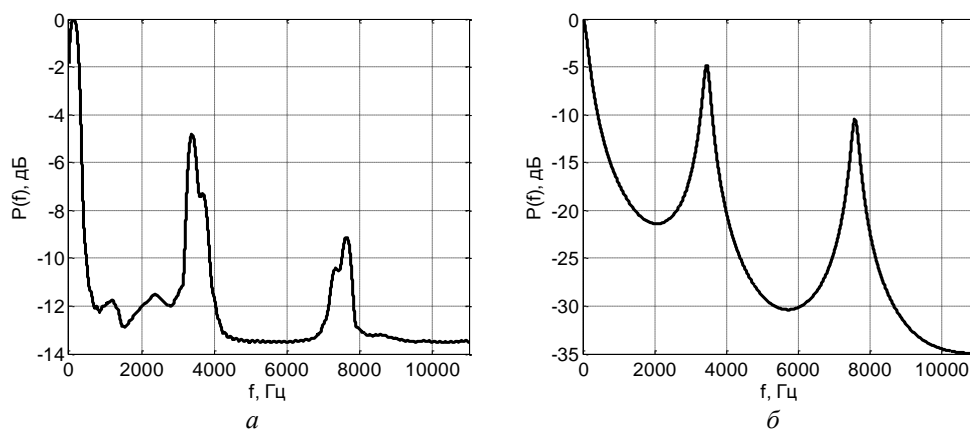


Рис. 3

На рис. 4 показаны оценки СПМ, полученные коррелограммным (рис. 4, *a*) и параметрическим (рис. 4, *б*) методами для шума лайнера Boeing 747. Как видно из графика СПМ на рис. 4, *a*, в спектр характеризуется двумя пиками, наиболее мощный из которых расположен на нулевой частоте. Параметрическая оценка СПМ была рассчитана по коэффициентам модели АР (8). Сравнение графиков показывает, что расположение на оси частот основных пиков у обеих оценок совпадает. Острые пики спектра указывают на его принадлежность к узкополосным процессам, для которых АР модель наиболее эффективна.

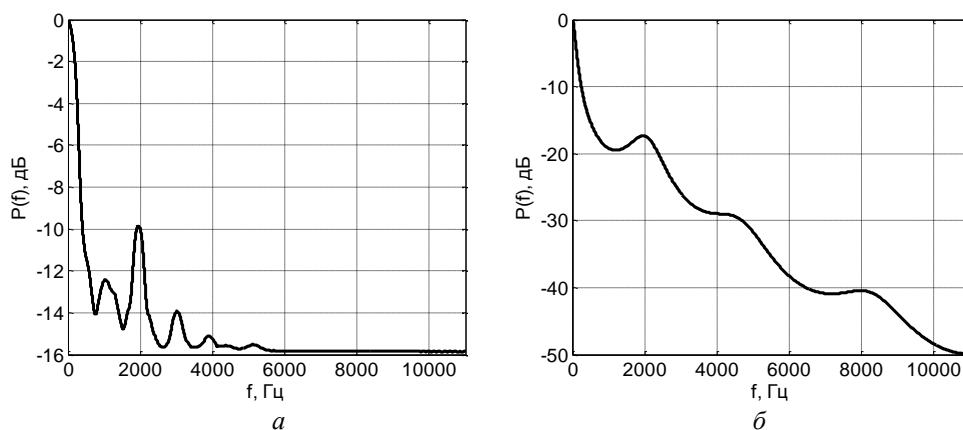


Рис. 4

Коррелограммный (рис. 5, *a*) и параметрический (рис. 5, *б*) спектры шума авиалайнера Boeing 767 представлены на рис. 5. Одномодовый спектр имеет узкополосный пик, расположенный вблизи нулевой частоты. Для описания одномодового сигнала используется модель АР невысокого порядка. Параметрический спектр шума авиалайнера Boeing 767 получен на основе модели АР(4).

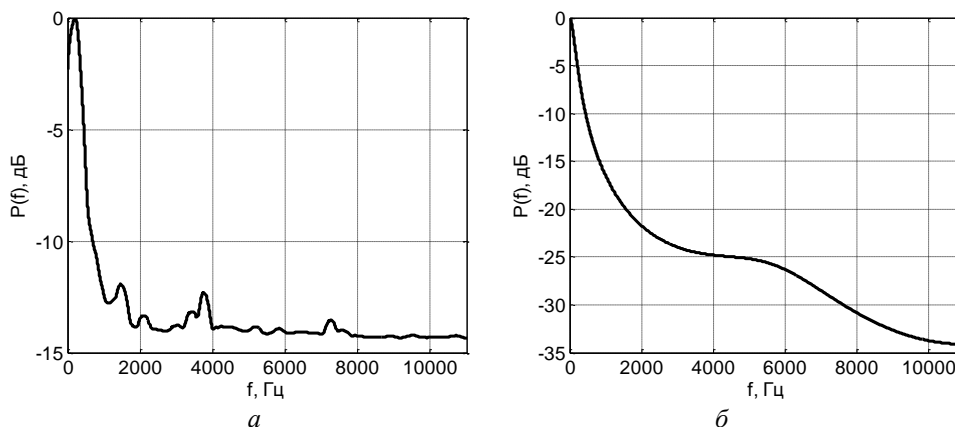


Рис. 5

Обеление АР фильтрами предсказания снижает уровень коррелированных помех до уровня белого шума. Заметим, что шумы самолетов состоят из коррелированной и шумовой составляющих. Поэтому коэффициент подавления помехи АР фильтром ограничивается уровнем шума, содержащимся в акустических сигналах, получаемых от самолетов. Уровень высокочастотных составляющих помехи и аддитивного белого шума довольно высок, что сказывается на коэффициенте подавления помехи. Убедиться в этом можно, если сгладить высокочастотные составляющие колебаний сигнала косинусным окном длиной 40 отсчетов. Полученный после процедуры сглаживания параметрический спектр, рассчитанный по модели АР (4), показан на рис. 6, *а* – для лайнера Boeing 707, *б* – для лайнера Boeing 737. Как видно из графика, уровень низкочастотного пика существенно повысился над уровнем высокочастотных составляющих спектра.

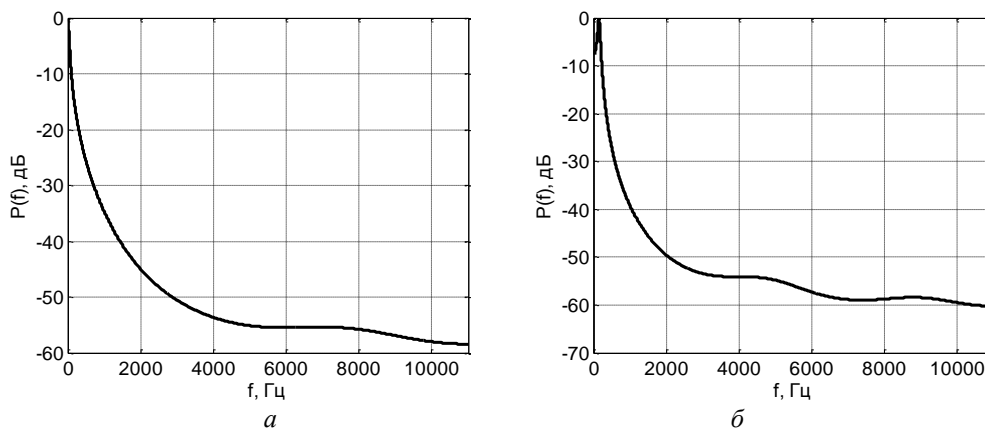


Рис. 6

Подавление шумов самолетов АР фильтром предсказания, представленным на схеме рис. 1, продемонстрировано на примерах сигналов, полученных от Boeing 707 и Boeing 747. Для моделей АР шумов этих самолетов были синтезированы фильтры АР предсказания, состоящие из 34 звеньев (Boeing 707) и 8 звеньев (Boeing 747). Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) этих фильтров представлены на рис. 7: *а* – для помехи от Boeing 707, *б* – для помехи от Boeing 747. Сравнение их с графиками СПМ коррелированных помех, создаваемых этими самолетами, представленных на рис. 2, *б* и рис. 4, *б*, показывает, что АЧХ и СПМ являются взаимно обратными. Очевидно, что результатом действия АР фильтра на коррелированную помеху будет ее обеление.

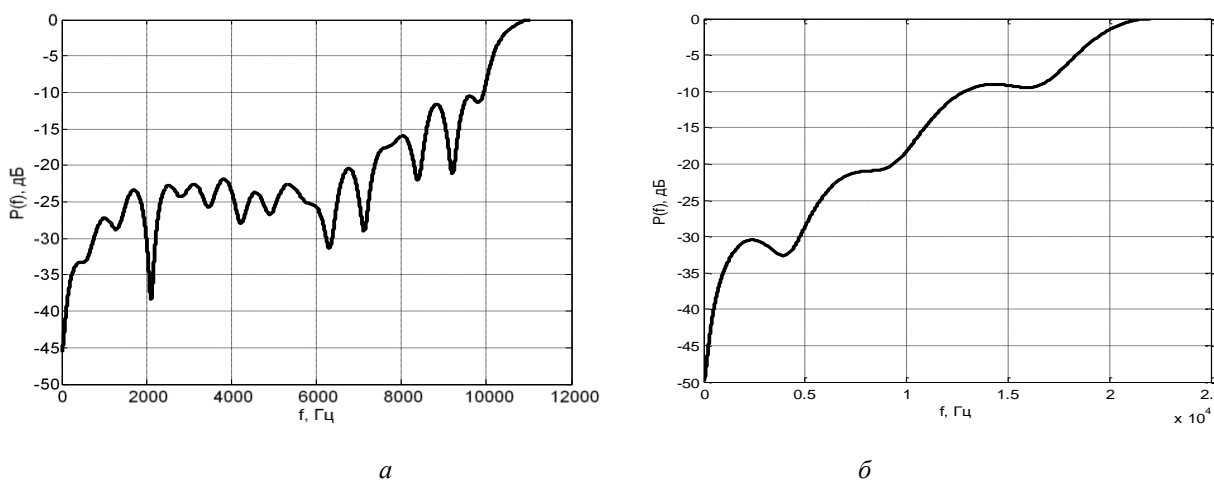


Рис. 7

Коэффициент подавления по мощности акустической помехи от Boeing 707 составляет 4,8. Спектр помехи достаточно широкополосный (рис. 2, *б*), что может характеризовать наличие в сигнале мощной составляющей белого шума. Коэффициент подавления акустиче-

ской помехи от самолета Boeing 747 составляет 28,7. Аналогичные результаты были получены для шумов самолетов Boeing 737 и Boeing 767. Коэффициенты подавления помех составили 29,5 и 9,1 соответственно.

Выводы

Показано, что модель АР позволяет описывать звуковые помехи с узкополосными пиками СПМ, получаемые от самолетов в аэропорту. Форма СПМ помех хорошо соответствует СПМ, полученным коррелограммным методом, что свидетельствует о достаточной адекватности моделей АР коррелированным помехам. Разные формы СПМ помех от самолетов указывают на необходимость адаптации применяемых АР фильтров подавления помех. Для рассматриваемых в работе акустических помех АР фильтры предсказания обеспечили коэффициент подавления помех в диапазоне значений от 4,8 до 29,5 раз.

Список литературы:

1. 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.
2. Карташов В.М., Тихонов В.А., Олейников В.Н. и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
3. Карташов В.М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2011. 234 с.
4. Kartashov V.M., Oleynikov V.N., Sheiko S.A., Korytsev I.V., Babkin S.I., Zubkov O.V., Anokhin M.A. [Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles](#) // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2018. Vol. 77, №10. P.915-924.
5. 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.
6. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов ; пер. с. англ. Москва : Мир, 1974. Вып.1. 406 с.
7. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва : Мир, 1990. 584 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 23.02.2019