

РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ / RADIO DETECTION AND LOCATION

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.60>

АРХИТЕКТУРА И ИСПОЛНЕНИЕ АВТОНОМНОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
МИКРОНАВИГАЦИИ В АВИАЦИОННЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РАДАРАХ

Научная статья

Коврегин В.Н.^{1,*}, Коврегина Г.М.²

¹ORCID : 0000-0001-6851-1446;

²ORCID : 0000-0003-2091-8786;

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург,
Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kovregin[at]mail.ru)

Аннотация

Предложены архитектура и варианты исполнения автономной системы инерциально-радиотехнической микронавигации в авиационных многофункциональных радиолокаторах, логика функционирования и режимы микронавигации при наличии или при отсутствии радиопомех для глобальных навигационных спутниковых систем, схемы и алгоритмические структуры комплексной обработки инерциально-радиотехнической информации на основе процедур обобщенной фильтрации Калмана и ее модификаций. Рассмотренная нетрадиционная схема комплексирования и циклограмма процедур комплексной обработки РЛ-инерциальной информации позволяют исключить причины снижения точности и расходимости калмановской фильтрации, связанные с фазовыми искажениями (асинхронностью, запаздыванием) и коррелированностью измерений, а также повысить устойчивость процесса РЛ коррекции при возможных срывах измерений в отдельных РЛ каналах.

Ключевые слова: авиационный радар, спутниковые и радиолокационные измерения, микронавигация радара, комплексирование инерциальных и радиотехнических каналов.

ARCHITECTURE AND DESIGN OF AUTONOMOUS INERTIAL-RADIO-RADAR MICRO-NAVIGATION
SYSTEM IN AVIATION MULTIFUNCTIONAL RADARS

Research article

Kovregin V.N.^{1,*}, Kovregina G.M.²

¹ORCID : 0000-0001-6851-1446;

²ORCID : 0000-0003-2091-8786;

^{1,2} Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (kovregin[at]mail.ru)

Abstract

The architecture and variants of the autonomous system of inertial-radio-radar micronavigation in aviation multifunctional radars, logic of functioning and modes of micronavigation in the presence or absence of radio interference for global navigation satellite systems, schemes and algorithmic structures of complex processing of inertial-radio-radar information on the basis of procedures of generalized Kalman filtering and its modifications are proposed. The described unconventional scheme of complexing and cyclogram of procedures of complex processing of RD-inertial information allow to exclude the reasons of decrease of accuracy and divergence of Kalman filtering related to phase distortions (asynchrony, delay) and correlation of measurements, and also to increase stability of RD correction process in case of possible failures of measurements in separate RD channels.

Keywords: aviation radar, satellite and radar measurements, radar micro-navigation, complexing of inertial and radio-radar channels.

Введение

В настоящее время в состав аппаратуры авиационных многофункциональных радаров (РЛС), как правило, включена специализированная система микронавигации (СМН) фазового центра антенны (ФЦА) РЛС [1], [2], интегрированная с РЛС на аппаратно-алгоритмическом уровне и обеспечивающая высокоточное определение траекторных параметров ФЦА и параметров ориентации главного луча РЛС (ГЛ) на относительно коротких (секундных) временных интервалах в зафиксированной на это время нормальной земной системе координат. Традиционно такие СМН представляют собой интегрированную инерциально-спутниковую систему с датчиками первичной информации, размещенными вблизи ФЦА, информационно взаимодействующую с РЛС и штатным навигационным комплексом (НК) летательного аппарата (ЛА) – носителя РЛС [3], [4], [5]. В то же время отмечается существенное усложнение сигнально-помеховой обстановки при работе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) из-за организованных радиопомех. Возникает необходимость пересмотра концепции, архитектуры (внешнего функционального проявления), исполнения (внутренней структуры) и аппаратной реализации традиционных инерциально-спутниковых СМН, учитывая возрастающую вероятность их продолжительной работы при отсутствии достоверной информации от бортовой аппаратуры потребителя ГНСС, используемой в СМН в качестве высокоточного позиционного или позиционно-скоростного корректора для инерциальных датчиков СМН. Следует отметить, что информационное взаимодействие СМН со штатным НК ЛА и/или с отдельными

подсистемами/датчиками из состава НК во многих случаях не представляется возможным (не обеспечивается интерфейсом) или не является эффективным (вследствие асинхронности и несогласованности измерений НК и СМН, неконтролируемых задержек при обмене, недостаточной для задач микронавигации точностью данных, получаемых от НК). В ряде случаев ЛА-носитель не имеет полноценного НК, а состав его бортового оборудования не представляет практического интереса в аспекте микронавигации РЛС. В данной работе СМН концептуально рассматривается как автономная система в структуре РЛС, которая практически не взаимодействует с НК ЛА и функционирует только на основе измерительной информации от традиционных датчиков первичной информации СМН (приемная антенна ГНСС, беслатформенный блок инерциальных чувствительных элементов) и непосредственно от самой РЛС, также рассматриваемой как датчик микронавигационной информации. По физическим принципам получения первичной измерительной информации такая автономная система – инерциально-радиотехническая (ИР).

В целом, *объектом исследования* является автономная ИР (АИР) СМН в типовой многофункциональной РЛС авиационного базирования, обеспечивающей обзор воздушного пространства (ОВП) и обзор земной поверхности (ОЗП), в т. ч. ОЗП с высоким разрешением при синтезируемой апертуре (СА) антенны [1], [2]. *Цель данной работы* – представление основных положений, определяющих архитектуру, исполнение, логику и режимы функционирования АИР СМН в полете, в т. ч. «на фоне» решения в РЛС ее основных функциональных задач ОВП и ОЗП и условиях организованных помех ГНСС.

Методы и принципы исследования

Исследуемая/разрабатываемая АИР СМН, в общем случае, обеспечивает определение параметров траектории ФЦА/ориентации ГЛ радара при решении РЛС задач ОВП, включая обнаружение, измерение траекторных параметров и сопровождения траекторий воздушных объектов, а также задач ОЗП, включая ОЗП с высоким/сверхвысоким разрешением при СА. Кроме того, в СМН, как назначаемая опция решаются и традиционные задачи навигации/ориентации ЛА в общепринятой геодезической (навигационной) системе координат. При назначении такой опции радар со «встроенной» АИР СМН в аспекте архитектуры можно рассматривать как «радиолокационно-навигационный комплекс», который может быть резервным или основным средством традиционной навигации ЛА – в зависимости от уровня оснащения ЛА бортовым навигационным оборудованием. Реализация этой опции, по сути, сводящаяся к переходу от навигации ФЦА к навигации удаленного от ФЦА центра масс ЛА, не является проблематичной и далее в работе детально не рассматривается. *Актуальной* остается *проблема* обеспечения требуемой точности микронавигации ФЦА при СА. В задачах ОВП – менее «жесткие» требования по точности, но в условиях организованных помех ГНСС их выполнение также является проблематичным. В настоящее время усложнение сигнально-помеховой обстановки для ГНСС является устойчивой тенденцией, затрудняющей решение указанной проблемы достижения требуемой точности микронавигации ФЦА.

На данный момент, наряду с разработками по повышению помехоустойчивости аппаратуры ГНСС, ведутся интенсивные исследования в области нетрадиционных методов и средств «неспутниковой» (микро)навигации и в т. ч. рассматриваются возможности использования самой РЛС как дополнительного корректирующего датчика скорости ФЦА в информационно-измерительной структуре СМН радара. Например, в работе [6] показана возможность высокоточного измерения радиальной скорости ФЦА по направлению ГЛ в моноимпульсном режиме с низкой частотой повторения импульсов (ЧПИ). В работах [7], [8], [9], [10] в качестве датчика скорости рассмотрена типовая РЛС с квазинепрерывным излучением (КНИ) при высокой/ высокой средней ЧПИ, в т. ч. и при линейной частотной модуляции несущего колебания в пачке импульсов. Применительно к режимам КНИ разработаны [7], [8], [9], [10]:

- методы измерения дальности R от ФЦА до земли и радиальной скорости ФЦА V_r при КНИ и КНИ с ЛЧМ;
- процедуры определения траекторной скорости ФЦА V по нескольким измерениям скорости $V_{R(k)}$ ($k \geq 3$), выполненным при разных направлениях ГЛ;
- схема комплексирования и базовые алгоритмы комплексной обработки инерциально-радиолокационной информации по скорости ФЦА на основе метода обобщенной фильтрации Калмана (ОФК) [11].

На рис. 1 показана упрощенная структурно-функциональная схема АИР СМН, сформированная с учетом вышеуказанных разработок [7], [8], [9], [10]. В отличие от типовых инерциально-спутниковых СМН, в АИР СМН реализуется «глубокая» функциональная интеграция СМН и радара, как уровне их информационного взаимодействия, так по контуру управления направлением ГЛ, параметрами КНИ и первичной обработкой принимаемых сигналов.

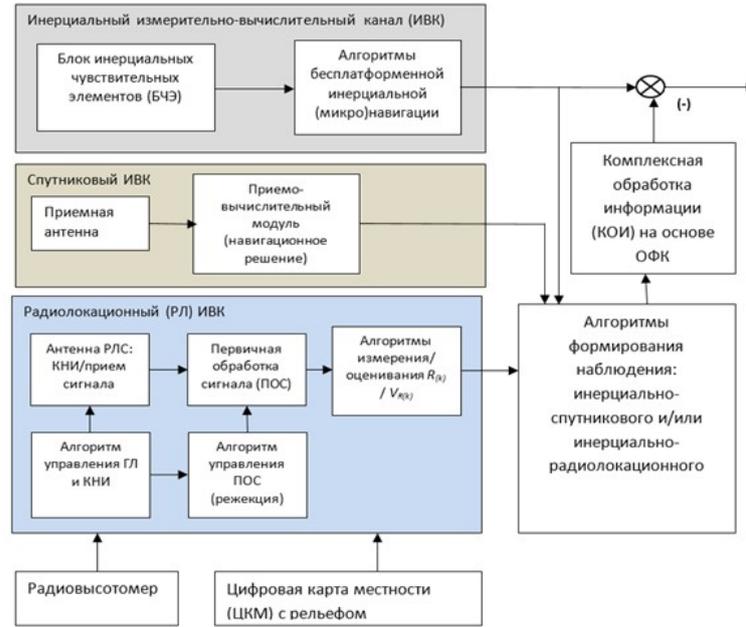


Рисунок 1 - Упрощенная структурно-функциональная схема АИР СМН
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.60.1>

На рис. 1 показан только один радиолокационный (РЛ) измерительно-вычислительный канал, обеспечивающий измерение дальности ФЦА до земли $R_{(k)}$ и радиальной скорости ФЦА $V_{R(k)}$ при заданном k -ом направлении ГЛ. При работе АИР СМН в полете сохраняются все традиционные режимы СМН: автономный инерциальный и инерциально-спутниковый. Кроме того, реализуются инерциально-РЛ (ИРЛ), инерциально-РЛ-спутниковый (ИРЛС) и РЛ-спутниковый режимы функционирования СМН. Последний из этих режимов реализуется как технологический режим калибровки/угловой юстировки РЛ каналов в полете, возможный только при одновременном функционировании спутникового и РЛ каналов, при признаках достоверности данных ГНСС по скорости, которые принимаются как «квазиэталонные» и с использованием которых оцениваются и учитываются систематические погрешности РЛ каналов. Этот технологический режим АИР СМН в данной работе не рассматривается.

Аналогично, при одновременной информационной «избыточности» по скорости ФЦА, обеспечиваемой ГНСС- и РЛ-каналами, реализуется функциональный режим ИРЛС. При этом формируются традиционные инерциально-спутниковые наблюдения как разность проекций скорости ФЦА в осях сопровождающего трехгранника $oENH$ геодезической системы координат, определяемых в инерциальном и спутниковом каналах:

$$Z_{I/Ci} = [V_E V_N V_H]_{Ii}^T - [V_E V_N V_H]_{Ci}^T; \quad (1)$$

(1) где T – транспонирование; $[V_E V_N V_H]_{Ii}^T$ и $[V_E V_N V_H]_{Ci}^T$ – соответственно проекции траекторной скорости ФЦА в инерциальном и спутниковом каналах.

Одновременно и аналогично формируются и РЛ-инерциальные наблюдения вида

$$Z_{I/rli} = [V_E V_N V_H]_{Ii}^T - [V_E V_N V_H]_{rli}^T; \quad (2)$$

где $[V_E V_N V_H]_{rli}^T$ – проекции траекторной скорости ФЦА, вычисленные на основе координатных преобразований нескольких РЛ-измерений радиальной скорости $V_{R(k)}$ ($k \geq 3$) при разных направлениях оси ГЛ, т. е. при реализации k каналов РЛ измерений.

В общем случае, задача коррекции инерциального канала СМН сводится к нахождению оптимальной – в смысле минимума дисперсии – несмещенной состоятельной оценки вектора состояния ошибок X_i инерциального канала и к компенсации этих ошибок. Решение задачи находится из следующих уравнений ОФК [11]:

$$\text{Прогноз : } m_0 = \hat{X}_{i/i-1} = \Phi_i \hat{X}_{i-1/i-1}; \quad (3)$$

$$M_0 = P_{i/i-1} = P_i P_{i-1/i-1} P_i^T + \Gamma_i Q_{i-1/i-1} \Gamma_i^T. \quad (4)$$

$$\text{Коррекция : } K_i = P_{i/i-1} H_i^T (H_i P_{i/i-1} H_i^T + R_i)^{-1}; \quad (5)$$

$$P_{i/i} = (E - K_i H_i) P_{i/i-1}; \hat{X}_{i/i} = \hat{X}_{i/j-1} + k_i (Z_i - H_i \hat{X}_{i(i-1)}), \quad (6)$$

где P_{ik} – ковариационная матрица размерности $n \times n$ погрешностей оценки вектора состояния; - оценка вектора состояния X_i размерности n на i -ом шаге по наблюдению Z_k на k -ом шаге; H_i – матрица связи вектора состояния с вектором наблюдения размерности $l \times n$; l – размерность вектора наблюдения; R_i – ковариационная матрица

погрешностей измерений; $\Phi_i = \Phi(t_i, t_{i-1})$ – переходная матрица для вектора состояния ошибок инерциального канала; $\Gamma_i = \Gamma(t_i, t_{i-1})$ – переходная матрица для интенсивностей шумов $Q_{i-1/i-1}$ инерциального канала.

Для l статистически независимых компонент $z_j, j = 1, \dots, l$ вектора наблюдения Z_i оптимальная скорректированная оценка вектора состояния может находиться из следующих уравнений последовательной модификации ОФК [12]:

$$\text{Коррекция : } K_j = M_{j-1} H_j^T (H_j M_{j-1} H_j^T + R_j)^{-1};$$

$$M_j = (E - K_j H_j) M_{j-1}; j = 1, 2, \dots, l \quad (7)$$

$$m_j = m_{j-1} + K_j (Z_i - H_j \hat{X}_{i/i-1}); \quad (8)$$

$$P_{i/i} = M_l; \hat{X}_{i/i} = m_l, \quad (9)$$

где M_j – ковариационная матрица погрешностей оценки m_j вектора X_i по наблюдению z_j ; R_j – дисперсия погрешностей ϑ_j j -го внешнего (по отношению к инерциальному) канала измерения; H_j – вектор-строка коэффициентов связи наблюдения z_j с вектором состояния X_i .

Отметим, что РЛ и спутниковые измерения скорости не являются коррелированными, а при обработке группы взаимно коррелированных компонент вектора наблюдения они могут быть приведены к последовательности некоррелированных путем выполнения следующих преобразований [12]:

$$Z_i^* = R_i^{-1/2} Z_i; H_i^* = R_i^{-1/2} H_i; R_i^* = E,$$

где E – единичная матрица; R_i – ковариационная матрица взаимнокоррелированных шумов наблюдений.

В рассматриваемом режиме ИРЛС реализуется экстраполяция вида (3), (4) и последовательная коррекция вида (5) – (9), причем первые три компонента ($j = 1, 2, 3$) соответствуют вектору (2) инерциально-РЛ наблюдения, а следующие компоненты ($j = 4, 5, 6$) – вектору (1) инерциально-спутникового РЛ наблюдения. Отметим, что по потенциальной точности РЛ измерения значительно уступают спутниковым. Однако при РЛ коррекции ($j = 1, 2, 3$) значительно снижается дисперсия погрешностей оценивания и при последующей спутниковой коррекции ($j = 4, 5, 6$) сокращается переходный процесс (увеличивается темп сходимости ОФК) и возрастает точность оценок вектора состояния.

При отсутствии информации от ГНСС в условиях организованных радиопомех режим ИРЛС «вырождается» в инерциально-радиолокационный режим. Для варианта обработки наблюдения вида (2) при последовательной модификации ОФК [12] в табл. 1 приведены полученные на основе натуральных экспериментов статистические характеристики – среднее значение и среднеквадратическое отклонение (СКО) – для разностей выходных данных ИРЛ режима по проекциям скорости ФЦА и аналогичных проекций, полученных по данным ГНСС – канала, которые принимались в качестве эталонных значений. При этом исследования варианты при трех и четырех каналах РЛ измерения радиальной скорости.

Таблица 1 - Статистические характеристики отклонений проекций скорости при ИРЛ режиме от данных, полученных от ГНСС

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.60.2>

	По проекции V_E		По проекции V_N		По проекции V_H	
	3 канала	4 канала	3 канала	4 канала	3 канала	4 канала
Среднее (м/с)	-0,07885	-0,006169	0,159559	0,162401	-4,287672	-0,624775
СКО (м/с)	1,244801	1,095195	1,210298	1,108757	15,323342	5,493386

При отсутствии достоверной информации от ГНСС каналы РЛ измерений остаются единственным корректором в СМН и, в сравнении с ИРЛС, в ИРЛ режиме к этим корректирующим РЛ каналам предъявляются более высокие требования по точности.

Следует отметить, что при определении проекция траекторной скорости :

- используются измерения/оценки радиальной скорости $V_{R(k)}$ (при $k=3$ или $k=4$), полученные при последовательной переориентации ГЛ, а временной интервал между моментами начала излучения для двух разных направлений ГЛ будет, как минимум, равен длительности излучаемой пачки импульсов при КНИ, т. е. РЛ измерения не синхронны, а время от момента излучения первой пачки до момента определения проекций траекторной скорости ФЦА (время запаздывания) при 3...4 пачках импульсов обычно составляет $\approx 0,3 \dots 0,8$ с;

- выполняются координатные преобразования с использованием измеряемых в инерциальном канале СМН углов рысканья (курса), крена и тангажа, т. е. в наблюдении вида (2) РЛ и инерциальные измерения являются коррелированными.

Очевидно, что эти обстоятельства нарушают корректность традиционной постановки задачи ОФК и могут приводить к снижению точности оценок, а ряде случаев и к практической расходимости процесса калмановской фильтрации [13].

С другой стороны, частота съема инерциальных измерений составляет сотни Гц и не составляет затруднений их синхронизация с относительно редкими РЛ измерениями, т. е. для момента излучения пачки импульсов для каждого k -го РЛ канала измерения радиальной скорости ФЦА можно сформировать разностное скалярное наблюдение вида

$$Z_{I/rl(k)_i} = V_{RI(k)_i} - V_{R(k)_i}, \quad (10)$$

где $V_{RI(k)_i}$ – радиальная проекция траекторной скорости ФЦА, пересчитанная по измерениям инерциального канала на то же направление к поверхности земли, для которого проводилось измерение радиальной скорости $V_{R(k)_i}$ в k -ом РЛ канале.

Очевидно, что скалярное наблюдение (10) уже не содержит асинхронных инерциальных и РЛ измерений и эти измерения, не вносящие фазовых искажений, к тому же не являются взаимокоррелированными. После прогноза (3), (4) осуществляется коррекция по аналогии с выражениями (7), (8) в последовательной модификации ОФК при $j=1$.

Таким образом, комплексную обработку информации в ИРЛ режиме целесообразно осуществлять на основе ОФК для скалярного наблюдения, формируемого в виде разности значений измеренной в РЛ канале и вычисленной (по инерциальным измерениям) радиальной составляющей скорости ФЦА. В целом, такая фильтрация последовательно реализуется применительно ко всем используемым в одном сеансе измерений РЛ каналам. Важно отметить, что наблюдения вида (2) возможно только в том случае, когда состоялись успешные измерения не менее, чем по трем задействованным РЛ каналам, т. е. когда возможен расчет проекций траекторной скорости ФЦА в сопровождающем трехграннике геодезической системы координат. При наблюдениях вида (9) сеанс ОФК состоится даже только при одном РЛ измерении и при «срывах» измерений во всех других РЛ каналах.

Заключение

Разработанная архитектура и варианты исполнения автономной инерциально-радиотехнической СМН многофункционального авиационного радара предполагают возможность решения в СМН задач традиционной навигации/ориентации носителя и микронавигации ФЦА/ориентации главного луча радара, в т. ч. и в условиях организованных радиопомех ГНСС, используя реализуемые в радаре каналы РЛ измерения траекторных параметров ФЦА. Предложенные нетрадиционная схема комплексирования и циклограмма процедур комплексной обработки РЛ-инерциальной информации позволяют исключить причины снижения точности и расходимости калмановской фильтрации, связанные с фазовыми искажениями (асинхронностью, запаздыванием) и коррелированностью измерений, а также повысить устойчивость процесса РЛ коррекции при возможных срывах измерений в отдельных РЛ каналах. Проблема повышения потенциальной точности микронавигационных РЛ измерений и устойчивости измерительного процесса (минимизации срывов измерений) на данный момент сохраняет актуальность, как и проблема повышения помехоустойчивости инерциально-РЛ режима при наличии аномальных погрешностей («выбросов»), характерных для радиотехнических измерений.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Фазылзянов Р.Р., Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.60.4>
Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.60.3>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Fazilzyanov R.R., Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.60.4>
International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.60.3>

Список литературы / References

- Сколник М.И. Справочник по радиолокации / М.И. Сколник. — Москва: Техносфера, 2015. — Т. 1.
- Кондратенков Г.С. Авиационные системы радиовидения / Г.С. Кондратенков. — Москва: Радиотехника, 2015. — 648 с.
- Chernodarov A.V. Using an inertial satellite navigation system for determination of motion parameters of the radar antenna phase center / A.V. Chernodarov, A.P. Patrikeev, V.N. Kovregin [et al.] // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. — 2016. — № 1. — P. 315–323.
- Чернодаров А.В. Летная отработка распределенной системы инерциально-спутниковой микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / А.В. Чернодаров, А.П. Патрикеев, В.Н. Коврегин [и др.] // Научный Вестник МГТУ ГА. — 2017. — № 20. — С. 222–231.
- Чернодаров А.В. Инерциально-спутниковая система микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой и доплеровским каналом измерения траекторной скорости / А.В. Чернодаров, В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина // Сборник материалов «XXX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам». — 2023. — № 1. — С. 38–40.
- Красильщиков М.М. К проблеме высокоточного позиционирования фазового центра антенны многофункциональной бортовой РЛС авиационного базирования / М.М. Красильщиков, Д.А. Козорез, К.И. Сыпало [и др.] // Гироскопия и навигация. — 2013. — № 2 (81). — С. 14–30.
- Коврегин В.Н. Метод комбинированных микронавигационных измерений в радаре квазинепрерывного излучения при обзоре воздушного пространства на фоне земли / В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина // Сборник материалов «XXXI Санкт-Петербургской международной конференция по интегрированным навигационным системам». — 2024. — № 1. — С. 188–191.

8. Коврегин В.Н. Методы и алгоритмы активного адаптивно-робастного сопровождения аэрообъекта и сопутствующих микронавигационных измерений в радарх квазинепрерывного излучения / В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина // Сборник материалов «XXXI Санкт-Петербургской международной конференция по интегрированным навигационным системам». — 2024. — № 1. — С. 192–195.

9. Коврегин В.Н. Адаптивно-робастные методы сопутствующих микронавигационных измерений по мешающим отражениям при поиске/наблюдении/сопровождении низколетящей цели / В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина, А.С. Мурзаев // Радиотехника. — 2024. — № 88 (8). — С. 91–103.

10. Коврегин В.Н. Автономная коррекция микронавигационной системы авиационного радара при организованных радиопомехах спутниковой навигации / В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина // Системный анализ и логистика. — 2023. — № 4 (38). — С. 54–63. — DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-54-63.

11. Брюмер К. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Брюмер, Г. Зифлинг. — Москва: Наука, 1982. — 200 с.

12. Mendel J.M. Computational requirement for a discrete Kalman filter / J.M. Mendel. — 2020. — № 1. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1099837> (accessed: 15.12.2024). — DOI: 10.1109/TAC.1971.1099837.

13. Шли Ф.Х. Расходимость фильтрации по методу Калмана / Ф.Х. Шли, С.И. Стендиш, Н.Ф. Тода // Ракетная техника и космонавтика. — 1967. — № 6. — С. 73–81.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Skolnik M.I. Spravochnik po radiolokatsii [Radar Handbook] / M.I. Skolnik. — Moscow: Tehnosfera, 2015. — Vol. 1. [in Russian]

2. Kondratenkov G.S. Aviatsionnye sistemy radiovideniya [Aircraft radio vision systems] / G.S. Kondratenkov. — Moscow: Radiotekhnika, 2015. — 648 p. [in Russian]

3. Chernodarov A.V. Using an inertial satellite navigation system for determination of motion parameters of the radar antenna phase center / A.V. Chernodarov, A.P. Patrikeev, V.N. Kovregin [et al.] // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. — 2016. — № 1. — P. 315–323.

4. Chernodarov A.V. Letnaja otrabotka raspredelennoj sistemy inertzial'no-sputnikovoj mikronavigatsii dlja radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj [Flight testing of distributed inertial-satellite micronavigation system for synthetic aperture radar] / A.V. Chernodarov, A.P. Patrikeev, V.N. Kovregin [et al.] // Scientific Bulletin of MSTU SA. — 2017. — № 20. — P. 222–231. [in Russian]

5. Chernodarov A.V. Inertzial'no-sputnikovaja sistema mikronavigatsii dlja radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj i doplerovskim kanalom izmereniya traektornoj skorosti [Inertial-satellite micro-navigation system for synthetic aperture radar with Doppler channel for trajectory velocity measurement] / A.V. Chernodarov, V.N. Kovregin, G.M. Kovregina // Proceedings of the "XXX St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems". — 2023. — № 1. — P. 38–40. [in Russian]

6. Krasil'schikov M.M. K probleme vysokotochnogo pozitsionirovaniya fazovogo tsentra anteny mnogofunktsional'noj bortovoj RLS aviatsionnogo bazirovaniya [To the problem of high-precision positioning of the antenna phase centre of a multifunctional airborne aviation-based radar system] / M.M. Krasil'schikov, D.A. Kozorez, K.I. Sypalo [et al.] // Gyroscopy and Navigation. — 2013. — № 2 (81). — P. 14–30. [in Russian]

7. Kovregin V.N. Metod kombinirovannyh mikronavigatsionnyh izmerenij v radare kvazinepreryvnogo izlucheniya pri obzore vozdušnogo prostranstva na fone zemli [Method of combined micro-navigation measurements in quasi-continuous radar for ground-based airspace surveillance] / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina // Proceedings of "XXXI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems". — 2024. — № 1. — P. 188–191. [in Russian]

8. Kovregin V.N. Metody i algoritmy aktivnogo adaptivno-robastnogo soprovozhdeniya aéroob'ekta i sopushtvujuschih mikronavigatsionnyh izmerenij v radarah kvazinepreryvnogo izlucheniya [Methods and algorithms for active adaptive-robust tracking of an aerobject and associated micro-navigation measurements in quasi-continuous radars] / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina // Proceedings of "XXXI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems". — 2024. — № 1. — P. 192–195. [in Russian]

9. Kovregin V.N. Adaptivno-robastnye metody sopushtvujuschih mikronavigatsionnyh izmerenij po meshajuschim otrazhenijam pri poiske/nabljudenii/soprovozhdenii nizkoletjashej tseli [Adaptive-robust methods for accompanying micro-navigation measurements from interfering reflections during search/observation/tracking of a low-flying target] / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, A.S. Murzaev // Radio Engineering. — 2024. — № 88 (8). — P. 91–103. [in Russian]

10. Kovregin V.N. Avtonomnaja korrektsija mikronavigatsionnoj sistemy aviatsionnogo radara pri organizovannyh radiopomehah sputnikovoj navigatsii [Autonomous correction of aviation radar micronavigation system under organized radio interference of satellite navigation] / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina // Systems Analysis and Logistics. — 2023. — № 4 (38). — P. 54–63. — DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-54-63. [in Russian]

11. Brjumer K. Fil'tr Kalmana-B'jusi [Kalman-Bucy filter] / K. Brjumer, G. Zifling. — Moscow: Nauka, 1982. — 200 p. [in Russian]

12. Mendel J.M. Computational requirement for a discrete Kalman filter / J.M. Mendel. — 2020. — № 1. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1099837> (accessed: 15.12.2024). — DOI: 10.1109/TAC.1971.1099837.

13. Shli F.H. Rashodimosť fil'tratsii po metodu Kalmana [Divergence of the Kalman filtering method] / F.H. Shli, S.I. Stendish, N.F. Toda // Rocket Technology and Astronautics. — 1967. — № 6. — P. 73–81. [in Russian]