

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА СТОХАСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) впервые появились во время второй мировой войны. В конце 50-х годов создаются беспилотные разведчики, а в 70-х годах XX века начинают проводиться научно-исследовательские разработки в области боевых БПЛА, а также беспилотных самолетов с большой высотой и продолжительностью полета, предназначенных для длительного наблюдения, сбора и передачи разведывательной информации.

Со временем БПЛА находят широкое применение и в других видах деятельности человека: в сельском хозяйстве для опыления растений на полях; для доставки медикаментов и гуманитарных грузов в труднодоступные районы; для проверки линий электропередачи трубопроводов и т.д. БПЛА могут использоваться и государственной службой по чрезвычайным ситуациям для мониторинга и прогнозирования, а также при контроле опасных объектов и т.д. [1 – 3].

В настоящее время малые БПЛА стали доступными для обычных пользователей, причём они имеют достаточно сложное оснащение, которое включает фото- и видеокамеры, систему автопилота и навигации. Повсеместное использование малых БПЛА породило ряд проблем, связанных с неадекватным поведением некоторых владельцев БПЛА, несанкционированным мониторингом объектов и территорий государственной важности, участившимися случаями вторжения в личную жизнь, возникновением возможности использованием БПЛА в террористических и разведывательных целях. Это обусловлено возможностью БПЛА выполнять задачи обнаружения, локализации и идентификации целей [4, 5].

Отсюда следует, что задача обнаружения БПЛА в воздухе, наблюдение за эволюцией его движения, разрешение нескольких близко расположенных летающих объектов является актуальной научно-прикладной задачей.

БПЛА является источником излучения электромагнитных и акустических колебаний, поэтому информация, обеспечивающая выявление и последующую пеленгацию БПЛА, может быть получена путем приема радиолокационными либо радиоакустическими средствами отраженной и излучаемой энергии во всех диапазонах спектра электромагнитных и акустических волн. Таким образом, можно сформулировать основные способы обнаружения БПЛА: по акустическому излучению, оптическое обнаружение, по излучению в инфракрасном диапазоне [6, 7 – 10], поиск БПЛА с помощью активных радиолокационных станций [9, 10], обнаружение средствами радиотехнической разведки.

Одним из основных методов является обнаружение БПЛА с использованием акустического канала. Суммарный спектр акустического излучения тактического БПЛА обусловлен гармоническими составляющими излучения двигателя, шума оборотов винта, излучением механической природы, а также высокочастотными и низкочастотными составляющими шума двигателя с непрерывными по частоте полосами [4, 11 – 15].

Для приема и обработки акустических сигналов БПЛА используется решетка микрофонов, поскольку использование отдельного микрофона даст лишь грубую оценку акустического сигнала [11]. Акустические антенные решетки оказываются эффективными для обнаружения и сопровождения низколетящих БПЛА на тактических расстояниях. В то же время акустическая решетка, кроме пространственного накопления сигналов, позволяет оценивать время прихода фронта акустической волны в разные точки пространства, что, в свою оче-

редь, обеспечивает оценку угла распространения волны относительно решетки, т.е. позволяет вычислить пеленг на источник излучения. Для БПЛА среднего размера с двигателем внутреннего сгорания дальность обнаружения в пять раз превышает этот же показатель для беспилотника с электрическим двигателем [16, 12 – 13].

Характеристики направленности – один из важнейших параметров источников шума в авиации. Факторы направленности излучения различных источников используются в классических подходах авиационной акустики для расчета ожидаемых уровней шума самолетов на местности. Эти методы расчета также входят в методику прогноза границ слышимости и заметности малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной установкой. В работе [17] приведены результаты акустических испытаний малоразмерного БПЛА с поршневым двигателем в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. Показано, что при работе силовой установки на взлетном режиме в задней полусфере в направлениях $105 - 120^0$ в суммарном шуме силовой установки доминирует излучение на частоте первой гармоники шума вращения винта. На оси коленчатого вала доминирующим является акустическое излучение от поршневого двигателя. Здесь же описаны факторы направленности суммарного акустического излучения силовой установки и отдельных его частей.

Задачи обнаружения и сопровождения БПЛА решаются, как правило, с использованием методов радиолокационной обработки сигналов, которые основаны на линейной фильтрации сигналов на фоне шумов и помех высокой интенсивности. В то же время, нелинейные методы стохастической фильтрации на основе стохастического резонанса открывают широкие перспективы для обнаружения сигналов, генерируемых БПЛА, и выделения их на фоне акустических шумов [18].

Эффект стохастического резонанса. Основные понятия

Принято считать, что наличие шума в системе является отрицательным фактором, и борьба с шумами является одной из актуальных задач повышения помехоустойчивости радиотехнических систем. Разрабатываются малошумящие устройства и методы шумоподавления, созданы помехоустойчивые коды, сигналы с наилучшей структурой автокорреляционной функции, оптимальные фильтры; вопросы приема сигналов рассматриваются с позиции теории статистических решений, используется обнаружение методом накопления [19].

Вместе с тем, исследования, проведенные в 80-х годах прошлого века в области теоретической и экспериментальной физики, показали, что в ряде случаев наличие шума способствует выделению сигнала на фоне помех [20, 21]. Одним из примеров такого поведения является эффект стохастического резонанса (СР) [20, 21]. Стохастическим резонансом называется эффект выделения периодического сигнала из аддитивной смеси с шумом. СР является универсальным эффектом, присущим многим нелинейным системам, находящимся под воздействием слабого сигнала, замаскированного шумом.

Отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал в случае СР заметно усиливается с ростом интенсивности шума в системе и достигает определенного максимума при некотором уровне шума. Поскольку эффект СР реализуется в низкочастотной области, то другое название СР – нелинейный стохастический фильтр.

Уравнение, описывающее эффект СР, имеет вид [20 – 22]

$$dy/dt = ay(t) - by^3(t) + x(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – входной сигнал; a, b – параметры системы; $y(t)$ – сигнал на выходе системы.

Данное уравнение является уравнением Абеля 1-го порядка и не имеет аналитического решения [23].

К входному сигналу предъявляются требования: он должен быть слабым и периодическим. Рассмотрим случай входного сигнала в виде аддитивной смеси гармонического сигнала $s(t)$ и Гауссова шума $n(t)$:

$$x(t) = s(t) + n(t). \quad (2)$$

Численный расчет отклика при воздействии на вход системы, обладающей эффектом СР, аддитивной смеси гармонического сигнала и гауссова шума приведен на рис. 1. Частота сигнала равна 1/8 Гц, отношение сигнал/шум – 3 Дб [24].

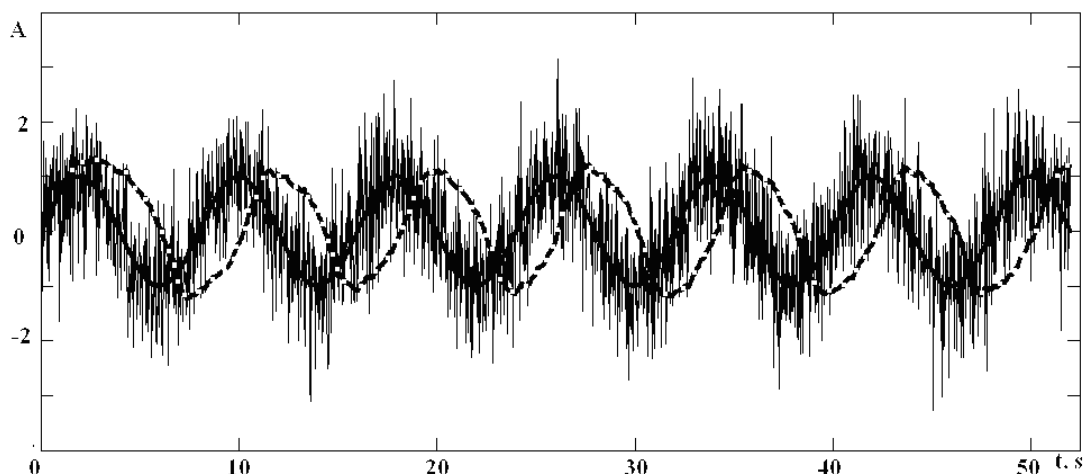


Рис. 1. Выделение сигнала на фоне гауссова шума при гармоническом входном сигнале (сплошная линия – передаваемый гармонический сигнал $s(t)$, тонкая – аддитивная смесь гармонического сигнала с шумом $x(t)$, пунктир – сигнал на выходе нелинейной системы $y(t)$)

Наглядно видно, что в результате обработки входной аддитивной смеси в соответствии с выражением (1) удастся значительно уменьшить шумовую компоненту колебания. Вместе с тем, наблюдается запаздывание выходного сигнала по отношению к входному, что характерно для нелинейных фильтров.

Выделение акустического излучения БПЛА методом стохастической фильтрации

Суммарный спектр акустического излучения тактического БПЛА обусловлен гармоническими и широкополосными составляющими. Он включает в себя гармонические составляющие излучения от двигателя, шума вращения винта, излучение механического происхождения, а также высокочастотную и низкочастотную составляющие шума двигателя с непрерывными по частоте спектрами. В шуме силовой установки БПЛА, включающего поршневой двигатель воздушного охлаждения, при отсутствии в его выхлопном тракте глушителя определяющим источником внешнего шума является поршневой двигатель.

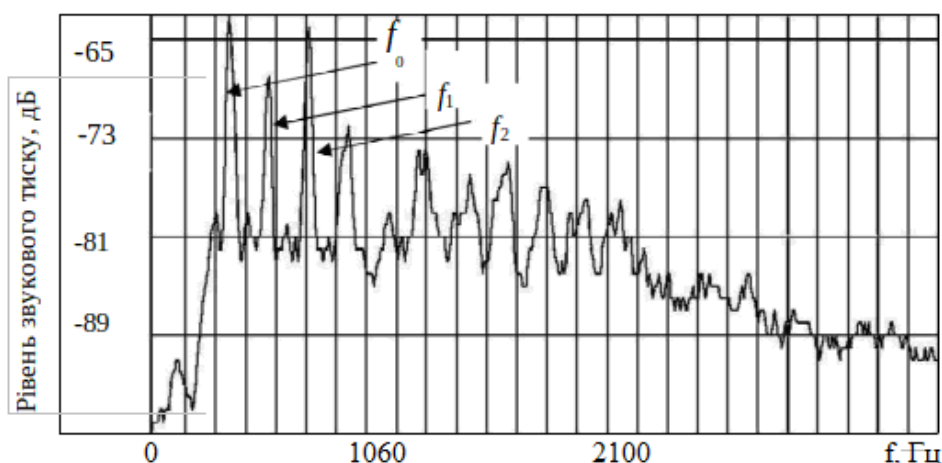


Рис. 2. Типовой спектр акустического излучения силовой установки БПЛА

Дискретные составляющие спектра следуют с частотами $f_i = f_0 \times i$, которые кратны частоте зажигания f_0 , где $i = 1, 2, 3, \dots$ – номер соответствующей гармоники. На высоких частотах значимость периодических процессов в формировании спектра акустического излу-

чения двигателя заметно ослабляется, поскольку более важную роль в суммарном акустическом излучении начинают играть процессы случайного происхождения. В частности, для шума выхлопа может быть существенной вихревая составляющая. На самом же деле, выхлопной тракт двигателя формирует в атмосфере последовательность импульсов давления, частотный спектр которых представлен на рис. 2 [5, 6, 25].

Применим метод СР для выделения полезного сигнала из аддитивной смеси сигнала БПЛА и шума. Результат расчета спектральной плотности мощности для дисперсии шума $D = 0.001$ приведен на рис. 3.

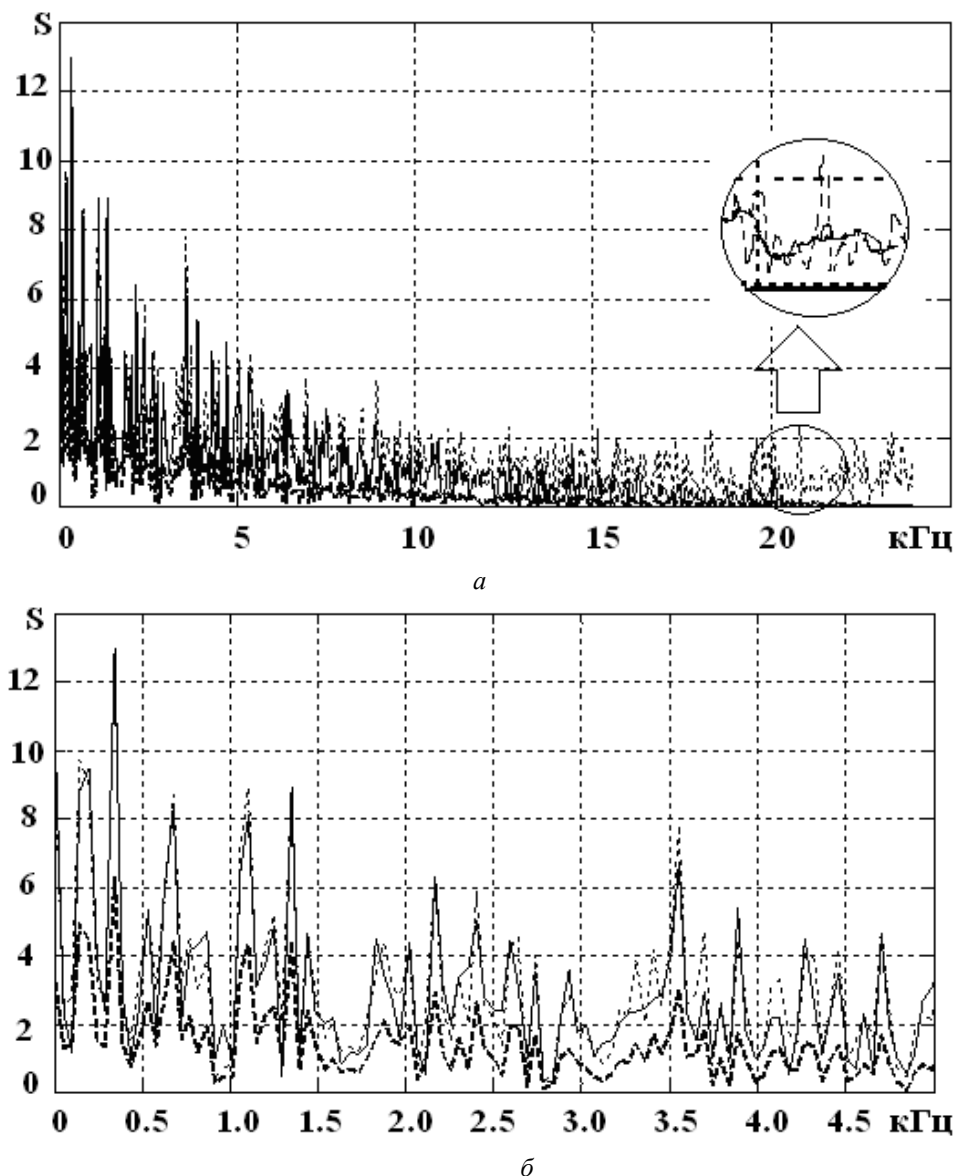


Рис. 3. Выделение сигнала БПЛА на фоне Гауссова шума с дисперсией $D = 0.001$ (сплошная линия – сигнал БПЛА, точки – аддитивная смесь полезного сигнала с шумом, пунктир – сигнал, полученный с помощью эффекта СР)

Рис. 3 показывает, что стохастический фильтр на основе эффекта СР обеспечивает выделение низкочастотных компонент акустического сигнала БПЛА, т.е. реализует обработку, аналогичную низкочастотной фильтрации, при отношении сигнал/шум на входе $SNR = -34.45$ дБ. Качество фильтрации определяется сохранением низкочастотных компонент в спектре выходного сигнала [2]. В высокочастотной же области наблюдаем значительное ослабление отклика фильтра.

Рис. 4, 5 иллюстрируют зависимость спектра отклика фильтра от уровня шума. Сравнивая рис. 2, 4, видим, что при дисперсии $D = 0.01$ и отношении сигнал/шум $SNR = -44.45$ дБ фильтр обеспечивает выделение низкочастотных компонент в области $f < 1,5$ кГц.

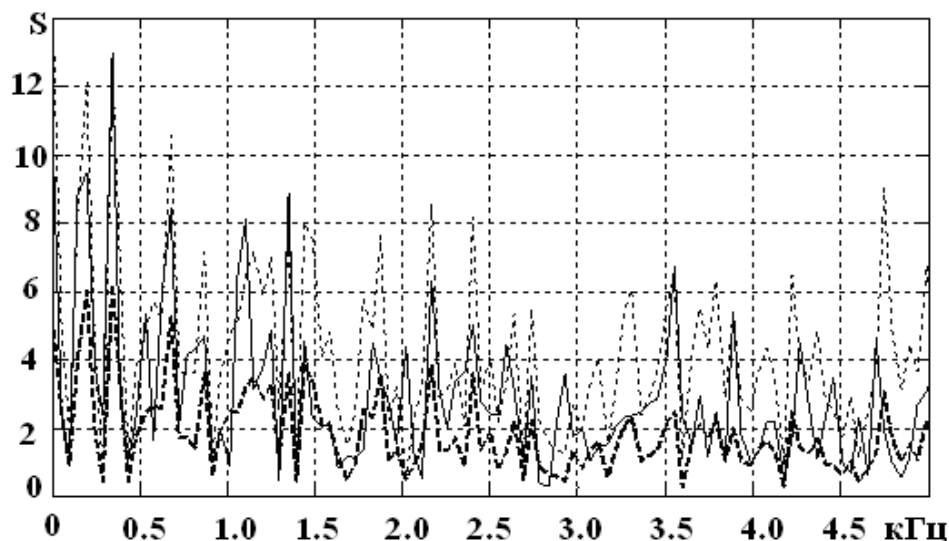


Рис. 4. Выделение сигнала БПЛА на фоне Гауссова шума с дисперсией $D = 0.01$ (сплошная линия – сигнал БПЛА, точки – аддитивная смесь полезного сигнала с шумом, пунктир – сигнал, полученный с помощью эффекта CP)

При дальнейшем увеличении мощности шума выделение сигнала не происходит, и на временной диаграмме появляются ложные пики (рис. 5).

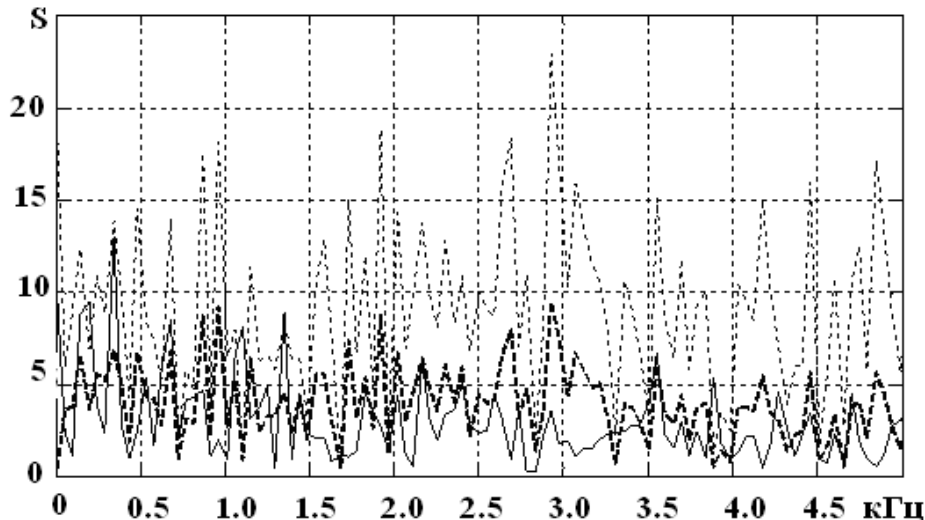


Рис. 5. Выделение сигнала БПЛА на фоне Гауссова шума с дисперсией $D = 0.1$ (сплошная линия – сигнал БПЛА, точки – аддитивная смесь полезного сигнала с шумом, пунктир – сигнал, полученный с помощью эффекта CP) $SNR = -54.45$ дБ

Поскольку используются численные методы, частоту дискретизации акустического сигнала БПЛА можно изменять и получать, соответственно, различные результаты. Меняя коэффициент пересчета частоты, регулируем ширину полосы пропускания нелинейного стохастического фильтра (рис. 6, 7).

На рис. 7 показано, что сигнал выделяется до значения примерно 1,5 кГц, а при увеличении коэффициента пересчета частоты сигнал выделяется примерно до 0,7 кГц. Данные результаты обусловлены тем, что эффект CP действует на низких частотах. Таким образом, можно обеспечить регулировку полосы пропускания фильтра в зависимости от спектра входного сигнала.

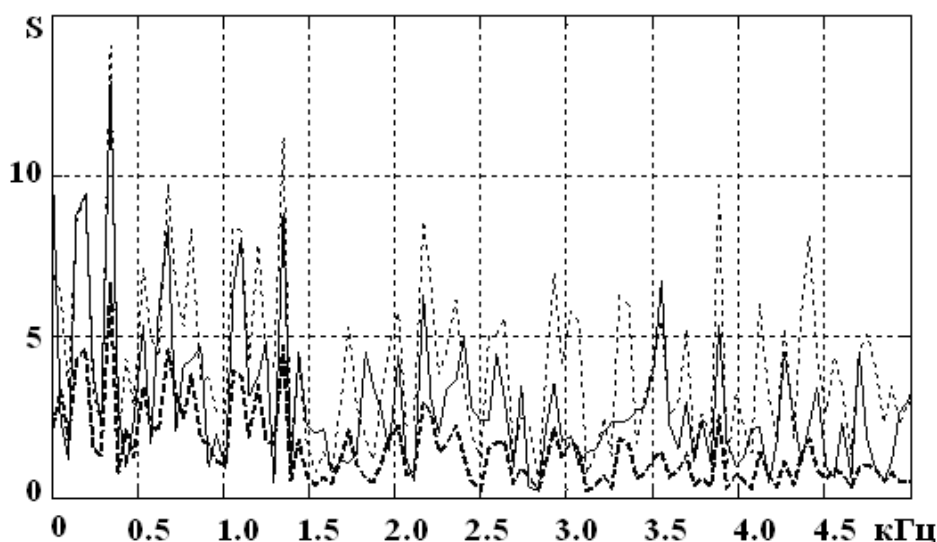


Рис. 6. Выделение сигнала БПЛА на фоне Гауссова шума с дисперсией $D = 0.01$, коэффициент пересчета частоты $k = 7000$ (сплошная линия – сигнал БПЛА, точки – аддитивная смесь полезного сигнала с шумом, пунктир – сигнал, полученный с помощью эффекта СР)

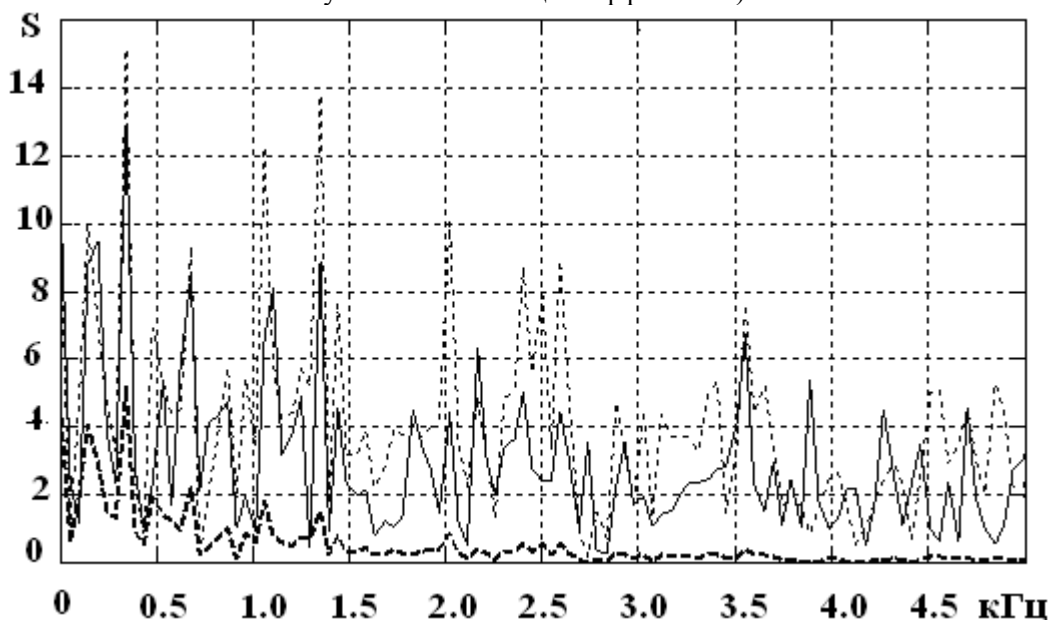


Рис. 7. Выделение сигнала БПЛА на фоне Гауссова шума с дисперсией $D = 0.01$, коэффициент пересчета частоты $k = 14000$ (сплошная линия – сигнал БПЛА, точки – аддитивная смесь полезного сигнала с шумом, пунктир – сигнал, полученный с помощью эффекта СР)

Выводы

1. Проведен анализ физической природы и основных признаков излучения, создаваемого современными БПЛА. Показано, что для решения проблемы обнаружения малозаметных и малоскоростных БПЛА наиболее эффективным является акустический канал, причем для обнаружения БПЛА информационной характеристикой акустического канала является суммарный спектр его акустического излучения.

2. На примере гармонического сигнала проведено численное моделирование эффекта СР. Показано, что стохастический фильтр на основе СР позволяет выделить гармонический сигнал из аддитивной смеси гармонического сигнала и гауссова шума.

3. Проведено численное моделирование процесса выделения полезного аудиосигнала из аддитивной смеси сигнала БПЛА и шума на основе модели стохастического фильтра. Показано, что выделение полезного сигнала из аддитивной смеси сигнала БПЛА и шума происходит, когда отношение сигнал/шум на входе $SNR > -54.45$ дБ.

4. Показано, что полосу пропускания стохастического фильтра можно регулировать, изменяя значения коэффициента пересчета частоты, выбирая количество гармоник, подлежащих выделению.

Список литературы:

1. Корольков В.А. Автоматизированные акустические и оптоэлектронные комплексы и системы для экологического и метеорологического мониторинга атмосферы : дис. ... д-ра техн. наук ; специальность 05.11.13. Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. Томск, 2017. 471 с.
2. 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*. 2017. Vol. 76, №8. P.743-749.
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*. 2018. Vol. 77, №5. P.461-468.
4. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет-журнал "Науковедение". 2017. Т. 9. № 1. <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана.
5. Амелин К.С., Миллер А.Б. Алгоритм уточнения местонахождения легкого БПЛА на основе калмановской фильтрации измерений пеленгационного типа / Санкт-Петербург. гос. ун-т // *Анализ и синтез систем управления. Информационные процессы*. 2013.Т. 13, № 4. С. 338–352.
6. Даник Ю.В., Бугайов М.В. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження // *Зб. наук. праць ЖВІ ДУТ. Інформаційні системи* 15. 2015. Вип.10. С.5-20.
7. Соловьев В. А. Проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов оптико-электронными устройствами / В. А. Соловьев // *Электронный математический и медико-биологический журнал*. 2011. Т. 10. Вып. 3. С. 1–13.
8. 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*. 2018. Vol. 77, №10.-P.915-924.
9. Beel J. J. Anti-UAV Defense For Ground Forces and Hypervelocity Rocket Lethality Models / J. J. Beel. Monterey, California : Naval Postgraduate School, 1992. P. 36–46.
10. Moses A. Radar-based detection and identification for miniature air vehicles / A. Moses, M. J. Rutherford, K. P. Valavanis // *IEEE International Conference on Control Applications*. 2011. September 28-30.
11. Sadasivan S. Acoustic signature of an unmanned air vehicle exploitation for aircraft localisation and parameter estimation / S.Sadasivan, M.Gurubasavaraj, S.R. Sekar // *Eronautical DEF SCI J*. 2001. Vol. 51, № 3. P. 279-283.
12. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K. Massey, R. Gaeta // *Georgia Inst. of Technology / GTRI / ATAS, Atlanta. 16th AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2010. P. 1-16.
13. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / L. Marino // *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. University "La Sapienza", Rome, Italy. American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2010. P. 1-14.
14. Pham T. TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs / T.Pham, N.Srour // *U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE*. 2004. Vol. 54. P. 24–29.
15. Zelnio A.M. Detection of small aircraft using an acoustic array. Thesis. B.S. // *Electrical Engineering, Wright State University*. 2007. 55 p.
16. Цепляева Т.П., Поздышева Е. М., Поштаренко А. Г. Анализ применения беспилотных комплексов / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». https://www.khai.edu/csp/portal//Archiv/OIKIT39/p_149-154.pdf. Дата обращения 16.09.2017 г.
17. Мошков П.А. Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов : дис. ... канд. техн. наук. Москва : МАИ (НИУ), 2015. 143 с.
18. Kharchenko O., Lonin Yu.F., Ponomaryov A.G. Frequency analysis of the stochastic filtering using transfer function. Part I. Sinusoidal input // *Problems of atomic science and technology*. 2018. № 4. Series "Plasma Physics". Issue 116. P.249-252.
19. Харкевич А.А. Борьба с помехами. Москва : Наука, 1965. 275с.
20. Анищенко В.С., Нейман В.Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка // *Успехи физических наук*. 1999. Т. 169, № 1. С. 7–37.
21. Герашенко О.В. Стохастический резонанс в асимметричной бистабильной системе // *Письма в ЖТФ*. 2003. Т. 29, вып.6. С. 82-86.
22. Q. He, J. Wang. Effects of multiscale noise tuning on stochastic resonance for weak signal detection // *Digital Signal Processing*. 2012. №22. P. 614-621.
23. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям ; пер. с англ. ; издание второе, перераб. и доп. Москва : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. 703 с.
24. Kharchenko O.I., Gorban A.M. Non-linear filtering of pulser signals in case of of high intensity noise // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations* . 2017. №6(112). P.113-116.
25. Гордієнко Ю.О., Бугайов М.В., Солонець О.І., Солопій О.А. Особливості акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 1 (22). С.32.

*Харьковский национальный
университет радиотехники*

Поступила в редколлегию 09.06.2019