

УДК 62.523.8

doi: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.026

А.В. Кучерявенко

АЛГОРИТМ ПОДАВЛЕНИЯ ТУРБОВИНТОВОГО ЭФФЕКТА

ФГАОУ ВУ «Южный федеральный университет»,
Ростов-на-Дону, Россия

В статье рассматривается возникновение шумовых компонент от вращающихся элементов конструкции летательного аппарата или турбовинтовых составляющих и влияние этих компонент на радиосигнал слежения за аэродинамическим объектом. Маскирующее действие сигналов от вращающихся элементов влияет на наблюдение за планерной составляющей, что мешает слежению за объектом. Отмечается необходимость подавления турбовинтовых составляющих в радиосигнале. Для решения проблемы предлагается использовать фрактальные методы обработки сигнала. Предложен алгоритм подавления турбовинтовых спектральных составляющих в эхо-сигнале аэродинамического объекта, основанный на определении функции подобия. В статье рассмотрены шаги выполнения алгоритма и приведена его блок-схема. Приведен пример сигнала из банка временных функций микродвижений элементов конструкции объекта, использующийся в качестве базиса при аппроксимации исходного эхо-сигнала. Проведено моделирование для одиночного аэродинамического объекта, подтверждающее подавление турбовинтовой составляющей эхо-сигнала. Разработанный алгоритм предлагается применить для классификации числа объектов в рое беспилотных летательных аппаратов. Отмечена необходимость уменьшения интервала дискретности параметров, описывающих кинематику микродвижений объекта. Материалы представляют практическую ценность в радиолокации при сопровождении беспилотных летательных аппаратов для устранения мешающих компонент в дальностно-доплеровском портрете объекта, автоматической координации, навигации и повышения безопасности полетов.

Ключевые слова: турбовинтовая составляющая, планерная составляющая, микродвижение, эхо-сигнал, спектр, радар, Доплер.

Введение. Массовый переход на беспилотные системы – дело ближайших десятилетий. Безопасное использование беспилотных летательных аппаратов (дрон) является актуальной задачей для современного мира. Беспилотные воздушные суда, согласно перспективам развития современного рынка, находят применение в различных службах: полицией крупных городов, пожарными, в здравоохранении, в картографии для получения геоданных высокой четкости, для срочной доставки покупок, еды, запасных частей, батарей, кабелей, для курьерских услуг, аэросъемка для нужд агро-бизнеса и точного сельского хозяйства, для мониторинга трубопроводов и ЛЭП, использование в качестве последней мили для улучшения покрытия сетей, использование в СМИ.

Дрон находится в воздухе практически постоянно, движется на низких траекториях, в том числе в труднодоступной местности. Поэтому становится актуальной проблема обеспечения безопасности полетов

дронов. Данная проблема усложняется, если речь идет об автоматической координации полета встречающихся дронов и навигации полетов роя беспилотных воздушных судов. Так же мешающее влияние на навигацию беспилотных воздушных судов оказывают ветровые энергетические установки, расположенные в удаленных районах, где предполагается эксплуатировать беспилотные летательные аппараты.

Особенность радиолокационного сопровождения беспилотных летательных аппаратов заключается в присутствии в эхо-сигнале составляющих, возникающих за счет рассеяния от элементов конструкции, совершающих микродвижения: лопастей винтов объектов.

Присутствие этих составляющих называется турбовинтовым эффектом (ТВЭ) или микро-Доплером, а составляющие называются турбинными составляющими. Наряду с полезной информацией, содержащейся в турбинных составляющих, помогающей определить тип аэродинамического объекта и режим работы его двигателя, турбинные составляющие могут быть ошибочно восприняты как планерные составляющие этого или другого аэродинамического объекта и вносить ошибки в навигацию полетов. Присутствие турбинных составляющих затрудняет определение числа летающих объектов в рое.

Структурное подобие планерных спектральных составляющих, отражающих поступательное движение объекта и спектральных составляющих, вызванных турбинным эффектом, затрудняет идентификацию движения объекта и количества объектов в рое летательных аппаратов. Если объектов будет несколько, то турбинные компоненты накладываются друг на друга и могут имитировать планерную составляющую от несуществующего объекта или маскировать планерные составляющие соседних объектов. Это является помехой для получения информации о движении летательных объектов, приводит к ошибкам пилотирования и слежения за объектом.

На Рисунке 1 показан спектр эхо-сигнала от двух летательных объектов. Показана планерная составляющая первого объекта (планерная составляющая) большой амплитуды и планерная составляющая второго объекта (планерная составляющая) малой амплитуды, соизмеримой с амплитудами составляющих турбовинтового эффекта [1].

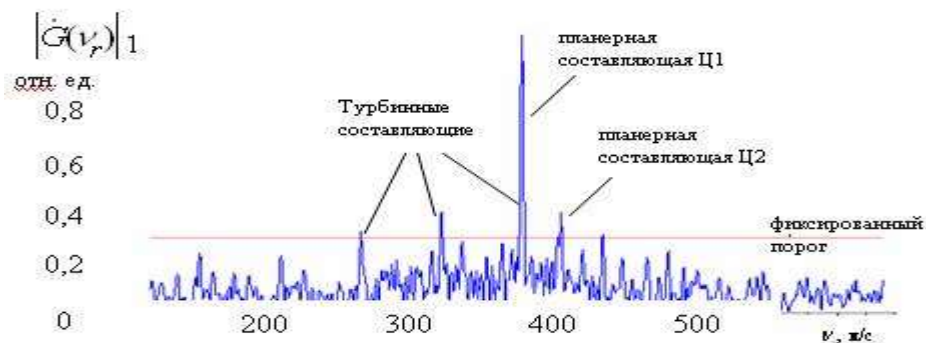


Рисунок 1 – Планерная и турбинные составляющие эхо-сигнала двух объектов

Материалы и методы. Идея подхода к идентификации спектральных составляющих основана на использовании отличий в структуре сигналов, сформированных из одной и разных точек пространства. Очевидно, что каким бы сложным ни был спектр отраженного сигнала, если все его спектральные составляющие принадлежат одной цели, то формируется этот спектр сигналом, пришедшим из одной точки пространства. Если суммарный спектр образован несколькими целями, то формируется он сигналами, пришедшими из различных точек пространства. Из этого следует, что в самой структуре спектра должны содержаться признаки для идентификации спектральных составляющих. Необходимо выявить эти признаки и использовать их для решения задач радиолокационного слежения за летательным аппаратом.

Для устранения в доплеровском портрете слежения за аэродинамическим объектами составляющих, вызванных турбовинтовым эффектом или микро-Доплером, с целью правильной классификации группового объекта по числу целей, предлагается рассмотреть алгоритм аппроксимации эхо-сигнала на нескольких этапах обработки – алгоритм согласованного преследования [2]. Результат применения данного алгоритма приведет к очистке доплеровского портрета объекта от мешающих составляющих ТВЭ и правильному определению числа аэродинамических объектов в группе.

Если $y(t)$ – доплеровский сигнал, отраженный от объекта, совершающего микродвижения. Задачей алгоритма является выделить из исходного доплеровского сигнала компоненты микродвижений так, чтобы доплеровский сигнал был представлен суперпозицией:

$$y'(t) = y(t) - \sum_{i=1}^N k_i d_i(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $d_i(t)$ – базис представления реального сигнала, k_i – коэффициенты, характеризующие отношение мощности исходного сигнала к функциям базиса, $\varepsilon(t)$ – ошибка представления сигнала, вызванная шумами и

ограниченностью числа функций базиса. Тогда в результирующем сигнале $y'(t)$ останутся только информативные планерные составляющие.

Результаты. За основу алгоритма подавления компонентов микродвижений объекта в доплеровском портрете предлагается использовать алгоритм согласованного преследования [2].

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 2. Алгоритм основан на последовательном выполнении нескольких шагов.

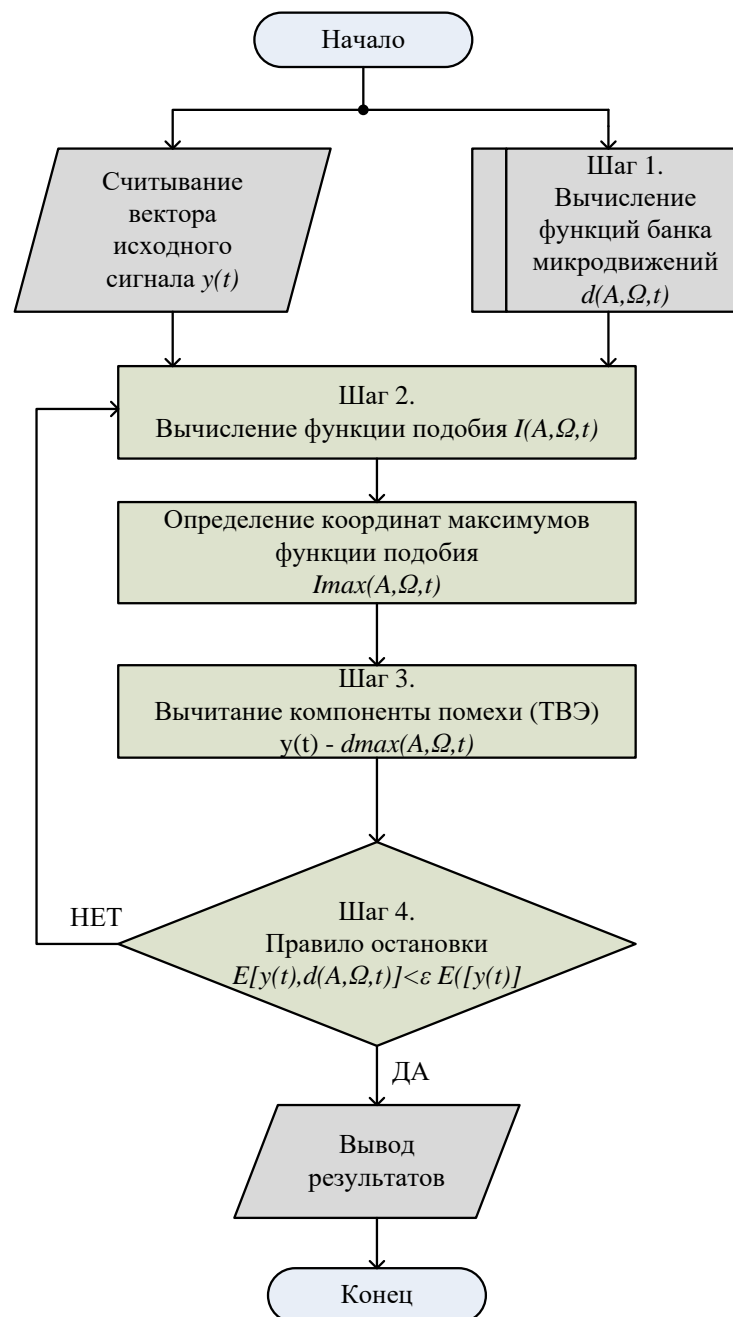


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма подавления

Шаг 1. Подготовка входных данных. Формируется вектор исходного сигнала $y(t)$ или считываются данные радарной установки слежения за объектом.

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K A \left[1 + M_T \cos \left(2\Omega_T t + k \frac{2\pi}{N} \right) \right] * \cos [\omega_0 t + m_T \cos(\Omega_T t)], \quad (2)$$

где M_T – коэффициент модуляции, Ω_T – частота турбинной составляющей, m_T – индекс модуляции турбинной составляющей.

Амплитудная модуляция с коэффициентом M_T в исходном сигнале $y(t)$ возникает за счет изменения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) вращающихся лопастей турбины, а угловая модуляция с индексом m_T обусловлена скоростью вращения этих лопастей.

Заранее или в процессе выполнения алгоритма проводится формирование банка функций микродвижений лопасти летательного объекта $d(A, \Omega, t)$ [3 - 5]

$$d(A, \Omega, t) = A \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [R_o + z_o \sin \beta] \right\} \sum_{k=0}^{N-1} \text{sinc} \left\{ \frac{4\pi A}{\lambda} \frac{A}{2} \cos \beta \cos \left(\Omega t + \varphi_o + \frac{k2\pi}{N} \right) \right\} \exp \{ -j \Phi_k(t) \}, \quad (3)$$

где $\Phi_k(t)$ функция фазы $\Phi_k(t) = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{L}{2} \cos \beta \cos \left(\Omega t + \varphi_o + \frac{k2\pi}{N} \right)$, N - общее количество лопастей, Ω - излучаемая радаром частота, R_o - расстояние между радаром, и n -й лопастью.

На Рисунке 3 приведена одна из временных функций банка микродвижений.

Микродвижения лопасти винта с учетом ЭПР представляют сигнал сложной структуры с малой амплитудой, для наглядности представления на графиках используется логарифмический масштаб. Из-за сложной структуры кинематики движения периодичность выражается неявно.

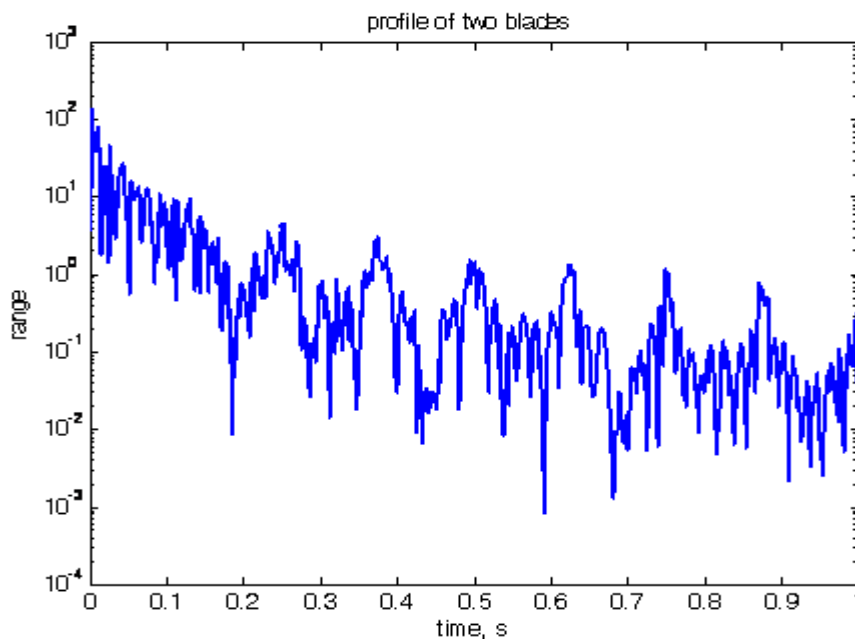


Рисунок 3 – Временной сигнал микродвижений двух лопастей

Шаг 2. Вычисляется функция подобия

$$I_N(A, \Omega_T, t) = \sum_N \int_0^T y(A, \Omega_T, t) d^*(A + \Delta A, \Omega_T + \Delta \Omega_T, t) dt \quad (4)$$

как свертка исходного сигнала $y(t)$ с компонентами банка функций $d(A, \Omega, t)$.

Функция подобия $I_n(A_n, \Omega_n, t)$ представляет собой трехмерный график с двумя осями определений: временем и параметрами микродвижений. Функция подобия характеризуется наличием максимальных значений – пиков, координаты которых соответствуют точному совпадению параметров исходного сигнала и функции микродвижений.

$$(A, \Omega) = \arg \max | \langle y(t), d(A, \Omega, t) \rangle | \quad (5)$$

Функция подобия, полученная на данном шаге, для одного аэродинамического объекта с числом лопастей несущих винтов равном двум, приведена на Рисунке 4.

На графике функции подобия наблюдается несколько максимумов. Один из них от планерной составляющей объекта, остальные – от турбовинтовых составляющих. На данном этапе вывод о числе объектов сделать невозможно, так как нельзя определить, какой пик в функции вызван планерной составляющей, а какой – турбовинтовой.

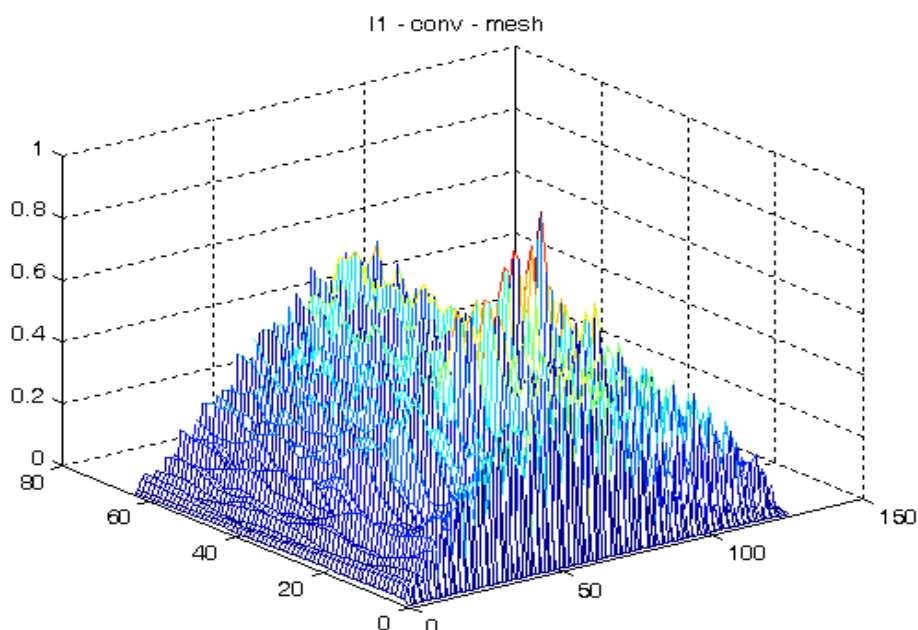


Рисунок 4 – Функция подобия для шага 2 алгоритма для одиночного объекта

Шаг 3. Очищение функции подобия от компонентов микродвижений элементов конструкции объекта путем вычитания из исходного сигнала компонент микродвижений, дающих максимум в функции подобия

$$y_m(A, \Omega_T, t) = y_{m-1}(A, \Omega_T, t) - d_{max}(A, \Omega_T, t), \quad (6)$$

где $y_{m-1}(A, \Omega_T, t)$ - эхо-сигнал, полученный в результате выполнения предыдущего шага, $d_{max}(A, \Omega_T, t)$ – функции банка микродвижений, параметры (5) которых совпали с параметрами пиков функции подобия из (4).

С результатом вычитания $y_m(A, \Omega_T, t)$ проводится свертка с временными функциями банка микродвижений и в полученной функции подобия так же анализируются другие максимумы.

Шаг 4. Вычисления на Шаге 2 выполняются до правила остановки

$$E[y(t)] - E[\langle y(t), d(A, \Omega, t) \rangle] < \varepsilon E[y(t)] \quad (7)$$

когда относительный уровень значения энергии сигнала $y_m(A, \Omega_T, t)$ уменьшается по сравнению с исходным значением до заданного порога ε . Порог ε выбирается из вероятности ошибки для отсутствия аэродинамических объектов.

В результате выполняется построение уточненной функции подобия, где присутствует одна планерная компонента, соответствующая одному максимуму.

На Рисунке 5 приведен результат выполнения алгоритма.

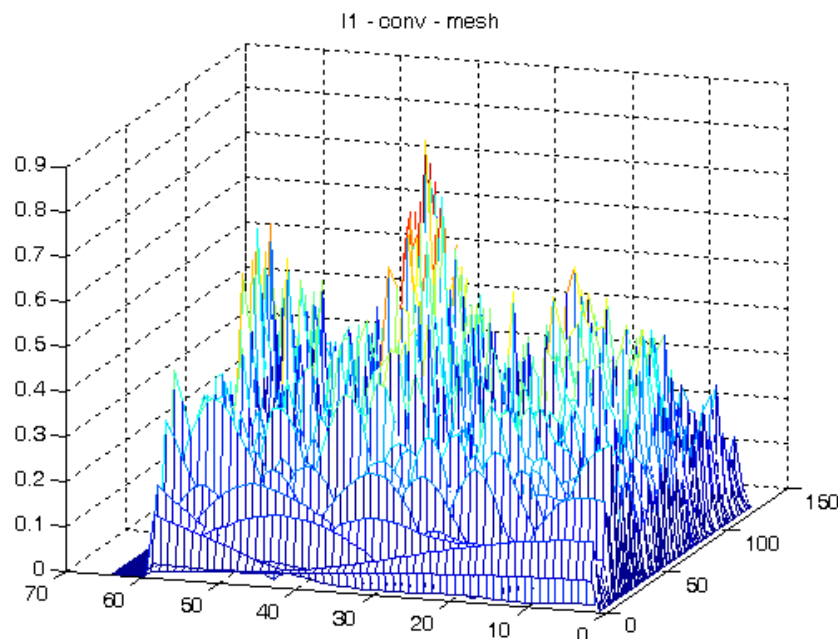


Рисунок 5 – Результат выполнения алгоритма

На графике Рисунка 5 присутствует единичная компонента, выше уровня 0,5, что позволяет сделать вывод об одном аэродинамическом объекте слежения.

Обсуждение. Следует отметить, что на точность работы алгоритма влияет интервал дискретности параметров, использующихся для описания микродвижений. Повышение точности возможно за счет уменьшения шага изменения параметра, но увеличивает число вычислительных операций.

Данный алгоритм работает с функциями во временной области, что упрощает количество вычислений из-за отсутствия перехода в спектральную область. Исследуемые сигналы представляют собой функции времени и параметров. Параметры зависят от ожидаемых значений функций кинематики микродвижений.

Заключение. Для решения задачи устранения турбинных составляющих в эхо-сигнале слежения за аэродинамическими объектами предлагается использовать алгоритм, использующий пространство базисных функций, описывающих микродвижения конструкций объекта и основанный на фрактальных методах. В работе получен результат применения алгоритма для обработки данных от одиночного летательного аппарата. Отмечена необходимость подбора параметров функций для достижения точного описания микродвижения и уменьшения взаимной когерентности базисных функций.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Южного федерального университета № ВнГр-07/2017-25 «Анализ состояния дел в исследуемой предметной области. Разработка теоретических и методологических основ создания широкополосных систем передачи изображения по гидроакустическому каналу. Разработка адаптивных алгоритмов обработки сигналов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсарь Н.М. Эффект вторичной модуляции радиолокационных сигналов: физические основы и практическое применение // Вестник Военной академии Республики Беларусь. 2003. №1. С. 61-77.
2. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. М. Мир, 2005. 671 с. с ил. (Mallat S. A wavelet tour of signal processing. Academic press. 2005. 671 p.)
3. Кучерявенко А.В. Модели микродвижений, вызывающих турбовинтовой эффект // Инженерный вестник Дона, 2019, №1.
4. Kucheryavenko A.V., Fedosov V.P. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MatLab // XIII International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems". "DTS-2017". Rostov-na-Don: Serbian Journal of Electrical Engineering ISSN 1451-4869 (Scopus, DOAJ), 2017. pp. 59-64.
5. Кучерявенко А.В. Подавление турбинного эффекта радиолокационного сигнала в импульсно-доплеровской РЛС // Инженерный вестник Дона, 2017, №4.

A.V. Kucheryavenko

ALGORITHM FOR ADDING TURBOVINET EFFECT

South Federal University, Rostov-on-Don

The article discusses the occurrence of noise components from rotating structural elements of the aircraft or turboprop components and the effect of these components on the radio signal tracking aerodynamic object. The masking effect of signals from rotating elements affects the observation of the glider component, which interferes with the tracking of the object. The need to suppress the turboprop components in the radio signal is noted. To solve the problem, it is proposed to use fractal signal processing methods. An algorithm for suppressing turboprop spectral components in an echo signal of an aerodynamic object, based on the definition of the similarity function, is proposed. The article describes the steps of the algorithm and its block diagram. An example of a signal from a bank of temporal functions of micro-movements of an object's structural elements, used as a basis for approximating the initial echo signal, is given. A simulation was performed for a single aerodynamic object, confirming the suppression of the turboprop component of the echo signal. The proposed algorithm is proposed to be used to classify the number of objects in a swarm of unmanned aerial vehicles. The necessity of decreasing the interval of discreteness of the parameters describing the kinematics of the object's micro-movements is noted. The materials are of practical value in radiolocation when accompanied by unmanned aerial vehicles to eliminate interfering

components in the far-Doppler portrait of the object, automatic coordination, navigation, and increased flight safety.

Keywords: turboprop component, glider component, micromovement, echo signal, spectrum, radar, Doppler.

REFERENCES

1. Slyusar N.M. The effect of secondary modulation of radar signals: the physical basis and practical application // Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus. 2003. №1. Pp. 61-77.
2. Mulla S. Wavelets in signal processing: Trans. from English M. Mir, 2005. 671 p. with silt. (Mallat S. A wavelet tour of signal processing. Academic press. 2005. 671 p.)
3. Kucheryavenko A.V. Models of micromovements causing a turboprop effect // Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4.
4. Kucheryavenko A.V., Fedosov V.P. XIII International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems". "DTS-2017". Rostov-na-Don: Serbian Journal of Electrical Engineering ISSN 1451–4869 (Scopus, DOAJ), 2017. pp. 59-64.
5. Kucheryavenko A.V. Suppression of the turbine effect of the radar signal in a pulse-Doppler radar // Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №1.