

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING**

УДК 621.396.96  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-60-71>

Поступила в редакцию 26.10.2022  
Received 26.10.2022

**П. А. Хмарский<sup>1</sup>, А. С. Солонар<sup>2</sup>, А. О. Наумов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*  
<sup>2</sup>*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

**УСТРОЙСТВО ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИНДИКАТОРНОГО КАНАЛА РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ НАВИГАЦИИ**

**Аннотация.** Рассмотрены особенности работы индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации (РСБН, на примере системы РСБН-4). Выявлено, что существенным недостатком индикаторного канала РСБН является низкая точность определения навигационных параметров (азимута и наклонной дальности летательного аппарата) по сравнению с бортовой аппаратурой. Показано, что в качестве одного из способов повышения точности измерения координат летательного аппарата в индикаторном канале можно использовать траекторную обработку радионавигационной информации. Целью данной обработки является оценка параметров движения летательного аппарата, находящегося в зоне наблюдения РСБН, на основе измерений его мгновенного положения для определения траектории на интервале измерений и прогнозирования его последующего движения. Структура устройства траекторной обработки индикаторного канала РСБН в значительной мере может повторять структуры аналогичных устройств, используемых при обработке радиолокационной информации с учетом особенностей работы индикаторного канала. Разработана структура траекторной обработки и отмечены ее особенности на примере отечественной системы РСБН-4. Проведенное математическое моделирование подтвердило возможность значительного повышения точности измерения координат летательного аппарата по сравнению с существующим индикаторным каналом РСБН-4Н.

**Ключевые слова:** траекторная обработка, вторичная обработка радионавигационной информации, сопровождение целей, радиотехническая система ближней навигации, индикаторный канал, радиомаяк, фильтр Калмана

**Для цитирования:** Хмарский, П. А. Устройство траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации / П. А. Хмарский, А. С. Солонар, А. О. Наумов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 60–71. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-60-71>

**Petr A. Khmarskiy<sup>1</sup>, Andrei S. Solonar<sup>2</sup>, Alexander O. Naumov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*  
<sup>2</sup>*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**DEVICE OF TRACKING PROCESSING FOR INDICATOR CHANNEL OF SHORT-RANGE RADIO NAVIGATION SYSTEMS**

**Abstract.** Features of the indicator channel of the short-range radio navigation systems (for example, the RSBN-4 system) are considered. It was revealed that a significant shortcoming of the indicator channel of the short-range radio navigation is the low accuracy of determining the navigation parameters (azimuth and inclined range of the aircraft) in comparison with on-board equipment. It is shown that one of the possible ways to increase the accuracy of measuring the coordinates of the aircraft in the indicator channel is the use of trajectory processing of radionavigation information whose purpose is to estimate the parameters of the motion of an aircraft in the short-range radio navigation observation zone on the basis of measurements of its instant position for determining the trajectory in the measurement interval and predicting his subsequent movement. The structure of the device for trajectory processing of the indicator channel RSBN can to a great extent repeat

the structures of similar devices used in the processing of radar information, taking into account the features of the operation of the indicator channel. The structure of trajectory processing is developed and its features are noted on the example of the system RSBN-4. The performed mathematical modeling confirmed the possibility of a significant increase in the accuracy of the measurement of the coordinates of the aircraft in comparison with the existing indicator channel RSBN-4N.

**Keywords:** trajectory processing, secondary processing of radionavigation information, target tracking, short-range navigation radio system, indicator channel, radio beacon, Kalman filter

**For citation:** Khmarskiy P. A., Solonar A. S., Naumov A. O. Device of tracking processing for indicator channel of short-range radio navigation systems. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 60–71 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-60-71>

**Введение.** Радиотехнические системы ближней навигации (РСБН) – важная составная часть системы радиотехнического обеспечения полетов гражданской и государственной авиации [1, 2]. Такая система предназначена для определения навигационных параметров летательного аппарата (ЛА) в полярной системе координат – азимута и наклонной дальности по отношению к точке стояния наземного радиомаяка РСБН, выполняющего роль опорной станции (рис. 1). В настоящее время на постсоветском пространстве наиболее широкое применение получила система РСБН-4, а за рубежом – VOR/DME (для гражданской и военной авиации) и TACAN (для военной авиации США). Все перечисленные РСБН имеют в своем составе два независимых друг от друга канала: азимутальный и дальномерный.

Помимо этого, в состав систем РСБН-4 и TACAN включается индикаторный канал, обеспечивающий определение указанных навигационных параметров по отображаемым на индикаторе кругового обзора (ИКО) отметкам летательных аппаратов, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН. Информация, выдаваемая на ИКО РСБН, используется для решения задач диспетчерской службы [1]: оценки воздушной обстановки; индивидуального опознавания; управления полетами в районе аэродрома. Ошибки измерения полярных координат по данным индикаторного канала РСБН существенно больше, чем бортовой аппаратуры РСБН. Для примера ошибка определения координат на борту ЛА с бортовой аппаратурой РСБН-6С (7С), составляет: по азимуту –  $\sigma_{\theta} = \pm 0,25^{\circ}$ ; по дальности –  $\sigma_R = \pm 200 \text{ м} \pm 0,33 \% R$  (где  $R$  – расстояние от ЛА до радиомаяка) [1]. А ошибка, получаемая при помощи индикаторного канала РСБН-4Н, составляет [1]: по азимуту –  $\sigma_{\theta} = \pm 1^{\circ}$ ; по дальности –  $\sigma_R = \pm 3 \text{ км}$  на масштабе развертки 100 км;  $\sigma_R = \pm 5 \text{ км}$  на масштабе развертки 400 км. Для модернизированного варианта РСБН-4НМ (Россия; информацию о ней см.: <https://katalog-rek.ru/catalog/228/1160/>) ошибки составляют:  $\sigma_R = \pm 1,5 \text{ км}$  (на масштабе 50 км);  $\sigma_R = \pm 2 \text{ км}$  (на масштабе 100 км);  $\sigma_R = \pm 3 \text{ км}$  (на масштабе 200 км);  $\pm 6 \text{ км}$  (на масштабе 400 км). Ошибка по азимуту для РСБН-4НМ составляет  $\sigma_{\theta} = \pm 1^{\circ}$ . В условиях возросшей на порядок интенсивности полетов повышаются требования к навигационному обеспечению авиации, возможности которого во многом ограничиваются значительными ошибками измерения координат ЛА по данным индикаторного канала РСБН.

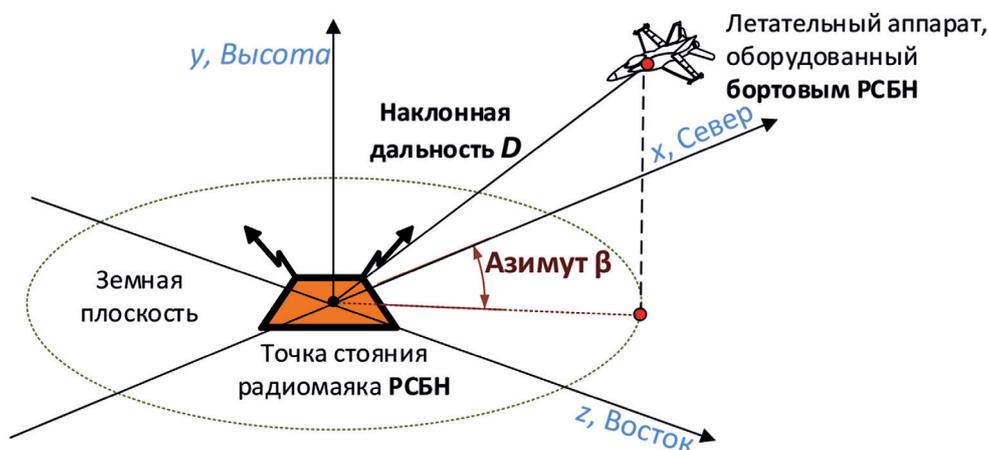


Рис. 1. Навигационные параметры, определяемые радиотехнической системой ближней навигации

Fig. 1. Navigation parameters determined by the short-range radio engineering system

Одним из возможных способов повышения точности измерения координат ЛА в индикаторном канале является использование траекторной обработки радионавигационной информации. Цель данной обработки заключается в оценке параметров движения ЛА, находящегося в зоне наблюдения РСБН, на основе измерений его мгновенного положения для определения траектории на интервале измерений и прогнозирования его последующего движения. Структура устройства траекторной обработки индикаторного канала РСБН в значительной мере может повторять структуры аналогичных устройств, используемых при обработке радиолокационной и оптиколокационной информации [3–7] с учетом особенностей его работы. Стоит отметить, что особенности построения и принципы работы устройства траекторной обработки радионавигационной информации для индикаторного канала РСБН в известной литературе не рассмотрены.

**Особенности работы индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации, существенные для траекторной обработки (на примере системы РСБН-4).** Чтобы построить системы траекторной обработки, необходимо проанализировать принципы работы источника информации для нее. В качестве такого источника в нашем случае будем рассматривать индикаторный канал системы РСБН-4, который обеспечивает отображение на стационарном и выносном (в составе командно-диспетчерского пункта) ИКО радиомаяка воздушной обстановки в зоне действия системы, то есть наклонную дальность и азимут ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН и работающих с конкретным радиомаяком РСБН-4Н [1].

Особенности построения и функционирования индикаторного канала системы РСБН-4 удобно рассматривать, используя структурную схему, приведенную на рис. 2. Для оценки наклонной дальности и азимута ЛА на антенну бортового приемника от наземной аппаратуры индикаторного канала (радиомаяка РСБН-4Н) поступают следующие сигналы [1]:

непрерывный азимутальный сигнал, излучаемый направленной вращающейся со стабильной скоростью ( $\Omega_{\text{ск}} = 100$  об/мин) антенной А1 с двухлепестковой диаграммой направленности (ДН);

импульсные опорные сигналы «35» и «36», излучаемые всенаправленной антенной азимутально-опорных передатчиков А2;

импульсные сигналы «Запрос индикации» (ЗИ, или «180»), излучаемые всенаправленной антенной импульсных передатчиков дальномерного канала А2.

Использование импульсных сигналов «35» и «36» позволяет маркировать следующие моменты времени:

момент пересечения минимумом (провалом) двухлепестковой ДН азимутальной антенны А1 азимутов, кратных  $10^\circ$ ;

момент пересечения минимумом (провалом) ДН этой же антенны северного направления истинного меридиана, проходящего через центр вращения азимутальной антенны, – так называемый сигнал «Север», следующий с частотой вращения азимутальной антенны А1 (1,66 Гц).

Сигналы ЗИ маркируют моменты пересечения минимумом (провалом) двухлепестковой ДН азимутальной антенны А1 азимутов, кратных  $2^\circ$ , и следуют с частотой 300 Гц.

В момент попадания ЛА в минимум (провал) диаграммы направленности азимутальной антенны радиомаяка на выходе бортового приемного устройства формируется (выделяется) азимутальный сигнал. Одновременно с этим импульсный передатчик дальномерного канала радиомаяка формирует трехимпульсный код сигнала ЗИ («180»), который через всенаправленную антенну передается на ЛА.

Бортовая схема выделения из всех принятых импульсов сигнала ЗИ выделяет только один, который следует сразу за азимутальным сигналом. Затем выделенный импульс сигнала ЗИ кодируется также трехимпульсным кодом сигнала «Ответ индикации» и передается на радиомаяк РСБН-4Н. Вследствие этого на экране ИКО радиомаяка появляется видеоотметка от ЛА.

При этом запуск радиальной развертки ИКО осуществляется импульсами «180» с задержкой на  $\Delta t_{\text{декод}}$  относительно запросных сигналов, которая для РСБН-4 составляет 47,6 мкс [1]. Такая задержка запуска необходима для компенсации времени декодирования сигналов «Запрос индикации» в бортовом оборудовании и сигналов «Ответ индикации» в наземном оборудовании радиомаяка. Оценка дальности до ЛА в индикаторном канале определяется по временной задержке между сигналами «Запрос индикации» и «Ответ индикации» с учетом значения  $\Delta t_{\text{декод}}$ .

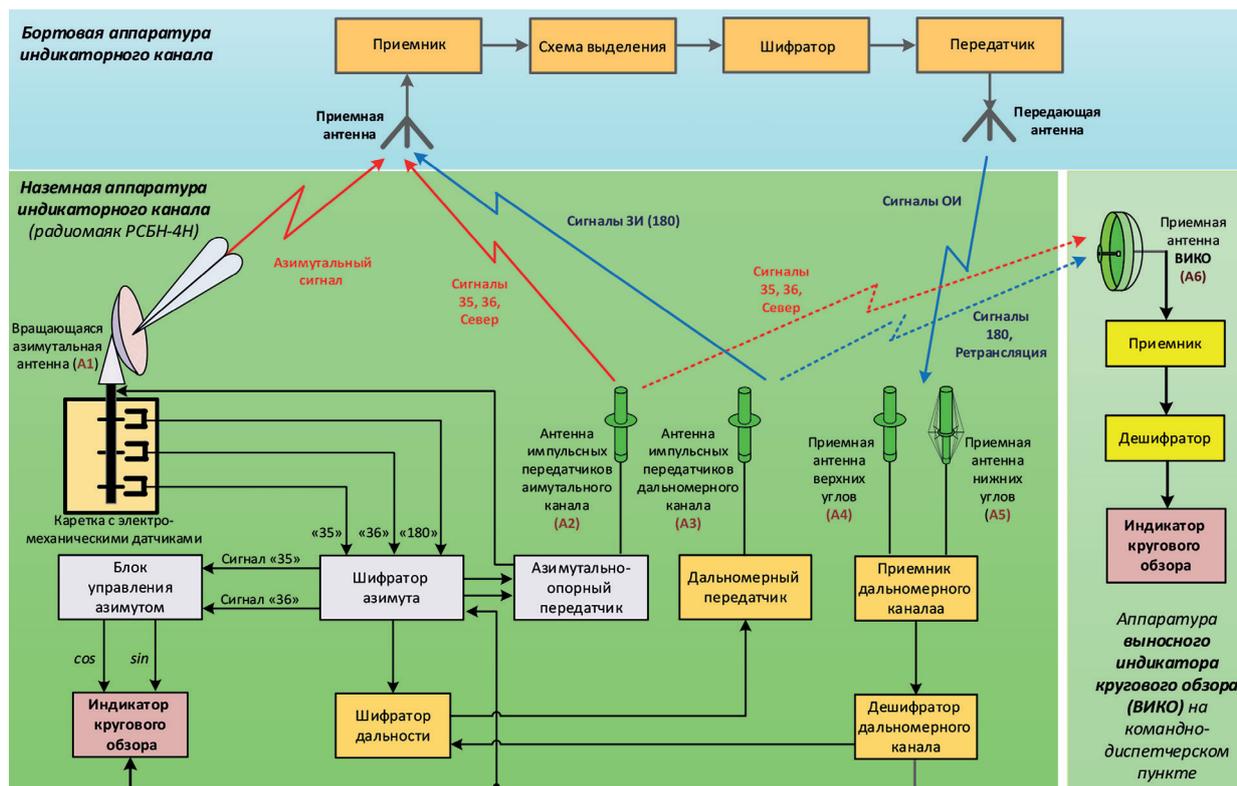


Рис. 2. Обобщенная структурная схема индикаторного канала РСБН-4Н

Fig. 2. Generalized block diagram of the RSBN-4N indicator channel

Для синхронного вращения развертки на ИКО с диаграммой направленности азимутальной антенны в индикаторном канале формируется синусно-косинусное развертывающее напряжение при помощи: сигналов «35», «36» (в аппаратуре ИКО) или метода цифровой аппроксимации синусоидальных функций при равномерном квантовании по времени сигналами «180» (в аппаратуре ВИКО Е-327) [1].

Реальная точность разового оценивания наклонной дальности в индикаторном канале будет ограничиваться: разрешающей способностью по дальности; отношением сигнал/шум на выходе приемного устройства; нестабильностью временной задержки дальномерных сигналов  $\Delta t_{\text{декод}}$  в бортовой и наземной аппаратуре. Расчеты показывают, что реальное значение среднеквадратического отклонения (СКО) разового оценивания дальности для индикаторного канала РСБН-4 может составлять 10–45 м в зависимости от условий наблюдения, что существенно выше точности при ручном съеме координат. В большинстве известных индикаторных каналов РСБН отсутствует автоматическое разовое оценивание наклонной дальности.

Измерение азимута существенно отличается от измерения наклонной дальности, так как отметка от ЛА может находиться только на двухградусной развертке азимута (сигналы «Запрос индикации»), от которых на борту формируется сигнал «Ответ индикации», следуют через  $2^\circ$ . При этом диапазон изменения ошибки измерения азимута будет составлять от 0 до  $2^\circ$ . Для центрирования данной ошибки (получения погрешности измерения азимута  $\pm 1^\circ$  со средним значением  $0^\circ$ ) азимутальный масштаб сдвигается на  $1^\circ$ . Таким образом, в индикаторном канале РСБН-4 происходит «загрубление» точности азимута и введение автоматического разового оценивания не позволит существенно повысить его значение.

**Обобщенная структура устройства траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации.** По аналогии с принципами обработки радиолокационной информации процесс обработки радионавигационной информации, можно разделить на первичную, вторичную и третичную обработки [2, 5]. *Первичная* обработка радионавигационной информации для индикаторного канала РСБН будет заключаться в принятии

решения о наличии или отсутствии ЛА, оборудованного бортовой аппаратурой РСБН, в некотором элементе пространства, разрешении нескольких близко расположенных ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН, а также оценке их мгновенного положения (азимута и наклонной дальности) за один обзор азимутальной вращающейся антенны А1. Дальнейший анализ результатов первичной обработки с использованием первичных измерений, полученных на нескольких обзорах, может проводиться с целью формирования оценок параметров движения ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН и находящихся в зоне действия радиолокационного средства. Это является задачей *вторичной обработки* радионавигационной информации, которую зачастую называют траекторной. К траекторной обработке также относят решение задачи объединения информации от нескольких источников (*третьичная обработка*).

Траекторная (вторичная) обработка в индикаторном канале РСБН при ее реализации затрудняется рядом факторов, негативно сказывающихся на ее качестве и требующих принятия специальных мер по их устранению или учету [3]. Такими факторами являются:

- погрешности радиолокационных измерений наклонной дальности ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН;

- скачкообразные измерения оценок азимута ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН, в пределах  $\pm 1^\circ$ ;

- возможность пропуска отметки на этапе первичной обработки (при малом отношении сигнал/шум или выходе из зоны видимости);

- неизвестный закон движения ЛА, который может совершать непредвиденные маневры;

- возможность наблюдения групповой цели, под которой понимается совокупность нескольких неразрешаемых ЛА, совершающих совместный полет на небольшом удалении друг от друга;

- возможность появления в зоне наблюдения новых ЛА и исчезновения старых;

- наличие аномальных разовых оценок ЛА, обусловленных существованием внутрисистемных синхронных и несинхронных помех.

Из изложенного очевидно, что система РСБН работает по принципам вторичной радиолокации (активный запрос – активный ответ), а значит, для нее характерно отсутствие мешающих отражений. Этот фактор позволяет обоснованно отказаться от использования карт помех и алгоритмов межобзорной селекции, а также существенно упростить другие элементы системы траекторной обработки – устройства обнаружения и сброса траекторий, отождествления оценок с траекториями.

С учетом перечисленных особенностей разработана структурная схема траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации на примере системы РСБН-4 (рис. 3). Кроме устройств, выполняющих задачи вторичной обработки радиолокационной информации, на рис. 3 изображены устройства, которые осуществляют пространственно-временную обработку принятого сигнала: антенна, радиоприемное устройство, устройство временной обработки сигнала и устройство обнаружения и разового оценивания. Эти устройства не входят в состав устройства траекторной обработки, но обеспечивают его результатами, полученными на этапе первичной обработки.

В устройстве обнаружения и разового оценивания координат формируются разовые оценки векторов наблюдаемых параметров сигналов  $\theta_{k+1}^i (i = \overline{1, M})$  (отметки) при условии их обнаружения, которые подаются на вход устройства вторичной обработки.

Решение о возможном соответствии каждой из пришедших на данном обзоре отметки той или иной сопровождаемой траектории принимается в устройстве отождествления. Все отметки, которые не отождествились ни с одной из сопровождаемых траекторий, подаются на вход устройства создания новых траекторий.

В данном устройстве происходит инициализация траекторий по отметкам, которые не отождествляются ни с одной из траекторий на этапе отождествления. Такая процедура позволяет, с одной стороны, снизить риск пропуска новых траекторий целей, входящих в зону обзора РСБН, с другой – повысить вероятность обнаружения ложной траектории по ложному срабатыванию обнаружителя первичной обработки РСБН. При этом каждой новой траектории присваивается уникальный, никогда не повторяющийся за все время существования устройства вторичной обработки номер.

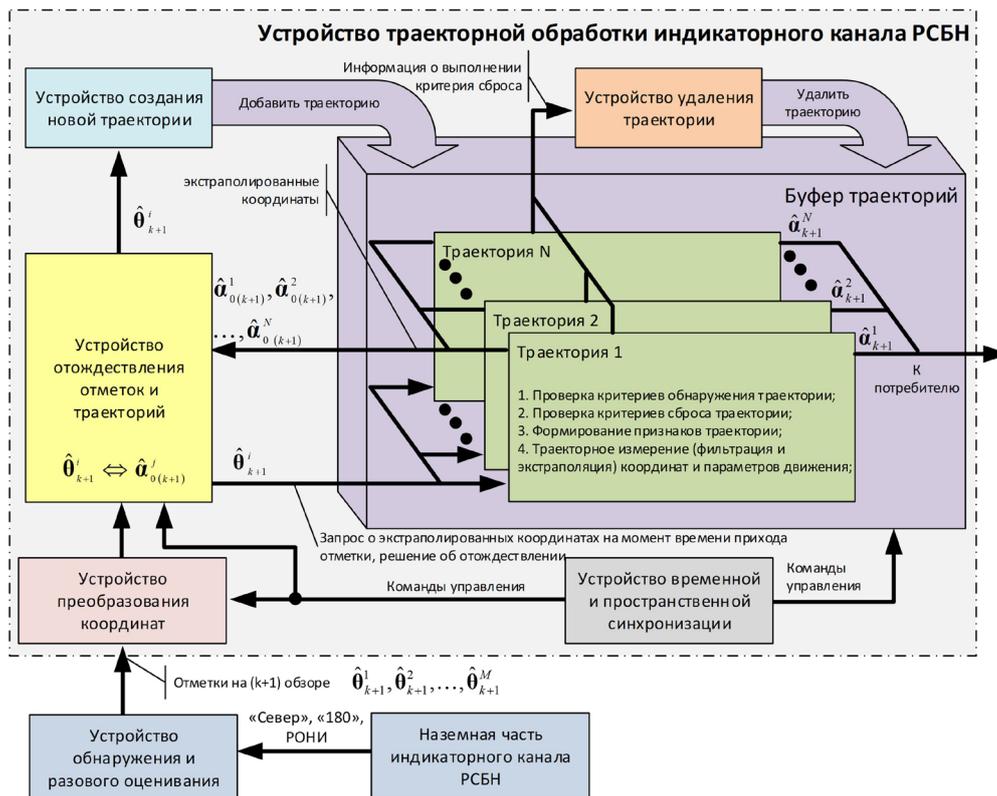


Рис. 3. Обобщенная структура устройства траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации

Fig. 3. Generalized structure of the trajectory processing device for the indicator channel of the short-range radio engineering system

Для организации процесса вторичной обработки радионавигационной информации используется устройство синхронизации, которое разбивает контролируемое воздушное пространство на азимутальные сектора. В процессе определения принадлежности отметки к траектории сравниваются заданная траектория и отметки, содержащиеся в том же секторе, а также двух смежных секторах. Траектории обрабатываются по секторам с учетом скорости сканирования антенны.

Все траектории хранятся в буфере, который обеспечивает хранение данных по всем траекториям и выдачу информации по ним потребителю. Если по траектории перестали поступать отметки, то информация по ней подается на устройство удаления траекторий. Такая ситуация возможна при выходе цели из зоны видимости РСБН по различным причинам.

Процесс обработки одной траектории включает в себя задачи: обнаружения траектории, выделения признаков, сброса (удаления) траектории, траекторное измерение координат и параметров движения целей.

Так как система РСБН работает по принципам вторичной радиолокации (активный запрос – активный ответ), то обнаружение траектории производится по первой отметке, не попавшей ни в один строб траектории. В этом случае вырабатывается команда устройству создания новой траектории «Создать траекторию».

Сброс траектории производится при выполнении бинарного критерия сброса траектории с сопровождения (по количеству  $n$  пропусков подряд), исходя из распределения с разделением по зонам. При выполнении критерия сброса выдается команда «Удалить траекторию» на устройство удаления.

Траекторное измерение координат и параметров движения целей с вероятностным объединением данных (PDA-IMM, JPDA-IMM) заключается в осуществлении фильтрации и экстраполяции координат и параметров движения обнаруженных ЛА (при попадании одной отметки в строб), взвешенном суммировании результатов фильтрации и последующей экстраполяции координат и параметров движения обнаруженных ЛА (при попадании нескольких отметок в строб [5, 6].

Работа траекторного измерителя координат и параметров движения ЛА с вероятностным объединением данных основывается:

на учете возможных моделей движения сопровождаемых целей в отдельных неадаптивных траекторных измерителях, построенных по калмановскому типу [8–10];

на учете оценок, работающих параллельно неадаптивных траекторных измерителей, настроенных на различные модели движения, в адаптивном траекторном измерителе [4, 5, 10];

на организации процесса оценивания вектора состояния цели путем использования всех отметок, отобранных в строб на текущем обзоре в траекторных измерителях координат и параметров движения целей с вероятностным объединением данных [11].

В рамках рассматриваемого в настоящей работе исследования изучался неадаптивный траекторный измеритель калмановского типа, настроенный на одну модель движения. Ранее было установлено, что для устранения эффекта «кажущихся ускорений» сопровождение ЛА по данным индикаторного канала целесообразно производить в прямоугольной системе координат [3]. Для этого нами предложено использовать фильтр Калмана при наблюдении прямоугольных координат с учетом взаимной корреляции ошибок наблюдения, оценка вектора состояния в котором формируется по результатам наблюдения разовых оценок прямоугольных координат [8]. Для проверки эффективности предлагаемого устройства траекторной обработки радионавигационной информации было проведено математическое моделирование.

**Математическое моделирование.** Методика оценки эффективности разработанного устройства траекторной обработки радионавигационной информации включала в себя этапы: определение показателей качества; разработка комплекса математического моделирования для анализа выбранных показателей качества; определение условий моделирования; математическое моделирование и сопоставительный анализ.

Используемые показатели качества – СКО суммарной ошибки измерения азимута  $\Delta_{\Sigma\beta}(k)$ , наклонной дальности  $\Delta_{\Sigma r}(k)$  и местоположения  $\Delta_{\Sigma}(k)$  ЛА [4, 5] – рассчитывались по следующим формулам:

$$\Delta_{\Sigma\beta}(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{exp}} - 1} \sum_{j=1}^{N_{\text{exp}}} ([\beta_{Tj}(k) - \beta_{\text{est}j}(k)]^2)}, \quad \Delta_{\Sigma r}(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{exp}} - 1} \sum_{j=1}^{N_{\text{exp}}} ([r_{Tj}(k) - r_{\text{est}j}(k)]^2)},$$

$$\Delta_{\Sigma}(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{exp}} - 1} \sum_{j=1}^{N_{\text{exp}}} ([x_{Tj}(k) - x_{\text{est}j}(k)]^2 + [z_{Tj}(k) - z_{\text{est}j}(k)]^2)},$$

где  $N_{\text{exp}}$  – количество проведенных опытов (под одним опытом понимается результат фильтрации траектории в течение 500 интервалов обновления данных);  $j$  – номер опыта;  $\beta_{Tj}(k)$ ,  $r_{Tj}(k)$ ,  $x_{Tj}(k)$ ,  $z_{Tj}(k)$  – истинные значения азимута, наклонной дальности и прямоугольных координат ЛА;  $k$  – номер шага наблюдения;  $\beta_{\text{est}j}(k)$ ,  $r_{\text{est}j}(k)$ ,  $x_{\text{est}j}(k)$ ,  $z_{\text{est}j}(k)$  – оцениваемые (первичные либо по результатам фильтрации) значения азимута, наклонной дальности и прямоугольных координат ЛА.

В ходе моделирования каждого модельного эксперимента результаты усреднялись по 5000 опытным реализациям. Для проведения сопоставительного моделирования ошибок измерений был разработан комплекс математического моделирования, позволяющий сформировать входное воздействие в виде суммы задающего и возмущающего воздействий. *Задающее* воздействие представлено детерминированной полиномиальной моделью 1-го порядка и моделью случайного ускорения в виде некоррелированного гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и СКО случайного дискретного маневра  $\sigma_M$ , равным  $0,001 \text{ м/с}^2$ . *Возмущающее* воздействие соответствовало ошибкам первичных измерений в индикаторном канале радиотехнической системы ближней навигации РСБН-4Н с периодом обзора  $0,66 \text{ с}$ .

Траектория была проложена перпендикулярно линии визирования (начальные значения курса  $\alpha$  и азимута  $\beta$  равнялись  $45^\circ$  и  $135^\circ$  соответственно). Начальные значения радиальной дальности для различных модельных экспериментов составляли: 25 км (эксперимент № 1, высота полета 100 м), 50 км (эксперимент № 2, высота полета 500 м), 100 км (эксперимент № 3, высота полета 1000 м) и 200 км (эксперимент № 4, высота полета 5000 м). Скорость летательного аппарата во всех экспериментах являлась постоянной и равнялась  $720 \text{ км/ч}$ . Полученные значения показателей качества приведены на рис. 4–7.

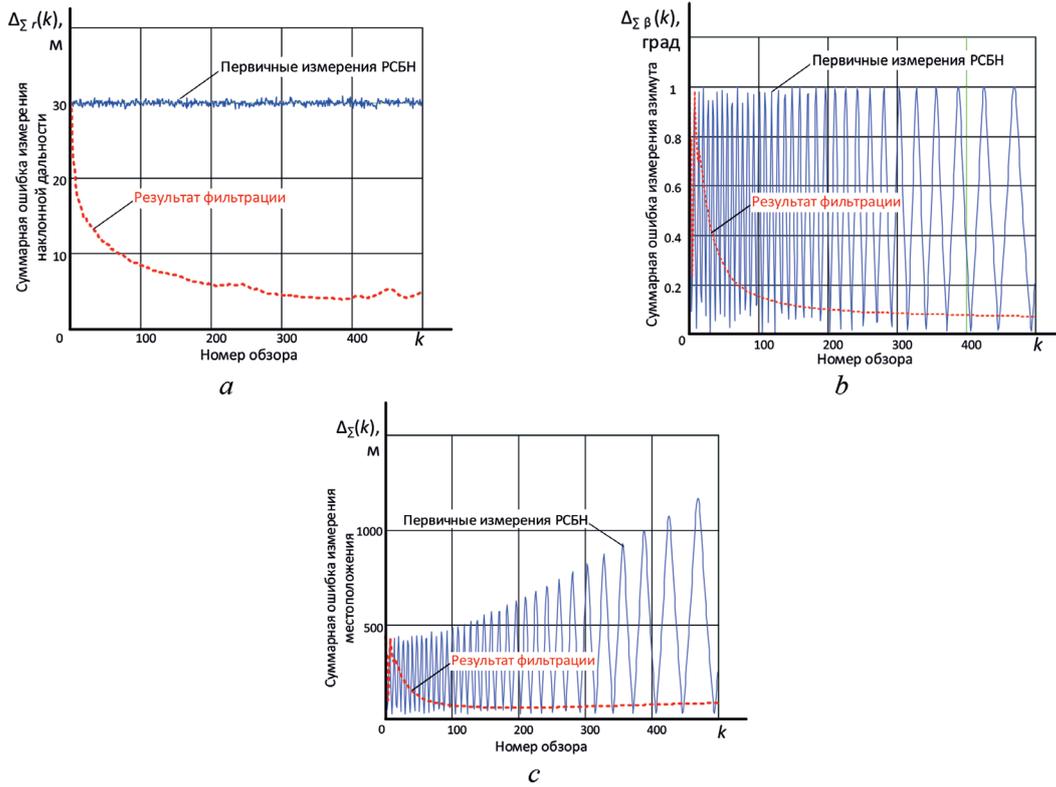


Рис. 4. Результаты модельного эксперимента № 1 (высота полета 100 м):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$   
 Fig. 4. Results of simulation experiment no. 1 (flight altitude 100 m):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$

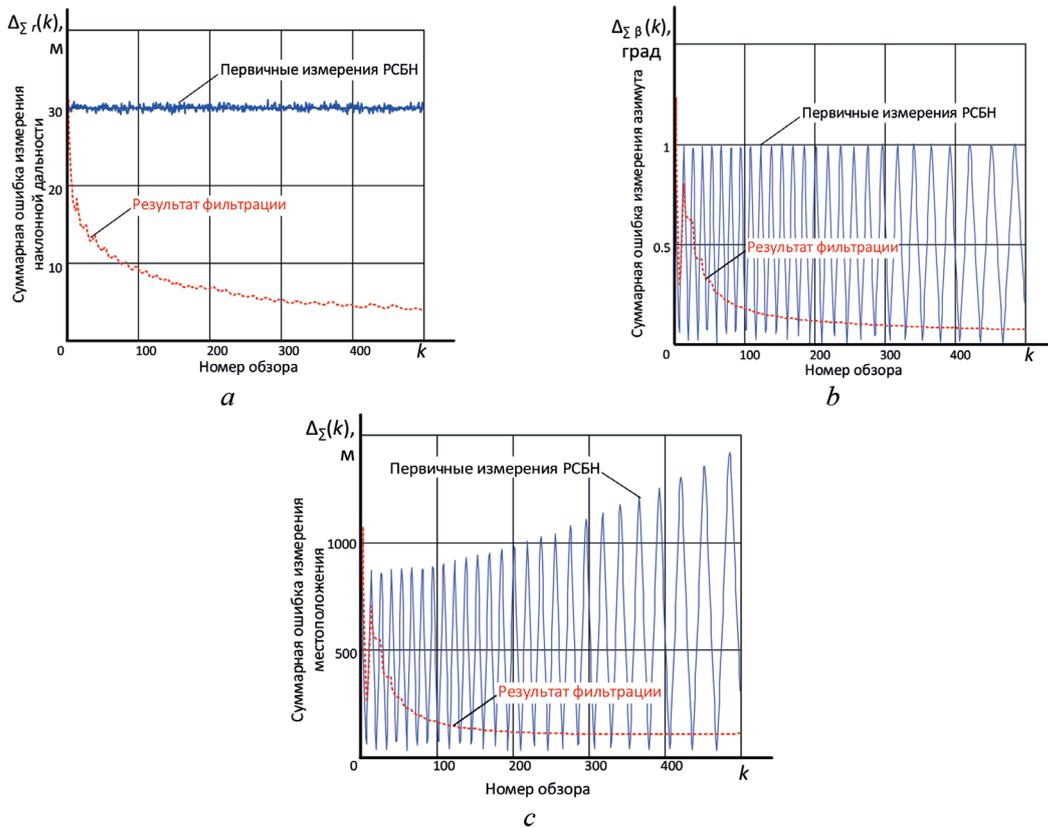
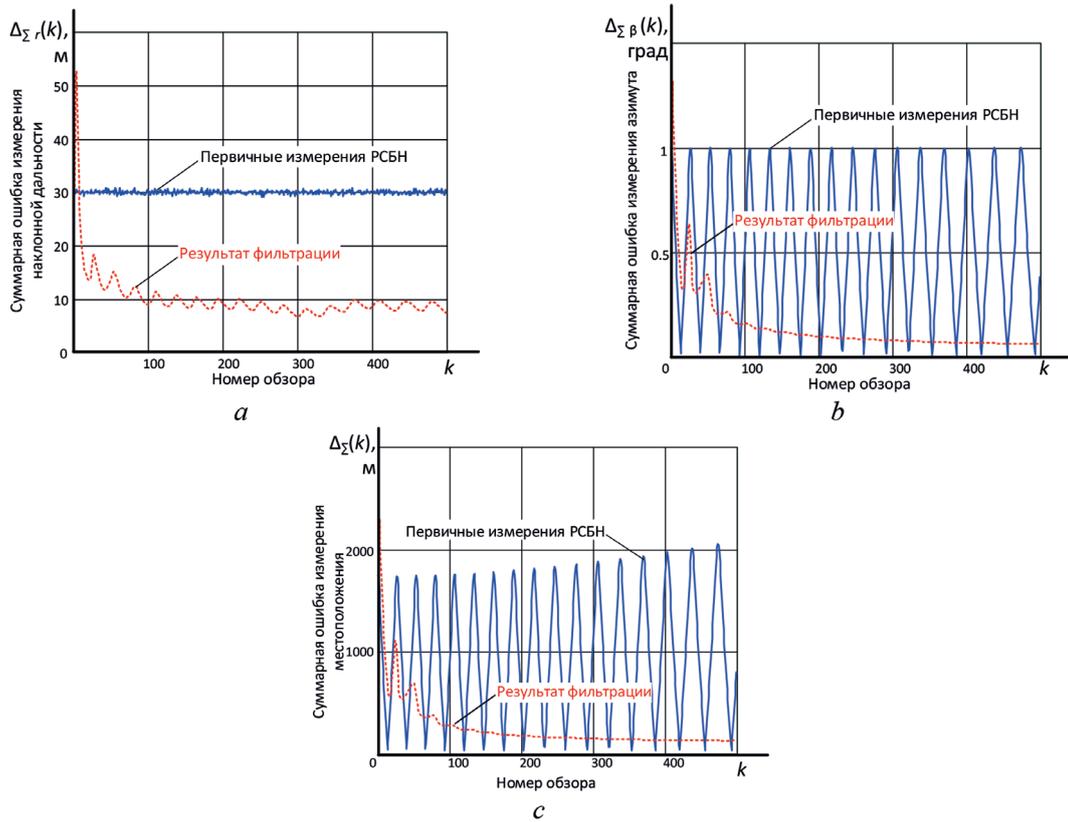
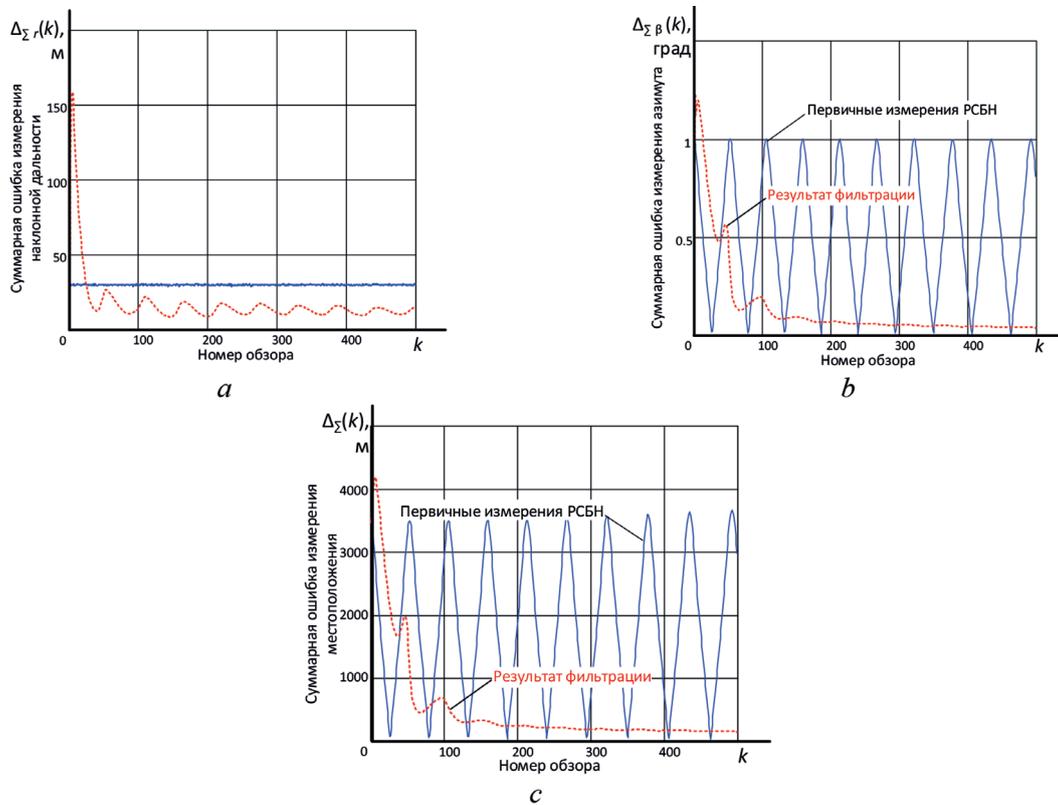


Рис. 5. Результаты модельного эксперимента № 2 (высота полета 500 м):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$   
 Fig. 5. Results of simulation experiment no. 2 (flight altitude 500 m):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$

Рис. 6. Результаты модельного эксперимента № 3 (высота полета 1000 м):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$ Fig. 6. Results of simulation experiment no. 3 (flight altitude 1000 m):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$ Рис. 7. Результаты модельного эксперимента № 4 (высота полета 5000 м):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$ Fig. 7. Results of simulation experiment no. 4 (flight altitude 5000 m):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$

Анализ результатов моделирования (см. рис. 4–7) показывает следующее:

1) использование автоматического разового оценивания в индикаторном канале РСБН позволяет существенно повысить точность измерения навигационных параметров (наклонной дальности и азимута) ЛА;

2) наибольший вклад в значение суммарной ошибки разового оценивания местоположения ЛА в индикаторном канале вносит ошибка измерения азимута, она может достигать от 500 до 4000 м в зависимости от условий наблюдения;

3) использование предлагаемого траекторного измерителя в составе устройства траекторной обработки позволяет повысить точность первичного разового оценивания в среднем в 3–5 раз в зависимости от условий наблюдения;

4) с увеличением дальности до ЛА наблюдается ухудшения качества фильтрации (особенно на начальных шагах), что связано с увеличением влияния скачкообразных измерений оценок азимута ЛА и подтверждается исследованиями, изложенными в [5, 10].

**Заключение.** Радиотехнические системы ближней навигации играют важную роль в радиотехническом обеспечении полетов авиации и предназначены для определения навигационных параметров, характеризующих положение летательного аппарата в полярной системе координат (наклонная дальность и азимут). Навигационные параметры определяются как на борту ЛА (при помощи азимутального и дальномерного каналов РСБН), так и на земле (при помощи индикаторного канала РСБН). Существенным недостатком существующих индикаторных каналов является более низкая точность определения навигационных параметров (азимута и наклонной дальности летательного аппарата) по сравнению с бортовой аппаратурой.

В настоящей работе предложен способ повышения точности измерения навигационных параметров ЛА в индикаторном канале – использование траекторной обработки радионавигационной информации. Применение данного подхода позволяет оценивать параметры движения ЛА, находящегося в зоне наблюдения РСБН, на основе измерений его мгновенного положения для определения траектории на интервале измерений и прогнозирования его последующего движения. Структура предлагаемого устройства траекторной обработки индикаторного канала РСБН в значительной мере повторяет структуры аналогичных устройств, используемых при обработке радиолокационной информации с учетом особенностей работы индикаторного канала. Предлагаемое устройство траекторной обработки индикаторного канала включает в себя следующие устройства: преобразования координат, отождествления отметок и траекторий, создания новой траектории, удаления траектории, а также буфер траекторий. Разработанное устройство траекторной обработки позволяет оценивать координаты и параметры движения наблюдаемых ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН, выдавать им признак траектории (скоростной или малоскоростной ЛА, «Включено опознавание» и т. д.).

Направлениями дальнейших исследований можно считать: разработку методов нелинейной дискретной фильтрации координат и параметров движения, учитывающей скачкообразные измерения оценок азимута ЛА; разработку модели входного воздействия для индикаторного канала РСБН с учетом аномальных разовых оценок ЛА, обусловленных существованием внутрисистемных синхронных и несинхронных помех; исследование показателей качества устройства траекторной обработки индикаторного канала РСБН в условиях многоцелевой обстановки (в том числе в случае наблюдения маневрирующих и (или) групповых целей).

### Благодарности

Исследования построения обобщенной структуры устройства траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации, приведенные в данной работе, выполнены при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T21-071).

### Acknowledgements

Research on the construction of a generalized structure of a trajectory processing device for the indicator channel of a short-range radio engineering system, presented in this work, was carried out with the support of a grant from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project no. T21-071).

## Список использованных источников

1. Иванюк, В. С. Всенаправленный азимутально-дальномерный радиомаяк РСБН-4 / В. С. Иванюк, А. С. Ткаченко, П. А. Хмарский. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2021. – 325 с.
2. Бакулев, П. А. Радионавигационные системы / П. А. Бакулев. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Радиотехника, 2011. – 272 с.
3. Хмарский, П. А. Траекторный измеритель для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации / П. А. Хмарский, А. Е. Бондаренко, А. С. Горбатко // Навигация и управление движением: материалы XXI конф. молодых ученых (XXI КМУ 2019), г. Санкт-Петербург, 19–22 марта 2019 г. / науч. ред. О. А. Степанов; под общ. ред. В. Г. Пешехонова. – СПб.: ГИЦ РФ АО «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. – С. 300–302.
4. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 510 с.
5. Bar-Shalom, Y. Estimation with Applications to Tracking and Navigation / Y. Bar-Shalom, X.-Rong Li, T. Kirubarajan. – New York: A Wiley-Interscience Publication, 2001. – 558 p. <https://doi.org/10.1002/0471221279>
6. Solonar, A. S. Main problems of trajectory processing and approaches to their solution within the framework of multitarget tracking / A. S. Solonar, P. A. Khmarski // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1864. – Art. ID 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012004>
7. Solonar, A. S. General construction principles and performance features of trajectory processing by data from one radar data source / A. S. Solonar, P. A. Khmarski // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1864. – Art. ID 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012138>
8. Li, X. R. Survey of maneuvering target tracking. Part III: Measurement models / X. R. Li, V. P. Jilkov // International Symposium on Optical Science and Technology: SPIE Proceedings. – San Diego, CA, United States, 2001. – Vol. 4473: Signal and Data Processing of Small Targets. – P. 423–446. <https://doi.org/10.1117/12.492752>
9. Zhao, Z. L. Best linear unbiased filtering with nonlinear measurements for target tracking / Z. L. Zhao, X. R. Li, V. P. Jilkov // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2004. – Vol. 40, № 4. – P. 1324–1336. <https://doi.org/10.1109/TAES.2004.1386884>
10. Li, X. R. Survey of maneuvering target tracking. Part V: Multiple-model methods / X. R. Li, V. P. Jilkov // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2005. – Vol. 41, № 4. – P. 1255–1321. <https://doi.org/10.1109/TAES.2005.1561886>
11. Artemiev, V. M. Detection of signals of moving objects based on the time selection method / V. M. Artemiev, S. M. Kostromitsky, A. O. Naumov // Proc. of the National Acad. of Sci. of Belarus. Phys.-techn. ser. – 2021. – Vol. 66, № 3. – P. 335–342. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-335-342>

## References

1. Ivanyuk V. S., Tkachenko A. S., Khmarski P. A. *Omnidirectional Azimuth-Range-finder Radio Beacon RSBN-4*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus, 2021. 325 p. (in Russian).
2. Bakulev P. A. *Radio Navigation Systems*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2011. 272 p. (in Russian).
3. Khmarski P. A., Bondarenko A. E., Gorbatko A. S. Trajectory meter for the indicator channel of the short-range navigation radio system. *Navigatsiya i upravlenie dvizheniem: materialy XXI konferentsii molodykh uchenykh (XXI KMU 2019), g. Sankt-Peterburg, 19–22 marta 2019 g.* [Navigation and Traffic Control: Materials of the 21<sup>st</sup> Conference of Young Scientists (21<sup>st</sup> CYS 2019), St. Petersburg, March 19–22, 2019]. St. Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2019, pp. 300–302 (in Russian).
4. Shirman Ya. D. (ed.). *Radio-Electronic Systems: Fundamentals of Construction and Theory*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 510 p. (in Russian).
5. Bar-Shalom Y., Li X.-Rong, Kirubarajan T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. New York, A Wiley-Interscience Publication, 2001. 558 p. <https://doi.org/10.1002/0471221279>
6. Solonar A. S., Khmarski P. A. Main problems of trajectory processing and approaches to their solution within the framework of multitarget tracking. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1864, art. ID 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012004>
7. Solonar A. S., Khmarski P. A. General construction principles and performance features of trajectory processing by data from one radar data source. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1864, art. ID 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012138>
8. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of maneuvering target tracking. Part III: Measurement models. *International Symposium on Optical Science and Technology: SPIE Proceedings*. San Diego, CA, United States, 2001, vol. 4473, 423–446. <https://doi.org/10.1117/12.492752>
9. Zhao Z. L., Li X. R., Jilkov V. P. Best linear unbiased filtering with nonlinear measurements for target tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 1324–1336. <https://doi.org/10.1109/TAES.2004.1386884>
10. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of maneuvering target tracking. Part V: Multiple-model methods. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 1255–1321. <https://doi.org/10.1109/TAES.2005.1561886>
11. Artemiev V. M., Kostromitsky S. M., Naumov A. O. Detection of signals of moving objects based on the time selection method. *Vestsi Natsyynal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 335–342. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-335-342>

**Информация об авторах**

*Хмарский Петр Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

*Солонар Андрей Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации, радиолокации и приема-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andssnew@yandex.ru

*Наумов Александр Олегович* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиотомографии, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: naumov@iaph.bas-net.by

**Information about the authors**

*Petr A. Khmarski* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

*Andrei S. Solonar* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Automation, Radar and Transceiver Devices, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andssnew@yandex.ru

*Alexander O. Naumov* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Radiotomography Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: naumov@iaph.bas-net.by