

УДК 621.396.96

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТ СЛЕДОВАНИЯ ЛОПАСТЕЙ ВИНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ СВЕРТКИ СПЕКТРА «ВТОРИЧНОЙ» МОДУЛЯЦИИ

С.Р. ГЕЙСТЕР¹, Т.Т. НГУЕН²

¹Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 7 декабря 2018

Аннотация. Предлагается новый способ измерения частот следования лопастей винтов летательного аппарата (в частности, несущего (НВ) и рулевого (РВ) винтов вертолета) для цепей адаптации радиолокационного датчика (РЛД) с обращенным синтезом апертуры антенны. В основе способа лежит свертка спектра «вторичной» модуляции сигнала с одновременной компенсацией доплеровской частоты отраженного сигнала. Это позволяет в типовых для РЛД условиях быстрого изменения доплеровской частоты обеспечить длительное когерентное накопление и, соответственно, высокую точность измерения частот вращения винтов.

Ключевые слова: частота вращения, частота следования лопастей, несущий винт, рулевой винт, вертолет.

Abstract. A novel measurement method for repetition frequencies of the blades of an aerial vehicle (in part, helicopter's main and tail rotor) for adaptation circuits of the radar sensor with an inverse synthesis of antenna aperture is proposed. The method based on the convolution of the spectrum of the «secondary» modulation of the signal with simultaneous compensation of the Doppler frequency of the reflected signal. This allows in typical conditions for the radar sensor rapid change of Doppler frequency to provide a long coherent accumulation and, accordingly, high accuracy of measurement of the rotational frequencies of the rotors.

Keywords: rotational frequency, repetition frequency of the blades, main rotor, tail rotor, helicopter.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 68-74

**Measurement method for repetition frequencies
of the blades of an aerial vehicle on the base of the convolution
of the «secondary» modulation spectrum**

S.R. Heister, T.T. Nguyen

Постановка задачи

Ошибка $\delta_{F_V} = \delta_{F_{LV}} / N_L$ измерения частоты вращения F_V винта с N_L лопастями определяет качество формирования радиолокационного изображения (РЛИ) винта и напрямую связана с ошибкой $\delta_{F_{LV}}$ измерения частоты следования импульсов «вторичной» модуляции $F_{LV} = N_L F_V$ (или частоты следования лопастей) для приближающихся (удаляющихся) лопастей в отраженном сигнале (ОС) винта. Для определения частоты F_V необходимо вначале точно измерить частоту следования F_{LV} приближающихся (удаляющихся) лопастей, а затем разделить ее на предполагаемое число лопастей N_L .

Обычно при распознавании самолетов частоту следования импульсов «вторичной» модуляции F_{LV} , формируемых лопастями винта (лопатками компрессора или турбины), определяют по спектру принятого сигнала [1]. Это возможно при двух условиях: первое – большое количество лопастей (лопатонок) и большая частота вращения вала компрессора (турбины) или тянущего винта; второе – малое изменение радиальной скорости летательного аппарата (ЛА) за время измерения, что напрямую связано с изменением ракурса наблюдения.

Оба условия нереализуемы при наблюдении ЛА в РЛД и, в частности, вертолетов на предельно малых высотах: частоты вращения НВ вертолета находятся в пределах $F_V = 3...5$ Гц при числе лопастей $N_L = 2...8$; дальность действия РЛД R_{RLD} небольшая (500...1000 м). Поэтому ракурс наблюдения в ходе полета ЛА относительно РЛД, ведущего мониторинг в секторе $\Delta\beta_{Tr(Rs)} \geq (20^\circ...40^\circ)$ под углом установки около 45° , будет быстро изменяться [2].

Изменение радиальной скорости ЛА относительно РЛД в ходе когерентного накопления ОС в узкополосных фильтрах быстрого преобразования Фурье (БПФ) вызывает «размывание» спектра «вторичной» модуляции и приводит или к неприемлемым ошибкам, или к принципиальной невозможности измерения частоты F_{LV} . Именно это является главной причиной невозможности применения традиционного способа измерения частоты вращения винта. Далее рассматривается новый способ измерения частоты следования импульсов «вторичной» модуляции F_{LV} (частоты следования приближающихся (удаляющихся) лопастей винта), устраняющий влияние быстрого изменения радиальной скорости, обеспечивающий свертку спектра «вторичной» модуляции (ССВМ) ОС винта и когерентное накопление свертки.

Физические основы когерентного накопления свертки спектральных составляющих «вторичной» модуляции отраженного сигнала винта

При монохроматическом зондирующем сигнале (МХЗС) отраженный от винта сигнал $U_{PL_V}(t)$ включает [3, 4] последовательности амплитудно-фазомодулированных импульсов «вторичной» модуляции от приближающихся (ПЛ) $U_{P_PL_V}(t)$ и удаляющихся (УЛ) $U_{P_UL_V}(t)$ лопастей, следующих с одинаковым периодом $T_p = 1 / F_{LV}$. Спектр комплексной огибающей ОС винта формируется относительно доплеровской частоты $F_{допК}$ корпуса ЛА и при МХЗС (см. рис. 1) имеет огибающую, определяемую спектром одиночного импульса «вторичной» модуляции, формируемого ПЛ, и спектром одиночного импульса «вторичной» модуляции, формируемого УЛ. Под огибающей на частотах $F_\xi(n) = F_{допК} + nN_L F_V$, $n = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N_\xi$ располагаются дискретные составляющие, обусловленные периодичностью ОС ПЛ и УЛ винта, где N_ξ – число анализируемых спектральных составляющих. Составляющие «вторичной» модуляции в левой части амплитудно-фазочастотных спектров (АФЧС) ОС НВ (или РВ) обозначим как ξ_{-n} , а в правой части – как ξ_{+n} .

На основе моделирования с использованием моделей ОС, описанных в [3], проведены исследования разностей фаз между соседними спектральными составляющими АФЧС ОС НВ и ОС РВ зависшего вертолета на примере Ми-2 ($V_t = 0$ м/с). Формировались и исследовались свертки $\xi_{-n}\xi_{-(n+1)}^*$ и $\xi_{n+1}\xi_n^*$. Исследования позволили выявить следующие важные свойства АФЧС «вторичной» модуляции ОС НВ и ОС РВ.

Первое – разности фаз между соседними спектральными составляющими для каждой (правой или левой) части АФЧС ОС НВ (или РВ) практически одинаковы.

Второе – фазы свертки в левой $\xi_{-n}\xi_{-(n+1)}^*$ и правой $\xi_{n+1}\xi_n^*$ частях спектра ОС НВ Ми-2, у которого количество лопастей нечетное, отличаются на 180° , а для спектра ОС РВ Ми-2, у которого количество лопастей четное, практически одинаковы.

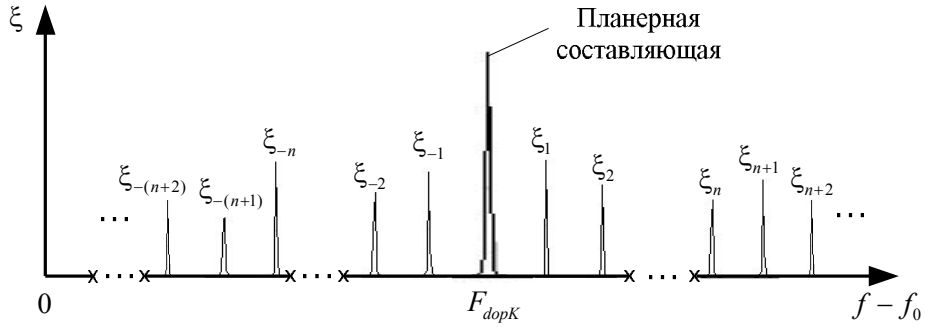


Рис. 1. Спектр сигнала «вторичной» модуляции винта

Свойства АФЧС комплексной огибающей ОС винта являются физической основой для реализации свертки спектра «вторичной» модуляции ОС винта:

1. Когерентные свойства свертки соседних спектральных составляющих «вторичной» модуляции позволяют реализовать свертку всех спектральных составляющих отдельно для правой и отдельно для левой частей спектра «вторичной» модуляции. Свертка спектра «вторичной» модуляции в спектральной области формируется следующим образом:

$$\text{для ОС ПЛ} \quad \xi_{\Sigma_PL} = \sum_{n=1}^{N_{\xi}-1} \xi_{n+1} \xi_n^* ; \quad (1a)$$

$$\text{и для ОС УЛ} \quad \xi_{\Sigma_UL} = \sum_{n=1}^{N_{\xi}-1} \xi_{-n} \xi_{-(n+1)}^* . \quad (1б)$$

2. Когерентность свертки правой и левой частей спектра «вторичной» модуляции винта позволяет сформировать общую свертку спектра «вторичной» модуляции (ССВМ) винта:

$$\text{при нечетном количестве лопастей} \quad \xi_{\Sigma_V} = \xi_{\Sigma_PL} - \xi_{\Sigma_UL} = \sum_{n=1}^{N_{\xi}-1} (\xi_{n+1} \xi_n^* - \xi_{-n} \xi_{-(n+1)}^*) ; \quad (2a)$$

$$\text{при четном количестве лопастей} \quad \xi_{\Sigma_V} = \xi_{\Sigma_PL} + \xi_{\Sigma_UL} = \sum_{n=1}^{N_{\xi}-1} (\xi_{n+1} \xi_n^* + \xi_{-n} \xi_{-(n+1)}^*) . \quad (2б)$$

Способ измерения частот следования лопастей несущего и рулевого винтов на основе свертки спектра «вторичной» модуляции сигнала

Способ измерения частоты следования лопастей винта может быть реализован в многоканальном устройстве (МКУ) свертки спектра «вторичной» модуляции (ССВМ), в произвольном канале которого вычисляется ССВМ ОС винта для измеряемой частоты F_{LV_izm} , устанавливаемой в диапазоне от F_{LV_min} до F_{LV_max} с шагом ΔF . Свертка может быть получена как во временной, так и в спектральной областях. Измеренное значение частоты \hat{F}_{LV} отождествляется с частотой настройки канала F_{LV_izm} , на выходе которого получен наибольший сигнал. При таком подходе потенциальная ошибка измерения частоты следования лопастей винта лежит в диапазоне $\pm 0,5\Delta F$. Частота $F_{LV_izm}(n)$ для канала с номером n описывается выражением:

$$F_{LV_izm}(n) = F_{LV_min} + n\Delta F, \quad n = \overline{0, N_F}, \quad N_F = \text{ceil}[(F_{LV_max} - F_{LV_min}) / \Delta F].$$

Структурные схемы каналов МКУ ССВМ с номерами n , в которых реализуется ССВМ ОС УЛ и ПЛ винта для частоты $F_{LV_izm}(n)$ во временной области, представлены на рис. 2. По аналогии с выражениями (1) эти схемы обеспечивают формирование во временной области свертки спектра «вторичной» модуляции ОС приближающихся лопастей

$$Z_{П_PL_V}(F_{LV_izm}(n)) = \int_0^{T_a} U_{P_PL_V}(t) U_{P_PL_V}^*(t) \exp[i2\pi F_{LV_izm}(n)t] dt \quad (3a)$$

и удаляющихся лопастей

$$Z_{II_UL_V}(F_{LV_izm}(n)) = \int_0^{T_a} U_{P_UL_V}(t) U_{P_UL_V}^*(t) \exp[i2\pi F_{LV_izm}(n)t] dt. \quad (36)$$

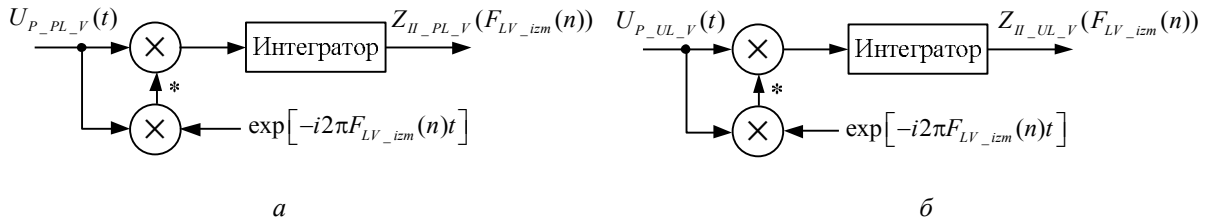


Рис. 2. Структурная схема n -го канала МКУ ССВМ для ОС ПЛ (а) и ОС УЛ (б) винта

В этих схемах одновременно выполняется автоматическая компенсация доплеровской частоты сигнала, отраженного от корпуса (планера) ЛА.

Структурные схемы устройств, реализующих способ измерения частоты следования лопастей НВ F_{L_NV} и РВ F_{L_RV} одновинтового вертолета на основе ССВМ ОС винта во временной области, представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

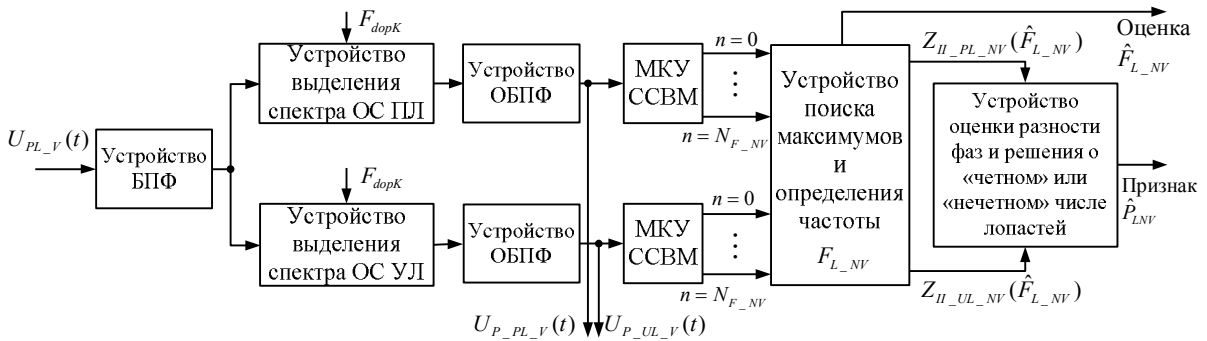


Рис. 3. Структурная схема устройства измерения частоты следования лопастей НВ

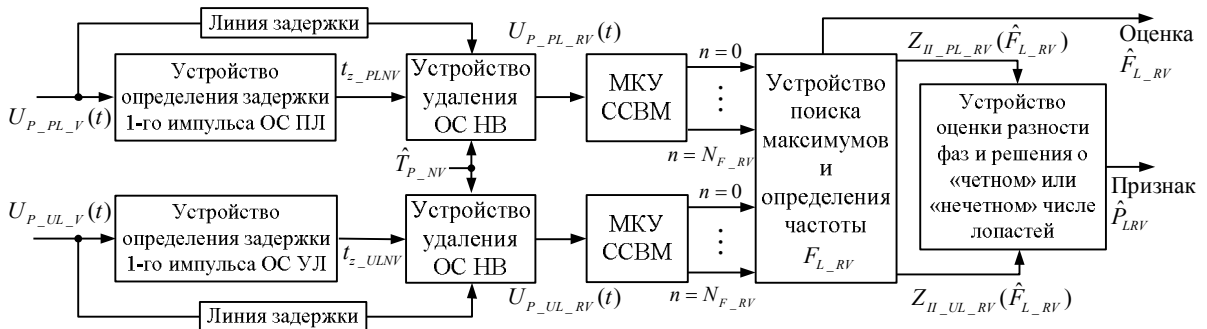


Рис. 4. Структурная схема устройства измерения частоты следования лопастей РВ

Принцип работы устройства измерения частоты следования лопастей НВ, представленного на рис. 3, следующий. ОС, из которого удалены отражения от корпуса и мешающие отражения (МО), поступает на вход устройства БПФ, на выходе которого формируется спектр. Затем относительно доплеровской частоты планера F_{dopK} выделяются спектры ОС ПЛ и УЛ винтов. Эти спектры преобразуются во временные реализации ОС ПЛ $U_{P_PL_V}(t)$ и ОС УЛ $U_{P_UL_V}(t)$ путем обратного БПФ (ОБПФ). Далее отраженные сигналы ПЛ и УЛ винтов запоминаются и поступают на входы одинаковых МКУ ССВМ. На выходах МКУ ССВМ формируются свертки $Z_{II_PL_NV}(F_{L_NV_izm}(n))$ и $Z_{II_UL_NV}(F_{L_NV_izm}(n))$. Свертки поступают в устройство поиска максимумов и определения частоты F_{L_NV} , где формируется

оценка частоты следования лопастей несущего винта \hat{F}_{L_NV} . В данном случае оценка частоты \hat{F}_{L_NV} соответствует частоте $F_{L_NV_izm}(n)$ канала, имеющего наибольший квадрат модуля свертки из $|Z_{II_PL_NV}(F_{L_NV_izm}(n))|^2$ и $|Z_{II_UL_NV}(F_{L_NV_izm}(n))|^2$. Признак \hat{P}_{LNV} «четного» («нечетного») числа лопастей НВ формируется на выходе устройства оценки разности фаз и решения о «четном» или «нечетном» числе лопастей, в котором вычисляется разность фаз $\Delta\varphi_{Z_NV}$ свертки $Z_{II_PL_NV}(\hat{F}_{L_NV})$ и $Z_{II_UL_NV}(\hat{F}_{L_NV})$. Признак «нечетное» число лопастей формируется при модуле разности фаз $|\Delta\varphi_{Z_NV}|$, близком к 180° , а признак «четное» число лопастей – при модуле разности фаз $|\Delta\varphi_{Z_NV}|$, близком к 0° .

Затем в устройстве, представленном на рис. 4, выполняется процесс измерения частоты следования лопастей рулевого винта F_{L_RV} и принятия решения о «четном» («нечетном») числе лопастей РВ. Отраженные сигналы ПЛ и УЛ винтов, сформированные путем ОБПФ в устройстве на рис. 3, поступают в устройства определения задержек первых импульсов «вторичной модуляции» в ОС ПЛ НВ t_{z_PLNV} и в ОС УЛ НВ t_{z_ULNV} относительно начала анализа. Затем на основе полученных задержек и периода повторения $\hat{T}_{P_NV} = 1/\hat{F}_{L_NV}$ путем временной селекции из ОС удаляются импульсы ПЛ и УЛ НВ. Полученные сигналы $U_{P_PL_RV}(t)$ и $U_{P_UL_RV}(t)$ для ПЛ и УЛ РВ поступают в два одинаковых МКУ ССВМ, на выходах которых формируются свертки $Z_{II_PL_RV}(F_{L_RV_izm}(n))$ и $Z_{II_UL_RV}(F_{L_RV_izm}(n))$. Частота следования лопастей РВ \hat{F}_{L_RV} определяется по наибольшему значению квадрата модуля свертки $|Z_{II_UL_RV}(F_{L_RV_izm}(n))|^2$ и $|Z_{II_PL_RV}(F_{L_RV_izm}(n))|^2$. Признак \hat{P}_{LRV} «четное» («нечетное») число лопастей РВ формируется по аналогии с формированием признака для НВ.

На основе измеренного значения частоты \hat{F}_{L_NV} (или \hat{F}_{L_RV}) можно получить оценку частоты вращения НВ (или РВ) делением \hat{F}_{L_NV} (или \hat{F}_{L_RV}) на предполагаемое число лопастей НВ (или РВ) и поиском реального сочетания частоты вращения и числа лопастей винта.

Заметим, что разработанный способ может также использоваться для измерения частоты следования лопастей винта двухвинтового вертолета и частоты следования лопастей винта (лопаток компрессора или турбины) самолета.

Результаты экспериментальных исследований способа

Условия исследований: вертолет Ми-2 удалялся от РЛД, зондирующий сигнал представлял собой МХЗС с круговой поляризацией и длиной волны $\lambda = 0,0125$ м. Квадратурные составляющие принятого сигнала на видеочастоте преобразовывались в цифровой вид с частотой дискретизации 96 кГц. Обработке подвергался преобразованный ОС, из которого были удалены ОС корпуса и мешающие отражения. Время когерентного накопления выбрано равным $T_a = 1,365$ с. Границы анализируемого диапазона частот следования лопастей для НВ приняты равными $F_{L_NV_min} = 9$ Гц и $F_{L_NV_max} = 20$ Гц, а для РВ – $F_{L_RV_min} = 40$ Гц и $F_{L_RV_max} = 80$ Гц. Шаг изменения частоты $\Delta F = 0,01$ Гц.

На рис. 5 (для НВ) и рис. 6 (для РВ) представлены зависимости квадратов модулей выходных свертки МКУ ССВМ от анализируемой частоты. Для уменьшения уровней боковых лепестков каналов МКУ ССВМ было использовано весовое окно Хеммига. Анализ зависимостей показывает, что свертка спектра ОС УЛ (или ПЛ) НВ (или РВ) имеет максимум

в районе частоты следования лопастей НВ (или РВ) в диапазоне анализируемых частот. Кроме того, на рис. 6 имеются небольшие дополнительные пики, обусловленные влиянием остатков ОС НВ и расположенные на частотах, кратных частоте следования лопастей НВ.

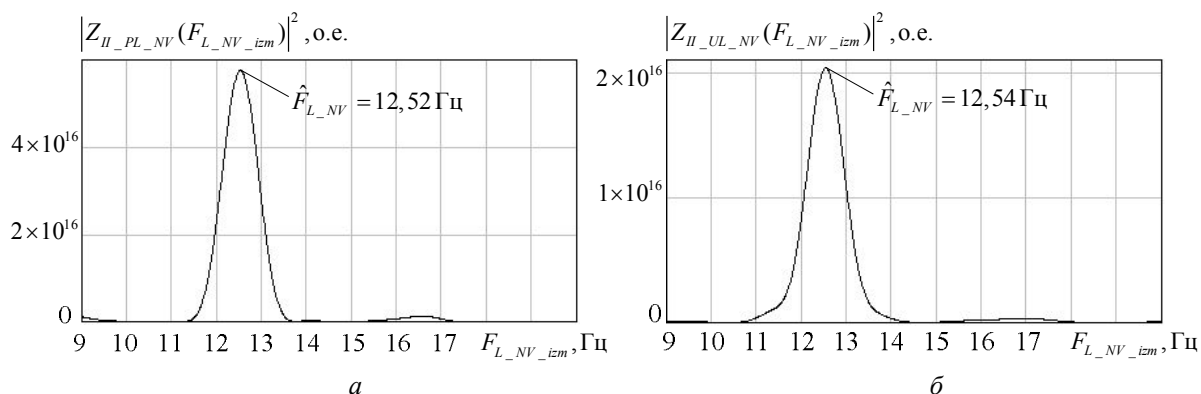


Рис. 5. Зависимости квадратов модулей выходных сверток МКУ ССВМ от измеряемой частоты, *a* – для ОС ПЛ НВ, *б* – для ОС УЛ НВ

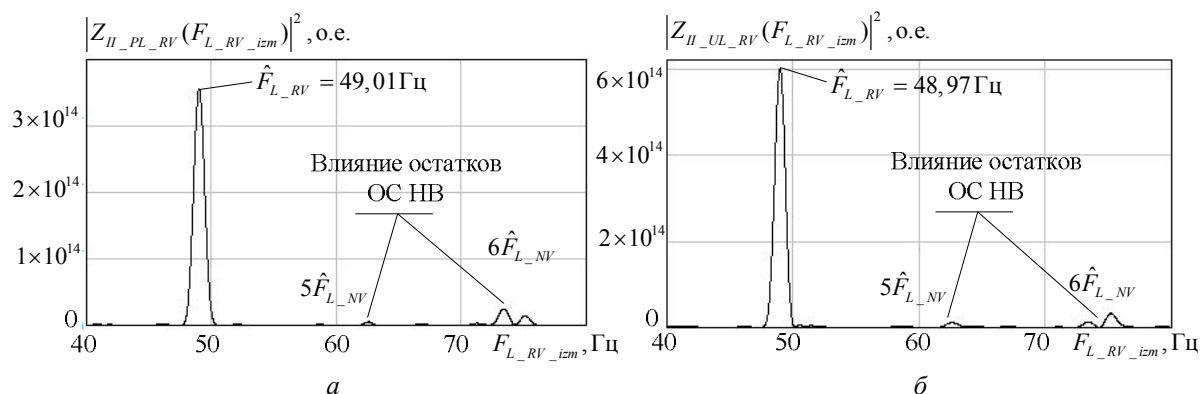


Рис. 6. Зависимости квадратов модулей выходных сверток МКУ ССВМ от измеряемой частоты, *a* – для ОС ПЛ РВ, *б* – для ОС УЛ РВ

Сравнение сверток, представленных на рис. 5, позволяет получить оценку частоты следования лопастей НВ – $\hat{F}_{L_{NV}} = 12,52$ Гц. Модуль разности фаз между свертками $Z_{II_PL_NV}(\hat{F}_{L_{NV}})$ и $Z_{II_UL_NV}(\hat{F}_{L_{NV}})$ составляет $|\Delta\varphi_{Z_NV}| = 188,48^\circ$ и, следовательно, НВ имеет нечетное число лопастей. Исходя из рис. 6 оценка частоты следования лопастей РВ составляет $\hat{F}_{L_{RV}} = 48,97$ Гц, а число лопастей РВ является четным, так как модуль разности фаз между свертками $Z_{II_PL_RV}(\hat{F}_{L_{RV}})$ и $Z_{II_UL_RV}(\hat{F}_{L_{RV}})$ составляет $|\Delta\varphi_{Z_RV}| = 0,114^\circ$.

Полученные результаты измерений соответствуют параметрам вертолета Ми-2 и подтверждают практическую работоспособность разработанного способа.

Заключение

Разработанный способ измерения частоты следования лопастей винта на основе свертки спектра «вторичной» модуляции отраженного сигнала наряду с выполнением основной функции устраняет негативное влияние на измерение быстрого изменения радиальной скорости летательного аппарата. Это свойство обеспечивает принципиальную возможность решения задач измерения параметров винтов ЛА в РЛД, для которого типовым условием наблюдения является быстрое изменение ракурса объекта наблюдения. Разработанный способ обеспечивает также существенное повышение отношения «сигнал винта/помеха» за счет когерентного накопления свертки, что приводит к соответствующему

снижению ошибок измерения искомой частоты. Важным свойством способа является возможность определения признака четности числа лопастей винта. Измеренное значение частоты следования лопастей и признак четности используются для определения частоты вращения винта, знание которой необходимо для построения радиолокационного изображения винта.

Список литературы

1. Гейстер С.Р., Курлович В.И., Шаляпин С.В. Экспериментальные исследования спектральных портретов винтовых и турбореактивных самолетов в радиолокаторе обзора с непрерывным зондирующим сигналом // Радиолокация и радиометрия: сб. ст. из науч.-техн. серии. 2000. Вып. 3. С. 90–96.
2. Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т. Облик радиолокационного датчика обнаружения и распознавания низколетящих целей, использующего обращенный синтез апертуры антенны // Наука и воен. безопасность. 2017. № 1 (51). С. 22–27.
3. Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т. Математические модели радиолокационного сигнала, отраженного от винта вертолета, в приложении к обращенному синтезу апертуры // Наука и воен. безопасность. 2018. № 3 (57). С. 34–40.
4. Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т. Маховые движения и изгибы лопастей несущего винта вертолета в модели отраженного сигнала // Наука и воен. безопасность. 2018. № 4 (58). С. 21–29.

References

1. Gejster S.R., Kurlovich V.I., Shaljapin S.V. Jeksperimental'nye issledovanija spektral'nyh portretov vintovyh i turboreaktivnyh samoletov v radiolokatore obzora s nepreryvnyim zondirujushhim signalom // Radiolokacija i radiometrija: sb. st. iz nauch.-tehn. serii. 2000. Vyp. 3. S. 90–96. (in Russ.)
2. Gejster S.R., Nguen T.T. Oblik radiolokacionnogo datchika obnaruzhenija i raspoznavanija nizkoletjashhih celej, ispol'zujushhego obrashhennyj sintez apertury anteny // Nauka i voen. bezopasnost'. 2017. № 1 (51). S. 22–27. (in Russ.)
3. Gejster S.R., Nguen T.T. Matematicheskie modeli radiolokacionnogo signala, otrazhennogo ot vinta vertoleteta, v prilozhenii k obrashhennomu sintezu apertury // Nauka i voen. bezopasnost'. 2018. № 3 (57). S. 34–40. (in Russ.)
4. Gejster S.R., Nguen T.T. Mahovye dvizhenija i izgiby lopastej nesushhego vinta vertoleteta v modeli otrazhennogo signala // Nauka i voen. bezopasnost'. 2018. № 4 (58). S. 21–29. (in Russ.)

Сведения об авторах

Гейстер С.Р., д.т.н., профессор, главный сотрудник Научно-исследовательского института Вооруженных сил Республики Беларусь.

Нгуен Т.Т., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Heister S.R., D.Sci., professor, main researcher of Research institute of the Armed forces of Republic of Belarus.

Nguyen T.T., PG student of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

20013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
e-mail: hsr_1960@yahoo.com
Гейстер Сергей Романович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
e-mail: hsr_1960@yahoo.com
Heister Sergey Romanovich