

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.4>

УДК: 621.396.969.18

МЕТОДИКА СИНТЕЗА АЛГОРИТМА ПЕЛЕНГАЦИИ ПОСТАНОВЩИКА КОМБИНИРОВАННОЙ ИМИТИРУЮЩЕЙ И МАСКИРУЮЩЕЙ ПОМЕХИ САМОПРИКРЫТИЯ В МОНОИМПУЛЬСНЫХ ИМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРОВСКИХ РАДИОЛОКАТОРАХ СОПРОВОЖДЕНИЯ

И.В. Чигирь¹, С.А. Горшков²

¹ Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»
220137, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, д.220

² Общество с ограниченной ответственностью «МилитСофт Солюшенс»
220090, Республика Беларусь, г. Минск, Логойский тракт, д.37

Статья поступила в редакцию 9 марта 2023 г.

Аннотация. Для измерителей угловых координат импульсно-доплеровских радиолокаторов (ИД РЛС) сопровождения, реализующих метод амплитудного мгновенного сравнения радиосигналов разработана методика синтеза алгоритма пеленгации постановщика комбинированной имитирующей и маскирующей помехи (КИМ-помехи) самоприкрытия. Проведен расчет и сравнительный анализ ошибок оценивания угловых координат воздушной цели-постановщика КИМ-помехи при выборе в качестве источников пеленговой информации: ответной шумовой помехи (ОШП), уводящей помехи (УП) и отраженного сигнала воздушной цели (ВЦ).

Ключевые слова: импульсно-доплеровская радиолокационная станция сопровождения, комбинированная имитирующая и маскирующая помеха самоприкрытия, пеленгация постановщиков помех.

Автор для переписки: Чигирь Иван Викторович, ivan.chigir.a@gmail.com

Введение

Динамичное развитие средств РЭП усложняет задачу помехозащиты (ПХЗ) ИД РЛС сопровождения от КИМ-помехи самоприкрытия [1 с. 55, 2]. КИМ-помеха самоприкрытия представляет собой аддитивную смесь уводящей по дальности и/или скорости помехи и протяженной по дальности коррелированной ОШП [1-3]. УП идентична по своей структуре отраженному сигналу (ОС) и превосходит его не менее чем на 3–5 дБ на импульс, обеспечивая увод следящих систем по дальности и/или скорости. ОШП представляет собой прерывистый коррелированный шум в полосе от 7 до 20 кГц относительно частоты Доплера сопровождаемой воздушной цели (ВЦ) или УП [2 с. 152]. Она излучается в ответ на каждый принятый зондирующий импульс РЛС в течение времени, не превышающего период повторения, обеспечивая маскирование ОС на определенном интервале частот и времени запаздывания. Согласованное по времени воздействие УП и ОШП с определенными энергетическими соотношениями [3] повышает эффективность увода по сравнению со случаем отдельного применения помех.

В [4] разработан алгоритм защиты ИД РЛС сопровождения от КИМ-помех, который предполагает постоянный мониторинг воздушно-помеховой обстановки в районе сигнала сопровождаемого объекта (ОС или УП). Устройство защиты от КИМ-помех включает в себя обнаружитель ОШП, компенсатор ОШП, а также дискриминатор угловых координат (УК) по КИМ-помехе. Задача обнаружения ОШП рассмотрена в [5], компенсации – в [6], задача пеленгации постановщика КИМ-помех ранее не рассматривалась.

1. Постановка задачи

Рассмотрим ситуацию противоборства моноимпульсной ИД РЛС сопровождения и ВЦ, на борту которой имеется станция активных помех. РЛС сопровождает одиночную ВЦ. В РЛС используется когерентное накопление импульсов на всем интервале наблюдения, при этом период повторения

постоянен в течение десятков-сотен импульсов. Начиная с момента t_0 , с борта ВЦ осуществляется постановка КИМ-помехи.

На интервале наблюдения T_H принятое колебание $f(t)$ состоит из аддитивной смеси ОС $m(t, \mathbf{a}_Ц)$, мешающих отражений (МО) $n(t)$, внутренних шумов и КИМ-помехи $h_{ким}(t, \mathbf{a}_{ким}) = h_{уп}(t, \mathbf{a}_{уп}) + h_{ошп}(t, \mathbf{a}_{ошп})$. Здесь $\mathbf{a}_Ц = \left\| t_{r_Ц} \quad F_{ДЦ} \right\|^T$ – вектор информативных параметров ОС ($t_{r_Ц}$ – время запаздывания, $F_{ДЦ}$ – частота Доплера цели); составляющие КИМ-помехи – $h_{уп}(t, \mathbf{a}_{уп})$ – УП, а $h_{ошп}(t, \mathbf{a}_{ошп})$ – ОШП; $\mathbf{a}_{ким} = \left\| \mathbf{a}_{уп} \quad \mathbf{a}_{ошп} \right\|^T$ – вектор информативных параметров КИМ-помехи; $\mathbf{a}_{уп} = \left\| t_{r_{уп}} \quad F_{Дуп} \right\|^T$ – вектор информативных параметров УП ($t_{r_{уп}}$ – время запаздывания УП, $F_{Дуп}$ – частота Доплера УП). УП идентична по своей структуре ОС и превосходит его по мощности; $\mathbf{a}_{ошп} = \left\| t_{r_{ошп}} \quad T_{0_{ошп}} \quad \Delta f_{ошп} \right\|^T$ – вектор информативных параметров ОШП: время запаздывания переднего фронта шумового импульса – $t_{r_{ошп}}$, его длительность – $T_{0_{ошп}}$ и ширина спектра – $\Delta f_{ошп}$. Тем самым с момента времени t_0 , когда $t_{r_{уп}} \approx t_{r_Ц}$, обеспечивается устойчивый переход следящих измерителей дальности и скорости с сопровождения скрытого ОШП ОС на сопровождение УП ($A_{уп}=1$). ОШП в полосе $\Delta f_{ошп}$ относительно частоты Доплера, сопровождаемой ВЦ или УП, маскирует большую часть интервала однозначного определения дальности вместе с ОС.

В результате временной дискретизации принятый сигнал представляет векторную функцию $\|f_i\|$ при $i = 0 \dots N - 1$, где $N = T_H / \Delta t$ – число временных отсчетов; Δt – шаг дискретизации по времени, выбираемый в соответствии с теоремой Котельникова. В векторном виде принятый сигнал $f(t)$ можно представить следующим выражением

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{m}(t, \boldsymbol{\alpha}_{\text{ц}}) + \mathbf{h}_{\text{КИМ}}(t, \boldsymbol{\alpha}_{\text{КИМ}}) + \mathbf{n}(t) + \mathbf{h}(t). \quad (1)$$

Задача обнаружения КИМ-помехи считается решенной [5], при этом имеется оценка параметров УП $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\text{УП}}$ и ОШП $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\text{ОШП}}$ [7], задача компенсации протяженной по дальности коррелированной ОШП без оценки ее корреляционных свойств решена [6], на фоне остатков компенсации решена задача обнаружения ОС и получена оценка ее параметров $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\text{ц}}$.

Для измерения УК в ИД РЛС сопровождения используется метод амплитудного мгновенного сравнения (АМС) радиосигналов [1,8]. Для измерения двух УК используют либо три канала устройства обработки [8 с.29], либо для уменьшения массогабаритных характеристик аппаратуры применяют методы уплотнения каналов [10 с.153]. В обоих случаях устройством, на выходе которого формируется невязка (разница между текущей и доопытной оценками УК), является фазовый детектор (ФД). Поэтому для дальнейших исследований будем рассматривать ИД РЛС сопровождения, в которых следящее измерение УК реализовано методом АМС с суммарно-разностной обработкой и перемножением.

В [8-11] подробно рассмотрены структуры устройств и алгоритмы пеленгации, которые обеспечивают следящее измерение УК сосредоточенных целей и постановщиков активных шумовых помех. Структуры устройств и алгоритмы пеленгации протяженных узкополосных шумоподобных помех, действующих в аддитивной смеси с другими активными помехами, в открытых источниках не рассматривались. Поэтому целью статьи является разработка методики синтеза дискриминатора УК по постановщику КИМ-помех.

2. Алгоритм получения сигнала ошибки пеленгации по воздушной цели

Структура следящего измерителя УК с суммарно-разностной обработкой и перемножением ИД РЛС представлена на рисунке 1. При использовании метода АМС информация об угловом положении ВЦ содержится в амплитудном множителе $A(\Delta\theta_{\text{ц}})$ комплексной диаграммы направленности антенны (ДНА)

$g(\theta)$ полезной составляющей принятого сигнала $\mathbf{f}_\theta(t)$. Здесь $\Delta\theta_{\text{ц}} = \theta_a - \theta_{\text{ц}}$ – рассогласование между угловым положением антенны РЛС θ_a и угловым положением ВЦ $\theta_{\text{ц}}$ (под θ понимается азимут β или угол места ε).

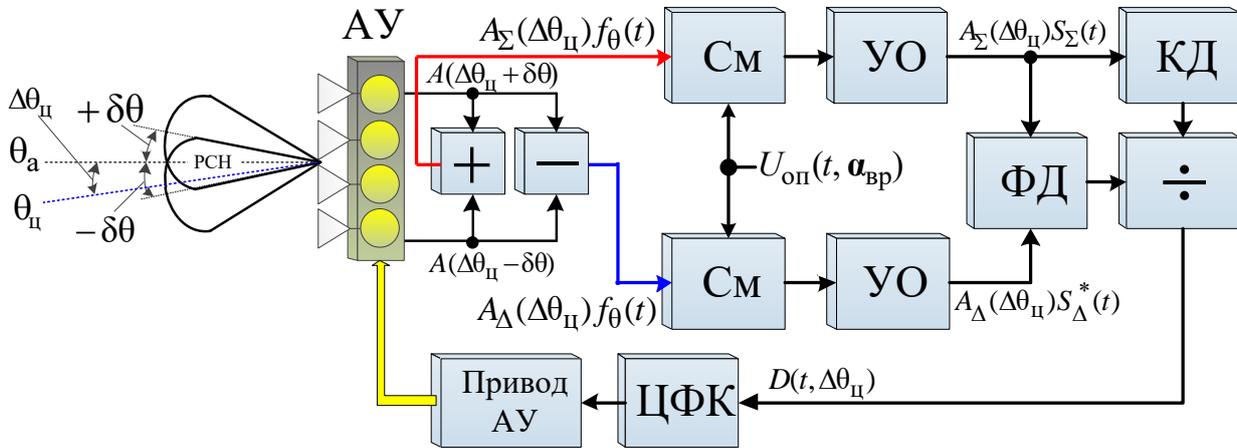


Рис. 1. Структурная схема штатного следящего измерителя угловых координат ИД РЛС сопровождения

На выходе устройства суммарно-разностной обработки формируются суммарная и разностная амплитудные ДНА $A_{\Sigma, \Delta}(\theta_a) = A(\theta_a + \delta\theta) \pm A(\theta_a - \delta\theta)$ (рисунок 1). На вход устройств обработки суммарного (разностного) каналов поступает принятый сигнал (1). Полезная составляющая $\mathbf{f}_\theta(t)$ в принятом сигнале учитывается с соответствующим амплитудным множителем ДНА. При постановке КИМ-помехи, которая является помехой самоприкрытия, полезная составляющая принятого сигнала $\mathbf{f}_\theta(t)$ представляет собой смесь отраженного от цели сигнала, всех составляющих КИМ-помехи. Сигнал на выходе устройства когерентной обработки суммарного канала измерителя описывается выражением $S_\Sigma(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) = A_\Sigma(\Delta\theta_{\text{ц}})S_\theta(t) + S_{\Sigma\text{ш}}(t)$, на выходе разностного канала – $S_\Delta(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) = A_\Delta(\Delta\theta_{\text{ц}})S_\theta(t) + S_{\Delta\text{ш}}(t)$.

В данных выражениях $S_\theta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} v_\phi(t - \tau) \cdot U_{\text{оп}}(\tau, \alpha_{\text{впр}}) \cdot f_\theta(\tau) d\tau$ –

результат когерентной обработки принятого сигнала на фоне внутренних шумов; $v_\phi(t - \tau)$ – импульсная характеристика устройства междупериодной когерентной

обработки сигнала; $S_{\Sigma\text{ш}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} v_{\Phi}(t - \tau) \cdot U_{\text{оп}}(\tau, \mathbf{a}_{\text{вр}}) \cdot h_{\Sigma\text{ш}}(\tau) d\tau$ – шумовая

составляющая обобщенного корреляционного интеграла на выходе устройства когерентной обработки суммарного канала;

$S_{\Delta\text{ш}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} v_{\Phi}(t - \tau) \cdot U_{\text{оп}}^*(\tau, \mathbf{a}_{\text{вр}}) \cdot h_{\Delta\text{ш}}(\tau) d\tau$ – то же, но на выходе устройства

когерентной обработки разностного канала обработки [9].

После обработки в каналах дискриминатора суммарный $S_{\Sigma}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})$ и разностные $S_{\Delta}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})$ сигналы перемножаются в ФД, выделяющем реальную часть их произведения сигналов, и нормируются в соответствии с алгоритмом

$$D(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) = \frac{\text{Re}[S_{\Sigma}(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) \cdot S_{\Delta}^*(t, \Delta\theta_{\text{ц}})]}{|S_{\Sigma}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})|^2}. \quad (2)$$

Опорный сигнал смесителя (См на рисунке 1) $U_{\text{оп}}(\tau, \mathbf{a}_{\text{вр}})$ служит для выделения полезной составляющей сигнала $\mathbf{f}_0(t)$. Вектор временных параметров $\mathbf{a}_{\text{вр}}$ должен совпадать с вектором временных параметров сопровождаемой ВЦ $\mathbf{a}_{\text{ц}}$ и выделять тот элемент разрешения по дальности и скорости, где сосредоточена цель. В свою очередь КИМ-помеха на выходе устройства обработки ИД РЛС сопровождения представляет собой распределенный по элементам разрешения дальности и скорости объект [3].

3. Методика структурно-параметрического синтеза дискриминатора угловых координат по воздушной цели – постановщику КИМ-помехи самоприкрытия

Работа углового дискриминатора по постановщику КИМ-помех самоприкрытия начинается после принятия решения об обнаружении КИМ-помехи. Разработаем для моноимпульсной ИД РЛС сопровождения методику структурно-параметрического синтеза дискриминатора УК воздушной цели – постановщика КИМ-помех самоприкрытия. Она включает ряд этапов.

1 этап. Расчет параметров устройства корреляционной обработки и количества каналов для многоканальной обработки принятого сигнала в разностном канале.

Задача. Для разностного канала обработки рассчитать параметры внутрипериодного и междупериодного устройств обработки, а также потребное количество таких каналов для проведения оценивания.

Решение задачи. В ИД РЛС при сопровождении ВЦ, как правило, используется квазинепрерывная последовательность простых прямоугольных радиоимпульсов с длительностью одиночного импульса T_0 , периодом повторения T_{Π} , при этом обнаружитель рассчитан на слабый медленно флуктуирующий сигнал [9 с.233]. В таком случае разрешающая способность по времени запаздывания Δt_r определяется длительностью одиночного импульса $\Delta t_r = T_0$, а по частоте Доплера ΔF шириной УПФ $\Delta F = \Delta F_{\Pi}$ (определяется числом импульсов ОС L и периодом повторения T_{Π}).

$$\Delta F_{\Pi} \approx 1/T_{\Pi} = 1/LT_{\Pi}. \quad (3)$$

В разностном канале обработки, подобно суммарному, количество каналов скорости (частоте Доплера) – I должно соответствовать числу накапливаемых импульсов ОС L . Каждый канал скорости настроен на свою частоту Доплера. Количество каналов дальности (времени запаздывания) – J определяется периодом повторения T_{Π} и интервалом дискретизации Δt .

$$J = T_{\Pi} / \Delta t. \quad (4)$$

2 этап. Обнаружение КИМ-помехи и оценка вектора ее параметров $\hat{\mathbf{a}}_{\text{КИМ}}$.

Задача. С заданными показателями качества принять решение об обнаружении КИМ-помехи и получить оценку вектора ее параметров $\hat{\mathbf{a}}_{\text{КИМ}}$.

Решение задачи. Обнаружение факта действия КИМ-помехи сводится к обнаружению ее маскирующей составляющей помимо сопровождаемого сигнала [4], т.е. к обнаружению на фоне сопровождаемого объекта – УП (ОС)

протяженной по дальности коррелированной ОШП и оценке вектора ее параметров – $\hat{\mathbf{a}}_{\text{ошп}}$.

Подробно алгоритм работы, структура устройства и анализ показателей качества рассмотрены в работах [4,5,7]. Структура устройства (рисунок 1 из [7]) определяется способом обработки принятого сигнала и состоит из последовательно включенных устройств внутрипериодной обработки (ВПО), когерентной компенсации мешающих отражений (ККМО), когерентной компенсации сопровождаемого сигнала (ККМС) и когерентного накопления ОС (КНОС) с одновременным обзором по дальности и радиальной скорости. Для принятия решения об обнаружении задается уровень ложной тревоги и рассчитывается порог обнаружения в соответствии с критерием Неймана-Пирсона. По результатам работы устройства обнаружения и оценивания параметров ОШП выдаются: решение о наличии/отсутствии ОШП $A_{\text{ошп},0}^*$ и оценка вектора ее параметров $\hat{\mathbf{a}}_{\text{ошп}}$.

3 этап. Стробирование по измеренным время-частотным параметрам $\hat{\mathbf{a}}_{\text{ошп}}$ на выходах суммарного и разностных каналов обнаруженной области маскирующей составляющей КИМ-помехи.

Задача. Из всей совокупности J элементов разрешения по дальности и I элементов разрешения по скорости суммарного и разностного каналов обработки выделить j -ые элементы дальности и i -ые элементы скорости, относящийся к маскирующей составляющей КИМ-помехи.

Решение задачи. В ИД РЛС элементы разрешения по времени запаздывания Δt_r и частоте Доплера ΔF соответственно меньше длительности шумового импульса $T_{0\text{ошп}}$ и ширины спектра $\Delta f_{\text{ошп}}$. На выходе устройства обработки КИМ-помеха будет представлять собой распределенный по элементам разрешения дальности и скорости объект, границы которой определяются параметрами маскирующей составляющей. Данные параметры

выбираются такими [3], чтобы на протяжении всего времени ее действия формируемый строб «накрывал» ОС и УП (рисунок 2).

$$T_{0_{\text{ОШП}}} = \Delta j \cdot \Delta t, \quad (5)$$

$$t_{r_{\text{ОШП}}} = j_{\text{Н}} \cdot \Delta t, \quad (6)$$

$$\Delta f_{\text{ОШП}} = \Delta i \cdot \Delta F_{\text{П}}, \quad (7)$$

где $\Delta i = i_{\text{к}} - i_{\text{н}}$ – количество УПФ занятых ОШП; $\Delta j = j_{\text{к}} - j_{\text{н}}$ – количество временных интервалов дискретизации занятых ОШП; $i_{\text{н(к)}}$ – начальный (конечный) номер фильтра ОШП; $j_{\text{н(к)}}$ – начальный (конечный) номер интервала временной дискретизации ОШП (рисунок 2).

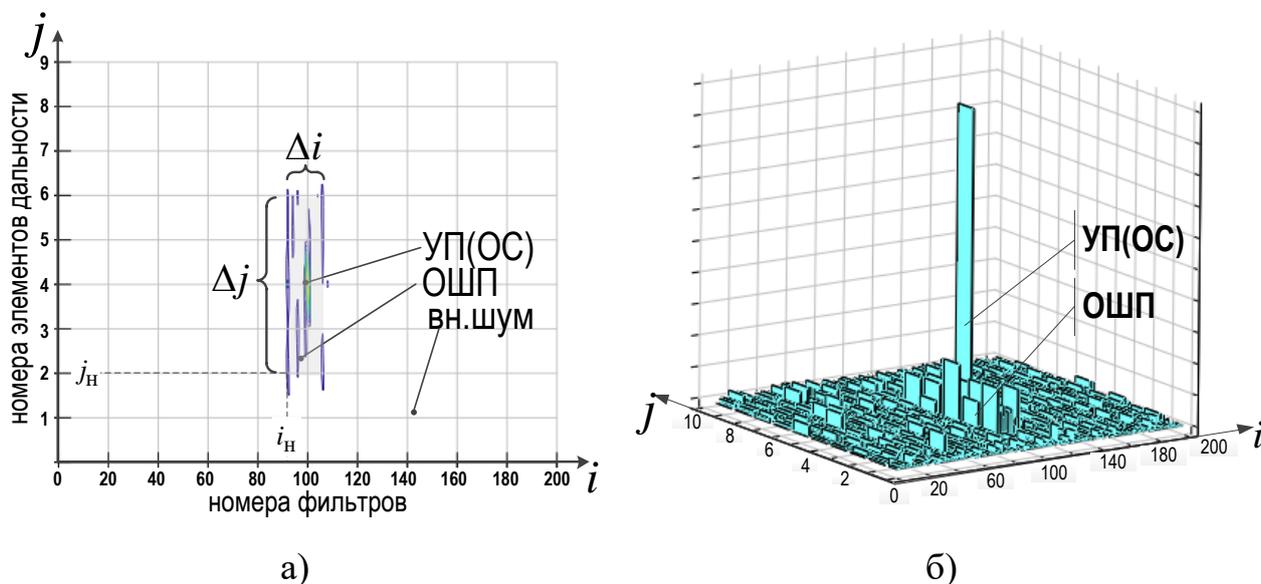


Рис. 2. Результат обработки принятого сигнала в матрице «дальность-скорость»
 а – линии уровня, б – столбчатая диаграмма

Распределение маскирующей составляющей КИМ-помехи, в пределах которой сосредоточены и УП и ОС с векторами параметров $\alpha_{\text{УП}}$, $\alpha_{\text{ОС}}$ (рисунок 2), можно выразить через число элементов по дальности и скорости

$$\alpha_{\text{ОШП}} = \left\| i_{\text{н}} \quad \Delta i \quad j_{\text{н}} \quad \Delta j \right\|^T. \quad (8)$$

В суммарном и разностном каналах обработки из всех элементов разрешения по дальности и скорости с использованием выражений (5) – (7) выделяются номера j -ых элементов разрешения по дальности и i -ых элементов

разрешения по скорости, относящихся к маскирующей составляющей КИМ-помехи – $S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})$ и $S_{\Delta ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})$.

4 этап. Оценка невязки УК в выделенных элементах разрешения дальности и скорости.

Задача. Рассчитать величину невязки УК по каждому элементу разрешения дальности и скорости, относящихся к маскирующей составляющей КИМ-помехи.

Решение задачи. Для расчета невязки по каждому из выделенных элементов все пары значений комплексных амплитуд принятого сигнала из суммарного $S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})$ и разностного $S_{\Delta ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})$ каналов обработки поступают на соответствующие им ФД, где выделяется реальная часть от их произведения $\text{Re}[S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) \cdot S_{\Delta ij}^*(t, \Delta\theta_{\text{ц}})]$.

5 этап. Усреднение полученных рассогласований с учетом весов.

Задача. Рассчитать результирующую величину невязки УК по постановщику КИМ-помехи.

Решение задачи. Маскирующая составляющая КИМ-помехи – это шумоподобное колебание, мгновенные значения которого коррелированы по времени. Внутри «шумового пятна» на выходах когерентных накопителей приемника обзора будут и элементы с малой энергией, в которых основной вклад в ошибки измерения УК вносить тепловой шум, и с большой, например, УП, энергия которой больше ОШП. Равновесное суммирование полученных невязок D_{ij} в элементах, относящихся к ОШП, приведет к снижению точности измерения. Для исключения данного недостатка сигнал ошибки по постановщику КИМ-помех $D_{\text{КИМ}}$ предлагается формировать путем взвешенного усреднения (веса пропорциональны квадрату модуля комплексной амплитуды соответствующих элементов суммарного канала обработки) угловых рассогласований в соответствии с выражением

$$\begin{aligned}
 D_{\text{КИМ}}(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) &= \frac{\sum_{i=i_H}^{i_H+\Delta i-1} \sum_{j=j_H}^{j_H+\Delta j-1} \frac{\text{Re}[S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) \cdot S_{\Delta ij}^*(t, \Delta\theta_{\text{ц}})]}{|S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})|^2} |S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})|^2}{\sum_{i=i_H}^{i_H+\Delta i-1} \sum_{j=j_H}^{j_H+\Delta j-1} |S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})|^2} = \\
 &= \frac{\sum_{i=i_H}^{i_H+\Delta i-1} \sum_{j=j_H}^{j_H+\Delta j-1} \text{Re}[S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) \cdot S_{\Delta ij}^*(t, \Delta\theta_{\text{ц}})]}{\sum_{i=i_H}^{i_H+\Delta i-1} \sum_{j=j_H}^{j_H+\Delta j-1} |S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})|^2} = \\
 &= \frac{\sum_{i=i_H}^{i_H+\Delta i-1} \sum_{j=j_H}^{j_H+\Delta j-1} \text{Re}[S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) \cdot S_{\Delta ij}^*(t, \Delta\theta_{\text{ц}})]}{Z_{\Sigma \text{норм}}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})},
 \end{aligned} \tag{9}$$

где $Z_{\Sigma \text{норм}}(t, \Delta\theta_{\text{ц}}) = \sum_{i=i_H}^{i_H+\Delta i-1} \sum_{j=j_H}^{j_H+\Delta j-1} |S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})|^2$ – нормирующий множитель.

4. Структурная схема пеленгатора воздушной цели – постановщика КИМ-помехи самоприкрытия

Структурная схема следящего пеленгатора постановщика КИМ-помех самоприкрытия, реализующая алгоритм (9) показана на рисунке 3. Она состоит из штатного приемника обзора с дополнительными выходами до и после детектора, обнаружителя-измерителя параметров ОШП и многоканального по дальности и скорости дискриминатора угловых координат КИМ-помехи. Принятый сигнал суммарного f_{Σ} и разностного f_{Δ} каналов через высокочастотный тракт радиоприемного устройства (РПрУ) поступает в идентичные структуры многоканальных по дальности и скорости корреляционных каналов обработки.

Основным элементом пеленгатора является дискриминатор УК по КИМ-помехе. Его когерентные каналы дальности и скорости (до ФД) построены аналогично корреляционным схемам приемника обзора и в том же время-частотном диапазоне. То есть, они так же перекрывают весь диапазон однозначных дальностей и скоростей. С выхода каждого ij -го канала результат когерентного накопления (КН) поступает на вход ФД. На второй вход ФД

подается выход соответствующего ij -го КН приемника обзора суммарного канала. Таким образом, на начальном этапе формируются частные выходы угловых дискриминаторов в каждом ij -м канале дальность-скорость. Затем эти частные выходы поступают на матричный коммутатор и сумматор I, на управляющий вход которого подается вектор оценок $\hat{\mathbf{a}}_{\text{ОШП}}$ с обнаружителя-измерителя параметров ОШП. Суммируются только элементы в строке $\hat{\mathbf{a}}_{\text{ОШП}}$. В завершении выходной сигнал сумматора нормируется на делителе к сумме $Z_{\Sigma\text{норм}}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})$ попадающих в строб $\hat{\mathbf{a}}_{\text{ОШП}}$ квадратов модуля $|S_{\Sigma ij}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})|^2$, вычисляемой на матричном коммутаторе и сумматоре II.

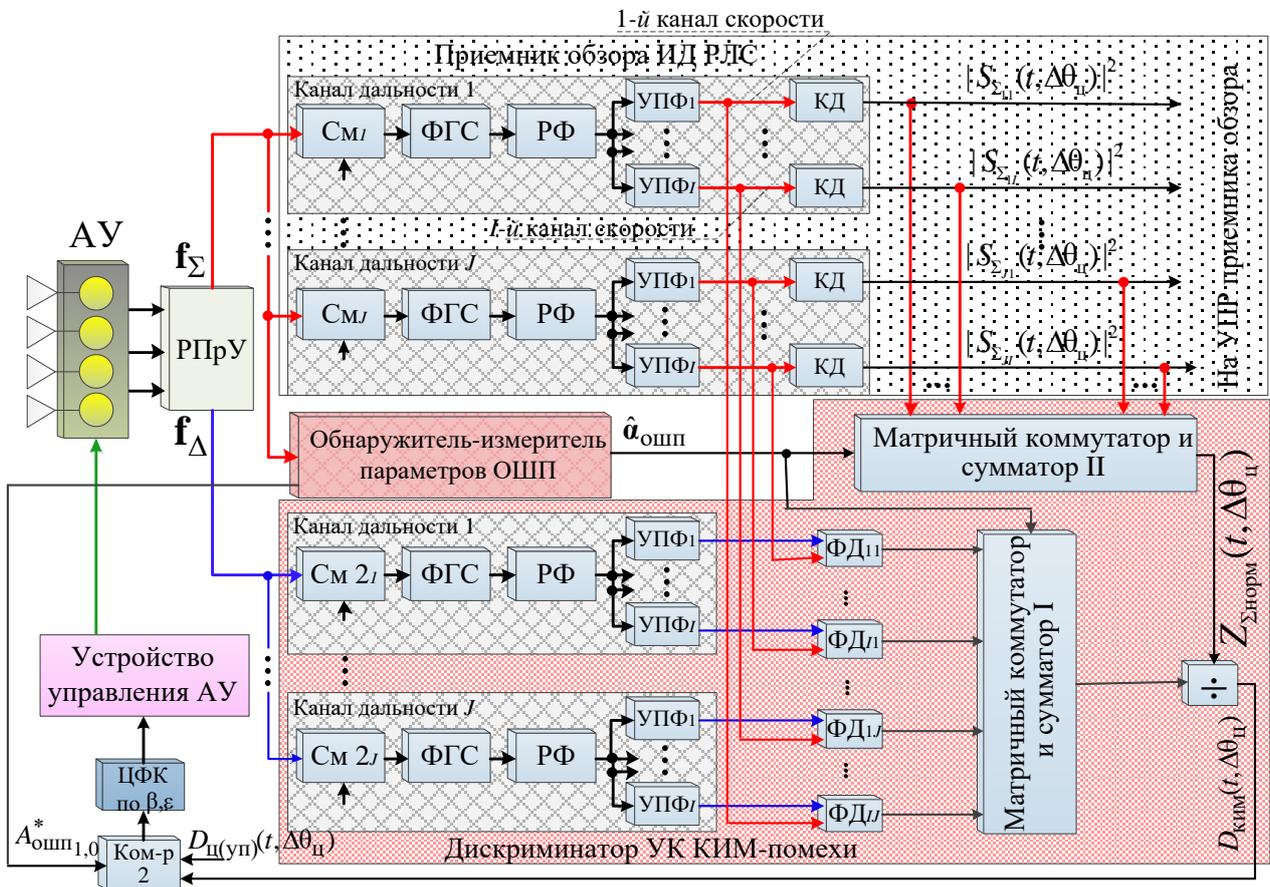


Рис. 3. Структурная схема слеящего пеленгатора постановщика КИМ-помех самопркрытиея

Полученный сигнал ошибки $D_{\text{КИМ}}(t, \Delta\theta_{\text{ц}})$ выдается через коммутатор 2 (ком-р 2) на цепи фильтрации и коррекции (ЦФК) по β, ϵ и далее на блок управления антенным устройством (АУ) или ДНА в случае антенной решетки.

На второй вход коммутатора 2 поступает сигнал ошибки дискриминатора УК по ВЦ (УП) $D_{ц(уп)}(t, \Delta\theta_{ц})$. Управляющим сигналом коммутатора 2 является решение об обнаружении ОШП $A_{ошп0,1}^*$, которое поступает из обнаружителя-измерителя параметров ОШП [4].

5. Результаты моделирования и их анализ

Для анализа показателей качества разработанного дискриминатора УК постановщика КИМ-помехи самоприкрытия проведено математическое моделирование. Принятый сигнал представляет собой аддитивную смесь ОС, внутренних шумов и КИМ-помехи. Параметры РЛС следующие: ширина ДНА (в азимутальной и угломестной плоскостях) $\Delta\beta = \Delta\varepsilon = \Delta\theta = 1^\circ$, рассовмещение приемных ДНА относительно РСН – $0,6895^\circ$; амплитудная характеристика ДНА $A(\theta)$ передающего, суммарного и разностных приемных каналов описывается моделью, соответствующей большинству антенн современных РЛС [12 с.148] с уровнем боковых лепестков ДНА не менее -23 дБ; длительность импульса $T_0 = 1$ мкс, период повторения импульсов $T_{п} = 10$ мкс, время наблюдения $T_{н} = 2$ мс, линейка УПФ перекрывает однозначный диапазон Доплеровских частот от 0 до 100 кГц при полосе одного фильтра примерно 500 Гц. Параметры цели: отношение сигнал шум $\gamma_{ц} = 0,2$. Параметры КИМ-помехи: имитирующая составляющая движется относительно скорости цели с ускорением $a_{уп} = 20$ м/с²; отношение УП-шум на один импульс $\gamma_{уп}$ на 4 дБ превосходит $\gamma_{ц}$; отношение ОШП-шум $\gamma_{ошп} = 0,5$. Время запаздывания шумового импульса внутри интервала однозначности $t_{r_{ошп}} = 3$ мкс; длительность шумового импульса $T_{0_{ошп}} = 5$ мкс; форма огибающей шумового импульса – прямоугольная. Моделируется три варианта ширины спектра ОШП $\Delta f_{ошп} - 8, 14$ и 20 кГц.

Анализ показателей качества измерения УК проведен в сравнении со штатным устройством измерения УК для ситуаций, когда в качестве источника пеленговой информации выступают: в первом случае – УП; во втором случае – ОС, обнаруженный на фоне остатков компенсации ОШП [6]; в третьем – КИМ-помеха при равновесном суммировании, в четвертом – КИМ-помеха при взвешенном суммировании согласно алгоритму (9). Для описанных выше пеленгаторов при различной ширине спектра маскирующей составляющей КИМ-помехи произведен расчет среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки измерения УК постановщика помех. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результат расчета СКО измерения УК, [град]

Источники пеленговой информации / Ширина спектра ОШП	УП	ОС после компенсации ОШП	Равновесное суммирование элементов КИМ-помехи	Взвешенное суммирование элементов КИМ-помехи
8 кГц	0.074	0.133	0.1	0.027
14 кГц	0.072	0.12	0.132	0.027
20 кГц	0.071	0.116	0.126	0.027

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что взвешенное суммирование в стробе $\hat{\alpha}_{\text{ОШП}}$ невязок УК от элементов дальности и скорости, относящихся к смеси ОШП, УП, ОС и внутреннего шума, обеспечивает повышение точности пеленгации (уменьшение СКО измерения УК) более чем в 2,5 раза. Этот выигрыш зависит от энергетических соотношений между УП, ОС и ОШП на фоне шума, а также параметров ОШП.

Зависимость СКО измерения УК постановщика КИМ-помех самоприкрытия от $\gamma_{\text{ОШП}}$ для ширины спектра ОШП 8 и 20 кГц представлена на рисунке 4. Как видно из рисунка 4, повышение мощности ОШП из состава КИМ-

помехи приводит к уменьшению ошибок пеленгации постановщика данного вида помех.

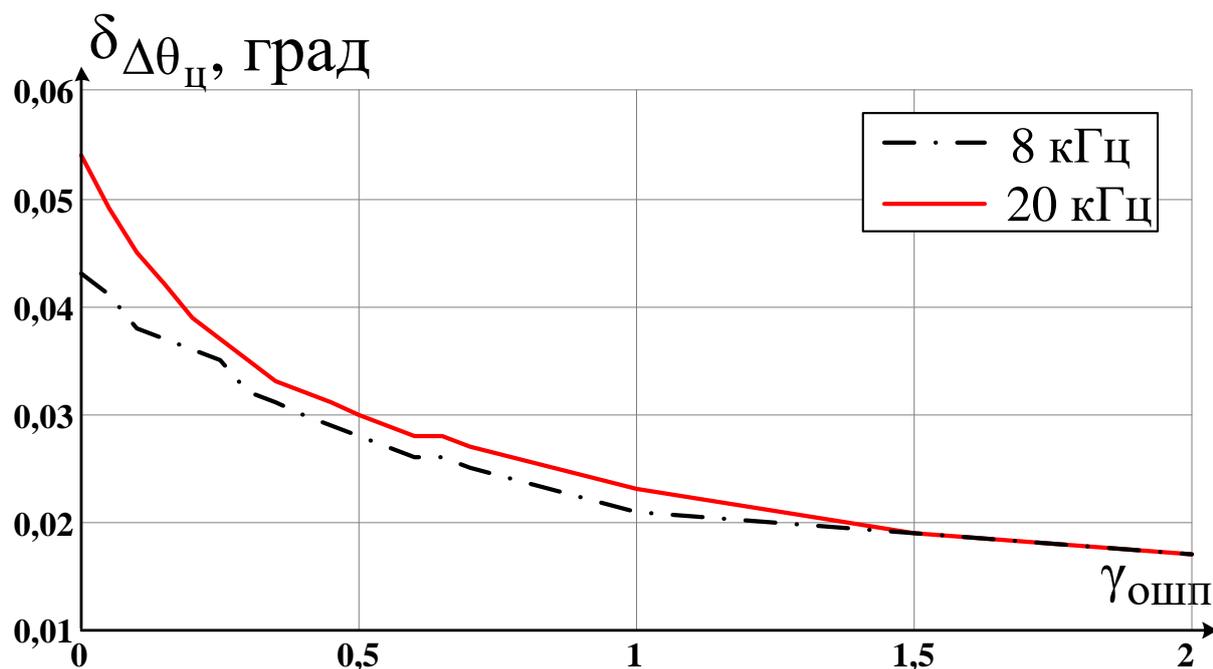


Рис. 4. Зависимость сигнала ошибки дискриминатора угловых координат по постановщику КИМ-помех самоприкрытия от $\gamma_{ОШП}$

По результатам моделирования получены дискриминационные характеристики (ДХ) углового дискриминатора, которые представлены на рисунке 5. На рисунках 5 а, б и в цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены кривые для различных источников пеленговой информации: 1 – УП; 2 – ОС, обнаруженных на фоне остатков компенсации ОШП, 3 – КИМ-помеха при равновесном суммировании, 4 – КИМ-помеха при взвешенном суммировании согласно алгоритму (9). На рисунке 5 г на одном графике представлены характеристики согласно алгоритму (9) для различных значений ширины спектра ОШП.

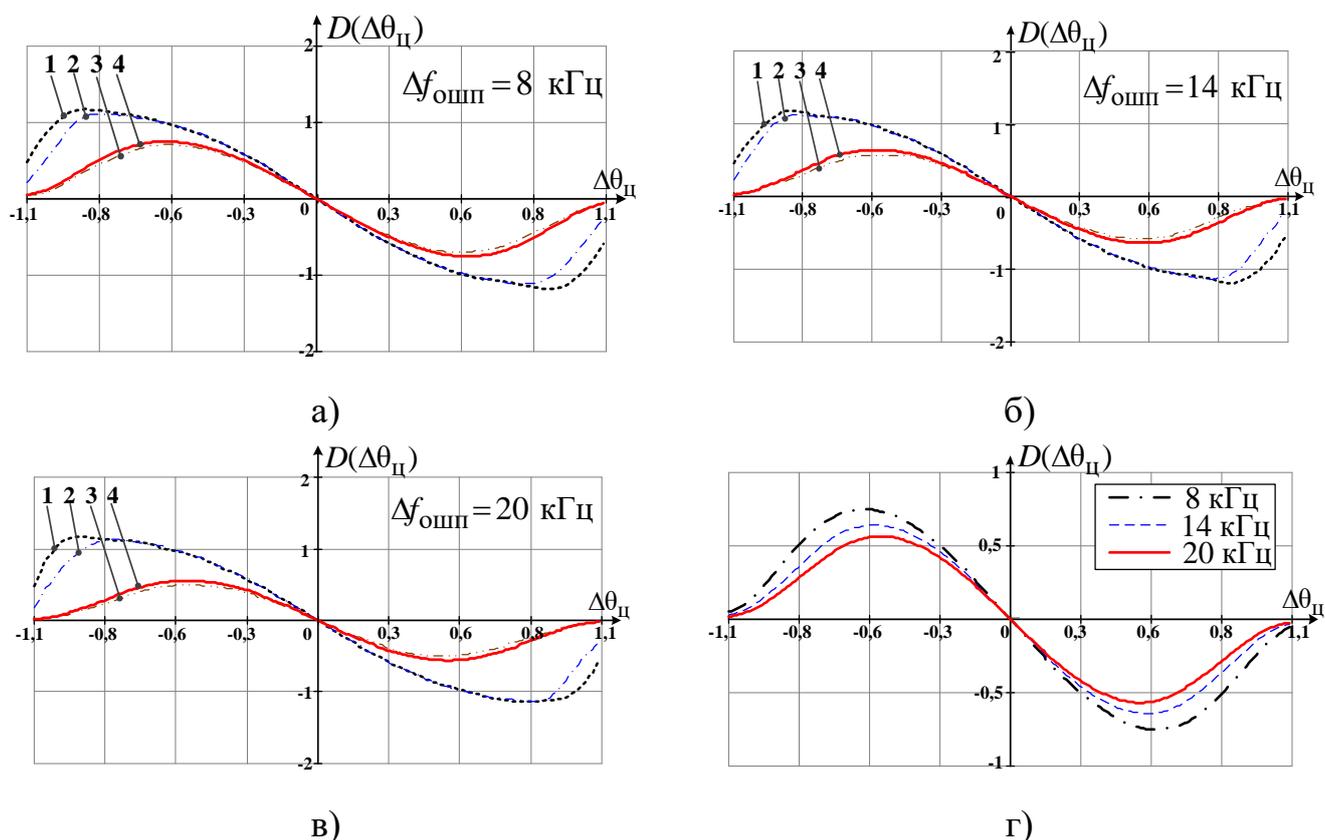


Рис. 5. Дискриминационная характеристика дискриминатора угловых координат постановщика КИМ-помех самоприкрытия

Кривые 3 и 4 на рисунках 5а, б, в имеют меньшую крутизну по сравнению с кривыми 1 и 2, так как источник пеленгации имеет шумоподобную структуру. При этом, чем более узкополосной является маскирующая составляющая КИМ-помехи, тем больше крутизна ДХ (рис. 5г).

По результатам моделирования получены так же флуктуационные характеристики (ФХ), которые представлены на рисунке 6. Цифры 1, 2, 3, 4 на рисунках а, б и в соответствуют обозначениям рисунка 5. На рисунке 6г на одном графике представлены характеристики согласно алгоритму (9) для различных значений ширины спектра ОШП.

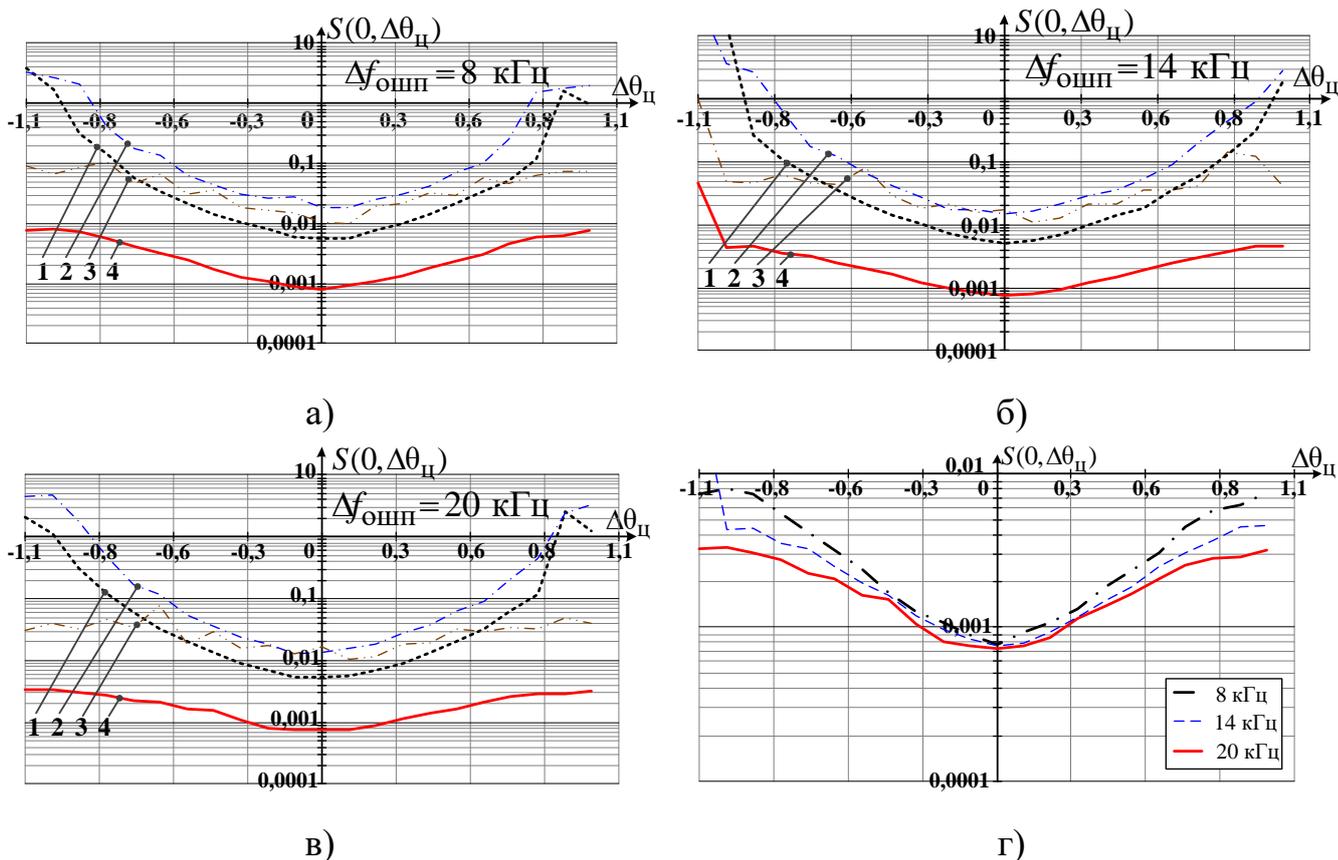


Рис. 6. Флуктуационная характеристика дискриминатора угловых координат постановщика КИМ-помех самоприкрытия

Как видно из рисунка 6 дискриминатору, функционирующему в соответствии с алгоритмом (9) (с весовым суммированием), соответствует минимальная спектральная плотность возмущающего воздействия и минимальная флуктуационная ошибка измерения при фиксированной полосе пропускания ЦФК. Как видно из табл. 1 ошибка при весовом суммировании более, чем в 2,5 раза меньше остальных вариантов обработки (в зависимости от энергетических соотношений, составляющих КИМ-помехи).

Минимум флуктуационной ошибки достигается весовым суммированием с весами, соответствующими интенсивностям маскирующей составляющей КИМ-помехи в каналах.

Заключение

Для ИД РЛС сопровождения синтезирован дискриминатор УК, работающий согласно алгоритму (9). Для его функционирования необходимо обнаружение и получение оценок вектора параметров маскирующей

составляющей КИМ-помехи, что обеспечивается работой обнаружителя-измерителя параметров ОШП, работа которого описана в [5,7].

Таким образом, методика структурно-параметрического синтеза дискриминатора многоканального пеленгатора ОШП, отличающаяся 1) корреляционной междупериодной обработкой разностных каналов амплитудного моноимпульсного пеленгатора на фоне ОШП в каждом элементе однозначного измерения дальности и скорости; 2) стробированием элементов матрицы дальность-скорость на основе оценок вектора параметров, полученных в обнаружителе-измерителе параметров ОШП; 3) весовым усреднением с нормированием к суммарной энергии ОШП стробированных по дальности и скорости рассогласований УК, что позволило уменьшить флуктуационную ошибку разового оценивания УК более чем в 2,5 раза в зависимости от ее параметров.

Литература

1. Канащенко А.И., Меркулов В.И. *Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития*. Москва, Радиотехника. 2003. 416 с.
2. Куприянов А.И. *Радиоэлектронная борьба*. Москва, Вузовская книга. 2013. 360 с.
3. Чигирь И.В., Горшков С.А., Кузьмичев Н.К. Анализ воздействия комбинированной имитирующей и маскирующей помехи на системы сопровождения по дальности и скорости радиолокаторов точного измерения координат. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2018. №1(58). С.71-81.
4. Чигирь И.В. Обоснование способа защиты моноимпульсных импульсно-доплеровских радиолокаторов сопровождения от комбинированных имитирующих и маскирующих помех самоприкрытия. *Сборник научных статей Военной академии Республики Беларусь*. 2021. №41. С.92-99.

5. Чигирь И.В. Синтез Байесовского алгоритма обнаружения и оценивания параметров коррелированной ответной шумовой помехи. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2022. №4(75). С.114-121.
6. Чигирь И.В., Горшков С.А., Кузьмичев Н.К. Устройство когерентной компенсации протяженных по дальности коррелированных ответных шумовых помех в импульсно-доплеровских радиолокаторах сопровождения. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2019. №2(61). С.73-83.
7. Чигирь И.В. Анализ показателей качества устройства обнаружения и оценивания параметров протяженной по дальности коррелированной ответной шумовой помехи и в импульсно-доплеровских РЛС сопровождения. *Журнал радиоэлектроники* [электронный ресурс]. 2023. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.6>
8. Леонов А.И. *Моноимпульсная радиолокация*. Москва, Радио и связь. 1984. 312 с.
9. Охрименко А.Е. *Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба*. Москва, Воениздат. 1983. 457 с.
10. Горшков С.А. *Основы радиолокации. Радиолокационное измерение координат и параметров движения целей*. Минск. ВА РБ. 2017. 181 с.
11. Буйлов Е.Н. Моноимпульсный радиолокатор сопровождения по дальности и угловым координатам с широкополосным зондирующим сигналом. *Журнал радиоэлектроники* [электронный ресурс]. 2021. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.10>
12. Barton D.K. *Radar Equations for Modern Radar* Boston; London. Artech House. 2013. 428 с.

Для цитирования:

Чигирь И.В., Горшков С.А. Методика синтеза алгоритма пеленгации постановщика комбинированной имитирующей и маскирующей помехи самоприкрытия в моноимпульсных импульсно-доплеровских радиолокаторах сопровождения. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.4>