

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»**

УДК 621.396.96

**ГАБЕЦ**  
**Сергей Александрович**

**РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ ВОЗДУШНЫХ  
ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ ГАУССОВСКОГО ШУМА С АДАПТАЦИЕЙ  
К КОЭФФИЦИЕНТУ МЕЖДУПЕРИОДНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ  
ПРИНЯТОГО СИГНАЛА**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.12.14 – радиолокация и радионавигация

**Минск, 2019**

Научная работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель – *Седышев Сергей Юрьевич*,  
кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры автоматике,  
радиолокации и приемопередающих  
устройств учреждения образования  
«Военная академия Республики Беларусь».

Официальные оппоненты: *Савенко Сергей Александрович*,  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник НИУ ГУ  
«Научно-исследовательский институт  
Вооруженных Сил Республики Беларусь»;

*Фирсаков Александр Анатольевич*,  
кандидат технических наук, доцент.

Оппонирующая организация – ОАО «КБ Радар» – управляющая  
компания холдинга «Системы  
радиолокации».

Защита состоится 21 февраля 2019 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций СД 04.01.01 при учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь» (220057, г. Минск, пр. Независимости, 220, учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»; e-mail: andssnew@yandex.ru; телефон ученого секретаря (017) 287-43-89).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Автореферат разослан «\_\_\_» января 2019 г.

***Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент***

***А.С. Солонар***

## ВВЕДЕНИЕ

Достигнутый за последнее время прогресс в разработке и производстве цифровой техники привел к созданию компактных, экономичных и надежных устройств цифровой обработки сигналов. В результате этого появилась возможность применения цифровых адаптивных систем обработки сигналов связи, радиолокации и навигации. В радиолокационной технике прочно укоренились такие адаптивные устройства, как автокомпенсаторы активных и пассивных помех, шумовой регулировки усиления, устройства стабилизации уровня ложных тревог, выравнивания частотных характеристик каналов приема. Адаптация РЛС к мешающим факторам или изменяющимся условиям наблюдения приближает ее показатели качества к потенциальным.

Последовательность отраженных сигналов от аэродинамической цели сопровождается междупериодными флуктуациями, которые описываются моделями. Параметры модели флуктуаций последовательности отраженных сигналов изменяются в зависимости от состояния атмосферы, типа цели, ракурса ее движения и учитываются при проектировании устройств междупериодной обработки и принятия решения об обнаружении цели.

В классических работах основным критерием оптимальности принятия решения об обнаружении цели является критерий Неймана-Пирсона (КНП). Практическая реализация этого критерия требовала нахождения оценок мощности радиолокационного фона для стабилизации уровня ложных тревог. В работах Седышева С.Ю. и Калютчика В.С. была решена задача построения адаптивных устройств принятия решения (УПР), оптимальных по критерию минимума среднего риска (КМСР), практическая реализация которого требовала нахождения оценок не только мощности радиолокационного фона, но и сигнала. Применение такого критерия при формировании порога обнаружения позволило повысить дальность обнаружения на 5–30% по сравнению с порогом, оптимальным по КНП.

Выявленным недостатком существующих УПР, оптимальных по КНП или КМСР, является отсутствие учета текущих значений коэффициента междупериодной корреляции принятого сигнала в алгоритмах расчета адаптивного порога обнаружения. Из-за этого возникают потери в дальности обнаружения радиолокационного приемника, вызванные несоответствием параметров УПР, рассчитанных при фиксированном (заданном) коэффициенте междупериодной корреляции сигнала и реальных (текущих) корреляционных свойствах принятого сигнала. Следовательно, актуальной является задача синтеза УПР, оптимального по КМСР, способного различать корреляционные свойства принятого сигнала и фона.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными программами (проектами) и темами.** Тема диссертации включена в утвержденные планы научной работы УО «ВА РБ» и соответствует перечню перспективных направлений диссертационных исследований Вооруженных Сил в области анализа процессов обнаружения, распознавания (различения и классификации), разрешения сигналов (помех), измерения их параметров и разработки предложений по их оптимизации. Содержание диссертационной работы соответствует пунктам 6.11 и 13 Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг.

Связь с крупными научными программами характеризуется реализацией результатов диссертации в НИР «Качество-2015» № ГР 20151623, проводимой кафедрой радиолокации и приемопередающих устройств УО «ВА РБ».

**Цель и задачи исследования.** Цель исследования – увеличение дальности обнаружения цели РЛС путем использования апостериорной информации о коэффициенте междупериодной корреляции принятого сигнала в каждом элементе разрешения РЛС по дальности.

Задачи исследования:

1. Провести аналитический обзор способов построения радиолокационных обнаружителей, определить и обосновать пути повышения их эффективности.

2. Синтезировать устройство принятия решения, оптимальное по критерию минимума среднего риска, учитывающее коэффициент междупериодной корреляции принятого сигнала при расчете значения порога обнаружения. Провести сопоставительный анализ синтезированного и наиболее эффективного из известных устройств принятия решения при равных вероятностях правильного обнаружения и ложной тревоги.

3. Разработать способ адаптации устройств междупериодного накопления к коэффициенту междупериодной корреляции принятого сигнала в каждом элементе разрешения РЛС. Методами имитационного математического моделирования и полунатурного моделирования провести анализ показателей качества синтезированного радиолокационного обнаружителя, учитывающего корреляционные свойства принятого сигнала, и подтвердить адекватность разработанной математической модели.

**Научная новизна** полученных результатов характеризуется:

развитием способов построения адаптивных устройств принятия решения об обнаружении сигнала, минимизирующих средний риск и учитывающих значения коэффициента междупериодной корреляции принятого сигнала при формировании порога обнаружения;

совершенствованием способа построения устройств междупериодного накопления принятого сигнала, заключающегося в использовании оценок коэффициента междупериодной корреляции в каждом элементе разрешения РЛС, для регулирования времени когерентного и некогерентного накопления и величины порога обнаружения в зависимости от условий наблюдения цели.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Статистический синтез устройства принятия решения с порогом обнаружения, формируемым в соответствии с критерием минимума среднего риска, *отличающийся* учетом различий в числе степеней свободы  $\chi^2$ -распределений вероятности сигнала и фона, *что позволило* компенсировать потери в дальности обнаружения цели от 2 до 16 % в зависимости от ширины спектра флуктуаций принятого сигнала.

2. Способ адаптации устройств междупериодного накопления к комплексному коэффициенту междупериодной корреляции принятого сигнала, *отличающийся* возможностью регулирования времени когерентного и некогерентного накопления сигнала в зависимости от условий наблюдения цели, *что позволило* увеличить дальность автоматического обнаружения на 1–20 % без ухудшения характеристик обнаружения.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени.**

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Основным соавтором публикаций является научный руководитель – кандидат технических наук, доцент С.Ю. Седышев, который определял цели, ставил задачи исследований, принимал участие в выборе методов исследований, планировании работ и обсуждении их результатов.

Научному руководителю принадлежит идея повышения дальности обнаружения цели РЛС за счет учета корреляционных свойств принятого сигнала в устройствах принятия решений, оптимальных по критерию минимума среднего риска. Совместно с научным руководителем получены результаты статистического синтеза устройства принятия решения, оптимального по критерию минимума среднего риска, учитывающего коэффициент междупериодной корреляции принятого сигнала.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Основные результаты диссертации докладывались: на Международной научно-практической конференции «XII Машеровские чтения» (Витебск, ВГУ им. П. М. Машерова, 2013); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы военной науки и практики в современных условиях и пути их решения» (Минск, УО «ВА РБ», 2015); III Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» (Минск, УО «ВА РБ», 2013); XVI Республиканской научной

конференции студентов и аспирантов (Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2013); Международной научной конференции «Молодежь в науке – 2013» (Минск, НАНБ, 2013); V и VI Международных молодежных научно-практических конференциях «Научные стремления» (Минск, НАНБ, 2014–2015); XVII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2014); Международной научно-технической конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 2014); Международной научно-практической конференции «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке: Современные проблемы радиотехники» (Харьков, ХНУРЭ, 2014).

**Опубликование результатов диссертации.** Основные результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 21 печатной работе: 6 публикаций, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 13 тезисов докладов и докладов в сборниках материалов конференций, патент на изобретение и патент на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит введение, перечень сокращений и условных обозначений, общую характеристику работы, основную часть, состоящую из четырех глав, заключение, библиографический список и приложения.

Общий объем диссертации составляет 148 страниц, текст иллюстрируется 60 рисунками и 17 таблицами, включает 6 приложений. При выполнении работы использовано 116 источников (в том числе 21 авторская публикация).

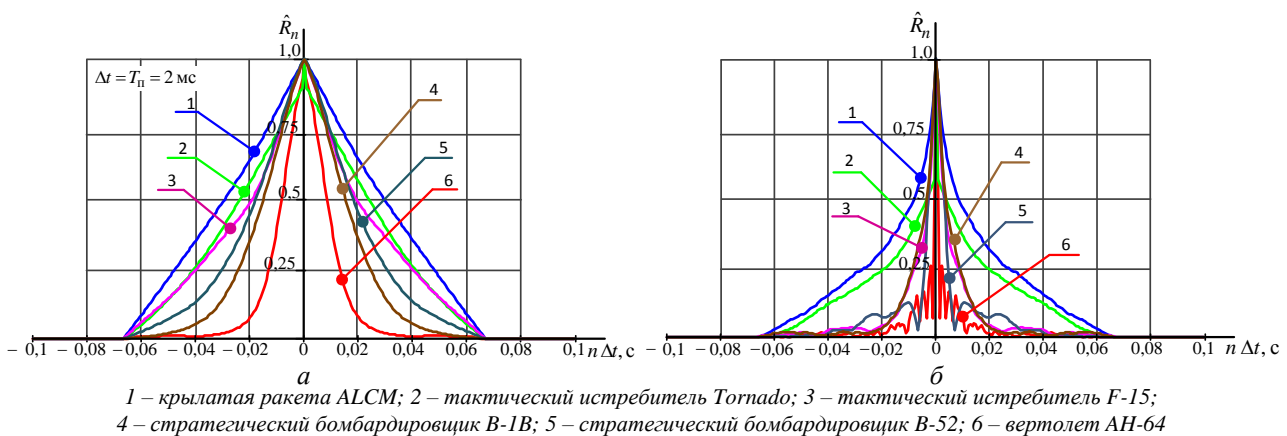
## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** проведен анализ моделей междупериодных флуктуаций последовательностей отраженных сигналов (ОС). Для импульсных РЛС обзора с разрешающим объемом, превышающим размеры цели, используются модели Сверлинга (Накагами) или модели сигнала, имеющие  $\chi^2$ -распределение, разработанные советскими учеными. Выявлено, что лишь в моделях, разработанных советскими учеными, параметры плотности вероятностей принятого сигнала и фона связаны с коэффициентом междупериодной корреляции (КМК) сигнала в явном виде. Модель частично-когерентной пачки ОС является более общей, так как, задавая различный КМК сигнала, возможно получить частные случаи когерентной или некогерентной пачки ОС. Корреляционные свойства принятого сигнала изменяются в зависимости от условий наблюдения цели [4, 6, 11, 19]. В существующих радиолокационных обнаружителях параметры устройств междупериодного накопления (МПН) фиксированные, при этом используются адаптивные к мощности фона УПР с алгоритмом формирования порога, не учитывающим различия в корреляционных свойствах полезного сигнала и фона.

По этой причине дальность обнаружения целей известных радиолокационных обнаружителей снижается [6, 11, 18]. Таким образом, учет текущего КМК принятого сигнала на этапах МПН и принятия решения позволит повысить дальность обнаружения цели.

Проведен анализ критериев оптимальности формирования порога обнаружения, используемых в адаптивных УПР. В радиолокации самым распространенным является критерий Неймана-Пирсона. Следует отметить, что алгоритм формирования порога обнаружения согласно критерию Неймана-Пирсона учитывает вид закона распределения вероятности шума и его среднее значение. Критерий Неймана-Пирсона является частным случаем критерия минимума среднего риска. Использование КМСР при формировании порога обнаружения позволило учесть дополнительную информацию об уровне сигнала в анализируемом элементе разрешения и в результате этого повысить дальность обнаружения цели при условии одинаковых вероятностей ложной тревоги. Известный алгоритм формирования порога обнаружения цели, оптимальный по критерию минимума среднего риска, применим только для случаев, когда половина числа степеней свободы  $\chi^2$ -распределения вероятности сигнала и фона равна  $n_0 = n_1$  [5]. Этот факт является его основным недостатком, так как параметры  $\chi^2$ -распределений сигнала и фона в общем случае различаются ( $n_0 \neq n_1$ ). На основании проведенного анализа обоснован путь повышения эффективности радиолокационных обнаружителей и определены задачи на дальнейшее исследование.

Во **второй** главе с помощью программного комплекса моделирования обратного вторичного излучения исследованы корреляционные свойства отраженных сигналов от различных классов воздушных целей в различных условиях турбулентности атмосферы, рассчитаны их числовые характеристики [4, 6]. Корреляционные функции междупериодных флуктуаций ОС представлены на рисунке 1.



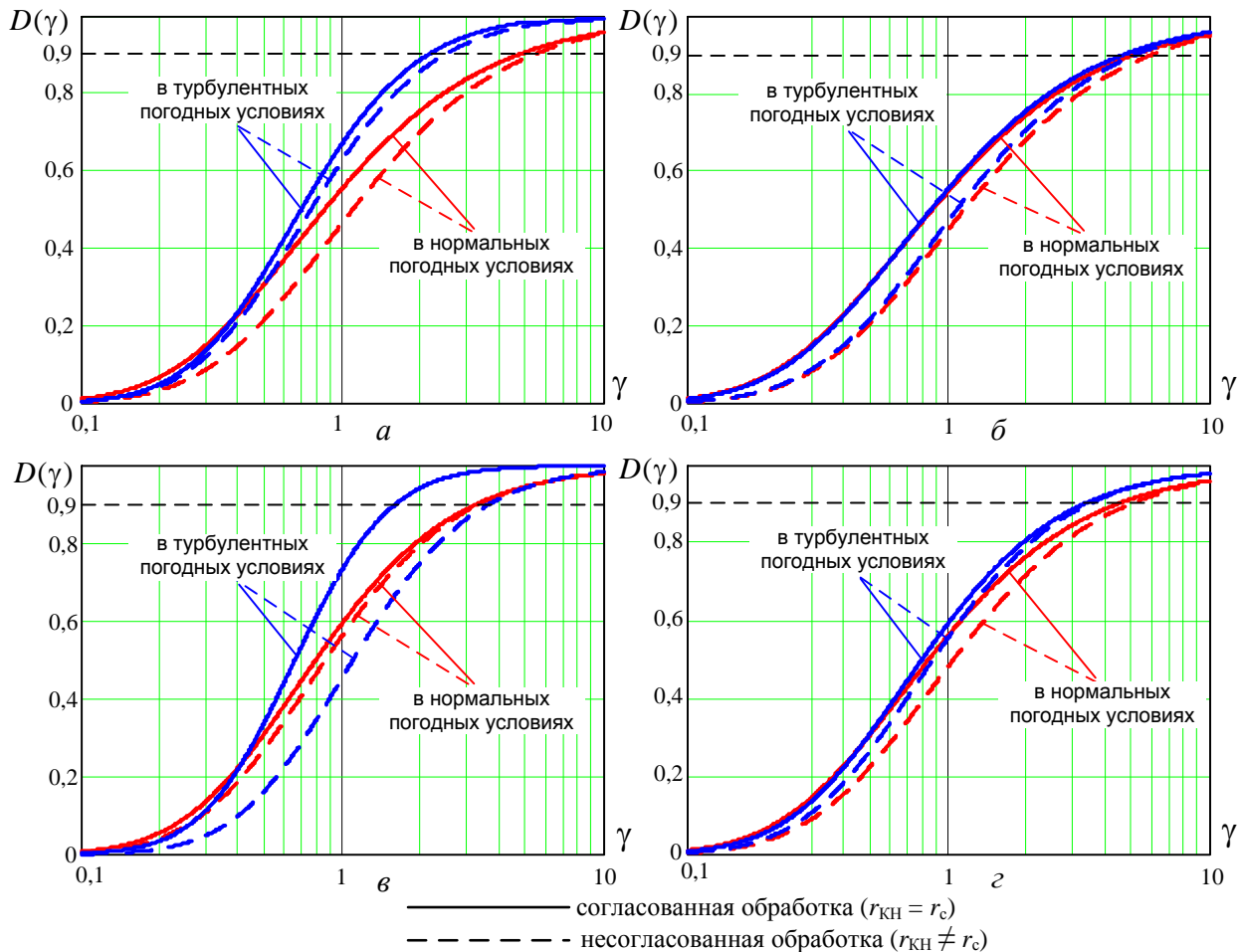
**Рисунок 1. – Корреляционные функции междупериодных флуктуаций ОС от различных целей: а – в нормальной атмосфере; б – в турбулентной атмосфере**

На рисунке 1 показано, что время корреляции ОС изменяется в зависимости от типа цели и состояния турбулентности атмосферы. Параметры модели междупериодных флуктуаций связаны с корреляционными свойствами ОС. По этой причине модель частично когерентной пачки ОС имеет различные параметры  $\chi^2$ -распределений вероятности сигнала и фона ( $n_0 \neq n_1$ ), что является главной особенностью применения такой модели при синтезе устройства принятия решения с порогом обнаружения, оптимальным по КМСР.

При проектировании системы обработки в существующих радиолокационных обнаружителях импульсных РЛС обзора используется модель междупериодных флуктуаций ОС с  $\chi^2$ -распределением вероятности сигнала и фона с равным числом степеней свободы ( $n_0 = n_1$ ), при этом параметры устройств обработки рассчитываются заранее. Так как параметры  $n_0$  и  $n_1$  связаны с корреляционными свойствами принятого сигнала, которые в свою очередь изменяются от условий наблюдения цели (см. рисунок 1), то в существующих радиолокационных обнаружителях текущий коэффициент междупериодной корреляции не учитывается и возникают потери. Для выявления таких потерь рассчитывались характеристики обнаружения цели типовой импульсной РЛС сантиметрового диапазона волн при накоплении 20 импульсов с частотой повторения 500 Гц при условной вероятности ложной тревоги  $F = 10^{-5}$  и требуемой вероятности правильного обнаружения 0,9 (рисунок 2). Построенные характеристики обнаружения позволили выявить потери в дальности обнаружения цели в различных условиях наблюдения, вызванные рассогласованием параметров устройств обработки сигнала и текущих корреляционных свойств принятого сигнала, которые составили: 3,3–4,5 % при условии наблюдения бомбардировщика, 3 % – крылатой ракеты, 2,5–16,6 % – вертолета и 2–3,2 % – тактического истребителя при нормальном и турбулентном состоянии атмосферы [6]

Таким образом, существующие радиолокационные обнаружители не учитывают текущий коэффициент междупериодной корреляции принятого сигнала. Параметры устройств междупериодного накопления не согласованы с корреляционными свойствами ОС. На входе УПР формируется сигнал, статистические свойства и параметры которого изменяются в зависимости от условий наблюдения цели. Уровень порога обнаружения цели формируется согласно статистическим свойствам и параметрам модели сигнала, которая использовалась при проектировании системы обработки, и не в полной мере соответствует реальной ситуации, по этой причине возникают потери в дальности обнаружения от 2 до 16 %.

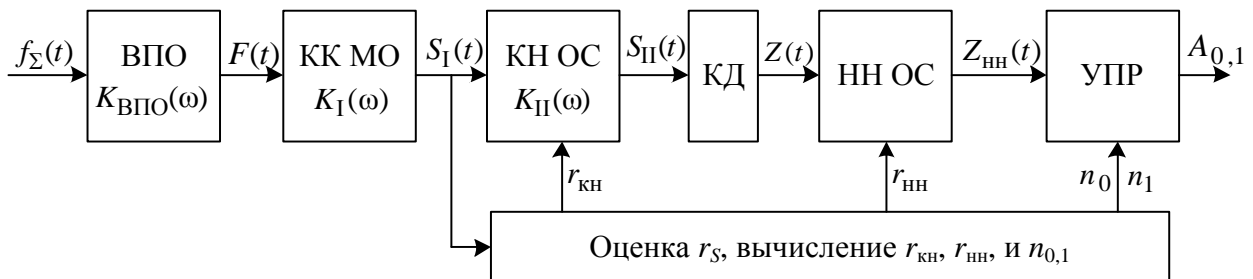




*a* – бомбардировщик B-52; *б* – крылатая ракета ALKM; *в* – вертолет AN-64; *г* – тактический истребитель F-15

**Рисунок 2. – Характеристики обнаружения цели при оптимальном и неоптимальном сочетании времени когерентного и некогерентного накопления в нормальных и турбулентных условиях атмосферы**

Для обработки сигнала, описанного моделью частично когерентной пачки ОС с различными параметрами  $\chi^2$ -распределений вероятности сигнала и фона, структура радиоприемного тракта включает устройство оценки корреляционных свойств сигнала и устройства когерентного и некогерентного накопления (КН и НН) с изменяющимися параметрами [2, 21] (рисунок 3).



**Рисунок 3. – Структура устройства обработки частично-когерентной пачки флуктуирующих сигналов при неизвестном коэффициенте междупериодной корреляции принятого сигнала**

Применение устройства обработки частично-когерентной пачки ОС, имеющего структуру, представленную на рисунке 3, позволит компенсировать потери в дальности обнаружения от 2 до 16 % [6]. Для обеспечения работы радиолокационного обнаружителя, имеющего структуру, показанную на рисунке 3, требуется синтезировать УПР, оптимальное по КМСП, способное различать корреляционные свойства принятого сигнала и фона.

Начальные условия синтеза: модель флуктуирующей последовательности сигналов – модель частично когерентной пачки с  $\chi^2$ -распределением плотности вероятности сигнала и фона с различными параметрами ( $n_0 \neq n_1$ ) (см. рисунок 3).

Критерий синтеза УПР – минимум среднего риска принятия решения об обнаружении, представленный выражением

$$R = r_{00}P(A_0)(1-F) + r_{10}P(A_0)F + r_{01}P(A_1)(1-D) + r_{11}P(A_1)D, \quad (1)$$

где  $r_{ij}$  – стоимость решения  $i$  при условии  $j$ ,  $i = 1$  – решение «цель есть»,  $i = 0$  – решение «цели нет»,  $j = 1$  – условие «цель есть»,  $j = 0$  – условие «цели нет»;  $P(A_0)$ ,  $P(A_1)$  – априорная вероятность отсутствия или наличия цели в элементе разрешения;  $D$ ,  $F$  – условные вероятности правильного обнаружения полезного сигнала и ложной тревоги.

Условные вероятности ложной тревоги  $F$  и правильного обнаружения  $D$  являются функциями порога обнаружения. В результате этого средний риск (1) также зависит от порога обнаружения:

$$R(Z_*) = [r_{10} - r_{00}]P(A_0)F(Z_*) - [r_{01} - r_{11}]P(A_1)D(Z_*) + r_{00}P(A_0) + r_{01}P(A_1), \quad (2)$$

где  $Z_*$  – порог обнаружения, минимизирующий средний риск принятия ошибочных решений.

Продифференцировали (2) по  $Z_*$  и приравняли к нулю  $dR(Z_*)/dZ_*$ , после преобразования получили уравнение

$$l_0 p_0(Z_*) = p_1(Z_*), \quad (3)$$

где  $l_0 = \frac{(r_{10} - r_{00})P(A_0)}{(r_{01} - r_{11})P(A_1)}$  – весовой множитель, определяющий качество принятия решения об обнаружении;  $p_0(Z)$ ,  $p_1(Z)$  – плотности  $\chi^2$ -распределений вероятностей сигнала и фона.

Статистический синтез характеризуется такой последовательностью действий [5]:

1. В уравнение (3) подставили плотности  $\chi^2$ -распределений вероятностей сигнала  $p_1(Z)$  и фона  $p_0(Z)$ , которые определяются выбранной моделью флуктуаций последовательности ОС, а следовательно, видом междупериодного накопления и статистическими характеристиками принятого сигнала:

$$l_0 \left( \frac{1}{\bar{Z}_0} \right)^{n_0} \frac{Z_*^{n_0-1}}{\Gamma(n_0)} \exp\left(-\frac{1}{\bar{Z}_0} Z_*\right) = \left( \frac{1}{\bar{Z}_1} \right)^{n_1} \frac{Z_*^{n_1-1}}{\Gamma(n_1)} \exp\left(-\frac{1}{\bar{Z}_1} Z_*\right), \quad (4)$$

где  $\bar{Z}_0$  – средний уровень шума;  $\bar{Z}_1$  – средний уровень сигнала в анализируемом элементе разрешения;  $n_0, n_1$  – половина числа степеней свободы  $\chi^2$ -распределений вероятностей шума и аддитивной смеси сигнала и шума;  $\Gamma(n)$  – гамма-функция.

2. Уравнение (4) после преобразования решили с использованием аппроксимации функции Ламберта при различных параметрах  $n_0$  и  $n_1$ :

$$Z_{*_{\text{опт}}}(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1) = \frac{\bar{Z}_0 \bar{Z}_1 (n_0 - n_1)}{\bar{Z}_1 - \bar{Z}_0} W \left\{ \frac{\bar{Z}_1 - \bar{Z}_0}{\bar{Z}_0 \bar{Z}_1 (n_0 - n_1)} \left[ l_0 \frac{\Gamma(n_1)}{\Gamma(n_0)} \frac{\bar{Z}_1^{n_1}}{\bar{Z}_0^{n_0}} \right]^{1/(n_0 - n_1)} \right\}, \quad (5)$$

где  $Z_{*_{\text{опт}}}(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1)$  – оптимальный по критерию минимума среднего риска порог обнаружения;  $W(x)$  – функция Ламберта ( $W(x) = \varphi^{-1}[x e^x]$ ,  $x e^x = z$ ,  $x = W(z)$ ):

$$W_k(x) \approx k \cdot \ln(x+1), \quad x \geq 0; \quad k = 0,75. \quad (6)$$

Результатом решения уравнения (5) является алгоритм формирования порога обнаружения, оптимального по КМСР, который представлен выражением

$$Z_{*_{\text{опт}}}(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1) = Z_*(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1) + \Delta Z_*(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1).$$

Здесь

$$Z_*(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1) = k \frac{\bar{Z}_0 \bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 - \bar{Z}_0} \ln \left( l_0 \frac{\Gamma(n_1)}{\Gamma(n_0)} \frac{\bar{Z}_1^{n_1}}{\bar{Z}_0^{n_0}} \right); \quad (7)$$

$$\Delta Z_*(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1) = k \frac{\bar{Z}_0 \bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 - \bar{Z}_0} (n_0 - n_1) \ln \left( \frac{\bar{Z}_1 - \bar{Z}_0}{\bar{Z}_0 \bar{Z}_1 (n_0 - n_1)} + \left( l_0 \frac{\Gamma(n_1)}{\Gamma(n_0)} \frac{\bar{Z}_1^{n_1}}{\bar{Z}_0^{n_0}} \right)^{\frac{-1}{n_0 - n_1}} \right). \quad (8)$$

3. Для упрощения при практическом использовании полученного алгоритма формирования порога обнаружения слагаемое  $\Delta Z_*(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1)$  можно не учитывать, так как оно незначительно влияет на уровень порога [5]. В таком случае алгоритм формирования порога обнаружения определяется выражением, которое получено путем преобразования слагаемого  $Z_*(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1)$  из (7):

$$Z_*(Z_0, Z_1) = \frac{\bar{Z}_0 \bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 n_0 - \bar{Z}_0 n_1} \ln \left( l_0 \frac{\Gamma(n_1)}{\Gamma(n_0)} \frac{\bar{Z}_1^{n_1}}{\bar{Z}_0^{n_0}} \frac{n_0^{n_0}}{n_1^{n_1}} \right). \quad (9)$$

4. Средний уровень фона  $\bar{Z}_0$  оценивается в скользящем окне по дальности известным способом, в качестве среднего уровня сигнала  $\bar{Z}_1$  используется сигнал в анализируемом элементе разрешения.

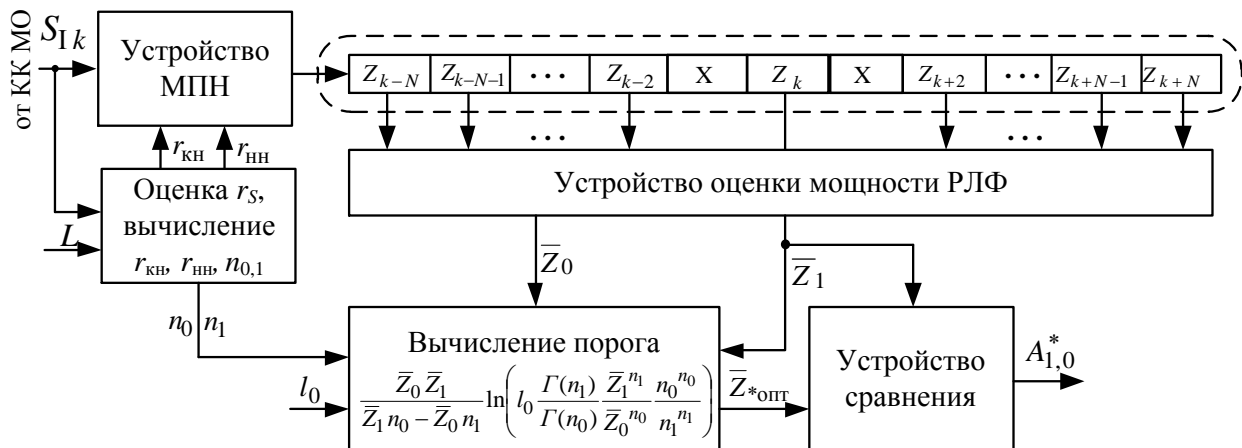
5. Весовой множитель  $l_0$  рассчитывается путем решения системы уравнений при заданных вероятностях правильного обнаружения и ложных тревог:

$$\begin{cases} F_{\text{тр}} - \frac{\Gamma[n_0, n_0 \lambda_*(\rho, l_0)]}{\Gamma(n_0)} = 0; \\ D_{\text{тр}} - \frac{\Gamma[n_1, n_1 \lambda_*(\rho, l_0)]}{\Gamma(n_1)} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где  $F_{\text{тр}}$  и  $D_{\text{тр}}$  – требуемые условные вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения;  $\lambda_*(\rho, l_0) = Z_*(Z_0, Z_1)/Z_0$  – нормированный уровень порога (9).

6. Необходимые параметры  $n_0$  и  $n_1$  рассчитываются согласно выбранной модели междупериодных флуктуаций [2]. Для расчета параметров  $n_0$  и  $n_1$  оценивается КМК принятого сигнала. В элементах разрешения, в которых отсутствует полезный сигнал, коэффициент междупериодной корреляции стремится к нулю, в таком случае параметр  $n_0$  равен числу ОС в пачке.

Структура синтезированного устройства принятия решения показана на рисунке 4. Принятый сигнал после этапа когерентной компенсации мешающих отражений (КК МО)  $S_{I k}$  поступает на вход устройства МПН. Структура устройства МПН согласно выбранной модели флуктуаций последовательности сигналов определена на рисунке 3.



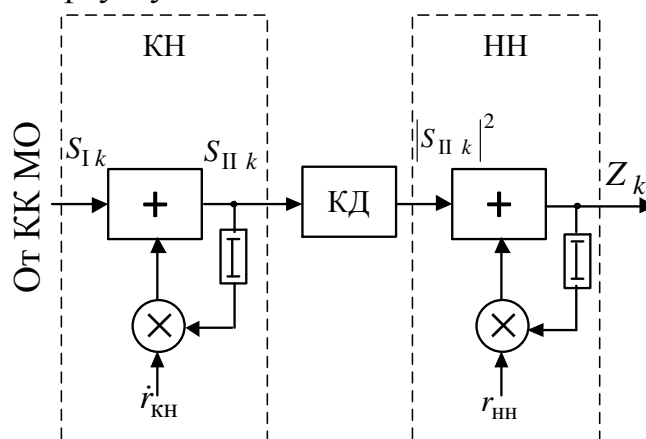
**Рисунок 4. – Структурная схема УПР с порогом обнаружения по КМСР для сигнала с произвольной междупериодной корреляцией**

Уровень порога обнаружения цели изменяется в зависимости от отношения сигнал/шум (ОСШ) и коэффициента междупериодной корреляции сигнала в анализируемом элементе разрешения. При этом вероятность ложной тревоги также изменяется, но в среднем не превышает заданный уровень. Для каждого проверяемого элемента разрешения минимизируется средний риск принятия неверных решений – «ложной» тревоги или пропуска цели.

Таким образом, синтезировано устройство принятия решения с порогом обнаружения, формируемым согласно КМСР и учитывающим коэффициент междупериодной корреляции принятого сигнала [5], что позволило компенсировать потери в дальности обнаружения цели от 2 до 16 % в зависимости от ширины спектра флуктуаций принятого сигнала.

Проведен теоретический расчет показателей качества обнаружения цели радиолокационного обнаружителя, учитывающего КМК принятого сигнала, и радиолокационного обнаружителя с фиксированными параметрами устройств МПН и принятия решения об обнаружении [5, 6]. Полученные данные позволили рассчитать выигрыш в дальности обнаружения цели предлагаемого радиолокационного обнаружителя по сравнению с известным, наиболее эффективным, который составил 2–23 % в зависимости от типа цели и состояния турбулентности атмосферы.

В **третьей главе** представлен способ адаптации радиолокационного обнаружителя к коэффициенту междупериодной корреляции принятого сигнала, включающий способ регулирования времени когерентного и некогерентного накопления и оценки коэффициента междупериодной корреляции принятого сигнала. Способ регулирования времени когерентного и некогерентного накопления реализован с помощью БИХ-фильтров первого порядка с управляемыми коэффициентами усиления задержанных на период зондирования каналов [2, 21]. Структурная схема устройства междупериодной обработки, основанная на БИХ-фильтрах первого порядка, представлена на рисунке 5. Использование БИХ-фильтров первого порядка обусловлено экспоненциальной корреляционной функцией междупериодных флуктуаций ОС.



**Рисунок 5. – Структурная схема устройства междупериодной обработки, основанная на БИХ-фильтрах первого порядка**

Модуль комплексного коэффициента  $|r_{КН}|$  определяет коэффициент обратной связи рециркулятора, а значит, и время КН, коэффициент  $r_{НН}$  определяет время НН [2, 21]. Аргумент комплексного КМК определяет набег фазы ОС за период зондирования, компенсируя тем самым частоту Доплера сигнала.

Выбор БИХ-фильтров для реализации устройств КН и НН позволил обеспечить управление их постоянной времени путем изменения коэффициентов обратной связи, а значит, и управление полосой фильтра [2]. Коэффициенты обратных связей фильтров КН и НН определяются согласно выражениям [2]

$$\dot{r}_{\text{КН}} = \hat{r}_S, \quad r_{\text{НН}} = \exp(-2/L_{\text{НН}}),$$

где  $\hat{r}_S$  – оценка КМК ограниченной последовательности ОС;  $L_{\text{НН}} = L - L_{\text{КН}} + 1$  – число НН импульсов, рассчитывается при известном числе ОС за время наблюдения цели ( $L$ ) и числе КН импульсов ( $L_{\text{КН}}$ ).

Оценка КМК принятого сигнала производится с помощью выражения (11), усреднение по дальности выполняется за три отсчета ( $M=3$ ) при условии 3 отсчетов дальности на один элемент разрешения. Междупериодное усреднение оценки КМК принятого сигнала проводилось за все время наблюдения цели. Способ оценки коэффициента междупериодной корреляции сигнала основан на рекурсивном решетчатом фильтре первого порядка [3, 13]:

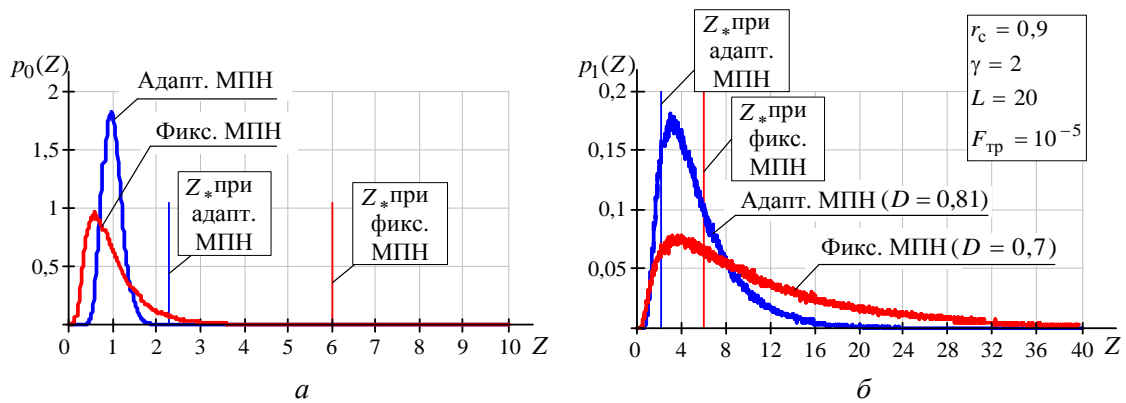
$$\hat{r}_S(k) = \frac{\sum_{m=1}^M \frac{F_{21}^m(k)}{F_{11}^m(k)}}{\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} [f_{k-l}^m f_{k-l}^{m*} + f_{k-l-1}^m f_{k-l-1}^{m*}]}, \quad k = 0 \dots L-1, \quad (11)$$

где  $F_{11}^m$  и  $F_{21}^m$  – оценки Берга;  $m$  – номер элемента дальности;  $k$  – номер периода повторения зондирующего сигнала;  $f_k^m$  – комплексные отсчеты принятого сигнала.

Использование оценки текущего КМК принятого сигнала на этапе МПН позволило управлять параметрами фильтров КН и НН и рассчитывать параметры  $\chi^2$ -распределения вероятности сигнала с учетом текущих корреляционных свойств ОС. Наличие информации о половине числа степеней свободы  $\chi^2$ -распределения вероятности сигнала и фона позволило минимизировать средний риск принятия неверных решений в синтезированном УПР.

Методом статистического моделирования проведено исследование плотности вероятности принятого сигнала после этапа адаптивного междупериодного накопления, результаты представлены на рисунке 6 при накоплении 20 импульсов с КМК ОС 0,9, отношении сигнал/шум 2,  $F_{\text{тр}} = 10^{-5}$ .

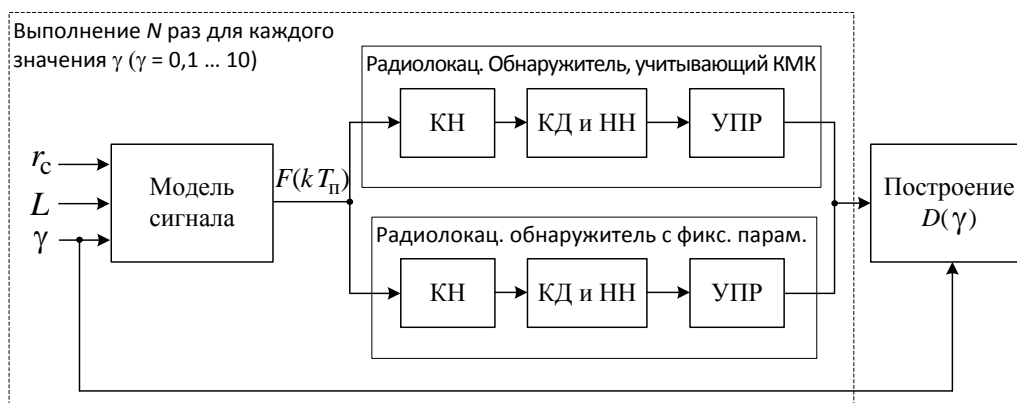
На рисунке 6, а показано, что плотность вероятности шума при адаптивном МПН подлжит большей трансформации, чем при МПН с фиксированными параметрами, что позволяет снизить порог обнаружения, не увеличивая вероятность ложных тревог. На рисунке 6, б показано, что снижение порога обнаружения увеличивает вероятность правильного обнаружения.



**Рисунок 6. – Гистограммы: а – шума после адаптивного МПН и с фиксированными параметрами; б – сигнала+шума после адаптивного МПН и с фиксированными параметрами**

Разработан программный комплекс математического моделирования, способный формировать сигнал после этапа внутрипериодной обработки и обрабатывать его сравниваемыми радиолокационными обнаружителями: 1) с адаптивными к КМК принятого сигнала устройствами МПН и синтезированным УПР по КМСР; 2) с фиксированными параметрами устройств МПН и УПР по КМСР, не учитывающим текущие корреляционные свойства принятого сигнала. Структура разработанного комплекса моделирования представлена на рисунке 7.

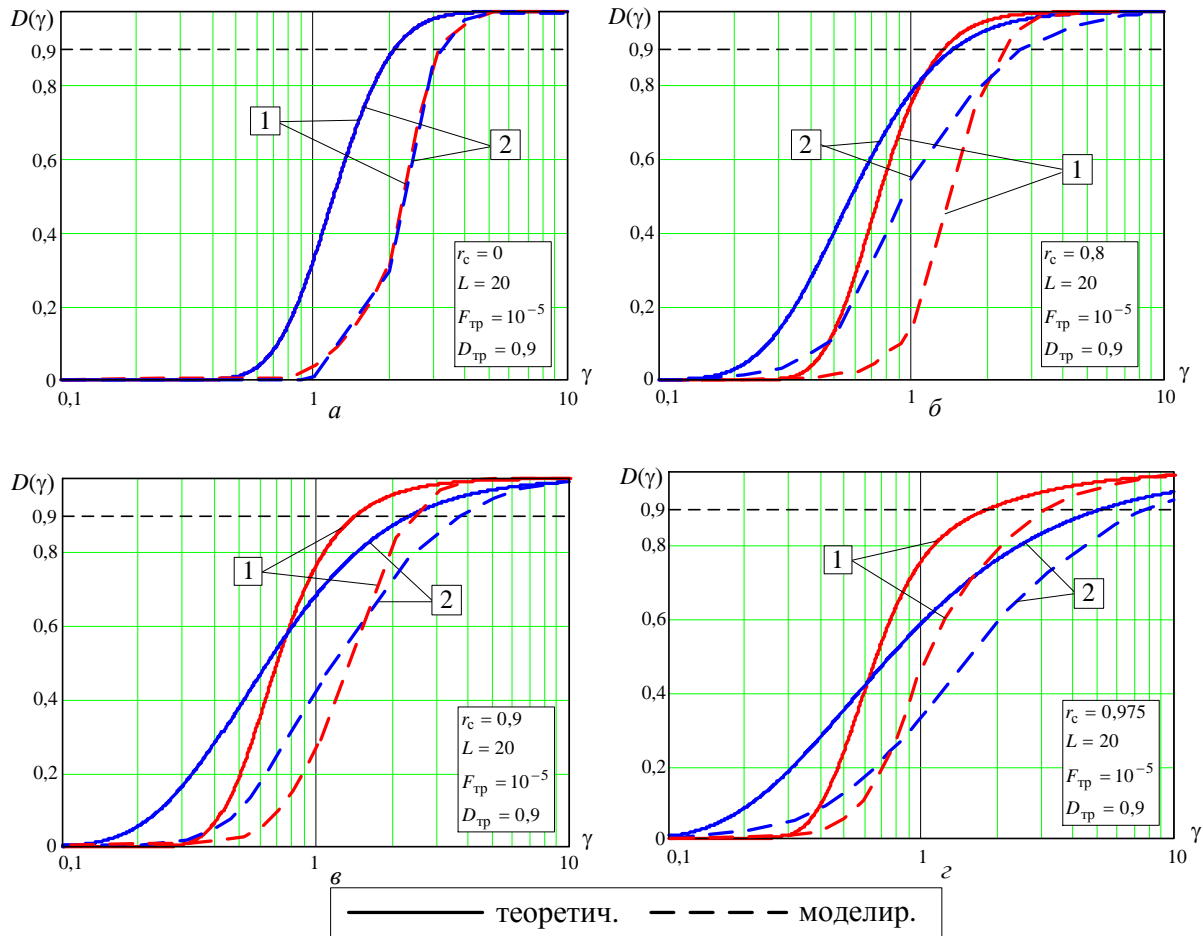
Приняты следующие ограничения при моделировании. Мешающие отражения отсутствуют или идеально скомпенсированы. В одном разрешающем объеме радиолокатора находится только один воздушный объект (цель сосредоточенная). В соседних элементах дальности, в которых оценивается уровень фона, цели отсутствуют. Корреляционная функция междупериодных флуктуаций ОС аппроксимируется экспонентой.



**Рисунок 7. – Структура комплекса моделирования, предназначенного для построения зависимости вероятности правильного обнаружения от ОСШ**

Использование данного комплекса позволило построить зависимости вероятностей правильного обнаружения от отношения сигнал/шум сравниваемых радиолокационных обнаружителей при доверительной вероятности 0,95 с погрешностью оценки вероятности правильного обнаружения 5 % и погрешностью

оценки вероятности ложной тревоги 9,8 %. При моделировании вероятность ложной тревоги для сравниваемых обнаружителей составила  $8,7 \cdot 10^{-6} - 1,03 \cdot 10^{-5}$ . Требуемая вероятность ложной тревоги  $10^{-5}$  с учетом погрешности оценки считалась достигнутой. Результаты моделирования представлены на рисунке 8.



*1 – адаптивный к КМК принятого сигнала; 2 – с фиксированными параметрами*  
**Рисунок 8. – Зависимость вероятности правильного обнаружения от ОСШ для сигналов с различным КМК: а –  $r_c=0$ ; б –  $r_c=0,8$ ; в –  $r_c=0,9$ ; г –  $r_c=0,975$**

На рисунке 8, а показано, что в случае некоррелированной последовательности ОС характеристики обнаружения совпадают, этот факт объясняется отсутствием этапа КН для адаптивного к КМК принятого сигнала радиолокационного обнаружителя и с фиксированными параметрами. В таком случае в сравниваемых радиолокационных обнаружителях порог обнаружения в УПР формируется одинаково. При увеличении КМК принятого сигнала преимущество радиолокационного обнаружителя, учитывающего КМК принятого сигнала, возрастает, как показано на рисунке 8, б, в, г.

Для анализа характеристик обнаружения и сравнения радиолокационных обнаружителей на рисунке 8 определялись значения требуемых ОСШ ( $\gamma_{тп}$ ), при которых кривые обнаружения достигнут требуемой вероятности правильного обнаружения 0,9. Данные значения приведены в таблице 1. Также стоит заметить, что частота Доплера сигнала при построении характеристики



обнаружения цели радиолокационным обнаружителем, учитывающим КМК принятого сигнала, оценивалась с помощью решетчатого алгоритма. При построении характеристики обнаружения радиолокационного обнаружителя с фиксированными параметрами частота Доплера сигнала считалась точно известной (совпала с центральной частотой фильтра КН), что на практике случается крайне редко. Из-за рассогласования центральной частоты фильтра КН с фиксированными параметрами и частоты Доплера сигнала ОСШ может уменьшиться до 2 раз. Вследствие этого требуемое ОСШ, при котором достигается заданная вероятность правильного обнаружения, увеличивается до 2 раз.

**Таблица 1. – Значения требуемого отношения сигнал/шум**

$r_c$	$\gamma_{тр}$	Адаптивная обработка		Фиксир. парам. КН и НН	
		моделирование	теоретическое	моделирование	теоретическое
0		3,2	2,1	3,2	2,1
0,8		2,4	1,35	2,5	1,48
0,9		2,5	1,43	3,8	2,37
0,975		3,1	1,85	7,6	5,27

С помощью данных таблицы 1 рассчитаны выигрыши в дальности обнаружения цели ( $D_{\%}$ ) адаптивного к корреляционным свойствам принятого сигнала радиолокационного обнаружителя по сравнению с радиолокационным обнаружителем с фиксированными параметрами и различными вариантами реализаций устройств междупериодного накопления сигнала. Полученные результаты приведены в таблице 2 для случаев:

сравнения результатов математического моделирования при точно известной частоте Доплера сигнала (центральная частота устройства когерентного накопления равна частоте Доплера сигнала ( $F_{кн} = F_{дс}$ ));

сравнения результатов математического моделирования при попадании частоты Доплера сигнала между фильтрами КН с фиксированными параметрами ( $F_{кн} = F_{дс} + 0,5 \Delta F_{кн}$ , требуемое отношение сигнал/шум увеличилось в 2 раза).

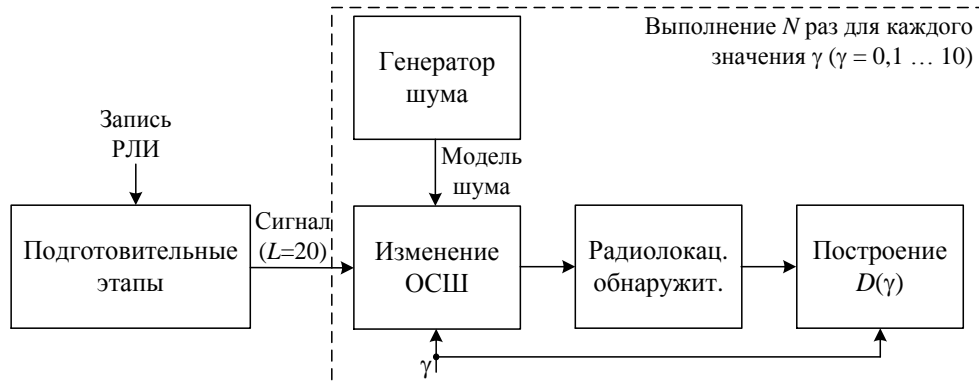
**Таблица 2. – Выигрыш в дальности обнаружения цели адаптивного к КМК принятого сигнала радиолокационного обнаружителя**

$r_c$	$D_{\%}$	Теоретический	По результатам моделирования	
			$F_{кн} = F_{дс}$	$F_{кн} = F_{дс} + 0,5 \Delta F_{кн}$
0		0 %	0 %	16 %
0,8		2,3 %	1 %	17 %
0,9		12 %	10 %	24 %
0,975		23 %	20 %	32 %

Выигрыш в дальности обнаружения цели по результатам моделирования составил 1–20 % без ухудшения характеристик обнаружения [14, 17, 18]. Уменьшение выигрыша в сравнении с теоретическими расчетами (2–23 %) обусловлено ошибками оценки КМК принятого сигнала. Полученные данные

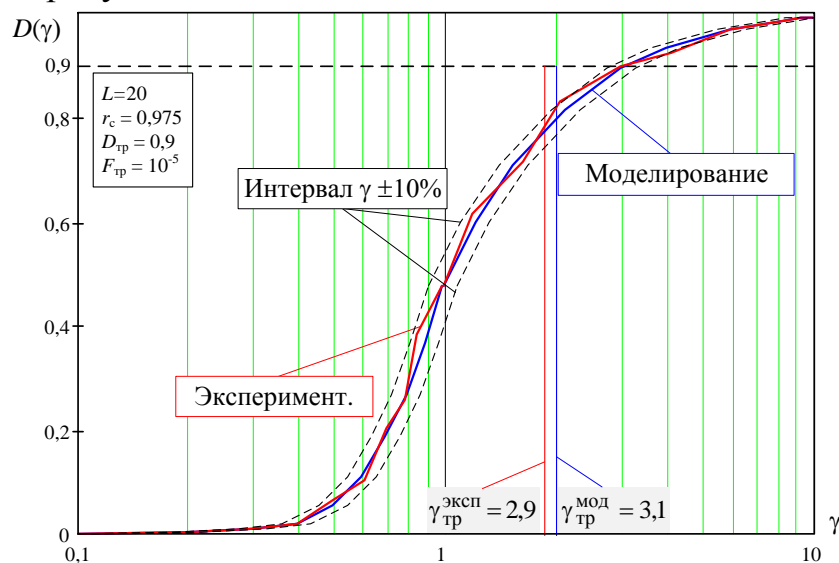
подтвердили преимущество радиолокационного обнаружителя с адаптивными к КМК устройствами междупериодного накопления и принятия решения об обнаружении при сравнении его с обнаружителем с фиксированными параметрами.

В четвертой главе приведены результаты полунатурного моделирования. Структурная схема разработанного комплекса полунатурного моделирования представлена на рисунке 9. Комплекс моделирования предназначен для проведения полунатурного эксперимента с использованием реальной записанной радиолокационной информации.



**Рисунок 9. – Структурная схема комплекса моделирования в интересах проведения полунатурного эксперимента**

Разработанный комплекс моделирования позволил оценить показатели качества обнаружения цели адаптивного к корреляционным свойствам принятого сигнала радиолокационного обнаружителя. Методом полунатурного моделирования получены зависимости вероятности правильного обнаружения от ОСШ предлагаемого радиолокационного обнаружителя. Результаты экспериментальных исследований согласуются с результатами математического моделирования, что показано на рисунке 10.



**Рисунок 10. – Характеристики обнаружения адаптивного к корреляционным свойствам принятого сигнала радиолокационного обнаружителя, полученные методом полунатурного моделирования**

Сравнение результатов проводилось по значениям требуемого отношения сигнал/шум, при котором достигается вероятность правильного обнаружения 0,9. Различие результатов полунатурного эксперимента и математического моделирования не превышает 10 %, что свидетельствует о высокой степени адекватности разработанной математической модели устройства междупериодного накопления с адаптивным регулированием времени когерентного и некогерентного накопления сигнала и синтезированного устройства принятия решения об обнаружении принятого сигнала.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Проведен аналитический обзор известных методов обнаружения радиолокационных сигналов, основанных на различных моделях междупериодных флуктуаций последовательности отраженных сигналов и способах формирования порога [4]. Выявленным недостатком известных методов обнаружения является отсутствие учета текущего значения коэффициента междупериодной корреляции принятого сигнала [6, 11, 17]. Результаты анализа позволили обосновать путь повышения эффективности радиолокационных обнаружителей, заключающийся в использовании дополнительной информации о текущем значении коэффициента междупериодной корреляции полезного сигнала и фона в каждом элементе разрешения РЛС [2, 5].

2. Рассчитаны с помощью программного комплекса моделирования обратного вторичного излучения BSS корреляционные свойства сигналов, отраженных от различных типов целей в нормальных и турбулентных погодных условиях [4, 6]. Анализ полученных данных показал, что коэффициент междупериодной корреляции принятого сигнала изменяется в зависимости от типа цели и состояния турбулентности атмосферы [4, 6]. Рассчитаны характеристики обнаружения цели в различных условиях наблюдения радиолокационным обнаружителем, не учитывающим текущие корреляционные свойства принятого сигнала. Полученные результаты позволили выявить потери в дальности обнаружения цели, вызванные рассогласованием параметров радиолокационного обнаружителя и текущих, изменяющихся в зависимости от условий наблюдения цели корреляционных свойств принятого сигнала. Показано, что такие потери в дальности обнаружения цели составляют от 2 до 16 % [6] и для исключения их необходимо учитывать коэффициент междупериодной корреляции принятого сигнала на этапах междупериодного накопления и принятия решения.

3. Проведен статистический синтез адаптивного устройства принятия решения об обнаружении, оптимального по критерию минимума среднего риска, обеспечивающего учет коэффициента междупериодной корреляции принятого

сигнала [5]. Показано, что при формировании порога обнаружения, оптимального по критерию минимума среднего риска, кроме уровня шума и сигнала в анализируемом элементе разрешения необходимо оценивать число степеней свободы  $\chi^2$ -распределения вероятности сигнала и фона с учетом междупериодной корреляции флуктуаций принятого сигнала [6, 21].

4. Разработан способ адаптации радиолокационного обнаружителя к коэффициенту междупериодной корреляции принятого сигнала, включающий способ оценки коэффициента междупериодной корреляции сигнала, основанный на решетчатой фильтрации, и способ регулирования времени когерентного и некогерентного накопления, реализованный на БИХ-фильтрах первого порядка с управляемыми коэффициентами усиления задержанных на период зондирования каналов [2, 3, 21]. Показано, что в элементах разрешения при отсутствии полезного сигнала все время наблюдения тратится на некогерентное накопление, благодаря этому происходит максимально возможная трансформация закона распределения фона. Уровень порога обнаружения цели вследствие максимальной трансформации фона снижается, но вероятность ложной тревоги сохраняется, в результате чего вероятность правильного обнаружения возрастает [2].

5. Методом статистического моделирования проведен сравнительный анализ предлагаемого радиолокационного обнаружителя и известного, наиболее эффективного [4]. Результаты моделирования показали, что при использовании синтезированного устройства принятия решения совместно со способом адаптации радиолокационного приемника к корреляционным свойствам принятого сигнала выигрыш в дальности обнаружения цели составил 1–20 % по сравнению с аналогичным приемником с фиксированными параметрами без ухудшения характеристик обнаружения [2, 21]. В случае различия частоты Доплера сигнала и центральной частоты фильтра когерентного накопления радиолокационного приемника с фиксированными параметрами выигрыш в дальности обнаружения цели составил 16–32 % [1]. Результаты полунатурного эксперимента подтверждают высокую степень адекватности адаптивного к корреляционным свойствам радиолокационного обнаружителя [2, 5].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты расчета коэффициента междупериодной корреляции отраженного сигнала от различных типов целей в различных условиях турбулентности атмосферы и выявленные потери в дальности обнаружении цели РЛС, связанные с рассогласованием корреляционных свойств цели и параметров устройств междупериодной обработки и принятия решения об обнаружении, использовались в научно-исследовательской работе «Теоретическое обоснование возможности увеличения дальности обнаружения и сопровождения целей радиолокатором

воздушного базирования», шифр «Качество-2015», № госрегистрации 20151623. Предложенный способ адаптации радиолокационного обнаружителя к коэффициенту междупериодной корреляции принятого сигнала совместно с синтезированным устройством принятия решения об обнаружении также использовался в НИР «Качество-2015». Методы решетчатой фильтрации, используемые в диссертационной работе для оценки коэффициента междупериодной корреляции принятого сигнала, применялись для фильтрации шумов квантования по амплитуде напряжения с угломестного датчика в НИР «Шершень ВА РБ», № госрегистрации 20121318.

Синтезированное устройство принятия решения, оптимальное по критерию минимума среднего риска, учитывающее текущий коэффициент междупериодной корреляции принятого сигнала совместно со способом адаптации устройств междупериодного накопления к коэффициенту междупериодной корреляции принятого сигнала могут быть использованы при разработке или модернизации радиолокационных обнаружителей активных импульсных радиолокаторов кругового или секторного обзора с когерентными радиопередающими устройствами.

Дальнейшее развитие тематики диссертационного исследования может заключаться в повышении точности оценки комплексного коэффициента междупериодной корреляции сигнала, использовании ее для измерения частоты Доплера сигнала, для распознавания классов воздушных объектов и борьбы с активными имитирующими помехами.

Соискатель

С. А. Габец

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых научных изданиях**

1. Габец, С. А. Адаптивное когерентное накопление отраженных сигналов / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Вестник ПГУ (Сер. С: Фундаментальные науки, информационные технологии). – 2014. – № 4. – С. 45–49.
2. Габец, С. А. Адаптивное к корреляционным характеристикам отраженного сигнала устройство междупериодной обработки / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Изв. НАН РБ. – 2015. – № 4. – С. 100 – 106.
3. Габец, С. А. Выбор алгоритма самонастройки для адаптивного устройства когерентного накопления отраженного сигнала в приемном устройстве радиолокатора обзора / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Доклады БГУИР. – 2016. – № 1 (95). – С. 57–63.
4. Габец, С. А. Методика получения характеристик флуктуаций отраженного сигнала от воздушных целей для моделирования входных воздействий / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Молодежь в науке – 2014: прил. к журн. Изв. НАН РБ (Сер. физ.-техн. науки). – 2015. – Ч. 3.– С. 12–15.

5. Габец, С. А. Оптимальное по критерию минимума среднего риска адаптивное устройство принятия решения, учитывающее корреляционные свойства отраженного сигнала / С. А. Габец, С. Ю. Седышев, Р. А. Гуцев // Доклады БГУИР. – 2017. – № 5 (107). – С. 32–39.

6. Габец, С. А. Характеристики обнаружения радиолокационного приемника, учитывающего корреляционные свойства отраженного сигнала / С. А. Габец, С. Ю. Седышев, // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 1 (42). – С. 81–87.

#### **Материалы республиканских и международных конференций**

7. Габец, С. А. Применение адаптивного фильтра когерентного накопления для улучшения характеристик обнаружения флуктуирующего сигнала / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // VII Машеровские чтения: сб. тез. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф., Витебск, 24–25 сентября 2013 г. / УО «ВГУ им. П. М. Машерова». – Витебск, 2013. – С. 103–104.

8. Габец, С. А. Адаптация к корреляционным свойствам отраженного сигнала для увеличения дальности / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Актуальные проблемы военной науки и практики в современных условиях и пути их решения: тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 23-24 апреля 2015 г. / УО «ВА РБ». – Минск, 2015. – С. 352.

9. Габец, С. А. Адаптивная междупериодная обработка радиолокационного сигнала на фоне коррелированных помех / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации: сб. тез. докл. III Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–17 мая 2013 г. / УО «ВА РБ». – Минск, 2013. – С. 121–122.

10. Габец, С. А. Адаптивный режекторный фильтр подавления мешающих отражений / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Респ. науч. конф. студентов и аспирантов: материалы конф., Гомель, 25–27 марта 2013 г. / УО «ГГУ им. Ф. Скорины». – Гомель, 2013. – С. 149–150.

11. Габец, С. А. Влияние корреляционных свойств отраженного сигнала на характеристики обнаружения радиолокационного приемника / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // II Междунар. науч.-техн. интернет-конф. «Информационные технологии в образовании, науке и производстве», Минск, 15 апреля 2013 г. / УО «МИДО БНТУ». – Минск, 2013.

12. Габец, С. А. Использование адаптивного когерентного накопления для улучшения характеристик обнаружения радиолокационных сигналов / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Молодежь в науке – 2013: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 19–22 ноября 2013 г. / НАН РБ. – Минск, 2013. – С. 592–594.

13. Габец, С. А. Использование лестничного RLS-алгоритма для когерентного накопления отраженного сигнала / С. А. Габец, С. Ю. Седышев //

Научные стремления-2014: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 25–27 ноября 2014 г. / ООО «Лаборатория интеллекта». – Минск, 2014. – С. 182–183.

14. Габец, С. А. Применение адаптивной обработки сигналов для повышения эффективности радиолокатора / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Респ. науч. конф. студентов и аспирантов: материалы конф., Гомель, 24–26 марта 2014 г. / УО «ГГУ им. Ф. Скорины». – Гомель, 2014. – С. 103–104.

15. Габец, С. А. Применение адаптивных алгоритмов обработки радиолокационных сигналов для улучшения качественных показателей радиолокатора / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Междунар. науч.-техн. конф., приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 18–19 марта 2014 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2014. – С. 86–88.

16. Габец, С. А. Применение лестничных RLS алгоритмов для когерентного накопления флуктуирующей последовательности отраженных сигналов / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Научные стремления-2014: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 25–27 ноября 2014 г. / ООО «Лаборатория интеллекта». – Минск, 2014. – С. 184–187.

17. Габец, С. А. Улучшение характеристик обнаружения радиолокационного приемника с помощью учета корреляционных свойств отраженного сигнала / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Междунар. науч.-практ. конф. «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке: Современные проблемы радиотехники», Харьков, 5–7 марта 2014 г. / УО «ХНУРЭ». – Харьков, 2014. – С. 111–112.

18. Габец, С. А. Учет корреляционных характеристик отраженного сигнала при настройке параметров радиолокационного приемника / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Научные стремления-2015: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 25–27 марта 2015 г. / ООО «Лаборатория интеллекта». – Минск, 2015. – С. 139–141.

19. Габец, С. А. Оценка корреляционных свойств отраженного сигнала с помощью программы моделирования обратного вторичного излучения сосредоточенных целей / С. А. Габец, С. Ю. Седышев // Современная военно-техническая политика: проблемы и перспектива: материалы Междунар. воен.-научн. конф., Минск, 21–22 марта 2013 г. / УО «ВА РБ». – Минск, 2013. – С. 369.

### **Патенты**

20. Устройство адаптивного когерентного накопления отраженного сигнала в радиолокационных комплексах кругового обзора: пат. на полезную модель № 10669, МПК G01S 7/36 / С. А. Габец, С. Ю. Седышев; заявитель УО «ВА РБ». – № u201401060; заявл. 23.04.2014.

21. Адаптивный к корреляционным свойствам сигнала радиолокационный обнаружитель воздушных объектов: пат. на изобретение № 21770 / С. А. Габец, С. Ю. Седышев; С. А. Горшков; заявитель УО «ВА РБ». – № a20150436; заявл. 28.08.2015.

## РЭЗЮМЭ

Габец Сяргей Аляксандравіч

### **Радыеёлакацыйны выявіцель павеатраных аб'ектаў на фоне гаўсаўскага шуму з адаптацыяй да каэфіцыента міжперыяднай карэляцыі прынятага сігналу**

**Ключавыя словы:** адаптыўная прылада прыняцця рашэння, каэфіцыент міжперыяднай карэляцыі прынятага сігналу, час кагерэнтнага і некагерэнтнага наапалення, рашотчаты фільтр.

**Мэта работы:** павышэнне дальнасці выяўлення РЛС шляхам выкарыстоўвання апастэрыорнай інфармацыі аб каэфіцыенце міжперыяднай карэляцыі прынятага сігналу ў кожным элеменце разрашэння РЛС па дальнасці.

**Метады даследавання:** метады статыстычнай тэорыі прыняцця рашэнняў, а таксама метады матэматычнага мадэлявання і наапаўнатурнага эксперыменту.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** праведзены аналітычны агляд існуючых спосабаў выяўлення павеатранага аб'екта, акрэслены іх недахопы і абгрунтаваны шлях павышэння эфектыўнасці. Сінтэзавана адаптыўная прылада прыняцця рашэння, аптымальнага па крытэрыю мінімума сярэдняй рызыкі, які ўлічвае каэфіцыент міжперыяднай карэляцыі прынятага сігналу ў кожным элеменце разрашэння. Распрацаваны спосаб адаптацыі прылад міжперыяднага наапалення да каэфіцыента міжперыяднай карэляцыі прынятага сігналу, які дазваляе рэгуляваць час кагерэнтнага і некагерэнтнага наапалення і велічыню парога выяўлення ў залежнасці ад умоў назірання цэлі. Метадам матэматычнага мадэлявання праведзены супастаўляльны аналіз паказчыкаў якасці сінтэзаванай прылады прыняцця рашэння і вядомых, найбольш эфектыўных прылад. Вынікі наапаўнатурнага эксперыменту пацвярджаюць высокую ступень адэкватнасці распрацаванай матэматычнай мадэлі адаптыўнага да карэляцыйных уласцівасцей прынятага сігналу радыеёлакацыйнага выявіцеля.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы прылад міжперыяднага наапалення і прыняцця рашэння для павышэння паказчыкаў эфектыўнасці выяўлення.

**Галіна прымянення:** мадэрнізацыя радыеёлакатараў агляда старага парку, якія маюць у сваім складзе кагерэнтную апрацоўку, а таксама праектаванне і стварэнне перспектыўных радыеёлакатараў новага пакалення.



## РЕЗЮМЕ

Габец Сергей Александрович

### **Радиолокационный обнаружитель воздушных объектов на фоне гауссовского шума с адаптацией к коэффициенту междупериодной корреляции принятого сигнала**

**Ключевые слова:** адаптивное устройство принятия решения, коэффициент междупериодной корреляции принятого сигнала, время когерентного и некогерентного накопления, решетчатый фильтр.

**Цель работы:** увеличение дальности обнаружения РЛС путем использования апостериорной информации о коэффициенте междупериодной корреляции принятого сигнала в каждом элементе разрешения РЛС по дальности.

**Методы исследования:** методы статистической теории принятия решений, а также методы математического моделирования и полунатурного эксперимента.

**Полученные результаты и их новизна:** проведен аналитический обзор существующих способов обнаружения воздушного объекта, выявлены их недостатки и обоснован путь повышения эффективности. Синтезировано адаптивное устройство принятия решения, оптимального по критерию минимума среднего риска, учитывающего коэффициент междупериодной корреляции принятого сигнала в каждом элементе разрешения. Разработан способ адаптации устройств междупериодного накопления к коэффициенту междупериодной корреляции принятого сигнала, позволивший регулировать время когерентного и некогерентного накопления и величину порога обнаружения в зависимости от условий наблюдения цели. Методом математического моделирования проведен сопоставительный анализ показателей качества синтезированного устройства принятия решения и известных, наиболее эффективных устройств. Результаты полунатурного эксперимента подтверждают высокую степень адекватности разработанной математической модели адаптивного к корреляционным свойствам принятого сигнала радиолокационного обнаружителя.

**Рекомендации по использованию:** результаты исследования могут быть использованы при разработке устройств междупериодного накопления и принятия решения для повышения показателей эффективности обнаружения.

**Область применения:** модернизация радиолокаторов обзора старого парка, имеющих в своем составе когерентную обработку, а также проектирование и создание перспективных радиолокаторов нового поколения.

## SUMMARY

Gabets Sergey

### **Radar detector of aerial objects against the background of Gaussian noise with adaptation to the inter-period correlation coefficient of the received signal**

**Key words:** decision-making adaptive device, inter-period correlation coefficient of the received signal, coherent and incoherent accumulation time, lattice filter.

**The purpose of the research** is to increase radar detection range using posterior information about the inter-period correlation coefficient of the received signal in each radar range bin.

**The research methods:** the methods of statistical decision-making theory as well as the methods of the mathematical modeling and seminatural experiment.

**The results obtained and their novelty:** analytical summary of the existing ways of aerial objects detection is provided, the drawbacks of these ways are detected and efficiency improvement course is founded. Decision-making adaptive device, which is minimum medium risk criterion optimal and considers the inter-period correlation coefficient of the received signal in each radar bin, is synthesized. The way of adaptation of inter-period accumulation devices to the inter-period correlation coefficient of the received signal that allows to control the time of coherent and incoherent accumulation and the quantity of the detection limit according to the target surveillance conditions is worked out. By the method of the mathematical modeling contrastive analysis of the quality characteristics of the synthesized decision-making device and known and the most effective devices is done. The results of the seminatural experiment prove the high degree adequacy of the worked out mathematical model of the adaptive to the correlation properties received signal of the radar detector.

**The extent of use.** The results of the research can be used in development of inter-period accumulation and decision-making devices to increase the detection efficiency indicators.

**The application field.** Modernization of the used surveillance radars with coherent processing, designing and development of the next generation perspective radars.

Подписано в печать 10.01.2019. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,63. Тираж 28 экз. Заказ 13.

Издатель и полиграфическое исполнение:

учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий

№ 2/81 от 19.03.2014.

Пр. Независимости, 220, 220057, Минск.