

РАДИОТЕХНИКА

Radioengineering XXI век

9 2016

В номере:

РАДИОСИСТЕМЫ

Выпуск 205

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ,
№ 1 (выпуск 5)

Выпуск 206

Статистический синтез и анализ
инфокоммуникационных систем, № 21

и др.



тел./факс: (495) 625-9241
e-mail: info@radiotec.ru
<http://www.radiotec.ru>

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70775 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»: ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ



РАДИОТЕХНИКА

Включен в перечень ВАК XXI век

Radioengineering

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.П. Андрианова, д.т.н., проф. П.А.Бакулев, д.ф.-м.н., проф. О.В. Бецкий, д.т.н., проф. А.В. Богословский, д.т.н., проф. А.Л. Бузов, д.т.н., проф. С.А. Букашкин, д.т.н., проф. Р.П. Быстров, д.т.н., проф. В.С. Верба, д.т.н., проф. В.В. Витязев, д.т.н., проф. Э.А. Засовин, д.т.н., доцент А.В. Иванов, д.т.н., проф. Ю.Л. Козиранский, д.ф.-м.н., проф. А.Г. Козорезов (Великобритания), к.ф.-м.н., с.н.с. В.В. Колесов (зам. главного редактора), д.ф.-м.н., проф. И.Н. Компанец, д.т.н., проф. Г.С. Кондратенков, д.т.н., проф. А.В. Коренной, д.ф.-м.н., проф. Б.Г. Кутуза, д.т.н., проф. В.И. Меркулов, д.т.н., проф. В.П. Мешанов, д.т.н., проф. В.А. Обуховец, д.т.н., проф. А.И. Перов, д.ф.-м.н. В.П. Плесский (Швейцария), д.ф.-м.н., проф. В.В. Проклов, акад. РАН В.И. Пустовойт, д.т.н., проф. В.Г. Радзиевский, д.т.н., проф. Е.М. Сухарев, д.т.н., проф. Е.Ф. Толстов, д.т.н., проф. В.Н. Ушаков, д.т.н., проф. В.Е. Фарбер, акад. РАН И.Б. Фёдоров, д.т.н., проф. Ю.С. Шинаков, в.н.с. Энрико Верона (Италия), д.т.н., проф. С.В. Ягольников, д.т.н., проф. М.С. Ярлыков.

Главный редактор
академик РАН
Ю. В. Гуляев

EDITORIAL BOARD:

L.P. Andrianova, Academician RAS I.B. Fedorov, Academician RAS V.I. Pustovoi, Dr.Sc. (Eng.), Prof. P.A. Bakulev, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. O.V. Betskil, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.V. Bogoslovskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.L. Buzov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. S.A. Bukashkin, Dr.Sc. (Eng.), Prof. R.P. Bystrov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.Ye. Farber, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. I.N. Kompanets, Dr.Sc. (Eng.), Prof. G.S. Kondratenkov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.V. Korennoi, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Yu.L. Koziratskii, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. A.G. Kozorezov (Great Britain), Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. B.G. Kutuza, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.I. Merkulov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Meshchanov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.A. Obukhovets, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Plessky (Switzerland), Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.I. Perov, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. V.V. Proklov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.G. Radzievskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Yu.S. Shinakov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Ye.M. Sukharev, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Ye.F. Tolstov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.N. Ushakov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.S. Verba, Dr.Sc. (Eng.), Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.V. Vityazev, Dr.Sc. (Eng.), Prof. S.V. Yagolnikov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. M.S. Yarlykov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. E.A. Zasovin, Dr.Sc. (Eng.), Associate Prof. A.V. Ivanov, associate researcher Enrico Verona (Italy), Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist V.V. Kolesov (Deputy Editor).

Editor-in-Chief,
Academician RAS,
Yu.V. Gulyaev

Содержание

№ 9 сентябрь 2016 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

(Журнал в журнале. Редакторы выпуска – д.т.н., проф. К.К. Васильев и д.т.н., проф. Н.Г. Ярушкина)

Статистический синтез и анализ инфокоммуникационных систем

Оценка вероятности отсутствия искомого фрагмента на изображении для алгоритма с управлением множеством процедур поиска

Биктимиров Л.Ш., Ташлинский А.Г.

6

Эффективность применения в рекуррентных процедурах привязки изображений целевых функций качества на основе информационных мер

Жукова А.В., Воронов С.В.

11

Использование распределений Пирсона при моделировании процесса рекуррентного оценивания параметров привязки изображений

Ташлинский А.Г., Воронов И.В.

17

Обнаружение протяженных сигналов на фоне дважды стохастических изображений Васильев К.К., Дементьев В.Е., Андриянов Н.А.	23
Разработка и анализ алгоритмов оценивания траектории автономных летательных аппаратов по результатам обработки изображений окружающих объектов Дементьев В.Е., Абдулкадим Х.А., Френкель А.Г.	28
Информативность некоторых характеристик для диагностики остеопороза по рентгенограммам Крашенинников В.Р., Бойцов А.А., Карусев Д.Н.	32
Прогнозирование динамики объекта с использованием авторегрессионных моделей на цилиндре Крашенинников В.Р., Кувайскова Ю.Е.	36
Моделирование алгоритмов адаптивной обработки данных в системе с мягким декодером Гладких А.А., Пчелин Н.А.	40
Метод снижения внутрисетевого трафика в процедуре восстановления данных Климов Р.В.	44
Оптимизация статистического контроля многопараметрического процесса Клячкин В.Н., Зенцова Е.А.	48

Автоматизированное проектирование, моделирование и эксплуатация технических, гуманитарных и вычислительных систем

Система рекомендаций для оценки действий проектировщика на примере САПР Афанасьев А.Н., Гульшин В.А., Канев Д.С., Войт Н.Н.	52
Разработка многоагентной системы извлечения знаний из гетерогенных источников Гуськов Г.Ю., Мошкин В.С., Наместников А.М., Филиппов А.А., Ярушкіна Н.Г.	57
Нечеткое моделирование и генетическая оптимизация временных рядов в интеллектуальной системе технической диагностики Эгов Е.Н., Ярушкіна Н.Г., Яшин Д.В.	64
Использование онтологий для формирования наборов эталонов речевых команд в задаче распознавания речевых команд на фоне шумов Армер А.И., Мошкин В.С.	72
Онтологический подход к структурированию знаний проектной организации Наместников А.М.	77
Процессная модель построения 3D-образа сборочной единицы на основе структурно-семантического объединения проектных процедур Похилько А.Ф., Цыганков Д.Э.	84

СТАТИСТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РАДИОСИСТЕМ

(Журнал в журнале. Главный редактор – д.т.н., проф. А.И. Перов)

Методы синтеза и алгоритмы оптимальной обработки сигналов в спутниковой навигации

Синтез алгоритмов синхронизации на основе ретрансляции навигационных сигналов с наземной станции Карутин С.Н., Лернер Д.В., Харисов В.Н.	88
Квазиоптимальный прием спутниковых навигационных сигналов с разной интенсивностью в локальных радионавигационных системах Перов А.И., Устинов А.Ю.	97
Алгоритм оптимальной линейной интерполяции с фиксированной задержкой Шатилов А.Ю.	106
Оптимальные алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов и их характеристики Ефименко В.С., Харисов В.Н., Павлов В.С.	113

Комплексирование угломерной навигационной аппаратуры потребителя с гироскопами низкого класса точности Днепров В.В., Корогодин И.В.	121
--	-----

Анализ алгоритмов обработки сигналов в спутниковой навигации

Влияние неидентичности каналов адаптивных антенных решеток на характеристики приема сигналов ГНСС Павлов В.С.	128
Сравнение точностей нелинейной фильтрации в расширенном фильтре Калмана и в ансамблевом фильтре Куликов Р.С.	135

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В РАДИОТЕХНИКЕ

Модель Д.В. Агеева селекции гармонических сигналов Шибырин С.В.	141
--	-----

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ

Анализатор состояния эфира в радиостанциях адаптивного радио Галкин В.А.	146
Синтез структуры цифрового углового дискриминатора радиолокационной станции с фазированной антенной решеткой Пятков В.В., Онуфрей А.Ю., Мелешко А.В., Ворона М.С.	156

АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ: ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Синхронизация и выделение символов при приеме радиосигнала с бинарной фазовой манипуляцией Симонгауз В.И.	165
--	-----

Contents

№ 9 September 2016

MATHEMATICAL MODELING OF INFORMATION COMMUNICATION SYSTEMS

(Journal in Journal. Editors – Dr. Sci. (Eng), prof. K.K. Vasiliev and Dr. Sci. (Eng), prof. N.G. Yarushkina)

Statistical synthesis and analysis of information communication systems

Estimating the probability of absence of target fragment on image for algorithm with control of multiple search procedures Biktimirov L.Sh., Tashlinskii A.G.	10
Efficiency of the information theoretic objective functions in recurrent image registration procedures Zhukova A.V., Voronov S.V.	16
On the use of Pearson distributions in the modeling of image registration parameters' recursive estimation Tashlinskii A.G., Voronov I.V.	21
Extended signals detection against a doubly stochastic background Vasiliev K.K., Dementiev V.E., Andriyanov N.A.	27

Development and analysis algorithms of estimation trajectory of autonomous aerial vehicles by results of image processing of the surrounding objects Dementiev V.E., Abdulkadim H.A., Frenkel A.G.	31
Informativeness of some characteristics for osteoporosis diagnosis on x-ray images Krashennnikov V.R., Boitsov A.A., Karusev D.N.	35
Object dynamics prediction based on autoregressive model on a cylinder Krashennnikov V.R., Kuvayskova Yu.E.	39
Adaptive data processing simulation in the system with soft decoder Gladkikh A.A., Pchelin N.A.	43
Method of net traffic reducing in the data recovery procedure Klimov R.V.	47
Optimization of multivariate statistical process control Klyachkin V.N., Zentsova E.A.	51

Computer-aided design, modeling, and operation of technical, humanistic systems and computer network

System recommendations for assessment of action on the example of designer CAD Afanasyev A.N., Gulshin V.A., Kanev D.S., Voit N.N.	56
Development of the multi-agent system for extracting of knowledge from heterogeneous sources Guskov G.Yu., Moshkin V.S., Namestnikov A.M., Filippov A.A., Yarushkina N.G.	62
Fuzzy modeling and genetic optimization of the time series in the intellectual technical diagnostics system Egov E.N., Yarushkina N.G., Yashin D.V.	70
Using ontologies to generate a set of voice commands in the problem of speech recognition of voice commands with background noise Armer A.I., Moshkin V.S.	76
Ontological approach to knowledge structuring in the project company Namestnikov A.M.	83
Assembly Unit 3D-Image Process Model Formation by Structural and Semantic Design Procedures Unification Pokhilko A.F., Tsygankov D.E.	87

STATISTICAL SYNTHESIS OF RADIOSYSTEMS

(Journal in Journal. Editor-in-Chief – Dr. Sci. (Eng), prof. A.I. Perov)

Methods of synthesis and algorithms of optimal signal processing in satellite navigation

Synthesis of synchronization algorithms for retransmission of navigation signals generated by ground station Karutin S.N., Lerner D.V., Kharisov V.N.	96
Quasioptimal reception of satellite navigation signals with different powers in local radio navigation systems Perov A.I., Ustinov A.Yu.	105
Fixed delay linear interpolation Shatilov A.Yu.	112
Optimal space-time processing algorithms and their properties Efimenko V.S., Kharisov V.N., Pavlov V.S.	119
Integration of GNSS-based attitude determination algorithm with low-grade gyro Dneprov V.V., Korogodin I.V.	127

Analysis of signal processing algorithms in satellite navigation

Influence of nonidentity reception channels in adaptive antenna arrays on GNSS signals reception characteristics Pavlov V.S.	134
Comparing of accuracy of nonlinear filtering in extended Kalman filter and in unscented filter Kulikov R.S.	140

MATHEMATICAL METHODS IN RADIO ENGINEERING

Ageev D.V. model of harmonic signal selection
Shibirin S.V.

145

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS AND DEVICES

Dynamical Spectrum Access in Personal Cognitive Radios
Galkin V.A.

155

Structure synthesis of the digital angular discriminator of phased array radar
Pyatkov V.V., Onufrei A.Yu., Meleshko A.V., Vorona M.S.

163

FUNCTIONAL ALGORITHMS: SIGNAL TRANSMISSION, RECEPTION AND PROCESSING

Synchronization and selection of symbols at the reception of BPSK radio signal
Simongauz V.I.

174

Все статьи, представленные в данном выпуске журнала, соответствуют номенклатуре специальностей научных работников (Приказ Минобрнауки РФ от 11.08.2009 № 294) по отраслям физико-математических, технических и химических наук.

"Radiotekhnika" (Radioengineering) is the leading scientific and technical journal in Russia. It covers wide spectrum of problems in priority areas of the development in communication, radar, navigation, and radioelectronics. Established in 1937.

Журнал «Радиотехника» переводится на английский язык.

Необходимую информацию о журнале и полный список опубликованных статей, а также аннотации к ним Вы найдете на нашем сайте <http://www.radiotec.ru>

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-25036 от 12 июля 2006 г.

Сдано в набор 10.08.2016. Подписано в печать 26.09.2016. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Печ.л. 21,75. Тираж 600 экз. Изд. № 33.

ЗАО «Издательство «Радиотехника»: 107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6. Тел./факс: (7-495)625-92-41, (7-495)625-78-72.

E-mail: info@radiotec.ru

Дизайн и допечатная подготовка ООО «САЙНС-ПРЕСС».

Отпечатано в ФГУП Издательство «Известия» УД ПРФ. 127254, ул. Добролюбова, д. 6.

Заказ № 2502.

ISSN 0033-8486

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2016 г.

Незаконное тиражирование и перевод статей, включенных в журнал, в электронном и любом другом виде запрещено и карается административной и уголовной ответственностью по закону РФ «Об авторском праве и смежных правах»

Комплексирование угломерной навигационной аппаратуры потребителя с гироскопами низкого класса точности

© Авторы, 2016

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2016

В.В. Днепров – аспирант, кафедра радиотехнических систем,
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
E-mail: vdneprov@mail.ru

И.В. Корогодин – к.т.н., доцент, кафедра радиотехнических систем,
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
E-mail: korogodin@srns.ru

Изложен алгоритм комплексирования системы слежения за разностью фаз с трехосевым гироскопом в угломерной навигационной аппаратуре потребителей. Показано, что комплексирование системы слежения с инерциальным датчиком позволяет компенсировать вращательную динамику объекта и сузить полосу следящей системы, что приводит к повышению помехоустойчивости алгоритма определения ориентации объекта. Также отмечено, что комплексирование позволяет оценить смещения нулей гироскопов. Приведены результаты имитационного моделирования для случая комплексирования с микромеханическим датчиком InvenSense MPU6050. Дана оценка выигрыша в помехоустойчивости при применении комплексирования.

Ключевые слова: спутниковые радионавигационные системы, ГЛОНАСС, GPS, угломерная аппаратура потребителей, комплексирование.

The article describes an integration of difference phase locked loop (DPLL) and 3 axis gyro. Such integrated system can be used in GNSS-based attitude determination algorithm. Integration DPLL with gyro allows tightening DPLL's bandwidth and enhancing anti-jam capability of navigational receiver. From the other hand, such integration can be used to estimate and compensate gyro's errors, i.e. axis' biases. The algorithm itself and computer simulation results are given in the paper.

Keywords: global navigation satellite system, GLONASS, GPS, attitude determination, inertial measurement unit integration.

Задача определения пространственной ориентации объекта по сигналам спутниковых радионавигационных систем (СРНС) решается при помощи угломерной навигационной аппаратуры потребителя (УНАП). Также определение ориентации осуществляется инерциальными навигационными системами (ИНС). Известно [1, 2], что комплексирование, то есть совместная обработка информации обеих указанных систем, позволяет получить интегрированную систему, обладающую лучшими характеристиками, чем системы по отдельности. Определение ориентации в УНАП осуществляется путем измерения разностей фаз сигналов, принятых в пространственно-разнесенных точках. При этом используют разницу фазовых измерений отдельных систем слежения за фазой (ССФ), либо оценки системы слежения за разностью фаз (ССРФ) [3]. Комплексирование ССРФ с инерциальными датчиками, в частности с трехосевым гироскопом, позволяет сузить полосу следящей системы и, тем, самым повысить помехоустойчивость самой ССРФ, а, следовательно, и УНАП в целом. В то же время, использование нескольких измерителей одной и той же физической величины позволяет оценить и компенсировать погрешности, присущие инерциальным датчикам (смещения нулей, погрешность масштабных коэффициентов). В [4] предложена реализация такого алгоритма комплексной ССРФ.

Ц е л ь р а б о т ы – оценка выигрыша в помехоустойчивости УНАП за счет использования микромеханических инерциальных датчиков. В качестве метода исследования используется компьютерное имитационное моделирование.

Система слежения за разностью фаз без комплексирования

Рассмотрим систему слежения за разностью фаз сигнала одного навигационного спутника (НС), принимаемого на две разнесенные в пространстве антенны. Сигнал СРНС, принимаемый в точках A и B представим в виде

$$y_A(t_{k,l}) = S_A(t_{k,l}) + n_A(t_{k,l}), \quad y_B(t_{k,l}) = S_B(t_{k,l}) + n_B(t_{k,l}), \quad (1)$$

где $l = \overline{1, L}$ и k – индексы, разбивающие ось времени, $t_{k,l} = t_{k,0} + lT_d$, $t_{k+1,0} = t_{k,0} + LT_d$; T_d – интервал дискретизации; L – число отсчетов на k -м интервале постоянства параметров сигнала; $n_A(t)$, $n_B(t)$ – независимые аддитивные белые гауссовские шумы с нулевыми матожиданиями и равными двусторонними спектральными плотностями мощности $N_0/2$; S_A и S_B вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} S_A(t_{k,l}) &= Ah_{\text{дк}}(t_{k,l} - \tau_{A,k}) \cos(\omega_c t_{k,l} + \omega_{\text{д},k}(l-1)T_d + \pi\theta_{\text{нс}} + \varphi_{0,k}), \\ S_B(t_{k,l}) &= Ah_{\text{дк}}(t_{k,l} - \tau_{B,k}) \cos(\omega_c t_{k,l} + \omega_{\text{д},k}(l-1)T_d + \pi\theta_{\text{нс}} + \varphi_{0,k} + \psi_k), \end{aligned} \quad (2)$$

в которых $h_{\text{дк}}(t_{k,l})$ – функция модуляции дальномерным кодом; $\theta_{\text{нс}}$ – навигационное сообщение, ψ – разность фаз принимаемых сигналов, обусловленная вращением базовой линии AB .

Ставится задача формирования оценок разности фаз ψ в произвольный момент времени, то есть фильтрация разности фаз. Критерием оптимальности является минимум дисперсии ошибки оценивания.

Представим модель изменения разности фаз ψ в виде многомерного дискретного марковского процесса (последовательности) [5]. Введем вектор состояния $\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \psi_k & \nu_k & \varepsilon_k \end{bmatrix}^T$ и модель динамики вектора состояния

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}\xi_{k-1}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \xi \sim N(0, D_\xi). \quad (3)$$

Задача получения оценок вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}_k$ по наблюдениям (1)–(2) и модели динамики вектора состояния (3) имеет квазиоптимальное решение в виде расширенного фильтра Калмана (РФК). Уравнения фильтрации записываются в виде [1]

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{K} \frac{u_{\text{д}\psi,k}}{S_\psi}, \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \begin{bmatrix} \hat{\psi}_k & \hat{\nu}_k & \hat{\varepsilon}_k \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \tilde{\mathbf{x}}_k = \begin{bmatrix} \tilde{\psi}_k & \tilde{\nu}_k & \tilde{\varepsilon}_k \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k$, $\tilde{\mathbf{x}}_k$ – оценка и экстраполяция вектора состояния; $u_{\text{д}\psi,k}$ – процесс на выходе дискриминатора разности фаз [3]:

$$\begin{aligned} u_{\text{д}\psi,k} &= \cos(\tilde{\psi}_k) [I_{B,k}Q_{A,k} - Q_{B,k}I_{A,k}] - \sin(\tilde{\psi}_k) [I_{B,k}Q_{A,k} - Q_{B,k}I_{A,k}], \\ I_{A(B)} &= \sum_{l=1}^L y_{A(B)}(t_{k,l}) h_{\text{дк}}(t_{k,l} - \tau_{A(B),k}) \cos(\omega_c t_{k,l} + \omega_{\text{д},k}(l-1)T_d), \\ Q_{A(B)} &= \sum_{l=1}^L y_{A(B)}(t_{k,l}) h_{\text{дк}}(t_{k,l} - \tau_{A(B),k}) \sin(\omega_c t_{k,l} + \omega_{\text{д},k}(l-1)T_d), \quad S_\psi = \left(\frac{AL}{2}\right)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Вектор-столбец коэффициентов фильтра $\mathbf{K} = [K_1 \quad K_2 \quad K_3]^T$ рассчитывается в каждом такте работы фильтра на основании дисперсионных уравнений Риккати. При практической реализации можно [1] воспользоваться упрощенными выражениями и рассчитать коэффициенты фильтра для стационарного режима, задаваясь значением эквивалентной шумовой полосы следящей системы $\Delta f_{\text{ССРФ}}$:

$$K_3 = 1, 2(\Delta f_{\text{ССРФ}})^3 T, \quad K_2 = 2(K_3)^{2/3} T, \quad K_1 = 2(K_3)^{1/3} T. \quad (7)$$

В УНАП реализуются отдельные ССРФ для обработки сигнала каждого спутника и каждой пары антенн. Всего формируется $M - 1$ независимых базовых линий, где M – число антенн.

Комплексирование ССРФ с гироскопическим датчиком

Проведем синтез алгоритма ССРФ с поддержкой от гироскопических датчиков. Пусть приемные антенны размещены на некотором объекте. Введем связанную с объектом систему координат (ССК или RPY) с центром в точке A и зададим в ней вектор \mathbf{r} , задающий положение базовой линии в ССК (рис. 1).

Ориентация базовой линии определяется ориентацией ССК относительно опорной системы координат. Примем в качестве опорной геоцентрическую связанную с Землей систему координат (ГЦСК или ECEF). Тогда разность фаз сигналов ψ , принимаемых в точках A и B , задается в виде

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}^T \mathbf{C}_{ECEF}^{RPY} (\mathbf{q}_{ECEF}^{RPY}) \mathbf{r}, \quad (8)$$

где \mathbf{k}^T – вектор направляющих косинусов на НС (в ГЦСК) относительно точки A ; \mathbf{q}_{ECEF}^{RPY} – известный за счет работы УНАП кватернион поворота ССК в ГЦСК; $\mathbf{C}_{ECEF}^{RPY} (\mathbf{q}_{ECEF}^{RPY}) = \mathbf{C} (\mathbf{q}_{ECEF}^{RPY})$ – матрица преобразования

координат из ССК в ГЦСК, записанная через компоненты кватерниона [1].

Примем модель измерений гироскопа в виде [6]

$$\boldsymbol{\omega}_{RPY,k} = (\mathbf{I} + \mathbf{M}_{g,k}) \boldsymbol{\Omega}_{RPY,k} + \mathbf{b}_{g,k} + \mathbf{n}_{g,k}, \quad (9)$$

где $\boldsymbol{\Omega}_{RPY,k}$ – истинный вектор угловых скоростей в ССК; $\mathbf{b}_{g,k}$ – вектор смещения нулей гироскопов, полагается винеровским процессом; $\mathbf{n}_{g,k}$ – вектор шумовых ошибок, полагается независимыми белыми гауссовскими шумами.

Матрица перекоса осей и погрешностей масштабных коэффициентов $\mathbf{M}_{g,k}$ полагается при синтезе алгоритма нулевой. Данное допущение принято для упрощения синтеза. В дальнейшем матрица $\mathbf{M}_{g,k}$ будет учтена на этапе имитационного моделирования.

Продифференцируем (8) по времени, учитывая, что \mathbf{r} в ССК неизменен:

$$\dot{\psi}_{\text{гирос}} = \frac{d\psi}{dt} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}^T \left(\frac{d \mathbf{C} (\mathbf{q}_{ECEF}^{RPY})}{dt} \right) \mathbf{r} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}^T \left[\mathbf{C} (\mathbf{q}_{ECEF}^{RPY}) \boldsymbol{\omega}_{RPY}^{\otimes} - \boldsymbol{\omega}_{ECEF}^{\otimes} \mathbf{C} (\mathbf{q}_{ECEF}^{RPY}) \right] \mathbf{r}, \quad (10)$$

где $\boldsymbol{\omega}^{\otimes}$ – косимметрическая матрица, применяемая при матричной записи векторного произведения

$$\boldsymbol{\omega}_{RPY} \times \mathbf{r} = \boldsymbol{\omega}_{RPY}^{\otimes} \mathbf{r}; \quad \boldsymbol{\omega}_{RPY}^{\otimes} = \begin{vmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{vmatrix} \text{ – матрица угловых скоростей вращения ССК относительно}$$

$$\text{инерциального пространства, измеряемых гироскопами; } \boldsymbol{\omega}_{ECEF}^{\otimes} = \begin{vmatrix} 0 & -\Omega_3 & 0 \\ \Omega_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \text{ – матрица угловых скоростей}$$

вращения ГЦСК (Земли) относительно инерциального пространства.

Выражение (10) описывает динамику разности фаз, рассчитанную через измерения гироскопов. Подставим (9) в (10) и представим производную разности фаз как сумму истинной составляющей, вклада, обусловленного смещением нулей гироскопов, и шумовой компоненты:

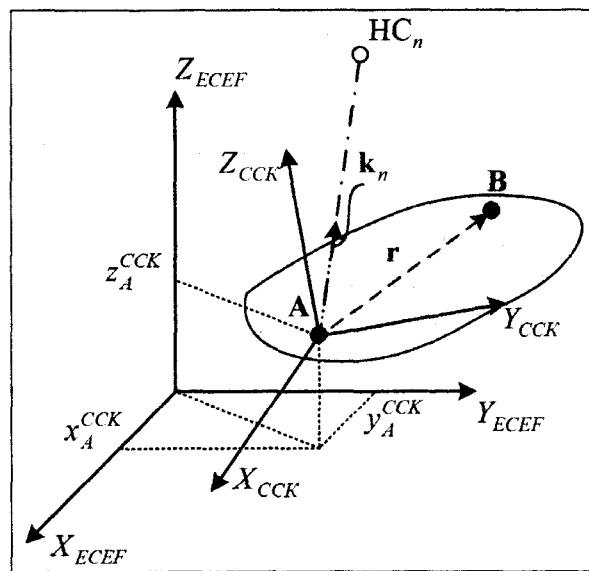


Рис. 1. Геометрия задачи

$$V_{\text{ги́ро}} = v - \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}^T \mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{ECEF}}^{\text{RPY}}) \mathbf{r}^{\otimes} \mathbf{b}_g + n_{v \text{ ги́ро}} = v + \mathbf{H} \mathbf{b}_g + n_{v \text{ ги́ро}}, \quad (11)$$

$$\mathbf{H} = -\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}^T \mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{ECEF}}^{\text{RPY}}) \mathbf{r}^{\otimes}, \quad n_{v \text{ ги́ро}} \sim N(0, \sigma_{v \text{ ги́ро}}^2). \quad (12), (13)$$

Проведем комплексирование ССРФ и гироскопического датчика по модернизированному варианту комплексирования [1, 5]. В таком варианте комплексирования ставится задача оценивания вектора смещений нулей гироскопов $\hat{\mathbf{b}}_{g,k}$. Считаем, что в штатном режиме работы ССРФ формирует оценки вектора состояния (5) $\hat{\mathbf{x}}_k$ и наблюдению доступны измерения его второй компоненты, представляющей собой истинную производную разности фаз на фоне шумов измерений:

$$\hat{V}_{\text{ССРФ},k} = v_k + n_{v \text{ ССРФ},k}, \quad (14)$$

где $n_{v \text{ ССРФ},k}$ – дискретный гауссовский шум с нулевым матожиданием и дисперсией $\sigma_{v \text{ ССРФ}}^2$.

Вычтем формально (14) из (11):

$$y_{b,k} = v_{\text{ги́ро},k} - \hat{V}_{\text{ССРФ},k} = \mathbf{H}_k \mathbf{b}_{g,k} + n_{v \text{ ги́ро},k} - n_{v \text{ ССРФ},k} = \mathbf{H}_k \mathbf{b}_{g,k} + n_{y,k}, \quad (15)$$

где $n_{y,k}$ – дискретный гауссовский шум с нулевым матожиданием и дисперсией $\sigma_y^2 = \sigma_{v \text{ ССРФ}}^2 + \sigma_{v \text{ ги́ро}}^2$.

Как упоминалось ранее, вектор смещений нулей гироскопов полагаем винеровским процессом. Запишем его модель динамики в виде

$$\mathbf{b}_{g,k} = \mathbf{F}_b \mathbf{b}_{g,k-1} + \mathbf{G}_b \xi_{b,k}, \quad \mathbf{F}_b = \mathbf{I}_3, \quad \mathbf{G}_b = \mathbf{I}_3, \quad (16), (17)$$

где \mathbf{I}_3 – единичная матрица размером 3×3 ; $\xi_{b,k}$ – вектор независимых дискретных белых гауссовских шумов с нулевым матожиданием и дисперсиями σ_b^2 .

Задача фильтрации вектора смещений нулей гироскопов \mathbf{b}_g при наблюдениях (15) и модели динамики (16) имеет известное решение в виде линейного фильтра Калмана (ЛФК) [1]. Уравнения фильтрации в данном случае принимают вид

$$\hat{\mathbf{b}}_k = \tilde{\mathbf{b}}_k + \mathbf{K}_b (y_{b,k} - \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{b}}_k), \quad \tilde{\mathbf{b}}_k = \mathbf{F}_b \hat{\mathbf{b}}_{k-1} = \hat{\mathbf{b}}_{k-1}. \quad (18), (19)$$

Коэффициенты \mathbf{K}_b рассчитываются по уравнениям Риккати. Для компенсации смещения нулей гироскопов в измерении используем полученные в ЛФК оценки (11):

$$v_{\text{несмещ},k} = v_{\text{ги́ро},k} - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{b}}_{g,k}. \quad (20)$$

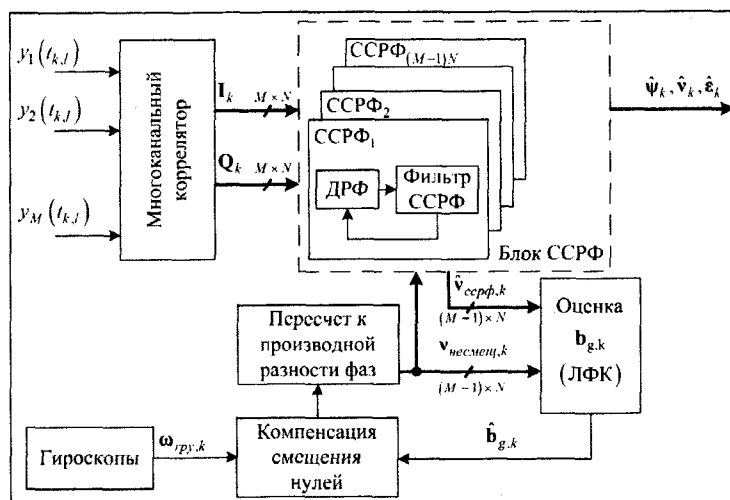


Рис. 2. Схема алгоритма

Используем (20) для компенсации динамики разности фаз. Для этого включим (20) в уравнения фильтрации (4):

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{B}_k + \mathbf{F} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{K} \frac{u_{\text{ДРФ},k}}{S_{\psi}}, \quad (21)$$

$$\mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} v_{\text{несмещ},k} T & 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (22)$$

На рис. 2 показана укрупненная хема полученного алгоритма. На вход поступают отсчеты сигналов N навигационных спутников, принимаемые на M антенн. В многоканальном корреляторе формируются квадратурные суммы для каждого принятого сигнала и каждой антенны. Далее

они поступают на входы соответствующих ССРФ, которые формируют оценки вектора состояния (5) для каждой базовой линии и каждого спутника. Кроме того, оценка производной разности фаз используется в алгоритме оценивания смещения нулей гироскопов. Наблюдения (15) рассчитываются по всем каналам ССРФ и объединяются в единый вектор.

Результаты имитационного моделирования

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма, а также для количественной оценки выигрыша в помехоустойчивости при применении комплексирования было проведено имитационное моделирование. В модели реализована УНАП с 3-элементной антенной системой, антенны которой расположены в вершинах равностороннего треугольника (рис. 3). Расстояния между антеннами, то есть длины базовых линий, равны 1 м. В такой конфигурации получаем две независимые базовые линии.

В качестве опорной системы координат в модели используется локальная СК Север–Восток–Низ (NED). Ориентация объекта определяется как положение ССК относительно NED. Модель динамики объекта реализует поворот вокруг одной из осей ССК с заданной угловой скоростью вращения. Вращение происходит в течение одной секунды, по истечении которой случайным образом меняется ось вращения и процесс продолжается.

В модели имитируются сигналы четырех навигационных спутников. Направления на НС задаются в NED через азимут и угол места. При этом НС равномерно распределены по углу места от 30 до 80°, а азимут каждого спутника в каждом эксперименте случайно изменяется.

На рис. 4 представлена реализация мгновенных разностей фаз для двух базовых линий и сигнала одного НС. Более тонкими линиями показаны оценки разности фаз, формируемые ССРФ.

Измерения гироскопа моделировались в соответствии с выражением (9). Истинный вектор угловых скоростей $\Omega_{RPY,k}$ рассчитывался на основании заложенной модели движения. Для моделирования смещения нулей и шумовых ошибок измерений гироскопического датчика $b_{g,k} + n_{g,k}$ в модели предусмотрено использование выборки данных микроэлектромеханического (МЭМС) датчика InvenSense MPU6050. Датчики типа МЭМС хорошо подходят для комплексирования с УНАП ввиду своих малых габаритных размеров, низкой стоимости и доступности. Микросхема MPU6050 представляет собой инерциальный измерительный блок (ИИБ), содержащий трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп, а также вычислительный модуль. При снятии выборок измерений гироскопа MPU6050 находился в покое, и принималось допущение $\Omega_{RPY} \approx 0$ ввиду низкой чувствительности ИИБ. Элементы матрицы перекоса осей и погрешностей масштабных коэффициентов $M_{g,k}$ моделировались на основании спецификации MPU6050 как случайные равномерно

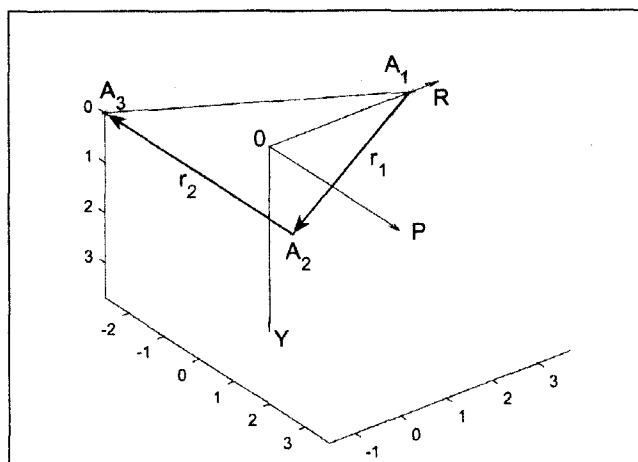


Рис. 3. Конфигурация антенной системы в ССК

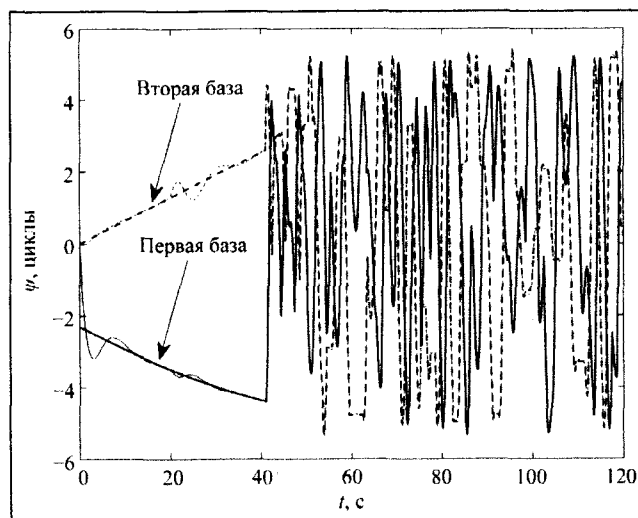


Рис. 4. Изменение во времени реализаций разностей фаз

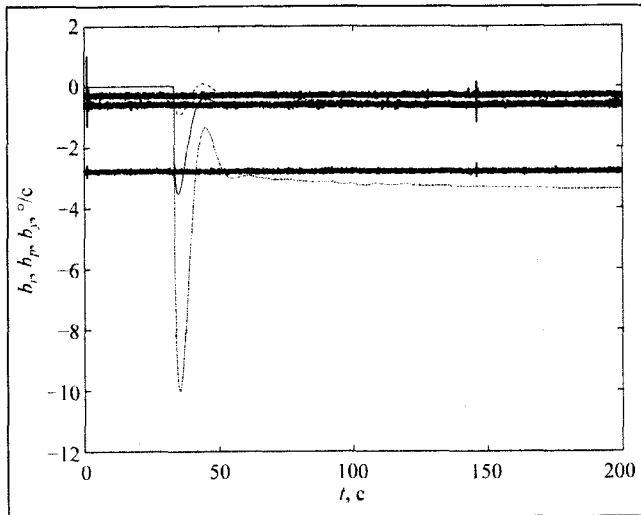


Рис. 5. Изменение во времени реализаций погрешностей гироскопа

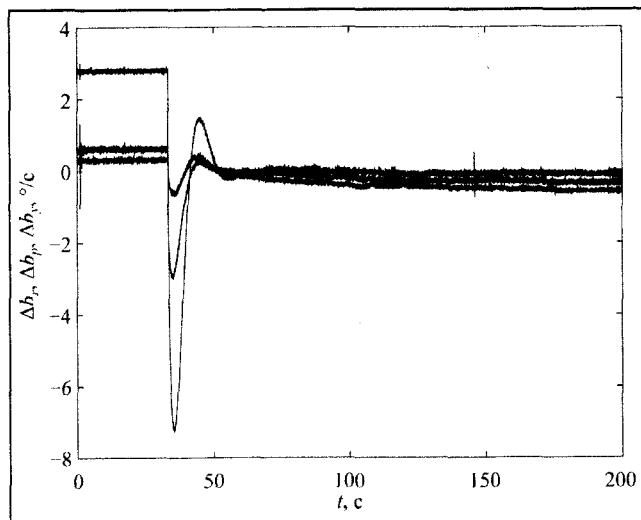


Рис. 6. Изменение во времени ошибок оценивания смещения нулей гироскопов

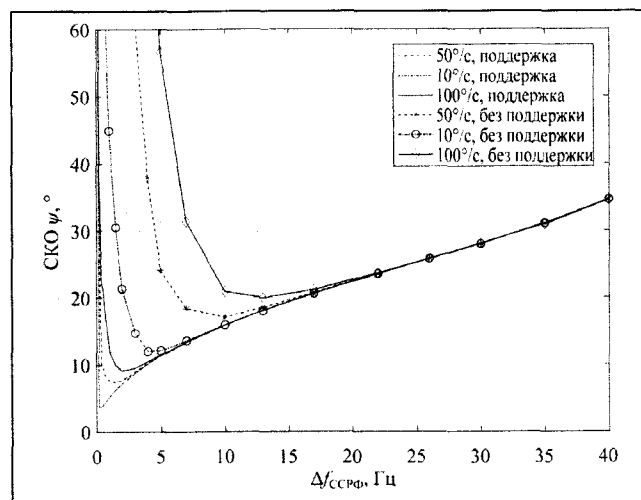


Рис. 7. Графики зависимостей от эквивалентной шумовой полосы следящей системы СКО разности фаз

распределенные величины с СКО 2%. На рис. 5 представлена выборка погрешности гироскопа. На рис. 6 представлены ошибки оценивания смещения нулей гироскопов. Видно, что алгоритм обрабатывает начальную ошибку и продолжает оценивать смещения нулей с течением времени.

Поддержка ССРФ измерениями гироскопа позволяет сузить полосу следящей системы. Это приводит к увеличению помехоустойчивости по шумовой полосовой помехе ССРФ, а, следовательно, и УНАП в части определения ориентации. На рис. 7 представлены зависимости среднеквадратической ошибки (СКО) оценивания разности фаз от эквивалентной шумовой полосы следящей системы $\Delta f_{ССРФ}$. На график нанесены зависимости для ССРФ без поддержки от инерциальных датчиков и для комплексированной ССРФ. Зависимости получены при угловых скоростях вращения 10, 50 и 100°/с, отношении сигнал/шум $q_{с/n0} = 40$ дБГц, темпе работы фильтра $T = 10$ мс. Оптимальные (по критерию минимума СКО) значения полос сведены в таблице. Там же представлен выигрыш в помехоустойчивости за счет комплексирования, определяемый как разница полос систем в логарифмическом масштабе.

Таблица. Оптимальные полосы ССРФ и выигрыш в помехоустойчивости

Скорость вращения, °/с	Оптимальная полоса, Гц		Выигрыш в помехоустойчивости, дБ
	ССРФ	Комплексированная ССРФ	
10	4	0,3	11
50	10	1,5	8
100	13	2	8

- Имитационное моделирование предложенного алгоритма комплексирования ССРФ с измерениями трехосевого гироскопа с учетом оценивания и компенсации смещения нулей гироскопов подтвердило работоспособность полученного алгоритма. По результатам моделирования проведена оценка выигрыша в помехоустойчивости по шумовой полосовой помехе. Показано, что данный выигрыш составляет 8...10 дБ для различной вращательной динамики объекта при использовании микромеханического датчика InvenSense MPU6050.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника. 2010. 800 с.
2. Гребенников А.В., Кудревич А.П., Оганесян А.А. Особенности применения нерадийных измерителей в угломерной НАП // Радионавигационные технологии. Вып. 4 (2015). С. 33–38.
3. Корогодин И.В. Разработка алгоритмов обработки сигналов спутниковых навигационных систем в аппаратуре определения угловой ориентации объектов. Дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ». 2013. 270 с.
4. Перов А.И. Алгоритм комплексирования следающей системы за разностью фаз навигационных сигналов с инерциальной навигационной системой // Радиотехника. 2014. № 9. С. 113–118.
5. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь. 2004. 608 с.
6. Шатилов А.Ю., Нагин И.А. Тесно связанный алгоритм комплексирования НАП СРНС и многоцелевой ИНС // Радиотехника. 2012. № 6. С. 118–125.

Поступила 3 августа 2016 г.

Integration of GNSS-based attitude determination algorithm with low-grade gyro

© Authors, 2016

© Radiotekhnika, 2016

V.V. Dneprov – Post-graduate Student, Department of Radio Systems, «National Research University «MPEI» (Moscow)
E-mail: vvdneprov@mail.ru

I.V. Korogodin – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Systems, «National Research University «MPEI» (Moscow)
E-mail: korogodin@srns.ru

One of important application of global navigation systems (GNSS) receivers is attitude determination. The task of attitude determination is often solved in two stages. Phase measurements and phase ambiguity resolution are made at first stage. The second stage is the calculation of the parameters characterizing the orientation of the antennas system relative to the reference coordinate system. Phase measurements are usually performed by phase locked loops (PLL) or difference phase locked loops (DPLL). One can improve tracking loop performance using integration with inertial measurement units. Paper describes integration of DPLL with 3-axis gyro measurements. Such integrated system can compensate user rotation dynamics. This results in tightening bandwidths of DPLLs and improving anti-jam capability of navigational receiver. From the other hand, such integration can be used to estimate and compensate gyro's errors, i.e. axis' biases. The algorithm itself and computer simulation results are given in the paper. Computer simulation shows that integration can enhance anti-jam capability by 8–10 dB for various angular velocity of an object.

References

1. GLONASS. Principy' postroeniya i funkcionirovaniya / Pod red. A.I. Perova, V.N. Xarisova. Izd. 4-e, pererab. i dop. M.: Radiotekhnika. 2010. 800 s.
2. Grebennikov A.V., Kudrevich A.P., Oganesyana A.A. Osobennosti primeneniya neradiotekhnicheskix izmeritelej v uglomernoj NAP // Radionavigacionny'e tekhnologii. Vy'pusk 4 (2015). S. 33–38.
3. Korogodin I.V. Razrabotka algoritmov obrabotki signalov sputnikov'x navigacionny'x sistem v apparature opredeleniya ugl'ovoj orientacii ob'ektov. Dis. ... kand. texn. nauk. M.: NIU «MEI». 2013. 270 s.
4. Perov A.I. Algoritm kompleksirovaniya sledyashhej sistemy' za raznost'yu faz navigacionny'x signalov s inercial'noj navigacionnoj sistemoj // Radiotekhnika. 2014. № 9. S. 113–118.
5. Tixonov V.I., Xarison V.N. Statisticheskij analiz i sintez radiotekhnicheskix ustrojstv i sistem. M.: Radio i svyaz'. 2004. 608 s.
6. Shatilov A.Yu., Nagin I.A. Tesno svyazannyj algoritm kompleksirovaniya NAP SRNS i mnogoczelevoj INS // Radiotekhnika. 2012. № 6. S. 118–125.
- 7.