

УДК 621.396.983

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АКУСТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ  
ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ МОДУЛЯЦИОННЫХ  
КОМПОНЕНТОВ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА**Б. АЛЬ-ЖЕЛИЛИ<sup>1</sup>, С.А. ГОРШКОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь,*<sup>2</sup>*Военная академия Республики Беларусь  
Минск, 220057, Беларусь**Поступила в редакцию 5 мая 2006*

Проведена оптимизация структуры радиолокационного обнаружителя отделяющегося объекта на фоне мешающих сигналов, к которым относятся пассивные помехи, отражения от планера сопровождаемой цели и модуляционные компоненты отраженного сигнала. Предложена квазиоптимальная структура. Проведено предварительное сопоставление характеристик разработанного устройства с акустическим обнаружителем.

*Ключевые слова:* мешающие отражения, мешающий сигнал, отделяющийся объект, модуляционные составляющие, обнаружение – разрешение.

**Введение**

Одной из актуальных задач радиолокационного наблюдения является обнаружение момента разделения сопровождаемых объектов. Разделение может быть обусловлено различными факторами: сбросом объектом-носителем ложного отражателя, полезного груза, запуском ракеты, появлением уводящей помехи и т.д.

В ряде случаев может потребоваться наискорейшее решение данной задачи при слабом полезном сигнале на фоне мощного мешающего. В качестве мешающего может выступать отраженный сигнал от планера объекта-носителя или от вращающихся элементов его конструкции. Дополнительным мешающим фактором может выступать коррелированная помеха, например, по времени.

Известны эвристические способы обнаружения отделяющегося объекта [1], предусматривающие наличие дополнительного канала так называемых ждущих стробов, расположенных в окрестности стробов сопровождения цели. Такое решение задачи вполне допустимо при отсутствии помех и достаточно сильном отделяющемся сигнале. Качество работы таких устройств резко снижается в присутствии мешающих сигналов и помехи, когда сигнал отделяющейся цели в десятки раз слабее сигнала сопровождаемой и обладает при том высокими динамическими свойствами. Значительно более простым вариантом решения рассматриваемой задачи является построение акустического обнаружителя с использованием возможностей оператора РЛС, предложенного Н.М. Слюсарем [2–3]. Однако возможности такого решения, по сравнению с оптимальным или квазиоптимальным вариантами, в литературе пока не рассмотрены.

*Цель работы* — оптимизация структуры обнаружителя отделяющейся цели на основе теории квазиполного обнаружения — разрешения и сопоставление его характеристик с характеристиками акустического обнаружителя.

### Постановка задачи

Пусть сопровождается цель с гауссовской корреляционной функцией отраженного сигнала  $R_{tg}(t-s)$  на фоне смеси стационарной пространственно протяженной гауссовской пассивной помехи с известной корреляционной функцией  $R_c(t-s)$  и гауссовского белого шума  $2N_0\delta(t-s)$  со спектральной плотностью  $N_0$ . Зондирующий сигнал — когерентная последовательность импульсов с заданным временем когерентного накопления  $T_{ca}$  и длиной волны  $\lambda$ . В известный момент времени  $t_0$  от цели отделяется объект с заданным ускорением  $a_r$ . Заданы также отношения помеха — шум  $\gamma_c$  и сигнал – шум для цели  $\gamma_{tg}$  и для отделяющегося объекта  $\gamma_{ob}$ . Время наблюдения  $T_{ob}$ , в течение которого принимается решение, может значительно превышать допустимое время когерентного накопления. Поэтому предполагается комбинирование когерентного и некогерентного накопителей. Временная структура ожидаемого сигнала с вектором временных параметров  $\mathbf{a}_{time}$  описывается функцией  $m(t, \mathbf{a}_{time})$ .

### Структура устройства сопровождения цели и обнаружения отделяющегося объекта

Рассмотренная задача решается в рамках теории квазиполного обнаружения — разрешения [4]. При этом как помеха, так и сопровождаемая цель считаются мешающими сигналами с известной суммарной корреляционной функцией

$$R_{tg-c}(t-s) = R_{tg}(t-s) + R_c(t-s). \quad (1)$$

В соответствии с [4–7] задача обнаружения отделяющегося объекта должна решаться путем "обеливания" мешающих сигналов с последующим накоплением полезного.

Можно показать, что частотная характеристика обеливающего фильтра  $K_l(\omega)$  представляет собой произведение частотных характеристик режекторных фильтров помехи  $K_{L_c}(\omega)$  и мешающего сигнала сопровождаемой цели  $K_{L_{tg}}(\omega)$ , причем

$$K_{L_{tg}}(\omega) = 1 / [1 + K_{L_c}(\omega) S_{tg}(\omega - \omega_0 - \Omega_{Dtg})], \quad (2)$$

где  $K_{L_c}(\omega) S_{tg}(\omega - \omega_0 - \Omega_{Dtg})$  — энергетический спектр мешающего сигнала на выходе режекторного фильтра помехи.

Частотная характеристика когерентного накопителя определяется исходя из допустимого времени когерентного накопления  $T_{ca}$  для цели с максимальным ускорением  $a_{r\max}$ :

$$T_{ca} \leq \sqrt{\lambda / 4a_{r\max}}. \quad (3)$$

Соответственно ширина "зубца" квадрата АЧХ накопителя определяется как  $\Delta F_{II} = 1/T_{ca}$ .

Допустимое время когерентного накопления может оказаться весьма малым для достижения требуемых характеристик обнаружения. Действительно, например, параметрам  $\lambda=3$  см и  $a_{r\max}=200$  м/с<sup>2</sup> соответствует  $T_{ca} \leq 6$  мс. Улучшить характеристики обнаружения можно дополняя когерентное накопление некогерентным.

Рассмотрим ситуацию, когда момент  $t_0$  отделения объекта от сопровождаемой цели и его радиальное ускорение  $a_r = \text{const}$  известны. При этом можно полагать известными значения частоты Доплера  $\Omega_{Dtg}(t_k)$  в моменты времени  $t_k$ , отличающиеся друг от друга на величину  $t_k - t_{k-1} = T_{ca}$ , равную интервалу когерентного накопления:

$$\Omega_{Dtg}(t_k) = \Omega_{Dtg}(t_0) + 2a_r(t_k - t_0)/\lambda = \Omega_{Dtg} + 2a_r k T_{ca} / \lambda, \quad (4)$$

где  $k=0..k_{\max}$  — номер интервала (такта) когерентного накопления. Если частота Доплера цели скомпенсирована в следящем измерителе, то в (4)  $\Omega_{Dtg} = 0$ .

Задачу обнаружения можно ограничить пределами элемента разрешения по дальности ( $\pm \Delta r/4$ ), в котором находится сопровождаемая цель. Тогда значение  $k_{\max}$  определяется соотношением максимально допустимого времени некогерентного накопления  $T_{n \max}$  к одному интервалу когерентного накопления. При этом

$$T_{n \max} \leq \sqrt{\Delta r / a_{r \max}}. \quad (5)$$

Например, если  $\Delta r = 50$  м,  $a_{r \max} = 200 \text{ м/с}^2$  и  $T_{ca} = 6$  мс, то  $T_{n \max} = 0,5$  с и  $k_{\max} = 83$ .

В рассматриваемых условиях некогерентный накопитель является одноканальным, учитывающим смещение огибающей сигнала по частоте Доплера во времени в соответствии с (4). Однако, момент отделения  $t_0$  и ускорение  $a_r$  обычно неизвестны заранее. В соответствии с одним из методов устранения априорной неопределенности [8] это приводит к многоканальности некогерентного накопителя по неизвестным параметрам. Максимальное число каналов некогерентного накопления  $N_n$  можно выразить формулой:

$$N_n = N_t N_a,$$

где  $N_t \leq k_{\max}$  — число каналов по времени отделения;  $N_a$  — число каналов по ускорению.

Для определения максимального числа каналов некогерентного накопления по ускорению необходимо задать интервал ускорений  $\Delta a_r = a_{r \max} - a_{r \min}$ , в пределах которого должен работать обнаружитель, а также допустимый разнос между соседними каналами по ускорению  $\delta a_r$ . Последний определяется с учетом (3)–(5) исходя из того, что максимальная разница ожидаемых доплеровских частот двух соседних каналов накопителя в расчете на максимальное запаздывание обнаружителя не должна превышать  $\Delta F_{II}/2$ .

Вариант оптимизированной корреляционно-фильтровой структуры устройства сопровождения цели по частоте Доплера с каналом обнаружения отделяющегося объекта показан на рис. 1. Основными элементами схемы являются система сопровождения по скорости (частоте Доплера) и канал обнаружения отделяющегося объекта. Они имеют общую часть: фильтровые устройства внутрипериодной обработки (ВПО) и когерентной компенсации мешающих отражений (ККМО). Временной селектор открывается селектирующим импульсом дальности (СИД), поступающим от системы сопровождения по дальности (ССД). Сигнал из окрестности цели поступает на вход системы сопровождения по скорости (ССС). После смесителя (СМ) и фильтра грубой селекции (ФГС) сигнал поступает на частотный дискриминатор (ЧД) следящей системы и на фильтр когерентной компенсации мешающего сигнала (ККМС).

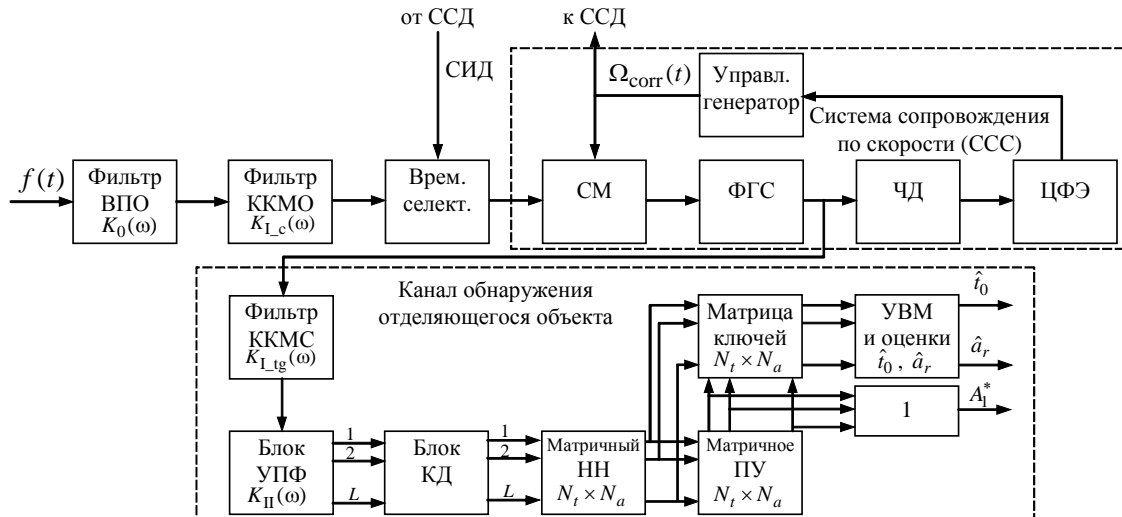


Рис. 1. Структурная схема системы сопровождения цели с каналом обнаружения отделяющегося объекта

"Очищенный" от помех сигнал затем когерентно накапливается в  $L$  узкополосных фильтрах (УПФ), перекрывающих частоту повторения, и после детектирования поступает на матричный некогерентный накопитель (НН), число каналов которого определяется условиями наблюдения. Выходы некогерентного накопителя подаются на матричное пороговое устройство (ПУ), управляющее ключами, пропускающими превысившие порог сигналы на устройство выбора максимума (УВМ) и оценки момента отделения  $\hat{i}_0$  и ускорения  $\hat{a}_r$ . Превышение порога на любом выходе НН обеспечивает формирование сигнала обнаружения  $A_1^*$ . Выбор уровня порогов определяется значениями шума и остатков от компенсации мешающих отражений и сигнала, а также заданным значением ложной тревоги в канале обнаружения отделяющегося объекта.

### Показатели качества оптимизированного обнаружителя и их моделирование

Основными показателями качества обнаружителя отделяющихся объектов являются зависимости от отношения сигнал–шум  $\gamma$  на выходе устройства ВПО: вероятности правильного обнаружения  $D$  при фиксированных уровне ложной тревоги  $F$  и параметрах пассивной помехи и мешающего сигнала; среднего времени обнаружения  $\bar{\tau}$ .

Рассмотренные показатели качества определялись путем математического моделирования с использованием программы BSS [9], позволяющей проводить динамическое моделирование воздушных объектов 11 типов в сантиметровом–дециметровом диапазонах длин волн.

**Условия моделирования.** Самолет-носитель: F-15 (из перечня объектов модели BSS). Отделяющийся объект: точечный (разработан с использованием программы Target Editor [9]). Параметры РЛС: длина волны — 3 см, частота повторения — 4 кГц, поляризация приемно-передающей антенны — горизонтальная. Ракурс наблюдения самолета — 25–35 градусов. Зондирующий сигнал — простой прямоугольный радиоимпульс длительностью 1 мкс. Время когерентного накопления — 16 мс. Число некогерентно суммируемых результатов когерентного накопления — от 2 до 20. Анализируемые ускорения отделяющихся объектов — от 100 до 200 м/с<sup>2</sup>. Общее число каналов обнаружителя 19 (по времени)×20 (по ускорению).

**Результаты моделирования.** На рис. 2,а,б показаны частотно-временные диаграммы отраженных сигналов от: а) сопровождаемого объекта (самолет F-15) при  $\gamma_c=10$  (наблюдаются планерная и модуляционные составляющие, как результат свертки спектра флуктуаций цели и спектра зондирующего сигнала) и отделяющегося объекта при  $\gamma_{об}=0,2$ ,  $a_r=20$  м/с<sup>2</sup>; б) отделяющегося объекта с параметрами, определенными выше и после компенсации мешающего сигнала от объекта-носителя (при известной корреляционной матрице). Отображены

только результаты когерентного накопления в пределах элемента дальности сопровождаемого объекта. Из рис. 2,а видно, что сигнал отделяющегося объекта пересекает мешающие спектральные составляющие. После компенсации мешающего сигнала наблюдаемость объекта улучшается, однако, часть энергии попадает в зоны режекции, что является платой за оптимизацию обработки.

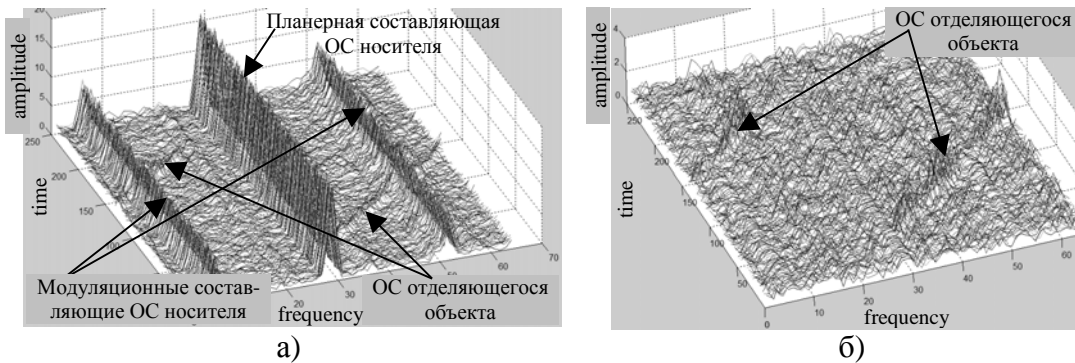


Рис. 2. Частотно-временные диаграммы отраженных сигналов (ОС) по результатам моделирования: а) объекта-носителя и отделяющейся цели; б) отделяющейся цели после когерентной компенсации мешающего сигнала объекта-носителя

На рис. 3 показаны характеристики обнаружения при фиксированных отношении сигнал–шум мешающего сигнала и значениях ускорения отделяющегося объекта  $a_r$ . Из рисунков видно, что с ростом ускорения от 100 до 150 м/с<sup>2</sup> вероятности правильного обнаружения также растут. Последнее по-видимому обусловлено изменением взаимного расположения полезного и мешающего сигналов. При дальнейшем увеличении интенсивности ускорения  $a_r$  вероятность обнаружения снижается вследствие рассогласования условий наблюдения и параметров когерентного накопителя. Среднее время срабатывания обнаружителя составило 2–3 такта когерентного накопления при отношениях сигнал–шум свыше 0,3 и 3–10 тактов для меньших его значений.

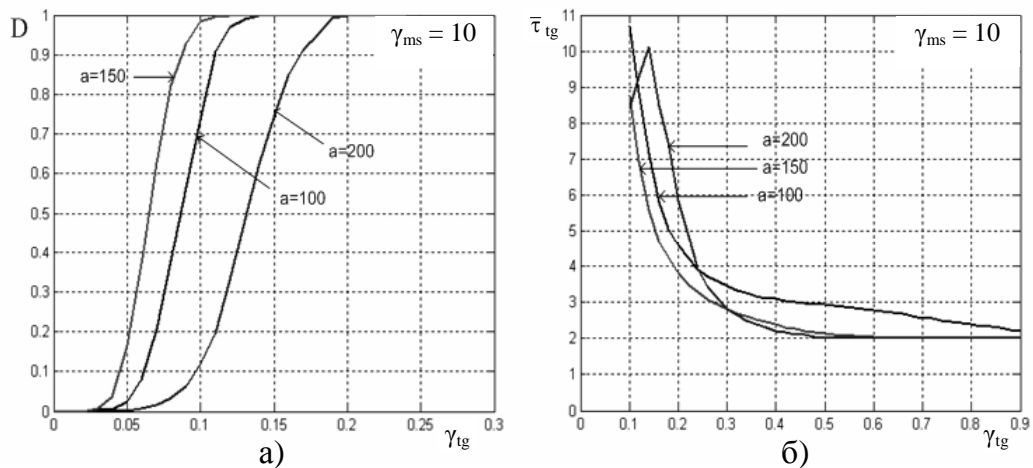


Рис. 3. Характеристики обнаружения отделяющегося объекта на фоне мешающего сигнала: а) кривые обнаружения  $D(\gamma_{tg})$  при различных ускорениях  $a$ ; б) кривые среднего времени срабатывания обнаружителя  $\bar{\tau}(\gamma_{tg})$  при различных ускорениях  $a$

## Акустический обнаружитель отделяющегося объекта и предварительные результаты его сопоставления с автоматическим

Идея построения акустического обнаружителя отделяющегося объекта была обоснована Н.М. Слюсарем [2, 3]. При этом в структурной схеме (рис. 1) выход ФГС через пару фазовых детекторов подается на головные телефоны. Обнаружение отделяющегося объекта на фоне звучания отраженного сигнала сопровождаемой цели проводится по характерным звуковым тонам изменяющейся частоты. Фильтр ККМС в данной структуре не предусмотрен.

Моделирование работы такого обнаружителя показало наличие ряда недостатков и достоинств по сравнению с автоматическим обнаружителем (рис. 1). К недостаткам акустического обнаружителя можно отнести следующие: повышенное (на 3–10 дБ) пороговое отношение сигнал–шум на один импульс; увеличение среднего времени принятия решения до 1–3 с; отсутствие возможности получения оценки момента отделения и ускорения с характеристиками, близкими к потенциальным.

Достоинством акустического обнаружения является простота его построения.

Дополнительные исследования были проведены для модифицированной схемы акустического обнаружителя, показанной на рис. 4. Перед блоком фазовых детекторов и головных телефонов был установлен фильтр когерентной компенсации мешающего сигнала (см. также рис. 1). В результате условия обнаружения звука отделяющегося объекта были существенно улучшены, что в свою очередь привело к снижению потерь в пороговом сигнале до 1–3 дБ.

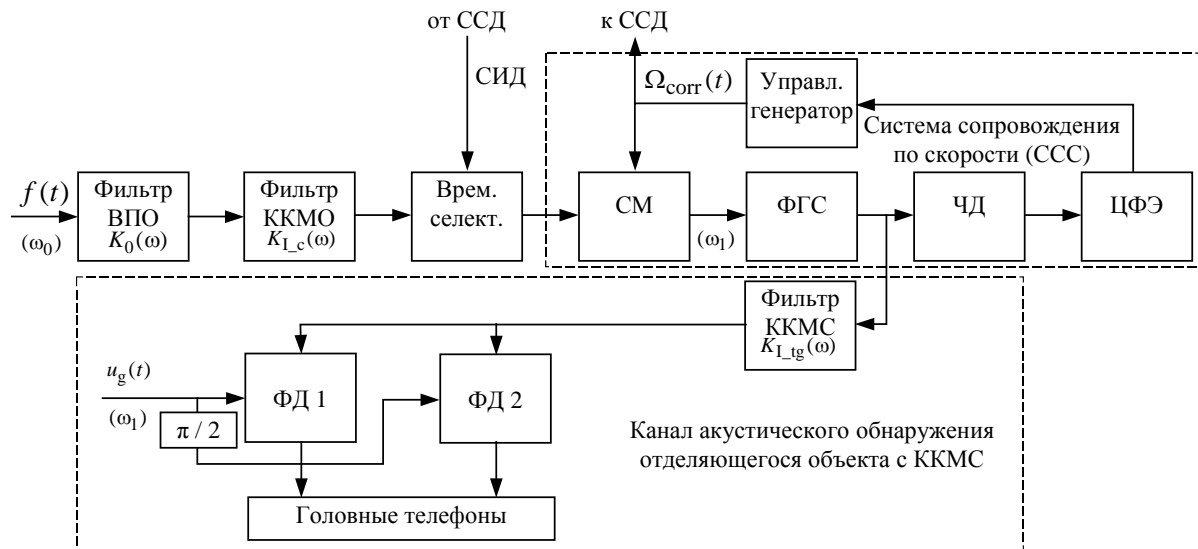


Рис. 4. Обобщенная структура системы сопровождения по дальности и скорости с модифицированным каналом акустического обнаружения отделяющегося объекта

### Заключение

Оптимизация структуры обнаружителя слабой цели с высокой динамикой на фоне сильной цели приводит к необходимости формирования дополнительного канала приема с обеспечением мешающего сигнала и накоплением полезного. Отсутствие информации о моменте отделения и об ускорении отделяющейся цели приводит к многоканальности устройства по этим параметрам. Моделирование показало работоспособность предложенного устройства. Основными показателями качества решения рассмотренной задачи устройства являются кривые обнаружения и кривые зависимости среднего времени срабатывания обнаружителя от отношения сигнал–шум. Выявлены источники потерь по сравнению с обнаружителем цели с постоянными параметрами. Это потери за счет: дискретизации; растяжения огибающей сигнала по частоте; параметров функции взаимной корреляции полезного и мешающего сигналов.

Проведено предварительное моделирование акустического обнаружителя, показавшее его пониженные характеристики, по сравнению с оптимизированной структурой. В частности, потери в пороговом отношении сигнал–шум составили 3–10 дБ.

Предложенная структура модифицированного акустического обнаружителя, содержащего перед фазовыми детекторами фильтр когерентной компенсации мешающего сигнала, продемонстрировала снижение потерь в пороговом сигнале до 1–3 дБ.

Таким образом, участие человека-оператора в решении задачи обнаружения отделяющегося объекта возможно по причине простоты реализации и относительно небольших потерь по сравнению с оптимизированной структурой автоматического устройства (при наличии канала компенсации мешающего сигнала сопровождаемого объекта). В то же время существенно ухудшенное время реакции человека-оператора и его слабые возможности по оцениванию параметров отделяющегося объекта снижают ценность такого решения.

Необходимо, однако, отметить, что объем проведенных исследований акустического обнаружителя как с модифицированной, так и с немодифицированной структурами пока недостаточен. Необходимо, в частности, проведение исследований влияния особенностей слухового аппарата различных людей, степени тренированности оператора и влияния внешних факторов на показатели качества обнаружения.

## THE DETACHABLE OBJECTS AUTOMATIC AND ACOUSTIC DETECTION ON BACKGROUND OF ROTATIONAL MODULATION SPECTRA COMPONENTS

B. GELILI, S.A. GORSHKOV

### Abstract

Optimization of separated target detector structure is considered against a background: ground and rain clutter; rotational modulation component of spectra. Quasi-optimal structures are proposed. Preliminary comparison of characteristics of the developed structure with acoustic detector is lead.

### Литература

1. Меркулов В.И., Дрогалин В.В. и др. // Радиотехника. 2002. № 5. С. 51–56.
2. Слюсарь Н.М. // Новости науки и технологий. 2005. № 2(3). С. 42–51.
3. Слюсарь Н.М., Николаев А.В. // В сб. тезисов докладов Шестой военно-научной конференции Военной академии Республики Беларусь, 22–23 января 2004 г. Минск, 2004. С. 216.
4. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов. М., 1974.
5. Радиоэлектронные системы: Справочник/ Под ред. Я.Д. Ширмана. М., 1998.
6. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М., 1981.
7. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и РЭБ. Ч. 1. Основы радиолокации М., 1983.
8. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М., 1977.
9. Gorshkov S.A., Leshchenko S.P., Orlenko V.M., Sedyshev S.Yu., Shirman Y.D. Radar Target Backscattering Simulation: Software and User's Manual / Artech House, Inc.: Boston–London, 2002.