

УДК.621.396:61

Н.Д. Рысаков, В.В. Куценко, И.Л. Костенко, И.В. Титов, А.П. Кулик

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## АЛГОРИТМ И УСЛОВИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ОТРАЖЕНИЙ В КОГЕРЕНТНОМ НАКОПИТЕЛЕ С ЛЮБЫМ ЧИСЛОМ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ РЛС АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ ПОСАДКИ САМОЛЕТА

*В работе обосновывается алгоритм и условия оптимальной доплеровской фильтрации отражений в когерентном накопителе (КН) с любым числом фильтров для РЛС автосопровождения посадки самолета. Также предлагается расчетная формула оптимальных весовых коэффициентов доплеровских фильтров для достижения минимального уровня боковых лепестков амплитудно-фазовых характеристик (АФХ) доплеровских фильтров. Рассчитаны и иллюстрируются боковые лепестки АФХ для КН из 8, 12, 16, 24, 32 и 36 фильтров. Оценен средний уровень боковых лепестков, свидетельствующий о достоверности предложений.*

**Ключевые слова:** весовые коэффициенты, доплеровские фильтры, фильтрация, амплитудно-фазовая характеристика, боковой лепесток.

### Введение

**Постановка проблемы.** Сложность реализации моноимпульсных способов пеленгации самолета на заключительном этапе посадки при плохой видимости ВПП состоит в сильном влиянии на точность пеленгации как отражений от земной поверхности, так и от метеоблаков. Компенсация такого влияния в РЛС автосопровождения является проблемной задачей.

**Анализ последних публикаций.** В работе [1] получены значения коэффициентов сглаживания боковых лепестков 16 доплеровских фильтров и обоснованы условия реализации оптимальной доплеровской фильтрации отражений в РЛС автосопровождения посадки самолета. В статье [2] обоснованы требования к точности измерения координат самолетов на заключительном этапе посадки в условиях плохой видимости ВПП. В работе [3] проанализирована возможность реализации моноимпульсных каналов пеленгации самолета в плоскостях курса и угла места двумя способами в предположении, что проблема компенсации мешающего влияния пассивных помех (ПП) решена.

**Формулировка целей статьи.** Предложить алгоритм и условия оптимальной доплеровской фильтрации отражений.

### Основная часть

Преимущества моноимпульсных способов определения угловых координат цели обуславливают целесообразность их реализации для обеспечения управления посадкой самолета в условиях плохой видимости ВПП. При этом компенсировать мешающее влияние пассивных помех (ПП) можно путем реализации в моноимпульсной РЛС (МРЛС) автосопровождения (АС) алгоритмов доплеровской фильтрации отражений с устранением неоднознач-

ности измерения угловых координат [3]. Эффективность обычной доплеровской фильтрации отражений в обзорных РЛС [4] ограничивается двумя факторами:

числом реализуемых доплеровских фильтров, ограничиваемым числом импульсов в пачке;

накоплением импульсов целей, движущихся с определенной (“слепой”) радиальной скоростью, вместе с ПП в нулевом доплеровском фильтре и необходимостью вобуляции периодом зондирования для уменьшения таких накоплений.

В РЛС автосопровождения самолета первое ограничение отсутствует, а для исключения накоплений в нулевом доплеровском фильтре импульсов целей можно оптимально подбирать значение периода зондирования РЛС на основе измерения радиальной скорости цели [1].

Поэтому в РЛС автосопровождения посадки самолета можно в когерентном накопителе (КН) существенно увеличить число доплеровских фильтров и реализовать оптимальное весовое накопление отраженных импульсов.

Уточним алгоритм и условия оптимальной доплеровской фильтрации с повышенным числом фильтров. В работе [1] применительно к РЛС автосопровождения самолета в зоне посадки предлагается осуществлять дискретное изменение значения периода зондирования таким образом, чтобы исключить накопления импульсов самолетов вместе с ПП в нулевом и в соседних с ним фильтрах.

Под *оптимальной доплеровской фильтрацией* предлагается называть не только дискретный подбор периода  $T_n$  [1], исключая проявление слепой скорости при СДЦ без вобуляции периода зондирования, но и реализацию оптимального весового накопления отражений с целью обеспечения минимального уровня боковых лепестков АФХ всех фильтров КН.

**1. Алгоритм и условия оптимальной доплеровской фильтрации с повышенным числом фильтров**

Первоначально убедимся, что увеличение числа доплеровских фильтров упрощает задачу оптимального выбора значения периода зондирования.

Из зависимости доплеровского набега фаз  $\varphi_c$  сигнала за период повторения  $T_{\Pi}$  от длины волны  $\lambda$  и радиальной составляющей скорости  $V_r$  самолета

$$\varphi_c = 4\pi \frac{V_r}{\lambda} T_{\Pi} \tag{1}$$

вытекает возможность регулирования значения набега  $\varphi_c$  путем подбора периода зондирования.

Действительно для исключения накоплений импульсов самолетов в нулевом и соседних с ним фильтрах доплеровский набег фаз должен удовлетворять условию:

$$\left(\frac{6}{N} + 2i\right)\pi \leq \varphi_c = \varphi_{opt} \leq \left(2 - \frac{6}{N} + 2i\right)\pi, \tag{2}$$

$i = 0, 1, 2, \dots$

Из условия (2) видно, что допустимые пределы изменения набега доплеровской фазы  $\Delta\varphi_{дол}$  с ростом числа фильтров увеличиваются

$$\Delta\varphi_{дол} = \left(2 - 12/N\right)\pi \tag{3}$$

и поэтому облегчается решение задачи подбора значения  $T_{\Pi}$  с целью исключения накоплений отраженных самолетом импульсов в названных фильтрах. На рис. 1 иллюстрируется зависимость значения допуска (3) от числа фильтров  $N$  на основе представления графиков  $K_i(\varphi_c)$  амплитудно-фазовых характеристик (АФХ) нулевого и соседних с ним фильтров ( $i = 0, 1, N-1$ ), в которых могут накапливаться ПП.

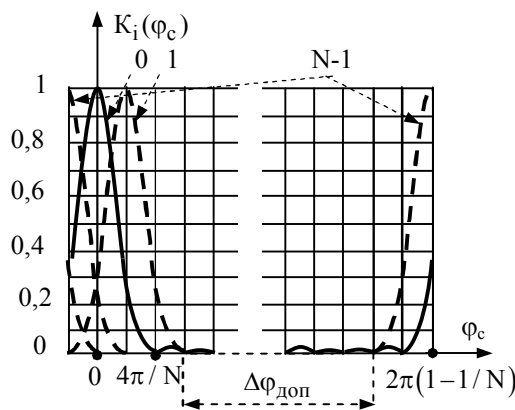


Рис. 1. Иллюстрация допуска доплеровского набега фаз  $\Delta\varphi_{дол}$  отраженных импульсов

Для выполнения условия (2) по измеренной  $V_r$  можно дискретно по мере изменения скорости  $V_r$  подбирать значение  $T_{\Pi}$  с соблюдением однозначности измерения дальности:

$$T_{\Pi} \geq 2D_{max}/C, \tag{4}$$

где  $C$  – скорость света;  $D_{max}$  – максимальная дальность действия РЛС.

В соответствии с выражением (1) условие (2) для любого числа  $N$  фильтров преобразуется к виду:

$$\left(\frac{6}{4N} + 0,5i\right) \leq V_r \frac{T_{\Pi}}{\lambda} \leq \left(0,5 - \frac{6}{4N} + 0,5i\right). \tag{5}$$

Из последнего выражения следует, что важным условием упрощения алгоритма работы синхронизатора локатора по оптимальному выбору значения  $T_{\Pi}$  для исключения накоплений отраженных самолетом импульсов в названных фильтрах является длина волны локатора – с увеличением  $\lambda$  число дискретных изменений периода  $T_{\Pi}$  по мере изменения скорости  $V_r$  в заданных пределах уменьшается.

Как известно, в зоне посадки по мере приближения к ВПП скорость самолета уменьшается в определенных для соответствующего класса самолетов пределах. По мере уменьшения скорости до определенного значения для выполнения условий (5) возникает необходимость дискретно изменять значение периода  $T_{\Pi}$ . Желательно необходимое число таких изменений за время управления посадкой самолета уменьшить. Как следует из (5), интервал скоростей  $\Delta V_c$  самолета, который при фиксированном  $T_{\Pi}$  удовлетворяет условию (5), увеличивается с ростом числа  $N$  фильтров и длины волны  $\lambda$  РЛС:

$$\Delta V_c \leq \left(0,5 - \frac{12}{4N}\right) \frac{\lambda}{T_{\Pi}}. \tag{6}$$

Исходим из того, что МРЛС АС входит в состав радиолокационного посадочного комплекса. Длину волну  $\lambda$  этого локатора нужно выбирать в выделенных для радиолокации диапазонах исходя из возможностей размещения ее антенны на каркасе (балки) крепления антенн посадочного радиолокатора. Поэтому примем  $\lambda = 3$  см.

Принцип подбора значений периода ( $T_{\Pi} = T_{\Pi j}$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots$ ), сводится к следующему:

1. В составе моноимпульсной РЛС измеритель скорости самолета  $V_c$  с определенной точностью  $\sigma_v$  измеряет скорость. Тогда измеренную скорость  $V_{изм}$  можно представить в виде:

$$V_{изм} = V_c \pm \sigma_v. \tag{7}$$

2. Диапазон  $\Delta V_{\Pi}$  возможного изменения посадочной скорости  $\Delta V_{\Pi} = (140 \div 45)$  м/с разбивается на перекрывающиеся интервалы (16)  $\Delta V_j$  скоростей (от начальной  $V_{нj}$  до конечной  $V_{кj}$ )

$$\Delta V_j = V_{нj} - V_{кj} = \left(0,5 - \frac{12}{4N}\right) \frac{\lambda}{T_{\Pi j}}. \tag{8}$$

и хранится в каналах памяти вычислителя.

3. Как следует из условий (4) и (5), первое и последующие значения  $T_{пj}$  периода  $T_{п}$  связаны с начальной скоростью  $V_{нj}$  соответствующего участка  $\Delta V_j$  и выбираются по принципу наименьшего числа  $i = 0, 1, 2, \dots$ , удовлетворяющего условию:

$$\frac{2D_{\max}}{C} \leq T_{пj} \leq \frac{\lambda}{V_{нj}} \left(0,5 - \frac{6}{4N} + 0,5i\right), \quad (9)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots; i = 0, 1, 2, \dots$$

4. При “размещении” интервалов  $\Delta V_j$  по диапазону  $\Delta V_{п}$  учитывается ошибка  $\sigma_v$  измерения скорости – начальное значение скорости  $V_{н(j+1)}$  последующего участка  $\Delta V_{(j+1)}$  скоростей связано с конечной скоростью  $V_{кj}$  участка  $\Delta V_j$  условием:

$$V_{н(j+1)} \geq V_{кj} + \sigma_v. \quad (10)$$

Будем исходить из того, что на удалениях самолета  $D_c$  от точки посадки  $D_c \leq 12$  км посадочные скорости  $V_c \approx V_r$  самолета могут изменяться от 140 м/с до 45 м/с.

При этом за первое значение начальной скорости  $V_{н1}$  интервала  $\Delta V_1$  для хранения в каналах памяти вычислителя принимается начальная скорость заданного диапазона  $\Delta V_{п}$ :  $V_{н1} = 140$  м/с.

Расчет второго и последующих интервалов скоростей  $\Delta V_j$  ( $j=1, 2, 3, \dots$ ) и соответствующих им периодов  $T_{пj}$  осуществляется по формулам (8), (9) и (10). В памяти вычислителя необходимо хранить значения  $\Delta V_j$  и  $T_{пj}$ , а также контрольные скорости  $V_{пj}$ , при которых вычислитель по результатам вычисления текущей скорости и ее сравнения с контрольными выдает команду синхронизатору на переход к следующему значению периода  $T_{п(j+1)}$ . Такие команды формируются при выполнении условия:

$$V_{изм} \leq V_{пj} = 0,5(V_{кj} + V_{н(j+1)}). \quad (11)$$

5. Тогда по результатам первого измерения скорости  $V_{изм1}$  вычислитель выдает команду синхронизатору по выбору в качестве первого значения  $T_{п1}$  периода зондирования при взятии самолета на автосопровождение, значения периода  $T_{пj}$ , соответствующего интервала  $\Delta V_j$  скоростей

$$\begin{aligned} V_{нj} &\geq V_{изм1} > V_{кj}, \\ T_{п1} &= T_{пj}. \end{aligned} \quad (12)$$

После выбора первого значения периода  $T_{п1}$  в соответствии с условием (11) вычислитель по результатам вычисления текущей скорости при выполнении условия (12) обеспечивает переход в синхронизаторе к формированию периода следующего значения, хранящегося в памяти.

Таким образом, в результате измерения текущей скорости самолета  $V_r$  вычислитель в периоды выполнения условия (12) выдает команду синхронизатору на изменение периода (и длительности) импульсов зондирования в последовательности:

$$T_{пj} \rightarrow T_{п(j+1)} \rightarrow T_{п(j+2)} \rightarrow,$$

где  $j$  – номер первого из хранящихся в запоминающем устройстве периода, выбранного по результатам первого измерения скорости.

Выполним расчет параметров адаптивной настройки КН в соответствии с описанной последовательностью для названных исходных данных:  $D_{\max}$ ,  $\lambda$ ,  $\Delta V_{п}$  и  $\sigma_v = 3$  м/с. Результаты такого расчета для накопителей с 8, 12, 16 и 24 фильтрами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета параметров адаптивной настройки когерентных накопителей

N	8	12	16	24
$\Delta V_1, \text{м/с}$	140÷119	140÷47	140÷33	150÷21
$T_{п1}, \text{мкс}$	174	80	87	87
$\Delta V_2, \text{м/с}$	122÷104	60÷18		
$T_{п2}, \text{мкс}$	199	180		
$\Delta V_3, \text{м/с}$	107÷64			
$T_{п3}, \text{мкс}$	87			
$\Delta V_4, \text{м/с}$	67÷41			
$T_{п4}, \text{мкс}$	139			

## 2. Алгоритм расчета значений оптимальных весовых коэффициентов для любого числа фильтров

Действительно при  $N = 12$  при таком диапазоне изменения посадочной скорости достаточно хранить в памяти вычислителя двух значений  $T_{п}$ , а при  $N = 16, 24$  или 36 оптимальная фильтрация сводится к правильному выбору единственного значения периода зондирования для заключительного этапа посадки.

Таким образом, МРЛС АС самолета для  $N = 8$  или  $N = 12$  в зоне посадки должна содержать измеритель скорости самолета и по результатам измерения скорости выбирать первое значение периода и по мере снижения скорости за пределы соответствующего интервала  $\Delta V_j$  выдавать синхронизатору команду на изменение периода зондирования  $T_{пj}$ . Возможный принцип построения такого измерителя предложен в работе [1] для КН из 16 фильтров и  $\lambda = 8$  мм. Этот принцип сохраняется для КН из любого числа фильтров. Перевод локатора в диапазон  $\lambda = 3$  см и реализация доплеровской фильтрации с числом 16, 24, 32 или 36 фильтров позволяет оптимизировать фильтрацию при одном расчетном значении периода зондирования.

Как отмечалось, вторым условием оптимальной фильтрации является реализация в КН оптимальных значений коэффициентов весового когерентного накопления. Проанализируем условия и получим расчетную формулу таких значений весовых коэффициентов для любого числа фильтров и проверим ее достоверность.

Будем исходить из того, что полученные оптимальные значения весовых коэффициентов для  $N=8$  доплеровских фильтров

$$k_1 = k_8, k_2 = k_7, k_3 = k_6, k_4 = k_5 = 1 \quad (13)$$

позволят получить алгоритм расчета значений весовых коэффициентов  $k_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) для любого числа  $N$  фильтров. Для такого расчета воспользуемся выражениями для квадратурных составляющих  $X_0(\varphi_c)$ ,  $Y_0(\varphi_c)$  АФХ нулевого фильтра [3,4]:

$$\begin{aligned} X_0(\varphi_c) &= \sum_{i=1}^N k_i \cos((i-1)\varphi_c); \\ Y_0(\varphi_c) &= \sum_{i=1}^N k_i \sin((i-1)\varphi_c), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\varphi_c$  – доплеровский набег фаз сигнала.

В соответствии с выражениями (14) и (13) получим соотношения для коэффициентов  $k_i$  ( $i=1, 2, \dots, N/2$ ), при которых значения квадратурных составляющих  $X_0(\varphi_c)$  и  $Y_0(\varphi_c)$  на фазах настройки второго ( $\varphi_c=90^\circ$ ) и третьего ( $\varphi_c=135^\circ$ ) фильтров при  $N=8$  равны нулю, то есть для условий:

$$X_0(90^\circ) = Y_0(90^\circ) = 0; \quad X_0(135^\circ) = Y_0(135^\circ) = 0.$$

Для  $\varphi_c=90^\circ$  и  $\varphi_c=135^\circ$  соответственно имеем:

$$\begin{aligned} k_3 &= 1 + k_1 - k_2; \\ 0,2929(k_1 - 1) + 0,7072(k_3 - k_2) &= 0; \\ 0,7072(k_1 - 1) + 1,7072(k_3 - k_2) &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя первое выражение во второе или третье выражения соотношений (15) получим:

$$\begin{aligned} k_2 &= 0,2929 + 0,7072k_1, \\ k_3 &= 0,7072 + 0,2929k_1. \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, выражения (16) позволяют получить значения коэффициентов  $k_2$  и  $k_3$ , если известно значение  $k_1$ . Под оптимальным значением  $k_1$  понимается значение, при котором достигается минимальный уровень боковых лепестков. Поэтому нужно проанализировать зависимость среднего уровня боковых лепестков от значения  $k_1$  и рассчитанных по формулам (16) значений  $k_2$  и  $k_3$ .

Для этого воспользуемся выражением АФХ нулевого фильтра [1,4]:

$$\begin{aligned} \varphi_c &= 0^\circ \rightarrow 180^\circ, \\ K_0(\varphi_c) &= \left(1 / \sum_{i=1}^N k_i\right) \cdot \sqrt{X_0^2(\varphi_c) + Y_0^2(\varphi_c)}, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $X_0(\varphi_c)$ ,  $Y_0(\varphi_c)$  – значения квадратурных составляющих принимаемого сигнала, рассчитываемых по формулам (14).

Расчет зависимости относительного среднего уровня боковых лепестков  $K_{\text{бл}}$  от значения  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  для  $N$  фильтров будем выполнять по формуле:

$$K_{\text{бл}} = 20 \left( \log \int_{2\pi/N}^{\pi} K_0(\varphi_c) d\varphi_c - \log \frac{2}{N} \pi \right). \quad (18)$$

С учетом выражений для квадратурных составляющих сигнала (14), взаимосвязи весовых коэффициентов (13) и (16) для  $N=8$  и для АФХ (17) по формуле (18) убеждаемся, что минимальное значение относительного среднего уровня боковых лепестков принимает значение

$$K_{\text{бл}} \approx -49,2 \text{ дБ}, \quad (19)$$

при  $k_1 = k_8 = \mathbf{0,1}$ . Тогда по формулам (16) получим  $k_2 = k_7 = \mathbf{0,364}$  и  $k_3 = k_6 = \mathbf{0,736}$ .

Очевидно, что для упрощения алгоритма работы когерентного накопителя можно осуществлять округление расчетных значений весовых коэффициентов  $k_i$  до двух или до одного знака после запятой. Для оценки влияния такого округления на уровень боковых лепестков был проведен расчет значений  $K_{\text{бл}}$  для 4 вариантов значений весовых коэффициентов  $k_i$ . Результаты расчета приведены в таблице 2, где вариант 3 соответствует значениям весовых коэффициентов, реализованным в РЛС 19ЖБ [4], а вариант 4 соответствует единичным значениям коэффициентов (вариант без сглаживания боковых лепестков).

В силу симметрии графиков АФХ любого фильтра относительно фазы его настройки зависимость уровня боковых лепестков от значений весовых коэффициентов можно иллюстрировать для одной симметричной половины. Для нулевого доплеровского фильтра накопителя из 8 фильтров на (рис. 2) приведены графики боковых лепестков АФХ  $K_0(j_c)$  для этих вариантов значений весовых коэффициентов.

Таблица 2

Зависимость среднего уровня боковых лепестков АФХ КН из 8 фильтров от значений весовых коэффициентов

Вариант	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$K_{\text{бл}}, \text{дБ}$
1	0,1	0,364	0,736	-49,2
2	0,1	0,36	0,74	-48,9
3	0,15	0,4	0,75	-42,2
4	$k_i = 1, i = 1, 2, \dots, 8$			-21,2

Из анализа значений (табл. 2) и графиков (рис. 2) следует:

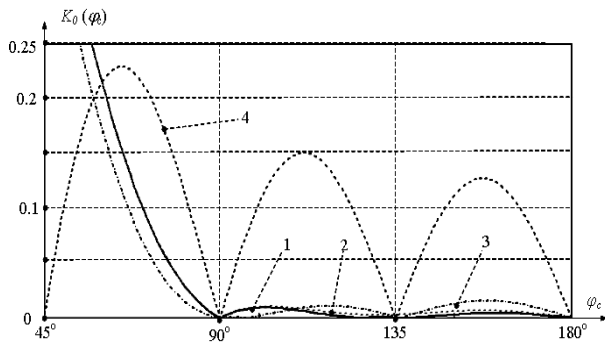


Рис. 2. Графіки АФХ нулевого фільтра для накопичувача з 8 доплерівських фільтрів

- округлення розрахункових коефіцієнтів до другого знака після коми несуттєво (на 0,3дБ) підвищує середній рівень бокових лепестків;

- реалізовані значення вагових коефіцієнтів в РЛС 19Ж6 не є оптимальними – реалізація коефіцієнтів 1-го або 2-го варіантів дозволить знизити рівень бокових лепестків на 7 дБ або 6,7 дБ.

Для отримання розрахункової формули оптимальних значень вагових коефіцієнтів використаємо отримані три значення оптимальних коефіцієнтів для 8 фільтрів. Розрахункове вираження представимо в вигляді:

$$\begin{cases} i = 1, 2, 3, 4, j = 9 - i, x_i = 1 - (2i - 1)/8; \\ k_i = k_j = \exp(a(x_i - 1/N) + b(x_i^2 - 1/N^2) + c(x_i^3 - 1/N^3)). \end{cases} \quad (20)$$

Тоді для трьох значень коефіцієнтів  $k_i = k_j$  (0,1; 0,364; 0,736) на основі вираження (20) отримуємо наступну систему з трьох рівнянь:

$$\begin{cases} 0,1 = \exp(0,75a + 0,75b + 0,66796875c), \\ 0,364 = \exp(0,5a + 0,375b + 0,2421875c), \\ 0,736 = \exp(0,25a + 0,125b + 0,05078125c). \end{cases}$$

В результаті рішення даної системи рівнянь отримуємо:

$$a = -0,366; b = -0,896; c = -2,03.$$

Тоді алгоритм розрахунку значень вагових коефіцієнтів  $k_i = k_j$  для будь-якого числа  $N$  фільтрів приймає аналогічний з (20) вигляд:

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}, j = N + 1 - i, x_i = 1 - \frac{2i - 1}{N}; \\ k_i = k_j = \exp(-0,366(x_i - \frac{1}{N}) - 0,896(x_i^2 - \frac{1}{N^2}) - 2,03(x_i^3 - \frac{1}{N^3})), \end{cases} \quad (21)$$

де  $i, j$  – номери вагових коефіцієнтів;  $x_i$  – аргумент розрахункового вираження вагового коефіцієнта  $k_i$ . Результати розрахунку значень вагових коефіцієнтів за алгоритмом (21) для  $N = 12, 16, 24, 32$  і  $36$  наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Значення оптимальних вагових коефіцієнтів

N	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>
12	0,073	0,203	0,413	0,659	0,868	1
16	0,062	0,142	0,27	0,439	0,622	0,789
	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>	k <sub>9</sub>	k <sub>10</sub>	k <sub>11</sub>	k <sub>12</sub>
24	0,917	1	1	0,917	0,789	0,622
	0,053	0,095	0,159	0,243	0,347	0,464
32	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>	k <sub>9</sub>	k <sub>10</sub>	k <sub>11</sub>	k <sub>12</sub>
	0,586	0,702	0,805	0,89	0,954	1
36	0,048	0,077	0,116	0,167	0,231	0,305
	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>	k <sub>9</sub>	k <sub>10</sub>	k <sub>11</sub>	k <sub>12</sub>
	0,388	0,402	0,477	0,568	0,657	0,74
	k <sub>13</sub>	k <sub>14</sub>	k <sub>15</sub>	k <sub>16</sub>	k <sub>17</sub>	k <sub>18</sub>
36	0,813	0,877	0,928	0,969	1	0,969
	0,047	0,071	0,104	0,146	0,197	0,256
	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>	k <sub>9</sub>	k <sub>10</sub>	k <sub>11</sub>	k <sub>12</sub>
	0,327	0,402	0,482	0,562	0,641	0,716
36	k <sub>13</sub>	k <sub>14</sub>	k <sub>15</sub>	k <sub>16</sub>	k <sub>17</sub>	k <sub>18</sub>
	0,785	0,845	0,897	0,939	0,973	1

Графіки бокових лепестків АФХ нулевого фільтра для  $N > 8$  фільтрів розрахункових коефіцієнтів (табл. 3) за алгоритмом (21) наведені на рис. 3.

Результати розрахунку середнього рівня бокових лепестків в залежності від значень розрахункових і округлених до другого знака коефіцієнтів для різних  $N$  наведені в табл. 4.

Аналіз графіків (рис. 3) і значень  $K_{бл}$  (табл. 4) дозволяє передположити, що:

- запропонований алгоритм (21) розрахунку вагових коефіцієнтів дозволяє отримати близькі до оптимальних значення цих коефіцієнтів;

Таблиця 4

Результати розрахунку середнього рівня бокових лепестків АФХ оптимальних фільтрів

N	Значення k <sub>i</sub>	K <sub>бл</sub> , дБ
12	Опт.(табл.3)	-49,52
	Округленні	-49,66
	Єдиничні	-23,54
16	Опт.(табл.3)	-49,64
	Округленні	-49,49
	Єдиничні	-25,29
24	Опт.(табл.3)	-51,57
	Округленні	-51,07
	Єдиничні	-27,74
32	Опт.(табл.3)	-53,11
	Округленні	-52,67
	Єдиничні	-28,99
36	Опт.(табл.3)	-53,69
	Округленні	-53,24
	Єдиничні	-30,23

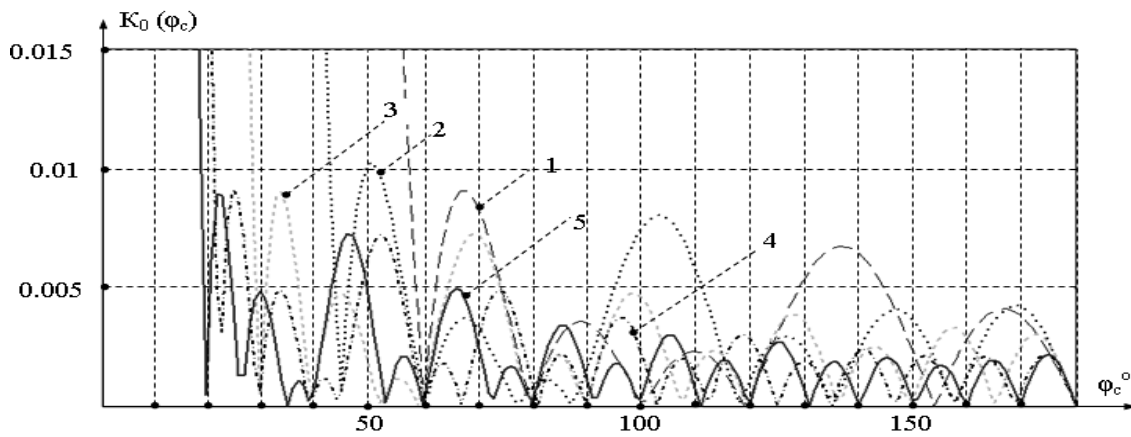


Рис. 3. Графики АФХ нулевого доплеровского фильтра для когерентного накопителя из 12 (кривая 1), 16 (2), 24 (3), 32 (4) и 36 (5) фильтров

- уменьшение относительного среднего уровня боковых лепестков (по отношению к уровню для единичных коэффициентов) при увеличении числа – доплеровских фильтров (табл. 4) связано с уменьшением этого уровня при единичных коэффициентах;

- округление значений весовых коэффициентов до второго знака после запятой вполне приемлемо – ведет к незначительному повышению среднего уровня боковых лепестков ( $\leq 0,5$  дБ), а для 12 фильтров такое округление даже снижает уровень боковых лепестков на 0,14 дБ.

## Выводы

МРЛС АС трехсантиметрового диапазона с когерентным накопителем из  $N \geq 16$  доплеровских фильтров позволяет оптимизировать фильтрацию при одном расчетном значении периода зондирования.

Предложенная расчетная формула весовых коэффициентов может представлять интерес для разработчиков когерентных накопителей с увеличенным числом фильтров.

## АЛГОРИТМ ТА УМОВИ ОПТИМАЛЬНОЇ ДОПЛЕРІВСЬКОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНЬ У КОГЕРЕНТНОМУ НАКОПИЧУВАЧІ З БУДЬ-ЯКИМ ЧИСЛОМ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ РЛС АВТОСУПРОВОДУ ПОСАДКИ ЛІТАКА

М.Д. Рысаков, В.В. Куценко, І.І. Костенко, І.В. Тітов, А.П. Кулик

У роботі обґрунтовано алгоритм та умови оптимальної доплерівської фільтрації відображень у когерентному накопичувачі (КН) з будь-яким числом фільтрів для РЛС автосупроводу посадки літака. Також пропонується розрахункова формула оптимальних вагових коефіцієнтів доплерівських фільтрів для досягнення мінімального рівня бічних пелюсток амплітудно-фазових характеристик (АФХ) доплерівських фільтрів. Розраховані та ілюструються бічні пелюстки АФХ для КН з 8, 12, 16, 24, 32 і 36 фільтрів. Оцінено середній рівень бокових пелюсток, що свідчить про достовірність пропозиції.

**Ключові слова:** вагові коефіцієнти, доплерівські фільтри, фільтрація, амплітудно-фазова характеристика, бічного пелюстка.

## ALGORITHM AND CONDITIONS FOR OPTIMAL DOPPLER FILTERING REFLECTIONS IN THE COHERENT DRIVE WITH ANY NUMBER OF FILTERS FOR RLS AUTOTRACKING LANDING

N.D. Rysakov, V.V. Kutsenko, I.I. Kostenko, I.V. Titov, A.P. Kulik

In work it is proved algorithm and conditions for optimal Doppler filtering reflections in the coherent drive (CD) with any number of filters for RLS autotracking landing. Also offered a formula for calculation of optimal weighting coefficients Doppler filters to achieve a minimum level of side lobes of the amplitude-phase characteristics (APC) Doppler filters. Designed and illustrated lateral petals APC CD of 8, 12, 16, 24, 32 and 36 of filters. Estimated average level of lateral petals, testifying to the authenticity of the proposals.

**Keywords:** weights, Doppler filters, filtering, amplitude-phase characteristics, lateral petal.

## Список литературы

1. Куценко В.В. Особенности реализации доплеровской фильтрации отраженных импульсов в моноимпульсной РЛС автосопровождения самолета на заключительном этапе посадки / В.В. Куценко // Наука і техніка Повітряних Сил ЗСУ. – Х.: ХУПС, 2012. – № 1(7). – С. 85-89.

2. Рысаков Н.Д. Анализ возможности реализации в составе радиолокационного посадочного комплекса моноимпульсного канала автосопровождения самолета на заключительном этапе посадки / Н.Д. Рысаков, В.В. Куценко, И.В. Титов, С.А. Макаров // Системи управління, навігації та зв'язку". – 2011. – Вип. 4(20). – С. 57-61.

3. Рысаков Н.Д. Требования к точности измерения координат посадочным радиолокатором для обеспечения посадки самолетов в условиях плохой видимости ВПП / Н.Д. Рысаков, И.В. Титов, А.П. Кулик // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2011. – № 2(92). – С. 133-136.

4. Озброєння та військова техніка РТВ. Побудова РЛС 19Ж6: навч. посіб. Ч. 2 / Д.А. Гриб, В.П. Голованов, В.Й. Климченко та інші. – Х.: ХУПС, 2008. – 300 с.

Поступила в редколлегию 23.01.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Ермаков, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.