

УДК 621.396.96

Залевский А. П.¹, Пиза Д. М.², Пресняк И. С.³, Сиренко А. С.⁴

¹Канд. техн. наук, доцент кафедры Запорожского национального технического университета

²Д-р техн. наук, профессор Запорожского национального технического университета

³Директор КП НПК «Искра»

⁴Ст. преподаватель Запорожского национального технического университета

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ И ВРЕМЯ-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ В КОГЕРЕНТНО-ИМПУЛЬСНЫХ РЛС

В статье рассмотрены принципы построения систем защиты от комбинированных помех РЛС обзора воздушного пространства З6Д6 и 80К6. Проанализированы алгоритмы работы систем помехозащиты обеих РЛС. Проведена оценка эффективности обеих систем методом моделирования с использованием реальных помеховых сигналов, записанных в полигонных условиях. Показаны преимущества и недостатки систем.

Ключевые слова: радиолокация, помехозащищенность, комбинированные помехи, пространственно-временная обработка, время-пространственная обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее конкурентоспособной среди радиолокационных станций (РЛС) украинского производства на зарубежном рынке вооружений оказалась трехкоординатная РЛС З6Д6. РЛС используется в системах противоздушной обороны многих стран мира. Одной из причин

высокого спроса среди стран-потребителей явилась высокая помехозащищенность в условиях одновременного воздействия активных и пассивных помех.

В настоящее время в НПК «Искра» разработана и запущена в производство новая когерентно-импульсная РЛС 80К6, которая также имеет спрос на мировом рынке

вооружений. Одной из принципиальных особенностей построения последней является использование время-пространственной фильтрации полезных сигналов на фоне помех в отличие от пространственно-временной фильтрации в РЛС 36Д6. В связи с вышеизложенным, представляется целесообразным провести сравнительный анализ построения и оценить эффективность пространственно-временной и время-пространственной фильтрации сигналов в РЛС 36Д6 и 80К6 как наиболее конкурентоспособных на зарубежных рынках.

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ

Схема помехозащиты РЛС 36Д6 [1] имеет последовательную структуру с пространственным или поляризационным фильтром, расположенным на первой ступени фильтрации и временным фильтром – на второй (рис. 1).

Пространственный фильтр используется для защиты от активной помехи, принимаемой боковыми лепестками диаграммы направленности антенны, а поляризационный – для защиты главного лепестка. В качестве элемента адаптации пространственного и поляризационного фильтра используется квадратурный автокомпенсатор (АКП) с корреляционной обратной связью [2], структурная схема которого приведена на рис. 2.

Напряжение на выходе АКП описывается выражением (1), а весовой коэффициент \dot{K} – выражением (2):

$$\dot{U}_\Sigma = \dot{U}_0 - \dot{K}\dot{U}_1, \tag{1}$$

$$\dot{K} = \frac{\overline{\chi \dot{U}_0 \dot{U}_1^*}}{1 + \chi |\dot{U}_1|^2}, \tag{2}$$

где \dot{U}_0 и \dot{U}_1 – сигналы основного и компенсационного каналов, соответственно; \dot{K} – весовой коэффициент АКП, χ – коэффициент, учитывающий глубину обратной связи; * – операция комплексного сопряжения.

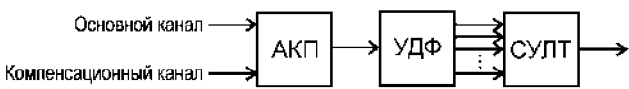


Рис. 1. Упрощенная структурная схема системы помехозащиты РЛС 36Д6

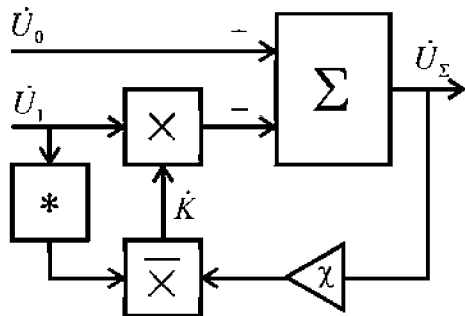


Рис. 2. Структурная схема автокомпенсатора с корреляционной обратной связью

Если $\chi \rightarrow \infty$, то единицей в знаменателе выражения (2) можно пренебречь. В таком случае оно преобразуется к виду (3):

$$\dot{K} = \frac{\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_1^*}}{|\dot{U}_1|^2} \tag{3}$$

Алгоритм работы автокомпенсатора в соответствии с выражением (3) называют алгоритмом с прямым вычислением весовых коэффициентов. В случае достаточной корреляции между входными сигналами \dot{U}_0 и \dot{U}_1 при использовании любого из алгоритмов будет иметь место компенсация помехи.

Обновление весового коэффициента автокомпенсатора в системе помехозащиты РЛС 36Д6 производится по сигналам, принимаемым за пределами развертки дальности, что необходимо для снижения вероятности настройки весового коэффициента на сигналы пассивной помехи. Сформированный весовой коэффициент используется для компенсации помехи в следующем периоде зондирования или в следующей частотной пачке в зависимости от режима работы системы помехозащиты.

С выхода АКП сигнал поступает на временную обработку, которая состоит из устройства доплеровской фильтрации (УДФ) с устройством стабилизации уровня ложных тревог (СУЛТ). УДФ использует алгоритм взвешенного дискретного преобразования Фурье (4), которое выполняется по каждому из дискретов дальности в частотной пачке:

$$\dot{X}_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n \dot{x}_i(nT_{II}) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} nk\right), \tag{4}$$

где $\dot{X}_i(k)$ – значение сигнала на выходе k -го доплеровского фильтра в i -ом дискрете дальности, w_n – значение n -го элемента весовой функции (окна), $\dot{x}_i(nT_{II})$ – значение сигнала в i -ом дискрете дальности n -го периода повторения T_{II} в частотной пачке из N периодов.

После временной обработки в УДФ выходные сигналы доплеровских фильтров поступают в устройство стабилизации уровня ложных тревог, где принимается решение о принадлежности обнаруженного на фоне шумов сигнала к классу пассивных помех или целей в каждом дискрете дальности.

Суть время-пространственной фильтрации состоит в следующем. Вначале сигналы основного и компенсационного каналов подвергаются обработке в многоканальном доплеровском фильтре (4). Затем выбирается фильтровой канал наименее подверженный влиянию пассивных помех, по выходному сигналу которого и выполняется настройка (адаптация) весового коэффициента автокомпенсатора активной помехи [3]. Формирование весового коэффициента осуществляется в пределах текущей частотной пачки по информации фазового фильтра, в котором априорная вероятность нахождения

пассивных помех наименьшая, а компенсация активной составляющей комбинированной помехи в пределах частотной пачки выполняется с использованием адаптивного весового коэффициента, сформированного в этой же самой частотной пачке.

Структурная схема системы время-пространственной обработки, приведена на рис. 3. Система работает следующим образом. С приемников основного и компенсационного каналов РЛС на входы устройств временной фильтрации основного 1 и компенсационного каналов 2 поступают сигналы, отраженные от аэродинамических целей, мешающих объектов (пассивных помех) и шумовые помехи, которые могут излучаться специальными устройствами. С помощью устройств временной фильтрации 1 и 2 происходит когерентное накопление и распределение по фазовым фильтрам смеси принимаемых сигналов и помех.

Временная фильтрация выполняется с помощью процедуры дискретного преобразования Фурье (2) с когерентным накоплением сигналов в каждом фильтровом канале. Распределенные по фазовым фильтрам сигналы основного и компенсационного каналов, поступают к устройствам памяти основного 3 и компенсационного 4 каналов, где задерживаются на время расчета весового коэффициента в формирователе, чтобы рассчитанный весовой коэффициент был использован для компенсации помехи в той частотной пачке, на основании которой производился его расчет. В процессе пространственной фильтрации рассчитываются весовые коэффициенты для компенсации активной составляющей комбинированной помехи в каждой частотной пачке.

При расчете весовых коэффициентов в формирователе весового коэффициента 6 автокомпенсатора 5 используется информация фазовых фильтров, априорная вероятность нахождения пассивных помех в которых наименьшая (например, фазовый фильтр с номером $N/2$, где накапливаются сигналы с межпериодной разностью фаз 180 градусов). Это делается для снижения вероятности настройки автокомпенсатора на пассивную составляющую комбинированной помехи.

На время расчета весового коэффициента в формирователе 6, устройство синхронизации 11 переводит запоминающие устройства 3, 4, в режим передачи информации фазовых фильтров, с номерами $N/2$, на соответ-

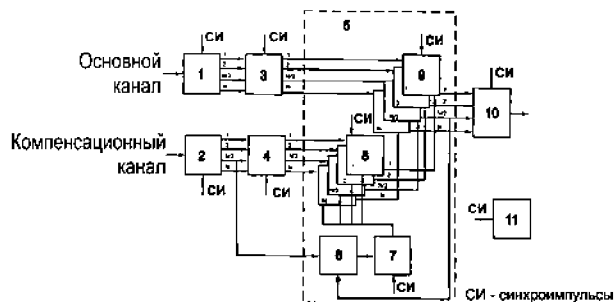


Рис. 3. Структурная схема системы время-пространственной обработки

ствующие входы автокомпенсатора 5, а запоминающее устройство 7 в режим формирования весового коэффициента. Для работы устройства адаптивного формирования весового коэффициента 6, использован алгоритм прямого вычисления весовых коэффициентов (3). После вычисления весового коэффициента устройство синхронизации 11 переводит устройство памяти весового коэффициента 7 в режим запоминания весового коэффициента до последующей процедуры адаптации, а устройства памяти 3 и 4 – в режим передачи по всем N каналам. При этом сигналы с выхода устройства памяти 4 компенсационного канала в N умножителях 8 умножаются на сохраненное в запоминающем устройстве 7 значение весового коэффициента. Результат умножения по каждому из фазовых фильтров поступает ко второму входу соответствующего сумматора 9, где складывается с информацией с выхода соответствующих фильтров основного канала. Такие вычисления проводят для каждого дискрета дальности текущей частотной пачки. Таким образом проводится процедура пространственной фильтрации и получают распределенные по фазовым фильтрам сигналы, в которых скомпенсирована активная составляющая комбинированной помехи.

Информация с выходов сумматора 9 поступает на устройство обработки 10, в котором происходит подавление пассивных помех, обнаружение сигналов, отраженных от целей. Для синхронизации работы всех блоков системы во времени с устройства синхронизации 11 поступают синхроимпульсы на каждый блок системы обработки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для принятия решения о возможной модернизации РЛС 36Д6, представляло интерес провести сравнение эффективности систем помехозащиты упомянутых РЛС в условиях максимально приближенным к полигонным. При этом сравнительную оценку эффективности различных вариантов построения систем помехозащиты необходимо провести в различных режимах работы радаров как при воздействии активных помех, так и при одновременном воздействии активных и пассивных помех.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оценка эффективности обеих систем проводилась методом моделирования с использованием реальных помеховых сигналов, записанных в полигонных условиях на РЛС 36Д6. Это дало возможность учесть влияние интерференции активных помех на эффективность их подавления при сканировании антенной системы РЛС [4, 5]. Моделирование проведено при различных значениях частоты повторения импульсов (ЧПИ) РЛС 36Д6 и различных темпах обзора (5 и 10 с). Особое внимание при моделировании уделено режимам при межпачечной адаптации пространственного фильтра (ПФ) РЛС 36Д6, а также особенности адаптации время-пространственного фильтра (ВПФ) с учетом накопления сигналов во временном фильтре. При моделировании обеих

систем помехозащиты предполагалось, что амплитудно- и фазочастотные характеристики каналов приема ПФ идентичны. В качестве критерия эффективности использован коэффициент подавления активной составляющей комбинированной помехи.

Результаты моделирования в координатах коэффициент подавления K_{Π} – номер доплеровского фильтра n приведены на рис. 4 и 5 для пространственно-временного фильтра (ПВФ) и ВПФ, соответственно. При этом уровень активной шумовой помехи на входах ПФ в обоих

случаях задавался равным 30 дБ над уровнем собственных шумов приемных каналов.

Из анализа рис. 4 следует, что эффективность ПВФ выше в режиме внутривыпечной адаптации по сравнению с межвыпечной. Это объясняется меньшими межканальными изменениями амплитуд и фаз, возникающими вследствие интерференции помеховых сигналов, при меньших интервалах между самонастройками фильтра. Таким же образом объясняется ухудшение коэффициента подавления при уменьшении ЧПИ в режимах редкий и сверхредкий.

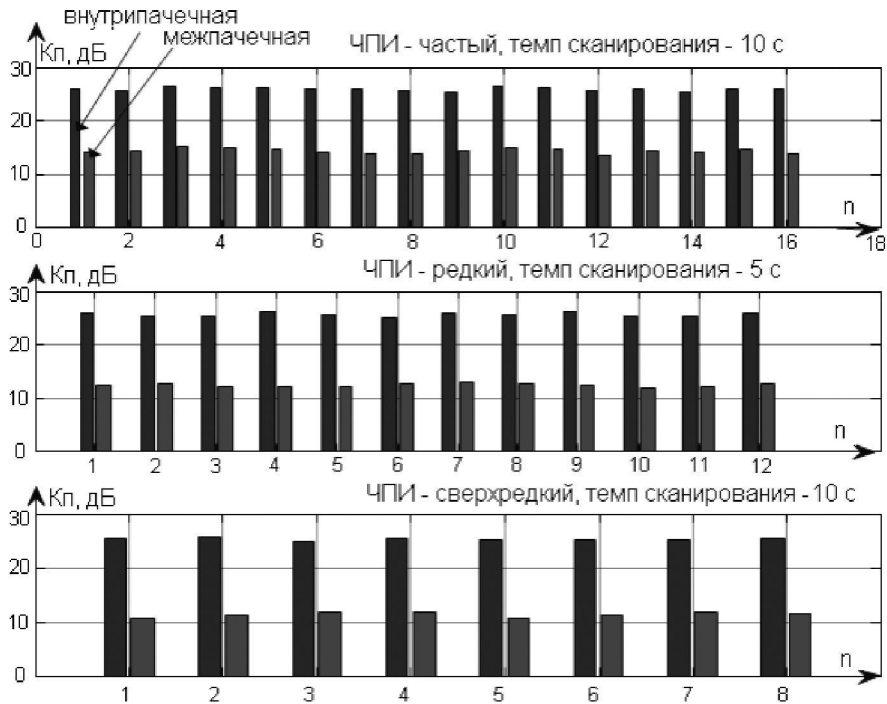


Рис. 4. Коэффициент подавления активной помехи K_{Π} на выходе ПВФ

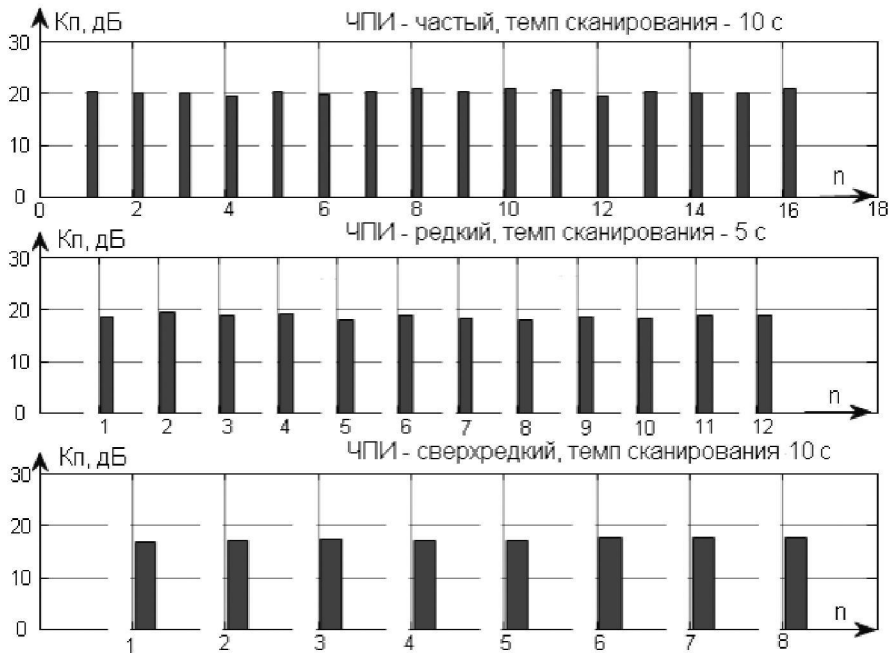


Рис. 5. Коэффициент подавления K_{Π} активной помехи на выходе ВПФ

Из сравнения рис. 4 и рис. 5 следует, что эффективность ПФ при внутривыпачечной адаптации выше, чем ВПФ. Однако, ВПФ имеет большую эффективность, чем ПФ при межвыпачечной адаптации. Учитывая то обстоятельство, что при обоих способах построения систем помехозащиты весовые коэффициенты ПФ внутри выпачки остаются неизменными, возможной причиной увеличения эффективности ВПФ может быть формирование весовых коэффициентов ПФ по усредненным значениям помеховых сигналов в основном и компенсационном каналах приема после преобразования Фурье во временных фильтрах. При проведении дальнейших исследований необходимо либо подтвердить, либо опровергнуть озвученную гипотезу.

На рис. 6 представлена сравнительная оценка эффективности обеих систем помехозащиты при одновременном воздействии активной шумовой помехи интенсивностью 34 и 40 дБ и пассивной помехи с переменным уровнем. При этом пассивная помеха моделировалась непрерывной по развертке дальности, а интерференция активной помехи не учитывалась.

Из рис. 6 следует, что при больших относительных уровнях пассивной помехи ВПФ имеет преимущество перед ПФ. Это объясняется его адаптацией в частотной области после преобразования Фурье путем выбора фильтрового канала с минимальным уровнем пассивной помехи. Снижение эффективности ПФ обусловлено межканальной декорреляцией при воздействии пассивной помехи. Однако, при модернизации РЛС 36Дб возможно применение алгоритмов с выбором интервала адаптации ПФ, на котором пассивная помеха отсутствует вследствие ее нестационарности. Снижение эффективности ВПФ при радиальной составляющей скорости помех $V_z \neq 0$ объясняется просачиванием пассивной помехи через боковые лепестки фильтров при Фурье-преобразовании.

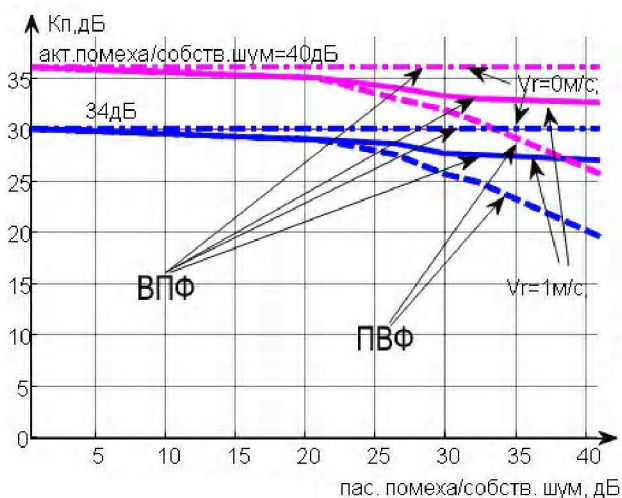


Рис. 6. Зависимость коэффициента подавления активной помехи от уровня пассивной помехи

ВЫВОДЫ

1. Эффективность пространственно-временного фильтра при внутривыпачечной адаптации выше, чем при межвыпачечной. Это обусловлено меньшими межканальными изменениями амплитуд и фаз, возникающими вследствие интерференции активных помех, при меньших интервалах между самонастройками пространственного фильтра.

2. При межвыпачечной адаптации весовых коэффициентов эффективность пространственно-временного фильтра ниже чем время-пространственного. Возможной причиной большей эффективности время-пространственного фильтра может быть формирование весовых коэффициентов по усредненным (после преобразования Фурье) значениям помеховых сигналов.

3. При больших относительных уровнях пассивной помехи время-пространственный фильтр имеет преимущество перед пространственно-временным при подавлении активных помех. Это достигается адаптацией весового коэффициента время-пространственного фильтра в частотной области с выбором фильтрового канала с минимальным уровнем пассивной помехи. Ограничением эффективности время-пространственного фильтра является просачивание пассивной помехи через боковые лепестки смежных фильтров.

4. При проведении дальнейших исследований для повышения эффективности пространственно-временных фильтров, в условиях воздействия комбинированных помех, необходимо учесть естественную нестационарность пассивной помехи путем выбора интервала дальности, на котором она отсутствует, для адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиолокационная станция 36ДбМ. Эксплуатация и техническое обслуживание. Учебное пособие / [Май И. Д., Каспирович А. Г., Винник В. А. и др.]. – Запорожье : КП «НПК «Искра», 2006. – 140 с.
2. Ширман, Я. Д. Теоретические основы радиолокации. Учебное пособие для вузов / Я. Д. Ширман. – М. : Советское радио, 1970. – 560 с.
3. Пат. 48705 Україна МПК⁹ G01S 7/36, H04B 15/00 Спосіб компенсації активної складової комбінованої завади [Електронний ресурс] / Кононович В. Я. (UA); Кукольницький А. П. (UA); Залевський О. П. (UA); Каспирович О. Г. (UA); Мейстер Ю. Л. (UA); Денека А. А. (UA); заявник і патентовласник: Казенне Підприємство «Науково-Виробничий Комплекс «Іскра» (UA). – Заявл. 06.11.2009; опубл. – 25.03.2010. – Режим доступу: <http://base.ukrpatent.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=143619&chapter=description>
4. Пиза, Д. М. Особенности адаптации пространственных фильтров при воздействии комбинированных помех [Текст] / Д. М. Пиза, А. П. Залевский // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2005. – № 1. – С. 45–48.
5. Создание и исследование алгоритмов пространственно-(поляризационно-)временной обработки сигналов в радиотехнических системах в условиях воздействия комбинированных помех [Текст] : отчет о НИР (закл.) : ДБ 05813; научн. рук. Пиза Д.М. – ЗНТУ, 2005. – 52 с.

Стаття надійшла до редакції 06.09.2012.

Залевський О. П., Піза Д. М., Пресняк І. С., Сіренко А. С.
ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ
ТА ЧАСО-ПРОСТОРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ В КО-
ГЕРЕНТНО-ІМПУЛЬСНИХ РЛС

У статті розглянуто принципи побудови систем захисту від комбінованих завад РЛС огляду повітряного простору 36Д6 і 80К6. Проаналізовано алгоритми роботи систем завадо захищеності обох РЛС. Проведено оцінку ефективності обох систем методом моделювання з використанням реальних завадових сигналів, які були записані в полігонних умовах. Показано переваги і недоліки обох систем.

Ключові слова: радіолокація, завадозахищеність, комбіновані завади, просторово-часова обробка, часо-просторова обробка.

Zalevsky O. P., Piza D.M., Presnyak I.S., Sirenko A.S.

COHERENT-PULSE RADAR SIGNALS SPACE-TIME
AND TIME-SPACE FILTERING PERFORMANCE
EVALUATION

The article describes the electronic counter-countermeasures of 36D6 and 80K6 air surveillance radars in jamming and clutter conditions. The algorithm of space-time processing that uses jamming signal cancelling at the first stage and Doppler filtering at the second one has been described. The algorithm of time-space processing that performs main and auxiliary channel signals Doppler filtering at the first stage has also been described. Jammer signal cancelling is performed in frequency domain at the second stage. The efficacy of both systems by simulation using actual interference signals recorded in real life conditions has been determined. The simulation results showed that the space-time filter with use of adaptation inside the coherent processing interval (CPI) is more effective than the same

filter that adapts between CPIs. Time-space filtering in jamming and clutter conditions has advantages over space-time filtering. The efficiency of time-space filtering is limited because of Doppler filter magnitude response sidelobes.

Key words: radar, electronic counter-countermeasures, clutter and jamming environment, space-time processing, time-space processing.

REFERENCES

1. Maj I.D., Kaspirovich A.G., Vinnik V.A. Radiolokacionnaya stantsiya 36D6M. Ekspluatatsiya i texnicheskoe obsluzhivanie. Uchebnoe posobie. Zaporozh'ye, KP «NPK «Iskra», 2006, 140 p.
2. Teoreticheskie osnovi radiolokatsii pod red. Shirmana Ya.D., Moscow, Sovetskoe radio, 1970, 560 p.
3. Kononovych V. Ya., Kukulnytskyi A.P., Zalevskyi O. P., Kaspyrovych O. H., Meister Yu. L.; Deneka A.A. Pat. 48705 Sposib kompensatsii aktyvnoi skladovoi kombinovanoi zavady: patent na korysnu model # 48705. Ukraina: MPK9 G01S 7/36, H04B 15/00, Zaiavnyk i patentovlasnyk: Kazenne Pidpriemstvo «Naukovo-Vyrobnychiy Kompleks «Iskra», Zaiavl. 06.11.2009; opubl. – 25.03.2010, biul. # 6, 2010.
4. Piza D.M. Zalevskij A.P. Osobennosti adaptatsii prostranstvenny'x fil'trov pri vozdeystvii kombinirovanny'x pomex, *Radioelektronika, informatika, upravlenie*, 2005, No 1, pp. 45–48.
5. Sozdanie i issledovanie algoritmov prostranstvenno-(polyarizacionno-)vremennoj obrabotki signalov v radiotexnicheskix sistemax v usloviyax vozdeystviya kombinirovanny'x pomex: otchet o NIR (zaklyuch.), DB 05813, nauchn. ruk. Piza D.M., ZNTU, 2005, 52 p.