

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.96

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-5-43-53>

Научная статья

Способ компенсации сигнала несущего винта вертолета во временной области перед построением радиолокационного изображения рулевого винта

С. Р. Гейстер[✉], В. В. Кириченко

ОАО "АЛЕВКУРП", Королев Стан, Республика Беларусь

[✉] hsr_1960@yahoo.ru

Аннотация

Введение. Наиболее распространены одновинтовые вертолеты, имеющие несущий и рулевой винты. Радиолокационные изображения винтов вертолета в сочетании с частотами их вращения содержат информацию, позволяющую определить тип вертолета. Закон амплитудной модуляции сигналов, отраженных от лопастей несущего винта, имеет импульсный характер. Импульсы этой модуляции существенно превышают по амплитуде сигнал, отраженный от корпуса. Поэтому построение изображения несущего винта не имеет принципиальных трудностей. Однако амплитуды сигналов, отраженных от лопастей рулевого винта, существенно меньше сигналов несущего винта. Поэтому задача измерения частоты следования лопастей рулевого винта на фоне сигнала несущего винта не решается. В итоге не решается задача построения изображения рулевого винта. Это является проблемой, которая осложняется тем, что спектры сигналов, отраженных от несущего и рулевого винтов, перекрываются.

Цель работы. Разработка способа компенсации сигнала несущего винта вертолета во временной области.

Материалы и методы. Компенсация сигналов, отраженных от лопастей несущего винта, может быть выполнена разными способами. В работе рассматривается способ, который основывается на использовании модулей комплексных амплитуд опорных сигналов (эталонов) канала построения изображения несущего винта. На основе этих модулей во временной области формируется функция взвешивания сигналов, отраженных от лопастей несущего винта. Эта функция в ходе взвешивания принятого сигнала обеспечивает компенсацию отражений от лопастей несущего винта.

Результаты. Разработан способ компенсации сигнала несущего винта вертолета во временной области в приложении к построению радиолокационного изображения рулевого винта вертолета. Способ не требует больших вычислительных ресурсов. Работоспособность способа иллюстрируется на примере сигнала, отраженного от вертолета Ми-8.

Заключение. Разработанный способ обеспечивает компенсацию сигналов, отраженных от лопастей несущего винта вертолета, и создает условия для измерения частоты вращения и построения изображения рулевого винта вертолета.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, несущий винт вертолета, рулевой винт вертолета, компенсация сигнала, измерение частоты вращения винта

Для цитирования: Гейстер С. Р., Кириченко В. В. Способ компенсации сигнала несущего винта вертолета во временной области перед построением радиолокационного изображения рулевого винта // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 5. С. 43–53.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-43-53

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.03.2025; принята к публикации после рецензирования 15.09.2025; опубликована онлайн 28.11.2025



Method for Compensating Helicopter Main Rotor Signal in the Time Domain Before Constructing a Tail Rotor Radar Image

Sergey R. Heister[✉], Valery V. Kirichenko

JSC "ALEVKURP", Korolev Stan, Republic of Belarus

[✉] hsr_1960@yahoo.ru

Abstract

Introduction. The most common helicopters are those based on a single rotor design, each with a main rotor and a tail rotor. Radar images of helicopter rotors, combined with their rotational speeds, contain information that allows the helicopter type to be determined. The amplitude modulation law for signals reflected from the main rotor blades is of a pulse nature. These modulation pulses significantly exceed the amplitude of the signal reflected from the airframe. Therefore, constructing an image of the main rotor presents no fundamental difficulties. However, the amplitudes of signals reflected from the tail rotor blades are significantly smaller than those of the main rotor. Therefore, the problem of measuring the rotational speed of the tail rotor blades against the background signal of the tail rotor is not solved. Consequently, the problem of constructing an image of the tail rotor is not solved. This problem is additionally complicated by the overlapping spectra of the signals reflected from the main and tail rotors.

Aim. Development of a method for compensating the helicopter rotor signal in the time domain.

Materials and methods. Compensation for signals reflected from main rotor blades can be accomplished through various approaches. This paper discusses a method based on the use of complex amplitude moduli of reference signals in the main rotor imaging channel. These moduli are used to generate a time-domain weighting function for signals reflected from the main rotor blades. This function, by weighting the received signal, ensures compensation for reflections from the main rotor blades.

Results. A method for compensating for the helicopter main rotor signal in the time domain has been developed for constructing a radar image of the helicopter tail rotor. The method does not require extensive computational resources. Its effectiveness is illustrated using a signal reflected from an Mi-8 helicopter as an example.

Conclusion. The developed method enables compensation for signals reflected from the blades of the helicopter main rotor and creates conditions for measuring the rotation frequency and constructing an image of the helicopter tail rotor.

Keywords: radar image, helicopter main rotor, helicopter tail rotor, signal compensation, rotor speed measurement

For citation: Heister S. R., Kirichenko V. V. Method for Compensating Helicopter Main Rotor Signal in the Time Domain Before Constructing a Tail Rotor Radar Image. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 5, pp. 43–53.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-43-53

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 26.03.2025; accepted 15.09.2025; published online 28.11.2025

Введение. Обработка слабого сигнала на фоне сильного сигнала, если оба сигнала близки по своим спектральным параметрам, как правило, приводит к неудовлетворительному результату. При этом сильный сигнал представляет собой помеху, которую необходимо максимально уменьшить путем компенсации с минимальным влиянием на свойства полезного слабого сигнала.

Пример компенсации сильного сигнала, мешающего построению радиолокационного изображения (РЛИ) движущейся системы отражате-

лей, изложен в [1, 2]. В этих работах описан подход компенсации сильного мешающего сигнала, спектр которого пересекается со спектром слабого полезного сигнала. Автором предложен способ компенсации [1], основанный на использовании сигнала, полученного обратным преобразованием от радиолокационного изображения корпуса автомобиля [3].

Вертолет, построенный по одновинтовой схеме, имеет в своем составе несущий и рулевой винты. Частота вращения рулевого винта (РВ) является ключевым параметром для по-

строения изображения этого винта и важной информацией для распознавания типа вертолета. Однако сигналы, отраженные от несущего винта (НВ), по мощности на порядок и более превышают сигналы, отраженные от РВ. Это практически исключает применение типовых подходов для правильного измерения частоты вращения РВ и построения его радиолокационного изображения. Для разрешения этой проблемы необходимо выполнить компенсацию сигналов, отраженных от лопастей НВ.

Постановка задачи. Компенсации помех посвящено большое количество работ, из которых в приложении к радиолокации можно выделить [4–12]. В основе компенсации помехового сигнала лежат его корреляционные свойства в области представления. В общем случае компенсация может выполняться во временной, спектральной и пространственной областях.

Сигнал, отраженный от лопасти НВ, имеет широкий спектр из-за амплитудной и фазовой модуляции, а также перекрывается [13] со спектром сигнала, отраженного от лопасти РВ. С учетом этого компенсацию сигнала, отраженного от лопастей НВ, целесообразно выполнять во временной области. При этом возможны следующие варианты:

– формирование компенсационного сигнала (прообраза сигнала, отраженного от лопастей НВ) на основе обратного преобразования РЛИ НВ, полученного на основе технологии обращенного синтеза апертуры антенны;

– формирование временных бланков для сигналов лопастей НВ, положение которых во времени определяется на основе измеренного значения частоты следования лопастей НВ и положения этих лопастей в РЛИ на момент начала бланкирования. В данной статье рассматривается именно этот вариант, так как он эффективен, а его реализация по сравнению с первым вариантом не требует объемных вычислительных процедур в связи с отсутствием необходимости выполнять обратное преобразование РЛИ НВ.

В иллюстративном примере для определенности полагаем, что радиолокационная станция (РЛС) непрерывно сопровождает приближающийся вертолет Ми-8, выполненный

по одновинтовой схеме. РЛС находится в центре декартовой системы координат, а вертолет движется со скоростью 62.5 м/с на приближение параллельно оси OX из точки с координатами $x_0 = 29\,840$ м, $y_0 = 1470$ м, $z_0 = 20$ м. Существенными для исследований являются такие параметры РЛС, как частота повторения зондирующих сигналов $F_{\Pi} = 50$ кГц и длина волны $\lambda = 0.03$ м. Принятый сигнал обозначим как $u_{\text{пр}}(n)$, где

$n = \overline{0, N-1}$ – номер периода зондирования. Сигнал получен на выходе устройства внутрипериодной обработки в элементе дальности, содержащем вертолет. Таким образом, временные отсчеты принятого сигнала $u_{\text{пр}}(n)$, $n = \overline{0, N-1}$ следуют с интервалом, равным периоду повторения $T_{\Pi} = 1/F_{\Pi}$ зондирующего сигнала. Длительность выборки принятого сигнала составляет $T_H = T_{\Pi}N$.

Особенности преобразований принятого сигнала при построении изображений. Полагаем, что построение РЛИ винтов (как несущего, так и рулевого) осуществляется по сигналам, отраженным от приближающихся кромок (ПК) лопастей [14, 15]. С учетом этого принятый сигнал $u_{\text{пр}}(n)$, $n = \overline{0, N-1}$ перед адаптацией к априорно неизвестным параметрам и построением РЛИ проходит следующие преобразования [15]:

- преобразование Фурье;
- удаление сигнала, отраженного от корпуса вертолета, на основе информации о радиальной скорости;
- удаление сигналов, отраженных от удаляющихся кромок лопастей НВ и РВ.

Рис. 1–4 характеризуют эти преобразования:

– на рис. 1 представлена временная диаграмма реальной части принятого сигнала $u_{\text{пр}}(n)$, $n = \overline{0, N-1}$. Сигнал представлен в относительных единицах (в выходных отсчетах аналого-цифрового преобразователя, формируемых относительно опорного напряжения);

– на рис. 2 представлен междуperiодный амплитудно-частотный спектр (АЧС) $|G_{\text{пр}}(k)|$,

$k = \overline{0, N-1}$ принятого сигнала $u_{\text{пр}}(n)$,

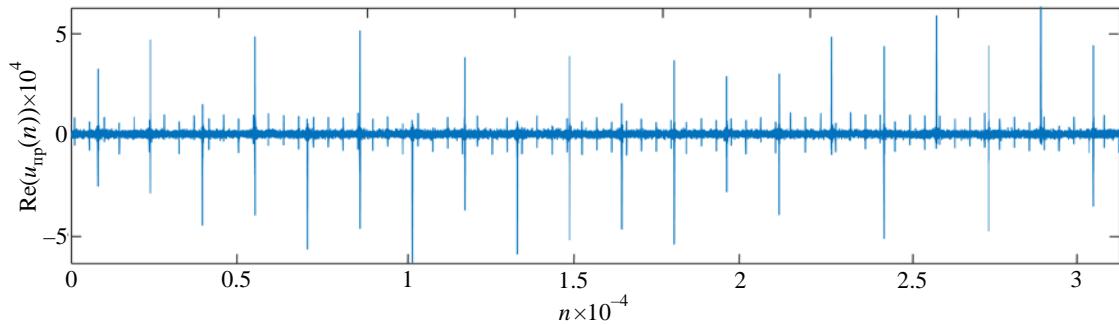


Рис. 1. Реальная часть принятого сигнала
 Fig. 1. Real component of the received signal

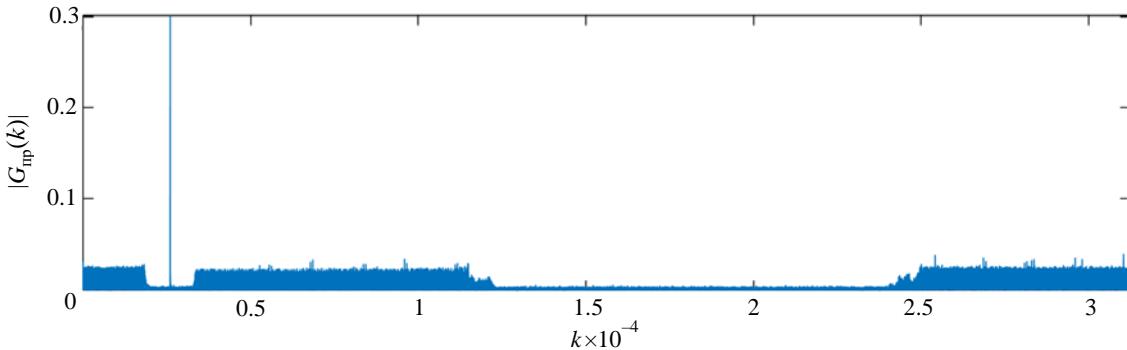


Рис. 2. Модуль спектра принятого сигнала
 Fig. 2. Received signal spectrum module

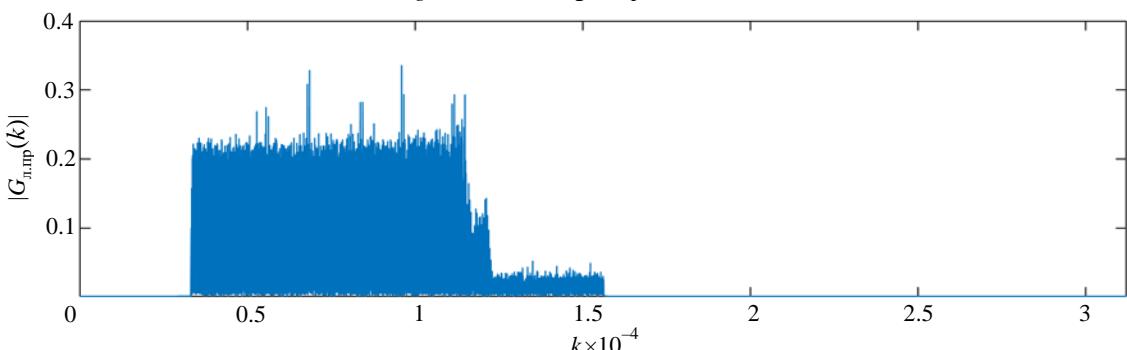


Рис. 3. Модуль спектра сигнала от приближающихся кромок
 Fig. 3. Module of the signal spectrum from the approaching edges

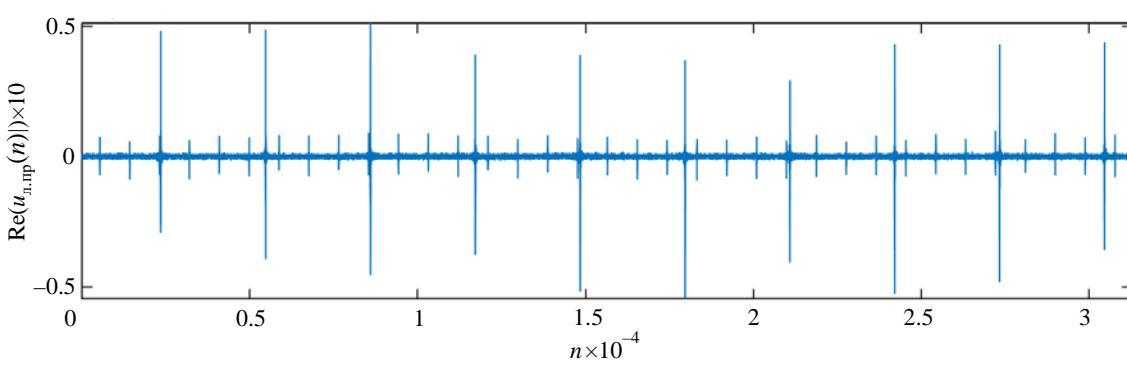


Рис. 4. Реальная часть сигнала с отражениями от приближающихся кромок лопастей
 Fig. 4. Real component of the signal with reflections from approaching blade edges

$n = \overline{0, N - 1}$, полученный путем дискретного прямого преобразования Фурье с числом точек $N = 31\,250$. Интервал $T_{\text{H}} = T_{\Pi}N$ для удобства

выбран равным двум периодам вращения НВ, т. е. $T_{\text{H}} \cong \frac{2}{F_{\text{в}} \text{НВ}}$, где $F_{\text{в}} \text{НВ} = 3.2 \text{ Гц}$ – частота

вращения НВ вертолета Ми-8. По обе стороны от корпусной составляющей расположены составляющие, соответствующие приближающимся и удаляющимся кромкам лопастей;

- на рис. 3 представлен АЧС $|G_{\text{л.пр}}(k)|$, $k = \overline{0, N-1}$, полученный из АЧС $|G_{\text{пр}}(k)|$, $k = \overline{0, N-1}$ и содержащий только составляющие от ПК;
- на рис. 4 представлена реальная часть сигнала $u_{\text{л.пр}}(n)$, $n = \overline{0, N-1}$, полученного обратным преобразованием Фурье от спектра $G_{\text{л.пр}}(k)$, $k = \overline{0, N-1}$.

Для эффективного построения РЛИ ПК лопастей РВ [13] необходимо получить:

- частоту вращения РВ $F_{\text{в РВ}}$, которая определяется на основе измерения частоты следования лопастей $F_{\text{л.в РВ}} = F_{\text{в РВ}} N_{\text{л РВ}}$, где $N_{\text{л РВ}}$ – число лопастей РВ;
- временную реализацию сигнала, содержащего только отражения от ПК лопастей РВ. Для этого из сигнала $u_{\text{л.пр}}(n)$, $n = \overline{0, N-1}$ необходимо удалить отражения от НВ.

Способ компенсации сигналов от лопастей несущего винта во временной области. Для компенсации сигналов НВ во временной области необходимо определить текущее положение этих сигналов в выборке принятого сигнала с использованием РЛИ НВ. Важно отметить, что отражения от РВ существенно меньше отражений от НВ [13]. Поэтому их влияние на процессы измерения частоты вращения и построения РЛИ НВ несущественны.

Для измерения частоты следования лопастей можно использовать свертку [14] вида

$$Z_0(k) = \sum_{n=0}^{N-1} u_{\text{л.пр}}(n) u_{\text{л.пр}}^*(n) \times \exp\left(i\left(2\pi k \frac{\Delta F}{F_{\text{п}}} n\right)\right), \quad k = \overline{K_{\min}, K_{\max}}, \quad (1)$$

где ΔF – шаг изменения частоты, определяющий точность измерений; $K_{\max} = \frac{F_{\max}}{\Delta F}$ – число, соответствующее максимальному значению диапазона измерения частоты следования лопа-

стей F_{\max} ; $K_{\min} = \frac{F_{\min}}{\Delta F}$ – число, соответствующее минимальному значению диапазона измерения частоты следования лопастей F_{\min} .

Частоты максимумов свертки (1) кратны целому значению частоты следования лопастей винта. Частота первого максимума соответствует искомому значению частоты следования лопастей. Уровни максимальных значений свертки определяются максимальными значениями амплитуд периодических сигналов во временной реализации.

На рис. 5 представлены результаты вычисления $Z_0(k)$, $k = \overline{100, 2000}$ для $u_{\text{л.пр}}(n)$, $n = \overline{0, N-1}$ в диапазоне 10...200 Гц с шагом "грубого" [14] измерения $\Delta F = 0.1$ Гц. В свертке $Z_0(k)$, $k = \overline{K_{\min}, K_{\max}}$:

- максимальные значения соответствуют отражениям от НВ;
- максимальные значения для РВ в данном случае на два порядка меньше максимумов для НВ и практически не видны.

На рис. 5, *a* первый максимум в свертке соответствует номеру $k_{\max} = 160$. Следовательно, "грубо" измеренное значение частоты следования лопастей НВ $\hat{F}_{\text{л.в НВ гр}} = k_{\max} \Delta F = 16$ Гц. Точное измерение частоты следования лопастей, выполненное аналогичным образом [14], дало результат $\hat{F}_{\text{л.в НВ т.ч}} = 15.999$ Гц. Для числа лопастей $N_{\text{л НВ}} = 5$ точно измеренное значение частоты вращения НВ $\hat{F}_{\text{в НВ}} = \frac{\hat{F}_{\text{л.в НВ т.ч}}}{N_{\text{л НВ}}} = 3.1998$ Гц.

В [15] рассмотрены алгоритмы построения РЛИ винтов летательных аппаратов. Изображение НВ вертолета представляет собой набор модулей комплексных амплитуд $|\xi_{\text{НВ}}(k_{\theta})|$, $k_{\theta} = \overline{1, N_{\theta}}$, относящихся к N_{θ} угловым направлениям относительно предполагаемого центра винта (измеренные в РЛС значения координат объекта) в горизонтальной плоскости. Эти угловые направления следуют с интервалом $\delta\theta = \frac{360^\circ}{N_{\theta}}$.

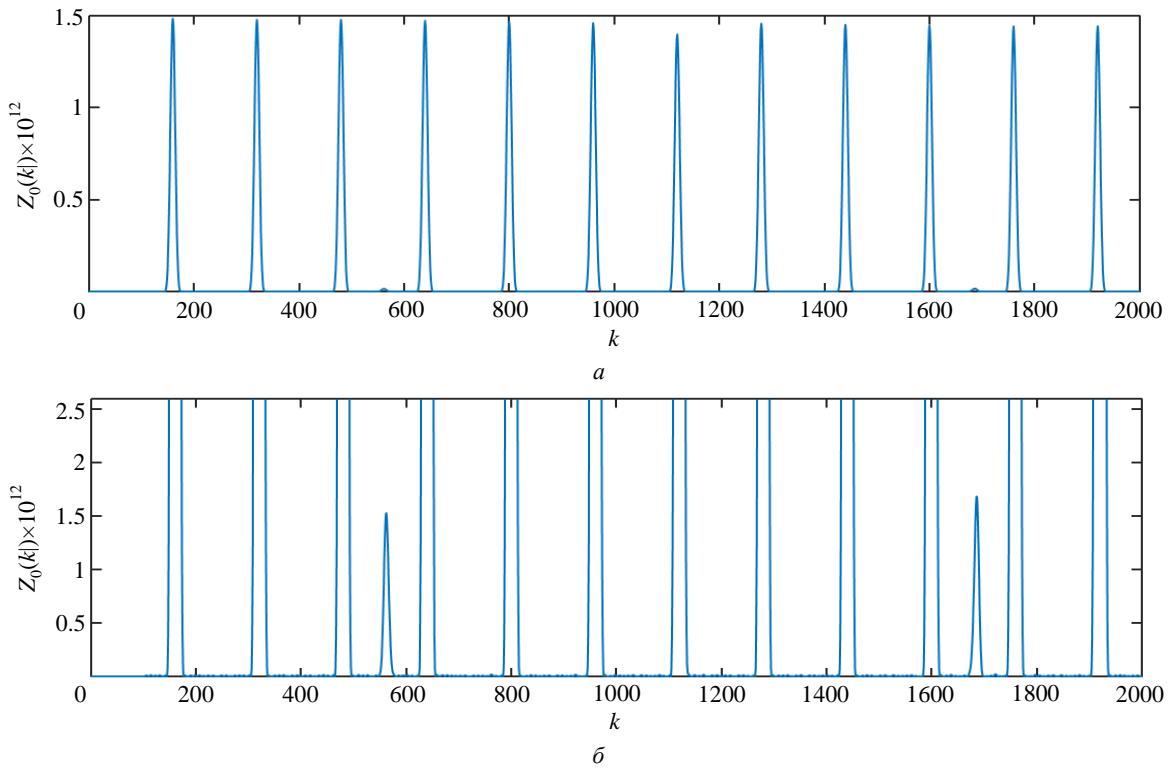


Рис. 5. Свертка $Z_0(k)$, $k = \overline{100, 2000}$: а – в масштабе для НВ; б – в масштабе для РВ

Fig. 5. Convolution $Z_0(k)$, $k = \overline{100, 2000}$: а – to scale for the main rotor; б – to scale for the tail rotor

Изображение ПК лопастей НВ формируется на выходах N_0 каналов обработки, в каждом k_0 -м из которых формируется сумма результатов перемножения N отсчетов принятого сигнала $u_{\text{л.пр}}(n)$, $n = \overline{0, N-1}$ для ПК лопастей на соответствующие временные отсчеты k_0 -й опорной функции $K_{\text{оп.пр}}(k_0, n)$, то есть

$$\xi_{\text{НВ}}(k_0) = \sum_{n=0}^{N-1} u_{\text{л.пр}}(n) K_{\text{оп.пр}}(k_0, n),$$

$$k_0 = \overline{1, N_0}.$$

Текущий n -й отсчет опорной функции k_0 -го канала $K_{\text{оп.пр}}(k_0, n)$ представляет собой отсчет сигнала, соответствующего нормированному по амплитуде и комплексно-сопряженному сигналу, отраженному от ПК виртуальной лопасти [15]. Виртуальная лопасть имеет определенные размеры и вращается в горизонтальной плоскости относительно предполагаемого центра винта, движущегося с измеренными параметрами летательного аппарата. Частота вращения виртуальной лопасти в рассматриваемом

мом иллюстративном примере соответствует измеренному значению $\hat{F}_{\text{в НВ}} = 3.1998$ Гц, а направление вращения виртуальной лопасти соответствует направлению вращения реальной лопасти. В обобщенном виде опорная функция k_0 -го канала для ПК лопасти описывается выражением

$$K_{\text{оп.пр}}(k_0, n) = \sum_{l=0}^{L_{\text{в НВ}}-1} \exp(-i2k_{\lambda}r(k_0, l, n)),$$

$$n = \overline{0, N-1},$$

где $k_{\lambda} = 2\pi/\lambda$ – волновое число, соответствующее длине волны λ в РЛС; $r(k_0, l, n)$ – радиальное расстояние от фазового центра антенны РЛС до l -го отражателя на ПК k_0 -й виртуальной лопасти в n -й момент времени; $L_{\text{в НВ}}$ – количество отражателей на ПК виртуальной лопасти. Отражатели на ПК виртуальной лопасти располагаются равномерно (например, с интервалом $\lambda/4$), начиная с определенного удаления [15] от центра виртуальной лопасти.

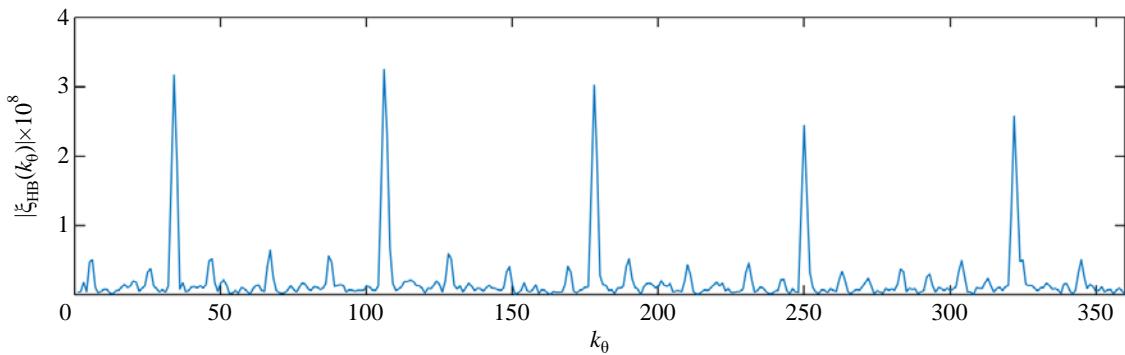


Рис. 6. Изображение приближающихся кромок лопастей несущего винта

Fig. 6. Image of approaching rotor blade edges

На рис. 6 для текущего примера представлено РЛИ ПК лопастей НВ вертолета Ми-8 при $N_\theta = 360$.

В РЛИ НВ первая лопасть находится в элементе с номером $q_{\text{HB}}(1)$. Для текущего примера в соответствии с рис. 6 значение $q_{\text{HB}}(1) = 34$.

С учетом известного числа лопастей $N_{\text{л HB}}$ в РЛИ НВ и измеренного значения $q_{\text{HB}}(1)$ можно определить номера элементов РЛИ с ПК всех лопастей НВ:

$$q_{\text{HB}}(g) = q_{\text{HB}}(1) + \frac{360}{N_{\text{л HB}}} (g - 1), \quad (2)$$

$$g = \overline{1, N_{\text{л HB}}}.$$

В соответствии с выражением (2) для текущего примера $q_{\text{HB}}(1) = 34$, $q_{\text{HB}}(2) = 106$, $q_{\text{HB}}(3) = 178$, $q_{\text{HB}}(4) = 250$, $q_{\text{HB}}(5) = 322$.

Компенсация сигналов, отраженных от ПК лопастей НВ, выполняется с использованием модулей сигналов опорных функций для каналов с

номерами $q_{\text{HB}}(g)$, $g = \overline{1, N_{\text{л HB}}}$, т. е. с использованием $|K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{HB}}(g), n)|$, $g = \overline{1, N_{\text{л HB}}}$, $n = \overline{0, N - 1}$. В качестве примера на рис. 7 представлены:

- временная реализация модуля принятого сигнала $|u_{\text{л.пр}}(n)|$, $n = \overline{0, N - 1}$ (оранжевый цвет), содержащего только сигналы, отраженные от ПК лопастей НВ (составляющие с наибольшим уровнем) и лопастей РВ (составляющие, амплитуда которых почти в 7 раз меньше);
- временная реализация модуля опорной функции $|K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{HB}}(1), n)|$, $n = \overline{0, N - 1}$ (синий цвет) для ПК первой лопасти НВ вертолета Ми-8.

Предлагаемый способ компенсации сигналов от приближающихся кромок лопастей несущего винта состоит в следующем:

- так как спектры сигналов, отраженных от лопастей НВ и РВ, перекрываются, а мощности составляющих НВ на порядки выше, то компенсацию сигналов НВ наиболее эффективно мож-

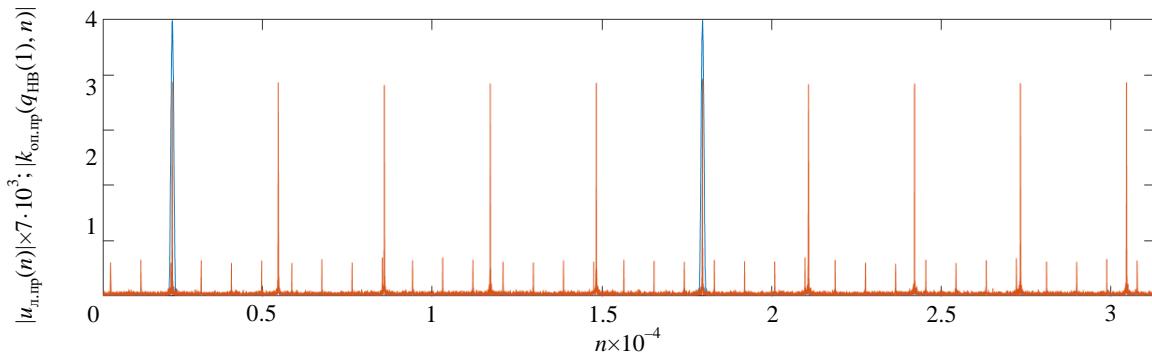


Рис. 7. Временные реализации модуля принятого сигнала и опорной функции для приближающейся кромки первой лопасти

Fig. 7. Temporary implementation of the received signal module and the support function for the approaching edge of the first blade

но осуществить во временной области с использованием опорных функций каналов построения РЛИ ПК лопастей НВ $|K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{НВ}}(g), n)|$,
 $g = \overline{1, N_{\text{л НВ}}}, n = \overline{0, N - 1}$;

– для выполнения компенсации необходимо использовать весовую функцию в пространстве "время", формируемую на основе опорных функций $|K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{НВ}}(g), n)|$, $g = \overline{1, N_{\text{л НВ}}}$,
 $n = \overline{0, N - 1}$;

– для повышения качества компенсации целесообразно расширить зоны компенсации во временной области путем использования в весовой функции дополнительно опорных функций $|K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{НВ}}(g) - 1, n)|$, $g = \overline{1, N_{\text{л НВ}}}$,
 $n = \overline{0, N - 1}$ и $|K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{НВ}}(g) + 1, n)|$, $g = \overline{1, N_{\text{л НВ}}}$,
 $n = \overline{0, N - 1}$, которые являются ближайшими справа и слева для основных опорных функций $|K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{НВ}}(g), n)|$, $g = \overline{1, N_{\text{л НВ}}}$, $n = \overline{0, N - 1}$.

Алгоритм компенсации сигналов, отраженных от приближающихся кромок несущего винта. Компенсация сигналов НВ осуществляется с помощью весовой функции. Эта функция $K_{\text{комп НВ}}(n)$, $n = \overline{0, N - 1}$ представляется произведением функций $K_{\text{комп}}(g, n)$,
 $g = \overline{1, N_{\text{л НВ}}}$, $n = \overline{0, N - 1}$ для сигналов ПК от всех $N_{\text{л НВ}}$ лопастей НВ:

$$K_{\text{комп НВ}}(n) = \prod_{g=1}^{N_{\text{л НВ}}} K_{\text{комп}}(g, n), n = \overline{0, N - 1}. \quad (3)$$

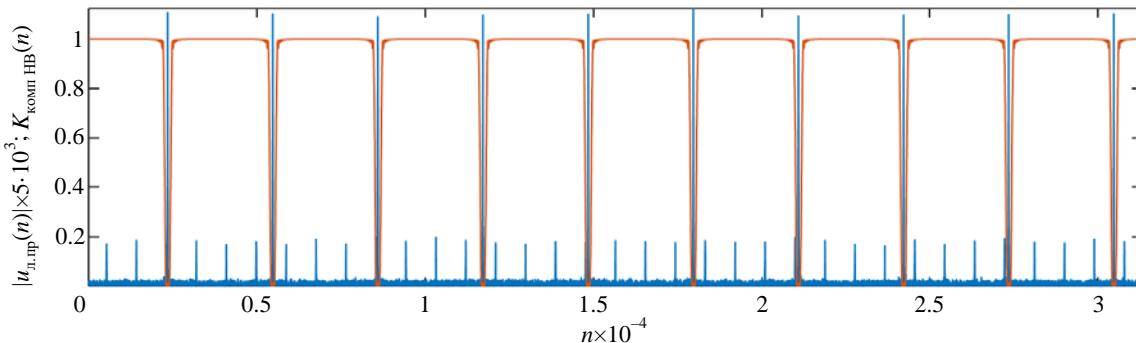


Рис. 8. Весовая функция компенсации сигнала несущего винта $K_{\text{комп НВ}}(n)$

и модуль временных отсчетов сигналов передних кромок НВ и РВ $|u_{\text{l.pr}}(n)|$

Fig. 8. Weighting function of signal compensation of the main rotor $K_{\text{комп НВ}}(n)$

and the module of time counts of the signals of the leading edges of the main and tail rotors $|u_{\text{l.pr}}(n)|$ blade

В (3) весовая функция для g -й лопасти представляется произведением из трех сомножителей (центральный и два боковых) и описывается выражением

$$K_{\text{комп}}(g, n) = \left(1 - |K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{НВ}}(g), n)|\right) \times \\ \times \left(1 - |K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{НВ}}(g) - 1, n)|\right) \times \\ \times \left(1 - |K_{\text{оп.пр}}(q_{\text{НВ}}(g) + 1, n)|\right), n = \overline{0; N - 1}.$$

Алгоритм компенсации сигналов от ПК лопастей НВ с формированием сигналов, отраженных от ПК лопастей РВ, имеет вид

$$u_{\text{пр.комп НВ}}(n) = u_{\text{l.pr}}(n) K_{\text{комп НВ}}(n), \quad (4) \\ n = \overline{0; N - 1}.$$

В сигнале, который описывается выражением (4), содержатся:

- сигналы, отраженные от ПК лопастей РВ;
- остатки компенсации сигналов, отраженных от ПК лопастей НВ;
- шумовая составляющая.

На рис. 8 оранжевым цветом показана весовая функция $K_{\text{комп НВ}}(n)$, $n = \overline{0, N - 1}$, обеспечивающая в соответствии с (4) компенсацию сигналов ПК лопастей НВ.

На рис. 9 изображена реальная часть принятого сигнала $u_{\text{пр.комп НВ}}(n) = u_{\text{l.pr}}(n) \times K_{\text{комп НВ}}(n)$ после компенсации сигнала ПК лопастей НВ. В этой временной реализации отчетливо наблюдаются сигналы $u_{\text{РВ пр}}(n)$, отраженные от ПК лопастей РВ.

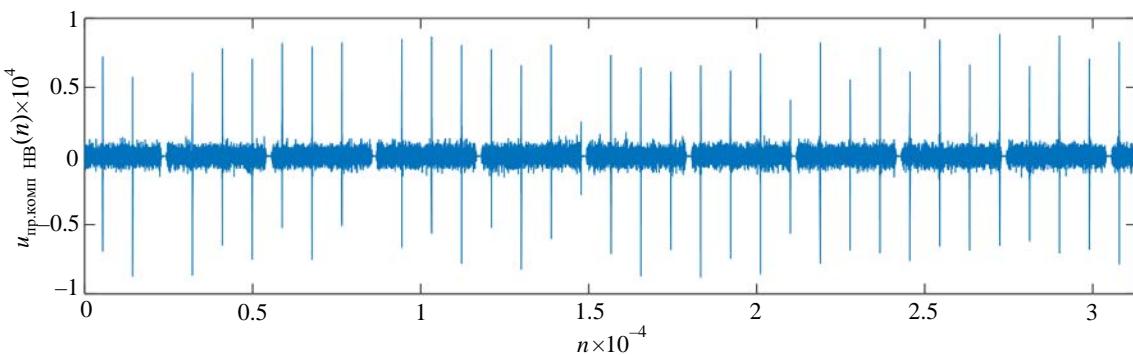


Рис. 9. Реальная часть сигнала, отраженного от приближающихся кромок лопастей вертолета Ми-8, после компенсации сигнала передних кромок НВ

Rис. 9. Real component of the signal reflected from the approaching edges of the Mi-8 helicopter blades, after compensation for the signal of the leading edges of the main rotor

При компенсации возможно подавление отдельных сигналов ПК лопастей РВ из-за их совмещения с сигналами ПК лопастей НВ. Для снижения влияния этого явления на качество формирования РЛИ ПК лопастей РВ используется сигнал длительностью в три и более периодов вращения РВ.

Заключение. НВ и РВ вертолета создают в отраженном сигнале составляющие с амплитудно-фазовой модуляцией, несущей информацию о конструктивных особенностях вертолета. Для извлечения этой информации требуется раздельная обработка сигналов от разных винтов.

Спектры сигналов, отраженных от НВ и РВ, имеют существенные различия в мощности и перекрываются. Частота вращения НВ вертолета составляет всего лишь единицы герц, а импульсы амплитудной модуляции имеют длительность, близкую к десятой доли миллисекунды. Следовательно, на коротком интервале времени, сопоставимом с десятыми долями секунды, отмеченные особенности исключают эффективное разделение сигналов НВ и РВ с использованием спектра принятого сигнала.

Анализ процедур, используемых при построении РЛИ лопастей винтов путем обращенного синтеза апертуры антенны, показал следующее. Во-первых, отражения от НВ существенно превалируют над отражениями от РВ. Это позволяет успешно выполнить адаптивное оценивание априорно неизвестного значения частоты вращения НВ и построить РЛИ передних кромок его лопастей. Необходимо отметить, что использование сигналов, отраженных только от передних или только от

задних кромок лопастей винтов, не имеет принципиального значения, а связано лишь с необходимостью установления определенности в принадлежности наблюдаемых импульсов амплитудной модуляции к приближающимся или удаляющимся кромкам лопастей. Во-вторых, РЛИ НВ, построенное по текущему временному фрагменту принятого сигнала, однозначно показывает положение всех лопастей НВ в этом фрагменте, который запоминается. Это позволяет на основе построенного РЛИ НВ сформировать во временной области весовую функцию, использование которой для обработки запомненного временного фрагмента принятого сигнала позволяет скомпенсировать сигналы ПК лопастей НВ в областях максимумов амплитудной модуляции. В данной статье представлен способ компенсации сигналов НВ во временной области, основанный на использовании модулей комплексных амплитуд опорных сигналов, формируемых в процессе построения РЛИ кромок лопастей НВ. Выражение (4) описывает алгоритм компенсации сигналов, отраженных от ПК лопастей НВ. После этапа компенсации во временной реализации принятого сигнала на фоне шума отчетливо наблюдаются только сигналы, отраженные от ПК лопастей РВ.

Предложенный способ несложен в реализации, так как использует сигналы виртуальных лопастей, сформированные при построении РЛИ НВ. Способ имеет высокую эффективность компенсации, что открывает новые возможности для адаптации к априорно неизвестным параметрам и построению РЛИ РВ.

Важно отметить, что разработанный способ компенсации сигналов, отраженных от кромок лопастей, может быть использован для обеспече-

ния раздельного анализа сигналов, отраженных от нескольких винтов любого летательного аппарата.

Список литературы

1. Гейстер А. С. Способ адаптивной когерентной компенсации сигнала, отраженного от корпуса автомобиля при обращенном синтезе апертуры антенны // Докл. БГУИР. 2013. № 4 (74). С. 56–60.
2. Гейстер А. С. Исследование способа адаптивной когерентной компенсации сигнала, отраженного от корпуса автомобиля при построении радиолокационного портрета колеса // Докл. БГУИР. 2013. № 8 (78). С. 71–75.
3. Гейстер С. Р., Пархоменко Н. Г., Гейстер А. С. Распознавание и измерение длины движущихся объектов в радиолокаторе с обращенным синтезом апертуры антенны // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16, № 11. С. 66–70.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / пер. с англ. Ю. К. Сальникова; под ред. В. В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
5. Бакулов П. А., Степин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
6. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию / пер. с англ. В. А. Ленсаченко. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
7. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю. И. Лосев, А. Г. Бердников, Э. Ш. Гойхман, Б. Д. Сизов; под ред. В. И. Лосева. М.: Радио и связь, 1988. 207 с.
8. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
9. Адаптивные фильтры / П. М. Грант, К. Ф. Н. Коунэн, Ф. Н. Фрилендер, Д. Р. Ипейчлер, Д. М. Тернер, Э. Р. Феррара мл., П. Ф. Адамс; пер с англ. под ред. К. Ф. Коуэна, П. М. Гранта. М.: Мир, 1988. 392 с.
10. Skolnik M. I. Radar Handbook. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2008. 1328 p.
11. Barton D. K., Leonov S. A. Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition). Boston, London: Artech House, 1998. 511 p.
12. Nathanson F. E. Radar design principles. 2nd ed. Raleigh: SciTech Publishing, 1999. 724 p.
13. Гейстер С. Р., Нгуен Т. Т. Экспериментальные исследования алгоритмов построения радиолокационных изображений винтов и способа измерения частоты следования лопастей // Докл. БГУИР. 2019. № 4 (122). С. 72–78.
14. Гейстер С. Р., Кириченко В. В. Способ двухэтапного радиолокационного измерения частоты следования лопастей винтовых летательных аппаратов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 3. С. 68–80.
doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-68-80
15. Гейстер С. Р., Нгуен Т. Т. Алгоритмы построения радиолокационного изображения винтов в горизонтальной и вертикальной плоскостях летательного аппарата в радиолокационном датчике с обращенным синтезом апертуры антенны // Докл. БГУИР. 2018. № 5 (115). С. 92–98.

Информация об авторах

Гейстер Сергей Романович – доктор технических наук (2004), профессор (2006), главный научный сотрудник ОАО "АЛЕВКУРП". Автор более 155 научных работ. Сфера научных интересов – построение радиотехнических систем различного назначения; радиолокационное распознавание; адаптивная обработка сигналов; радиоэлектронная защита.

Адрес: ОАО "АЛЕВКУРП", ул. Московская, д. 1а, Королев Стан, 223050, Республика Беларусь
E-mail: hsr_1960@yahoo.com, hsr_aero1960@mail.ru

Кириченко Валерий Викторович – старший научный сотрудник ОАО "АЛЕВКУРП". Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – формирование и обработка радиосигналов; моделирование реальных процессов и устройств.

Адрес: ОАО "АЛЕВКУРП", ул. Московская, д. 1а, Королев Стан, 223050, Республика Беларусь
E-mail: kirvv1964@yandex.ru

References

1. Heister A. S. Method for Adaptive Coherent Compensation of Signal Reflected from Car Body. *Doklady BGUR*. 2013, no. 4 (74), pp. 56–60. (In Russ.)
2. Heister A. S. The Results of Capability Studying of Method for Adaptive Coherent Compensation of Signal Reflected from Car Body in Application to Isar Imaging of Car Wheels. *Doklady BGUR*. 2013, no. 8 (78), pp. 71–75. (In Russ.)
3. Heister S. R., Parkhomenko N. G., Heister A. S. Recognition and Length Measurement of Moving Objects Using Inverse Synthetic Aperture Radars. Electromagnetic Waves and Electronic Systems. 2011, vol. 16, no. 11, pp. 66–70. (In Russ.)
4. Widrow B., Stearns S. Adaptive Signal Processing. New Jersey, Prentice-Hall, 1985, 474 p.

5. Bakulev P. A., Stepin V. M. *Metody i ustroistva selektsii dvizhushchikhsya tselei* [Methods and Devices for Selecting Moving Targets]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1986, 288 p. (In Russ.)
6. Monzingo R. A., Miller T. W. *Introduction to Adaptive Arrays*. New York, John Wiley & Sons, 1980, 543 p.
7. Losev Yu. I., Berdnikov A. G., Goikhman E. Sh., Sizov B. D. *Adaptive interference compensation in communication channels*. Ed. Losev V. I. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1988, 208 p. (In Russ.)
8. Shirman Ya. D., Manzhos V. N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoi informatsii na fone pomekh* [Theory and Technology of Processing Radar Information against a Background of Interference]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1981, 416 p. (In Russ.)
9. Adaptive filters. Ed by C. F. Cowan, P. M. Grant. New Jersey, Prentice-Hall, 1985, 308 p.
10. Skolnik M. I. *Radar Handbook*. 3rd ed. New York, McGraw-Hill Education, 2008, 1328 p.
11. Barton D. K., Leonov S. A. *Radar Technology Encyclopedia*. Boston, London, Artech House, 1998, 511 p.
12. Nathanson F. E. *Radar Design Principles*. 2nd ed. Raleigh, SciTech Publishing, 1999, 724 p.
13. Heister S. R., Nguyen T. T. *Experimental Studies of Radar Image Construction Algorithms for Propellers and Measurement Method for Repetition Frequencies of the Blades*. *Doklady BGUIR*. 2019, no. 4 (122), pp. 72–78. (In Russ.)
14. Heister S. R., Kirichenko V. V. *Method for Two-Stage Radar Measurement of the Blade Repetition Rate of a Propeller-Driven Aircraft*. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 68–80. (In Russ.)
doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-68-80
15. Heister S. R., Nguyen T. T. *Measurement Method for Repetition Frequencies of the Blades of an Aerial Vehicle on the Base of the Convolution of the "Secondary" Modulation Spectrum*. *Doklady BGUIR*. 2019, no. 1 (119), pp. 68–74. (In Russ.)

Information about the authors

Sergey R. Heister, Dr Sci. (Eng.) (2004), Professor (2006), Chief Researcher of the JSC "ALEVKURP". The author of more than 155 scientific. Area of expertise: construction of radio engineering systems for various purposes; radar recognition; adaptive signal processing; electronic defense.

Address: JSG "ALEVKURP", 1a, Moscow St., Korolev Stan 223050, Republic of Belarus
E-mail: hsr_1960@yahoo.com, hsr_aero1960@mail.ru

Valery V. Kirichenko, Senior Researcher at the JSC "ALEVKURP". The author of 15 scientific publications. Area of expertise: formation and processing of radio signals; simulation of real processes and devices.

Address: JSG "ALEVKURP", 1a, Moscow St., Korolev Stan 223050, Republic of Belarus
E-mail: kirvv1964@yandex.ru