

АДАПТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В АЭРОПОРТАХ

В. М. КАРТАШОВ, В. А. ТИХОНОВ, В. В. ВОРОНИН

Показано, что применение адаптивных решетчатых фильтров и адаптивных фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) для подавления акустических помех, создаваемых самолетами в аэропортах, позволяет существенно снизить их влияние на точность оценки скорости ветра в системах акустического зондирования. При слабом уровне акустических помех и шумов применение адаптивных решетчатых фильтров и фильтров с КИХ дает примерно одинаковые результаты, а при значительных уровнях помех использование решетчатых фильтров более предпочтительно.

Ключевые слова: авторегрессия, акустическое зондирование атмосферы, подавление помех, оценка частоты, адаптивный решетчатый фильтр.

ВВЕДЕНИЕ

Применение систем акустического зондирования атмосферы (САЗ) в качестве средства дистанционного мониторинга позволяет решить ряд практических задач метеорологии, таких как определение скорости ветра, температуры, влажности атмосферы на заданной высоте. Одним из факторов, ограничивающим эффективность работы систем акустического зондирования, является внешний акустический шум, принимаемый антенной.

Средства и методы защиты от помех, используемые в САЗ (звукозащитные бленды, укрытия различного рода), имеют ряд недостатков: большие габариты и вес, сложность транспортировки, недостаточная степень защиты от помех, попадающих в главный и боковой лепестки диаграммы направленности антенн. Эти недостатки в значительной степени влияют на работу и качественные показатели САЗ.

Разработаны и эксплуатируются рядом зарубежных фирм САЗ с фазированными акустическими антенными решетками и электронным управлением лучом диаграммы направленности. При этом адаптивные методы пространственно-временной обработки сигналов в них практически не используются. В связи с этим, разработка методов и средств адаптации САЗ атмосферы к изменяющейся метеорологической и помеховой обстановке является актуальной научно-прикладной задачей современной теории и техники акустического зондирования [1, 2, 3].

Исследования влияния нормального белого шума и коррелированной стационарной помехи на оценку центральной частоты указывают на необходимость разработки и использования эффективных методов борьбы с коррелированными случайными помехами. Акустические помехи, действующие на САЗ, нестационарные во времени и 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 фак-

торов. Поэтому для подавления помех необходимо применять эффективные адаптивные фильтры.

В работе исследовались возможности использования адаптивных решетчатых фильтров (РФ), а также адаптивных фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) для подавления акустических помех, создаваемых в аэропорту самолетами. Для адаптации использовались алгоритмы по методам наименьших квадратов (МНК) (Least Mean Square – LMS) и по рекурсивному методу наименьших квадратов (РНК) (Recursive Least Square – RLS).

1. АДАПТИВНЫЕ РФ И КИХ ФИЛЬТРЫ

При подавлении узкополосных помех наиболее часто используются фильтры на решетчатой структуре и КИХ фильтры [3, 4]. Эти фильтры не содержат обратных связей и потому всегда устойчивы. КИХ фильтры более простые по структуре, требуют меньшего количества вычислений, чем РФ. Однако, если нет критических ограничений на быстродействие адаптивной системы подавления помех, предпочтительней использовать по ряду причин РФ.

Для РФ и КИХ фильтров были получены и исследованы блочные и пошаговые методы адаптивного предсказания. В данной работе исследуется и сравнивается пошаговый адаптивный алгоритм на основе РФ с фильтром КИХ при работе с акустическими помехами системы САЗ в условиях работы аэропорта. 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, а оценки коэффициентов отражения некоррелированы.

Схема КИХ фильтра предсказания прямой реализации представлена на рис. 1. Процесс подавления помехи $x[t]$ описывается уравнением

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

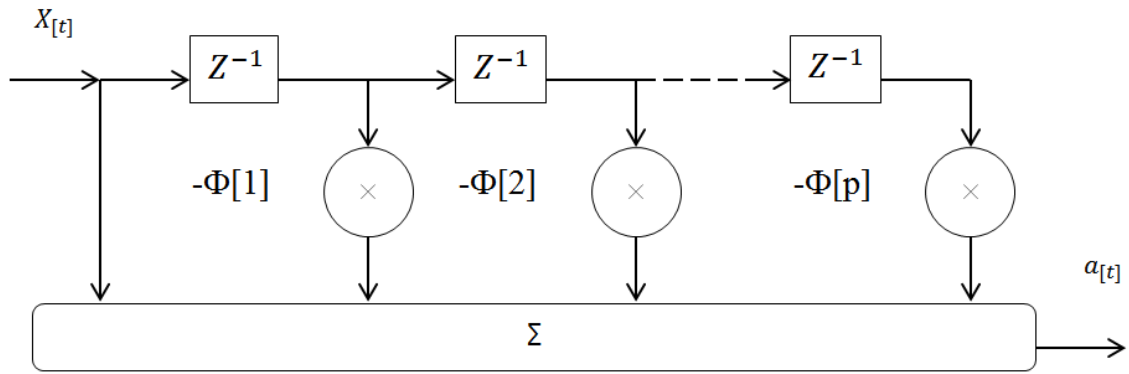


Рис. 1. Схема КИХ фильтра предсказания прямой реализации

где $\Phi[j]$ – коэффициенты фильтра, $a[t]$ – некоррелированные случайные отсчеты, p – число звеньев фильтра. Для расчета коэффициентов АР используется система уравнений Юла-Уокера, которая в матричном виде представляется следующим образом

$$\vec{R} = R_p \vec{\Phi}, \quad (2)$$

где

$$\vec{\Phi} = \begin{bmatrix} \Phi[1] \\ \Phi[2] \\ \vdots \\ \Phi[p] \end{bmatrix}, \quad R_p = \begin{bmatrix} R[0] & R[1] & \dots & R[p-1] \\ R[1] & R[0] & \dots & R[p-2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R[p-1] & R[p-2] & \dots & R[0] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} R[1] \\ R[2] \\ \vdots \\ R[p] \end{bmatrix}.$$

Корреляционная матрица R_p в (2) имеет теплицеву структуру, у которой элементы, расположенные на диагоналях, идентичны.

Решение матричного уравнения методом Юла-Уокера (2) можно записать в виде

$$\vec{\Phi} = R_p^{-1} \vec{R}. \quad (4)$$

Классический метод вычисления коэффициентов АР при длинных реализациях дает, как правило, устойчивые решения. Однако в силу разных причин, например, наличия погрешностей в измерениях, при коротких реализациях, решения уравнения (4) могут быть неустойчивыми. В этом случае малые изменения значений функции корреляции, приводят к большим изменениям коэффициентов АР. При коротких реализациях метод Юла-Уокера дает неточную оценку параметров, что приводит к снижению разрешающей способности параметрических спектральных оценок. Кроме этого, с ростом порядка модели существенно растет объем вычислений, связанных с обращением

корреляционной матрицы в (4). В связи с этим, часто применяются более точные решения уравнения (2), позволяющие сократить количество операций использованием рекуррентных алгоритмов [4].

Для нестационарной помехи параметры модели изменяются во времени. Поэтому уравнение (1) принимает вид

$$a[t] = x[t] - \sum_{j=1}^p \Phi_t[j] x[t-j].$$

Коэффициенты фильтра $\Phi_t[j]$ вычисляются с помощью некоторого алгоритма адаптации. В данной работе для обновления параметра АР фильтра применялся пошаговый градиентный алгоритм – метод наименьших квадратов и РНК. В методе наименьших квадратов коэффициенты фильтра вычисляются с помощью выражения

$$\Phi_{t+1}[j] = \Phi_t[j] - \mu a[t] x[t],$$

где μ – положительный коэффициент, называемый размером шага.

Пошаговый алгоритм адаптации для АР фильтра, основанный на РНК, рекурсивно обновляет оценки обратной корреляционной матрицы R_p^{-1} [4]. Он более сложен и требует большего числа вычислений. Однако он быстрее адаптируется, по сравнению с градиентными методами.

Алгоритм Левинсона-Дарбина позволяет рекурсивно вычислять коэффициенты АР, а также получить структуру РФ. На рис. 2 представлен решетчатый фильтр p -го порядка для подавления помех. При поступлении коррелированной помехи на вход фильтра, на выходе каждого звена появляются ошибки предсказания вперед и назад. Коэффициенты отражения вычисляются по выбранному алгоритму адаптации.

Работа фильтра с изменяющимися во времени коэффициентами отражения, описывается выражениями:

$$a_t^k = a_t^{k-1} - K_t^{k-1} d_{t-1}^{k-1},$$

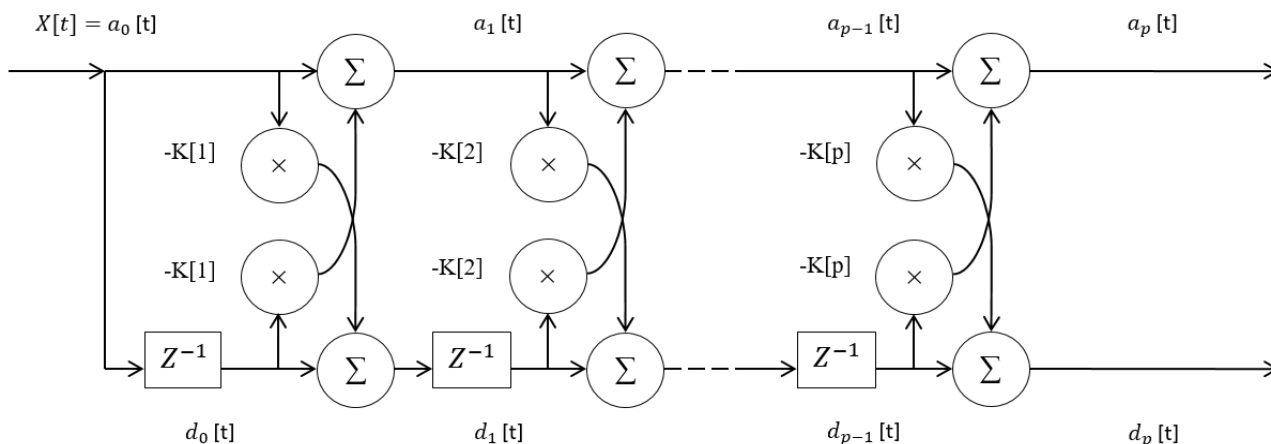


Рис. 2. Решетчатый фильтр р-го порядка для подавления помех

$$d_t^k = d_{t-1}^{k-1} - K_t^{k-1} a_t^{k-1},$$

где d_t^k – ошибка обратного предсказания на выходе k -го звена РФ в t -й момент времени, K_t^{k-1} – коэффициенты усиления (отражения) $k-1$ -го звена РФ в t -й момент времени. В данной работе для обновления коэффициентов РФ применялся пошаговый градиентный алгоритм и РНК.

Градиентный алгоритм пошаговой адаптации, предложенный в [6], базируется на методе наискорейшего спуска. Используя обновленные ошибки предсказания, вычисляют коэффициенты отражения РФ

$$K_{t+1}^k = K_t^k + \mu_k d_t^k d_{t-1}^k.$$

Пошаговый алгоритм адаптации для РФ, основанный на РНК, более сложен и требует большего числа вычислений.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ

Для обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов при взлете и посадке важно знать скорость ветра в приземных слоях атмосферы. Для определения скорости ветра в САЗ измеряют доплеровский сдвиг частоты, отраженного от неоднородностей атмосферы зондирующего сигнала. При работе САЗ вблизи аэропорта важное значение имеет точность оценки частоты отраженного сигнала при воздействии мощных акустических помех, создаваемых самолетами.

В работе методом имитационного моделирования проводилась оценка средней частоты пика спектральной плотности мощности (СПМ) полезного сигнала при воздействии коррелированных помех. Частота пика спектра определялась по АР параметрической

оценке СПМ ковариационным методом [8]. Параметрическая оценка СПМ сигнала вычислялась по формуле

$$P(f) = D_a \left/ \left| 1 - \sum_{i=1}^p \Phi[i] e^{-ji 2\pi f T} \right|^2 \right.,$$

где D_a – дисперсия ошибки предсказания $a[t]$. Коэффициенты АР рассчитывались с помощью системы уравнений Юла-Уокера.

На рис. 3 показаны оценки СПМ, полученные параметрическим методом для шумов авиалайнеров: а – Boeing 707 АР(34), б – Boeing 737 АР(8), в – Boeing 747 АР(8), г – Boeing 767 АР(4). Как видно из графиков СПМ, спектры характеризуется различным количеством пиков. Наиболее мощный пик на всех спектрах расположен вблизи нулевой частоты. Параметрическая оценка СПМ помех была рассчитана по коэффициентам модели АР различных порядков. С ростом числа пиков в СПМ, увеличивался порядок используемой модели АР.

Для подавления коррелированной помехи применялись адаптивные РФ, а также АР предсказывающий фильтр, который относится к устройствам с КИХ. Моделировалась ситуация, когда требовалось оценить частоту одномодового имитационного полезного сигнала на фоне коррелированных помех, создаваемых авиалайнерами, со спектрами, представленными на рис. 3. В помеховом канале присутствовала коррелированная помеха $x[t]$ и аддитивный белый шум

$$X[t] = x[t] + e[t],$$

где $e[t]$ – белый шум. В информационном канале присутствовал оцениваемый полезный сигнал $y[t]$ и та же аддитивная помеха $x[t]$

$$Y[t] = y[t] + x[t],$$

где Y_t – смесь коррелированной помехи и сигнала.

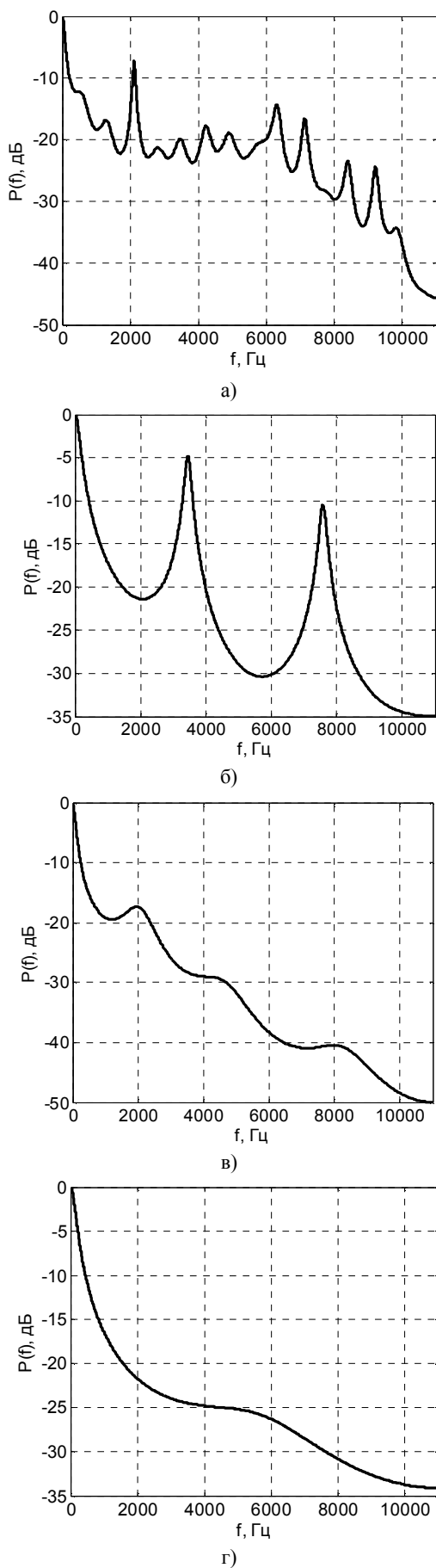


Рис. 3. Параметрические АР оценки спектров шумов лайнеров Boeing: а – Boeing 707 АР(34), б – Boeing 737 АР(8), в – Boeing 747 АР(8), г – Boeing 767 АР(4)

При отсутствии белого шума в помеховом канале, помехи в обоих каналах сильно коррелированы и могут быть полностью компенсированы адаптивным фильтром. 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. 4, демонстрирует влияние отношения помеха/белый шум в децибелах на величину взаимной корреляции помех в информационном и помеховом каналах. При этом в информационном канале присутствует полезный сигнал и помеха, а в помеховом канале – помеха и аддитивный белый шум.

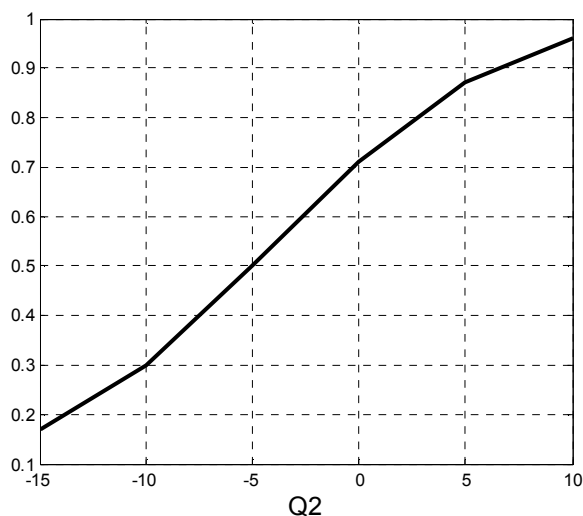


Рис. 4. Взаимная корреляция помехи в информационном канале и помехи с аддитивным белым шумом в помеховом канале

Как показали эксперименты, снижение уровня взаимной корреляции помех в обоих каналах приводит к росту ошибок при оценивании частоты пика сигнала. На рис. 5 представлены типичные параметрические АР(3) СПМ адаптивного МНК РФ при отношении сигнал/помеха $Q1 = -5$ дБ и отношении помеха/шум $Q2 = -10$ дБ для помехи, создаваемой авиалайнером Boeing 707: 1 – на входе РФ, 2 – на выходе РФ. Помеха на нулевой частоте полностью не подавилась РФ и имеет более высокий уровень на нулевой частоте, чем полезный сигнал вблизи частоты зондирующего сигнала. Поэтому поиск максимума в СПМ и оценка его частоты приведут к ошибкам измерений частоты полезного сигнала, росту среднеквадратического отклонения (СКО) его оценки.

Имитационный зондирующий сигнал с частотой пика 5000 Гц и шириной полосы 200 Гц был получен с помощью формирующего АР фильтра методом, описанным в [8]. В экспериментах оценивалась частота пика полезного сигнала, смещенного коррелированной помехой, создаваемой авиалайнерами. Помеха подавлялась адаптивным фильтром. Полученные оценки частоты полезного сигнала усреднялись по 100 экспериментам. Измерения проводились по последо-

вательно расположенным во времени выборкам помехи длиной по 500 отсчетов. Таким образом измерения производились при адаптивном подавлении шума от авиалайнеров для выборки общей длиной 50000 отсчетов.

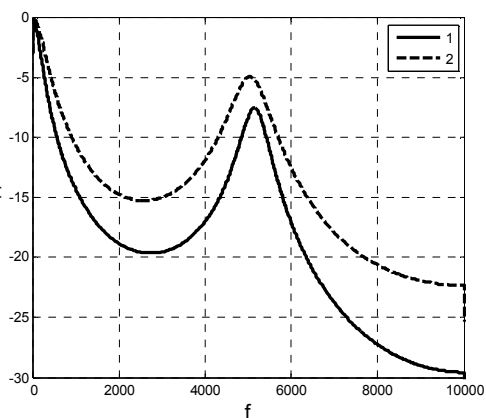


Рис. 5. Параметрические СПМ по моделям АР(3) адаптивного МНК РФ при Q1=-5 дБ и Q2=-10 дБ для помехи от Boeing 707: 1 – на входе РФ, 2– на выходе РФ

Результаты измерений частоты имитационного полезного сигнала при подавлении помех от

Boeing 707 приведены в табл. 1. Подавление звуковой помехи от Boeing 707 осуществлялось РФ с адаптацией по МНК и по методу РНК, а также с использованием фильтров АР предсказания с адаптацией по МНК и по методу РНК. Оценки частоты производились при различных Q1. При значениях Q1>-5 дБ оценки частоты пика полезного сигнала были гораздо точнее.

Для помех, создаваемых авиалайнерами Boeing 747 и Boeing 767, результаты оценки частоты полезного сигнала аналогичны, т.к. у них приблизительно похожие СПМ. В случае помех, создаваемых авиалайнерам Boeing 737, полученные результаты оценок частоты полезного сигнала несколько хуже. В табл. 2 приведены результаты оценок, полученные различными адаптивными фильтрами.

Анализ результатов, приведенных в таблицах 1 и 2, показывает преимущество РФ перед КИХ фильтрами, на основе АР фильтров предсказания. Применение процедуры оценивания частоты пика, расположенного вблизи частоты зондирующего сигнала, позволяет улучшить точность оценки и использовать все результаты измерений частоты полезного сигнала. Однако при этом могут быть потеряны оценки доплеровского сдвига частоты, создаваемые сильными порывами ветра.

Таблица 1

Оценки частоты полезного сигнала при использовании РФ и АР фильтра с адаптацией по МНК и РНК для помехи от Boeing 707 при Q1=-5 дБ

МНК РФ Q2(дБ)	10	5	0	-5	-10	-15	-20
f_c (Гц)	4995	5018	5058	5056	5137	5131	4944
Δf_c (Гц) СКО	33	40	67	85	105	132	198
РНК РФ Q2(дБ)	10	5	0	-5	-10	-15	-20
f_c (Гц)	5050	5009	4957	4932	5063	5124	5042
Δf_c (Гц) СКО	37	39	50	88	125	147	170
МНК АР Q2(дБ)	10	5	0	-5	-10	-15	-20
f_c (Гц)	5032	4984	4929	5254	4945	5174	5086
Δf_c (Гц) СКО	42	91	140	190	251	260	249
РНК АР Q2(дБ)	10	5	0	-5	-10	-15	-20
f_c (Гц)	5047	5041	5028	5075	4501	4501	-
Δf_c (Гц) СКО	33	41	63	104	333	450	-

Оценки частоты полезного сигнала при использовании РФ и АР фильтра с адаптацией по МНК и РНК для помехи от Boeing 737 при Q1=-5 дБ

МНК РФ Q2(дБ)	10	5	0	-5	-10	-15	-20
f_c (Гц)	4978	4944	4930	4715	4689	4501	4501
Δf_c (Гц)СКО	35	45	130	249	240	404	286
РНК РФ Q2(дБ)	10	5	0	-5	-10	-15	-20
f_c (Гц)	5023	4998	5019	5031	4501	4683	4501
Δf_c (Гц)СКО	35	40	103	219	294	269	288
МНК АР Q2(дБ)	10	5	0	-5	-10	-15	-20
f_c (Гц)	4934	4937	4938	5099	4501	4501	4501
Δf_c (Гц)СКО	35	61	161	254	232	259	194
РНК АР Q2(дБ)	10	5	0	-5	-10	-15	-20
f_c (Гц)	4985	4970	4855	4501	4762	4501	-
Δf_c (Гц)СКО	43	46	107	244	381	461	-

ВЫВОДЫ

В работе показано, что применение адаптивных РФ и адаптивных фильтров с КИХ для подавления акустических помех, создаваемых в аэропорту самолетами, позволяет существенно снизить их влияние на точность оценки скорости ветра в САЗ. При слабом уровне акустических помех и шумов применение адаптивных РФ и фильтров с КИХ дает примерно одинаковые результаты. При значительных уровнях помех использование РФ более эффективно. Если использовать частоту зондирующего сигнала, существенно отличающуюся от частоты максимального пика помехи, то точность оценки частоты отраженного сигнала можно повысить. Для этого частоту пика полезного сигнала следует искать в некотором диапазоне значений, расположенном в окрестностях частоты зондирующего акустического сигнала.

Литература

- [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] *Semenets V. V., Kartashov V. M., Leonidov V. I.* Registration of refraction Phenomenon in the Problem of acoustic Sounding of Atmosphere in Airport Zone // *Telecommunications and Radio Engineering*. – New York. – 2018. – Vol. 77, №5. – P. 461–468.
- [4] Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К. Ф. Н. Коуэна, П.М. Гранга. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
- [5] *Сергиенко А. Б.* Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768.

- [6] *Griffiths, L. J.* "A Continuously Adaptive Filter Implemented as a Lattice Structure," *Proc. IEEE® Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Hartford, CT, pp. 683–686, 1977.
- [7] *Марпл.-мл. С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
- [8] *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.

Поступила в редколлегию 19.12.2018



Карташов Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой МИРЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов – обработка сигналов и изображений, системы дистанционного зондирования атмосферы с использованием электромагнитных и акустических волн, методы навигации и управления мобильными наземными и летающими роботами.



Тихонов Вячеслав Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра МИРЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов – теория линейного предсказания, негауссовы процессы, распознавание и кодирование речи, экономическая статистика.



Воронин Виталий Валерьевич, соискатель кафедры МИРЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов – системы дистанционного зондирования атмосферы.

УДК 621.391

Карташов В. М. Адаптивне заглушення завад в системах акустичного зондування атмосфери в аеропортах/ В. М. Карташов, В. А. Тихонов, В. В. Воронін // Прикладна радіоелектроніка: наук. – техн. журнал. – 2019. – Том 18, № 1, 2. – С. 16–22.

Показано, що застосування адаптивних ґратчастих фільтрів і адаптивних фільтрів з кінцевою імпульсною характеристикою (КИХ) для заглушення акустичних завад, що створюються літаками в аеропортах, дозволяє істотно понизити їх вплив на точність оцінки швидкості вітру в системах акустичного зондування. При слабкому рівні акустичних завад і шумів застосування адаптивних ґратчастих фільтрів і фільтрів з КІХ дає приблизно однакові результати, а при знач-

них рівнях завад використання ґратчастих фільтрів прийнятніше.

Ключові слова: авторегресія, акустичне зондування атмосфери, заглушення завад, оцінка частоти, адаптивний ґратчастий фільтр.

Табл.: 02. Іл.: 05. Бібліогр.: 08 назв.

UDC 621.391

Kartashov V. M. **Adaptive dejaming in the systems of the acoustic sounding of atmosphere in airports/** V. M. Kartashov., V. A. Tikhonov., V. V. Voronin // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2019. – Vol. 18, № 1, 2. – P. 16–22.

The article indicates that application of adaptive latticed filters and adaptive filters with the finite impulse response (FIR) for suppression of the acoustic hindrances created by airc in airports, allows substantially reducing their influence on the exactness of estimating a wind speed in the systems of the acoustic sounding. At a weak level of acoustic interference and noise the application of adaptive latticed filters and filters with FIR leads to approximately identical results, and at considerable interference levels the use of the latticed filters is more preferable.

Keywords: autoregression, acoustic sounding of atmosphere, dejaming, estimation of frequency, adaptive latticed filter.

Tab.: 02. Fig.: 05. Ref.: 08 items.