



УДК 629.072: 621.396
ГРНТИ 47.49 02

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАЛМАНОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ ОТ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В.П. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
М.П. БЕЛЯЕВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
М.М. ЯСТРЕБОВ
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
С.В. МИТРОФАНОВА
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье рассматриваются навигационные системы беспилотного летательного аппарата. На беспилотном летательном аппарате используется инерциальная навигационная система. Предлагается вторичная обработка навигационных данных на основе калмановской фильтрации. Рассмотрены структурная схема алгоритма калмановской фильтрации навигационных данных и компьютерный анализ эффективности данного алгоритма.

Ключевые слова: навигационная система; узконаправленная антенная система; беспилотный летательный аппарат.

EFFICIENCY ANALYSIS OF KALMAN FILTRATION NAVIGATION DATA FROM THE INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

V.P. VASIL'EV, Candidate of technical sciences
MESCAF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
M.P. BELYAEV, Candidate of technical sciences
MESCAF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
M.M. YASTREBOV
MESCAF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
S.V. MITROFANOVA
MESCAF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)

The article deals with the navigation systems of an unmanned aerial vehicle. On an unmanned aerial vehicle, an inertial navigation system is used. A secondary processing of navigational data based on Kalman filtering is suggested. The structural scheme of the Kalman filtering algorithm for navigational data and the computer analysis of the algorithm efficiency are considered.

Keywords: navigation system; highly directional antenna system; unmanned aerial vehicle.

Введение. Перспективным направлением развития комплексов связи с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) является использование направленных антенных систем и/или использование оптических систем связи (лазеров) [1]. Учеными США созданы гибридные коммуникационные системы связи, включающие в себя радиосвязь и оптическую систему связи [2]. Гибридные системы связи продемонстрировали скорость передачи данных до 3 Гбит/с на дальности до 200 км. Но к гибридным системам связи предъявляются очень высокие требования по определению местоположения и ориентирования БЛА. Решение проблемы определения местоположения и ориентирования БЛА с высокой точностью планируется до 2020 года [3].



Актуальность. Принципиальная трудность определения координат БЛА только с помощью спутниковой радионавигационной системы (СРНС) состоит не столько в том, что реализуемая точность не всегда достаточна, но в том, что сигналы СРНС могут быть недоступны на некоторый промежуток времени (из-за рельефа местности, плотной городской застройки, погодных условий, из-за неисправности или отказа аппаратуры и т.д.) [4].

Для преодоления этой принципиальной трудности координаты БЛА могут дополнительно определяться по данным резервной инерционной навигационной системы, которая размещается на БЛА и оказывается способной в течение длительного времени, независимо определять его координаты посредством обработки показаний различных датчиков [4]. Но инерциальная навигационная система подвержена накоплению ошибки определения местоположения и ориентирования БЛА. Поэтому авторами статьи предлагается использовать фильтр Калмана для обработки навигационных данных.

Рассмотрим алгоритм обработки данных, поступающих от инерциальной навигационной системы (ИНС), который представляет собой алгоритм типа многомерной Калмановской фильтрации (КФ) [5]:

$$\hat{\mathbf{P}}(k+1) = \tilde{\mathbf{P}}(k+1) + \mathbf{K}(k+1)[\mathbf{S}_1(k+1) - \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{P}}(k+1)] \quad (1)$$

$$\tilde{\mathbf{P}}(k+1) = \mathbf{B} \hat{\mathbf{P}}(k); \quad (2)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \tilde{\mathbf{G}}(k+1) \mathbf{C}^T [\mathbf{C} \tilde{\mathbf{G}}(k+1) \mathbf{C}^T + \mathbf{Q}_2(k+1)]^{-1}; \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{G}}(k+1) = \mathbf{B} \hat{\mathbf{G}}(k) \mathbf{B}^T + \mathbf{Q}_1(k); \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{G}}(k+1) = \tilde{\mathbf{G}}(k+1) - \mathbf{K}(k+1) \mathbf{C} \tilde{\mathbf{G}}(k+1). \quad (5)$$

Здесь \mathbf{B} – матрица перехода, $\hat{\mathbf{P}}(k)$ – оценка вектора состояния $\mathbf{P}(k)$, причем $\hat{\mathbf{P}}^T(k) = [\hat{x}^M, \hat{y}^M, \hat{v}_x^M, \hat{v}_y^M, \hat{x}^H, \hat{y}^H, \hat{v}_x^H, \hat{v}_y^H]$, $\tilde{\mathbf{P}}(k)$ – экстраполированная оценка вектора состояния $\mathbf{P}(k)$, причем $\tilde{\mathbf{P}}^T(k) = [\tilde{x}^M, \tilde{y}^M, \tilde{v}_x^M, \tilde{v}_y^M, \tilde{x}^H, \tilde{y}^H, \tilde{v}_x^H, \tilde{v}_y^H]$, $\tilde{\mathbf{G}}(k)$ – ковариационная матрица вектора $\tilde{\mathbf{P}}(k)$, $\hat{\mathbf{G}}(k)$ – ковариационная матрица вектора $\hat{\mathbf{P}}(k)$, $\mathbf{K}(k)$ – вектор коэффициентов фильтра Калмана, $\mathbf{S}^T(k)$ – вектор наблюдения, $\mathbf{Q}_1(k)$ и $\mathbf{Q}_2(k)$ – ковариационные матрицы векторов шума возмущений и шума наблюдений оцениваемых компонент.

Для компьютерного моделирования и анализа эффективности калмановской фильтрации необходимо рассмотреть структурную схему алгоритма (рисунок 1).

В блоке 1 алгоритма производится ввод исходных данных, необходимых для вычисления оценки вектора состояния (блок 8), где k_{\max} максимальное количество итераций в цикле алгоритма (блок 2) использования калмановского фильтра. Необходимые данные для новой итерации в цикле обновляются в теле цикла. Таким образом, для выполнения новой итерации в цикле необходимы только данные от ИНС.

После введения (получения) $\hat{\mathbf{P}}(k)$ оценки вектора состояния необходимо определить экстраполяцию вектора $\mathbf{P}(k)$ (блок 3).

В блоке 4 происходит вычисление предсказания ошибки ковариации с учетом ковариационной матрицы вектора возмущения $\mathbf{Q}_1(k)$. Ковариационная матрица вектора возмущений составляется согласно системным ошибкам специфики динамического движения БЛА малого, среднего классов и МР. Размерность матриц $\tilde{\mathbf{G}}(k)$, $\hat{\mathbf{G}}(k)$, $\mathbf{Q}_1(k)$ составляет 8×8 .



Вычисление матрицы усиления Калмана $\mathbf{K}(k)$ (блок 5) происходит с учетом ковариационной матрицы вектора наблюдения $\mathbf{Q}_2(k)$. Ковариационная матрица вектора наблюдения зависит от внешних факторов влияющих на БЛА и МР. Размерность матриц $\mathbf{Q}_2(k)$ составляет 4x4, $\mathbf{K}(k)$ составляет 8x4.

После оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{P}}(k+1)$ необходимо ее выдать потребителю навигационной информации (блок 8).

Для последующей итерации в цикле вычисляется оценка матрицы ошибки ковариации $\hat{\mathbf{G}}(k+1)$ (блок 9).

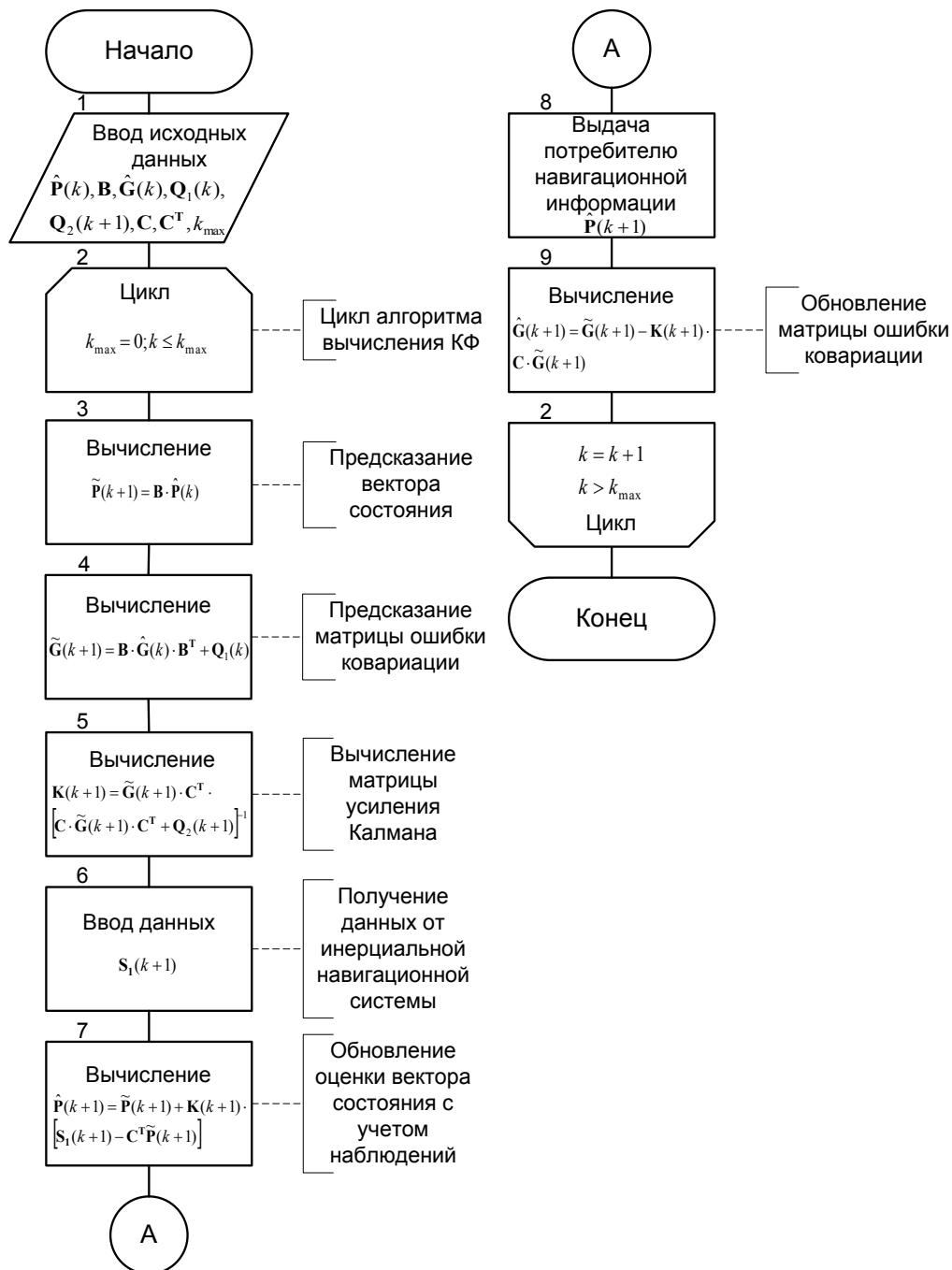


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма вычисления калмановской фильтрации данных, поступающих от инерциальной навигационной системы



На основе данной структурной схемы алгоритма разработана компьютерная программа в среде программирования «Delphi». В разработанной компьютерной программе провели моделирование и анализ эффективности калмановской фильтрации данных, поступающих от инерциальной навигационной системы.

Данная программа показывает траекторию движения БЛА при наличии некоторых регулярных составляющих проекций ускорений [6] (рисунок 2). Из рисунка 2 видно, что при моделировании задавалась криволинейная траектория движения БЛА.

Моделирование проводилось для дискретной модели движения путем усреднения по 500 реализациям при начальных проекциях скорости (ПС) движения БЛА на оси x , y 20 м/с. Интервал времени между соседними точками выборки составил 1 с. При следующих значениях СКО (среднеквадратического отклонения): 0,4 м – СКО дискретного белого шума координат (ДГБШ); 0,4 м/с – СКО ДГБШ ПС на оси x, y системы координат; 10 м – СКО ДГБШ наблюдений координат БЛА. Начальные координаты БЛА задавались с точностью, равной СКО ДГБШ наблюдений координат. СКО ДГБШ наблюдений ПС ИНС на оси x, y , системы координат составило 0,8 м/с и 0,2 м/с для рисунка 3 и рисунка 4, соответственно [6].

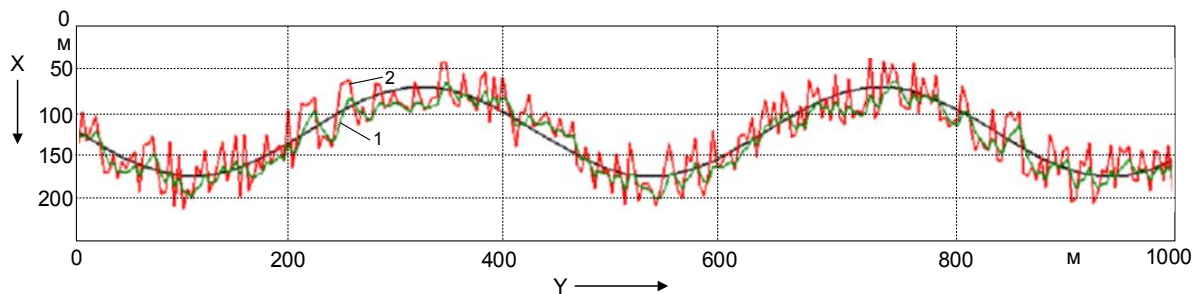


Рисунок 2 – Пример моделируемой траектории движения БЛА

На рисунках 3 и 4 отражены результаты компьютерных экспериментов (КЭ) и их серий в случае отсутствия во время движения регулярных составляющих ускорения БЛА (значения ускорений имели чисто случайный характер). Движение БЛА моделировалось в интервале времени, длительностью 250 с для дискретного времени, равного 1 с.

Кривые 1, 2 отражают зависимости от времени T (секунды) среднекоординатного (СрК) СКО определения координат, в метрах, для случая наличия и отсутствия обработки показаний ИНС по предложенному выше алгоритму, соответственно, в масштабе, приведенном слева. Кривая 3 – выигрыша (AR) по СрК СКО для случая наличия обработки показаний ИНС по предложенному алгоритму и отсутствием обработки.

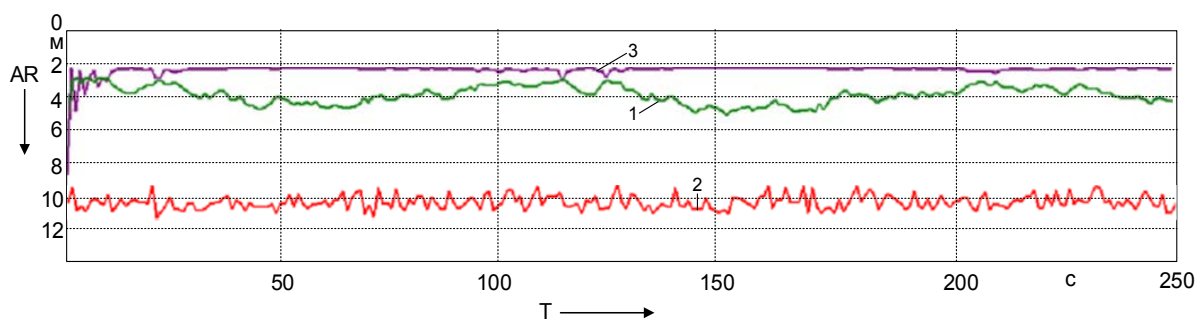


Рисунок 3 – График зависимости СКО измерения координат ИНС от времени, при $\sigma_v = 0,8$ м/с

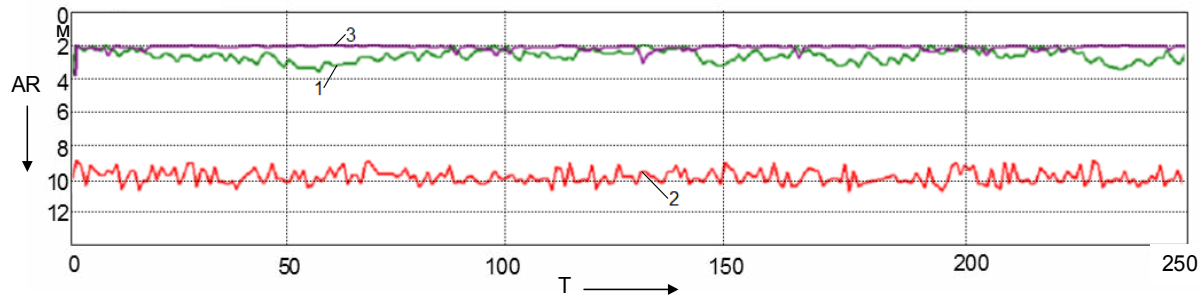


Рисунок 4 – График зависимости СКО измерения координат ИНС от времени, при $\sigma_v = 0,2$ м/с

Как видно из рисунков 3 и 4, с увеличением точности наблюдений ПС БЛА на оси системы координат при неизменной точности наблюдений координат, увеличивается выигрыш по СрК СКО для случая наличия обработки показаний ИНС по предложенному алгоритму перед случаем ее отсутствия. По завершении переходного периода выигрыш принимает значения, флуктуирующие вокруг постоянного во времени среднего значения.

Как видно из рисунков 3 и 4 выигрыш (AR) в точности определения координат составляет 2,5 раза.

Однако ИНС используется только в качестве резервного средства определения координат БЛА, т.к. подвержена накоплению ошибки определения местоположения и ориентирования БЛА. Поэтому реализация алгоритма КФ для обработки навигационных данных от ИНС позволяет увеличить время определения координат БЛА с удовлетворительной точностью. Компьютерное моделирование показало, что СрК СКО в определении координат БЛА в течение 5 минут не превосходит 10 метров (что соответствует СКО в определении направления на БЛА – источник ПС при расстоянии между БЛА 12 км и не более 0,05 градуса) при средних проекциях скоростей движения БЛА на оси системы координат Гаусса-Крюгера 20 м/с, т.е. 72 км/ч.

При той же средней скорости БЛА в наиболее неблагоприятном случае движения БЛА перпендикулярно начальному направлению на источник ПС от другого БЛА в ситуации отсутствия ИНС, размещенной на БЛА, на 5 минут, систематическая ошибка определения одной из координат БЛА – источника ПС, составит 6000 м, а систематическая ошибка определения направления на БЛА – источник ПС при расстоянии между БЛА, например, 12 км, достигнет величины 30 градусов.

Вывод. Таким образом, авторами предлагается алгоритм комплексирования первичных навигационных данных, поступающих от инерциальной навигационной системы, разработанный на основе оптимальной фильтрации Калмана, что позволяет использовать направленные антенные системы в течении определенного времени при отказе основного источника навигационной информации (СРНС). Компьютерное моделирование показало, что данный алгоритм обеспечивает выигрыш в точности определения координат в среднем в 1,5–2,5 раза, в зависимости от условий его применения. Выигрыш обеспечивается использованием данных от ИНС о координатах и проекциях скорости движения БЛА согласно дискретной калмановской фильтрации путем реализации в каждый заданный момент времени предсказания координат БЛА с последующей коррекцией этого предсказания в фильтре, коэффициенты которого вычисляются на основе использования статистических данных об ошибках измерений в ИНС. Указанный выигрыш возрастает при повышении точности измерений проекций скорости БЛА в ИНС.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В.П., Чистилин Д.А. Использование БЛА как ретранслятора связи // V Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» 14-15 мая 2015г.: [сб. мат.-лов тез. докл.] - Минск: ВАРБ, - С. 340.
2. Васильев В.П., Родионов Д.В. Tактический канал связи зарубежных беспилотных летательных аппаратов // Международная научно-практическая конференция «Развитие науки и образования в современном мире» 31 марта 2015 г., Ч. 3. - Москва: АР-Консалт. - С. 73-75.
3. Дорожная карта армии США 2002-2027 год, 192 с.
4. Сучилин В.И., Волобуев Г.Б. Автономная навигация наземного подвижного объекта путем Калмановской фильтрации двумерных координат по измерениям проекций скорости // Сб. докладов XII-й Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь». - Воронеж Т.3, 2006. - С. 2330–2338.
5. Сучилин В.И., Волобуев Г.Б. Сравнительный анализ эффективности двух алгоритмов автономного навигационного вычисления двумерных координат наземного подвижного объекта по данным о проекциях его скорости // Теория и техника радиосвязи, вып. 2, 2006. - С. 63–70.
6. Васильев В.П., Сучилин В.И. Исследование Калмановской фильтрации координат подвижных объектов радиосвязи с применением для ориентации антенных систем // «Охрана, безопасность и связь-2012» Международная НПК: сборник материалов / Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2013. - С. 319-323.
7. Сучилин В.И., Волобуев Г.Б., Парфенов В.И. Выбор алгоритмов фильтрации координат наземного подвижного объекта для реализации в комплексной навигационной системе нового поколения с автономным и спутниковым сегментами // Сб. докладов XIV Санкт-Петербургской МНТК по интегрированным навигационным системам. - С.-Петербург, июнь 2007. - С. 226-228.

REFERENCES

1. Vasil'ev V.P., Chistilin D.A. Ispol'zovanie BLA kak retranslyatora svyazi // V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nye voprosy nauki i tekhniki v sfere razvitiya aviatsii» 14-15 maya 2015g.: [sb. mat.-lov tez. dokl.] Minsk: VARB, S. 340.
2. Vasil'ev V.P., Rodionov D.V. Takticheskij kanal svyazi zarubezhnykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Razvitie nauki i obrazovaniya v sovremennom mire» 31 marta 2015 g., CH. 3. Moskva: AR-Konsalt. S. 73-75.
3. Dorozhnaya karta armii SSHA 2002-2027 god, 192 s.
4. Suchilin V.I., Volobuev G.B. Avtonomnaya navigatsiya nazemnogo podvizhnogo ob"ekta putem Kalmanovskoj fil'tratsii dvumernykh koordinat po izmereniyam proektsij skorosti // Sb. dokladov XII-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya i svyaz'». Voronezh T.3, 2006. S. 2330-2338.
5. Suchilin V.I., Volobuev G.B. Sravnitel'nyj analiz ehffektivnosti dvukh algoritmov avtonomnogo navigatsionnogo vychisleniya dvumernykh koordinat nazemnogo podvizhnogo ob"ekta po dannym o proektsiyakh ego skorosti // Teoriya i tekhnika radiosvyazi, vyp. 2, 2006. S. 63–70.
6. Vasil'ev V.P., Suchilin V.I. Issledovanie Kalmanovskoj fil'tratsii koordinat podvizhnykh ob"ektov radiosvyazi s primeneniem dlya orientatsii antennykh sistem //



«Okhrana, bezopasnost' i svyaz'-2012» Mezhdunarodnaya NPK: sbornik materialov / Voronezh: Voronezhskij institut MVD Rossii, 2013. S. 319 323.

7. Suchilin V.I., Volobuev G.B., Parfenov V.I. Vybior algoritmov fil'tratsii koordinat nazemnogo podvizhnogo ob"ekta dlya realizatsii v kompleksnoj navigatsionnoj sisteme novogo pokoleniya s avtonomnym i sputnikovym segmentami // Sb. dokladov XIV Sankt-Peterburgskoj MNTK po integrirovannym navigatsionnym sistemam. S.-Peterburg, iyun' 2007. S. 226 228.

© Васильев В.П., Беляев М.П., Ястребов М.М., Митрофанова С.В. 2018

Васильев Виталий Петрович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Беляев Максим Павлович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Ястребов Максим Максимович, оператор научно роты научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Митрофанова Светлана Викторовна, младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, mitrofanovas85@mail.ru