**18-07-00126А**

**Аналитическое адаптивное извлечение динамических знаний в нечетко-стохастических нелинейных средах на основе непериодических точных измерений**

Заказчик - РФФИ

2018-2020

№ договора: 18-07-00126/20

***Результаты этапов:***

**1 этап**

Для решения поставленной задачи разработан гибридный механизм глубинной интеграции методов нечеткого и стохастического анализа динамических процессов, описываемых нелинейными стохастическими уравнениями с высокой степенью неопределенности параметров состояния. В основу данного механизма положена разработанная в проекте принципиально новая обобщенная схема нечетко-стохастического вывода, предусматривающая наличие нелинейного наблюдателя за динамикой развития процесса, функционирующего в потоке интенсивных помех с большой степенью неопределенности их вероятностных характеристик. Для высокоточного оценивания параметров состояния динамической системы впервые использован адаптивный аналитический подход, основанный на возможности получения в непериодические (случайные) моменты времени точных измерений фазовых координат системы. Разработанный на его основе аналитический метод адаптации, апробированный на первом этапе проекта для линейных систем, решает задачу высокоточной идентификации параметров состояния за счет адаптивной перестройки структуры схемы оценки в реальном масштабе времени, причем, при незначительном увеличении вычислительных затрат на адаптацию. Полученные результаты с высокой эффективностью реализованы при разработке алгоритмов функционирования инерциально-спутниковых навигационных систем и обеспечивают возможность достижения целей проекта на его последующих этапах.

**2 этап**

Впервые аналитически решена задача адаптивной оценки состояния нелинейных динамических стохастических систем на основе экспериментальной информации, содержащейся как в темпоральных данных, зашумленных интенсивными помехами, так и в точных измерениях, поступающих непериодически (случайно). Разработан общий подход к аналитическому решению задачи адаптивной идентификации вероятностных характеристик случайных возмущений, формирующих нечетко-стохастическую среду функционирования нелинейной динамической системы, на основе информации, содержащейся как в зашумленных наблюдениях, так и в точных, поступающих нерегулярно, измерениях. На основе данного подхода получен алгоритм адаптивной идентификации дисперсионной матрицы случайных возмущений динамической стохастической системы на основе совместного использования зашумленных данных информационного комплекса и нерегулярно поступающих точных измерений. В развитие разработанной методологии получено аналитическое решение задачи адаптивной идентификации дисперсионной матрицы помех измерения наблюдателя динамической стохастической системы с использованием непериодических точных измерений и синтезирован соответствующий алгоритм адаптивной фильтрации. Численное моделирование разработанных алгоритмов показало их высокую эффективность по критерию "точность-вычислительные затраты", что позволило обеспечить их успешное практическое использование при разработке навигационных алгоритмов и алгоритмов начальной ориентации интеллектуальных инерциально-спутниковых навигационных систем.

**Итоговый этап**

Разработан гибридный механизм интеграции методов нечеткого и стохастического анализа динамических процессов, описываемых нелинейными стохастическими уравнениями с высокой степенью неопределенности параметров состояния. Для реализации данного механизма в проекте разработана новая обобщенная схема нечетко-стохастического вывода, предусматривающая наличие нелинейного наблюдателя за динамикой процесса, функционирующего в потоке интенсивных помех с большой степенью неопределенности их вероятностных характеристик. Для высокоточного оценивания параметров состояния динамической системы впервые использован адаптивный аналитический подход, основанный на возможности получения в непериодические (случайные) моменты времени точных измерений фазовых координат системы. На основе данного подхода разработан аналитический метод адаптации, обеспечивающий высокоточную идентификацию параметров состояния за счет адаптивной перестройки структуры схемы оценки в реальном масштабе времени. Развитие данного метода позволило получить общее аналитическое решение задачи адаптивной идентификации вероятностных характеристик случайных возмущений, формирующих нечетко-стохастическую среду функционирования нелинейной динамической системы, на основе экспериментальной информации, содержащейся как в зашумленных данных, так и в точных измерениях, поступающих непериодически (случайно). Найдены аналитические решения задач адаптивной идентификации как дисперсионной матрицы случайных возмущений динамической стохастической системы, так и дисперсионной матрицы помех измерения ее наблюдателя, разработаны соответствующие адаптивные алгоритмы оценки-идентификации, позволяющие резко повысить точность оценивания параметров состояния динамической системы при незначительном увеличении вычислительных затрат на адаптацию. Разработанные методы и алгоритмы позволяют резко повысить точность формирования темпоральных сценариев развития стохастических процессов в качестве элементов знаний, обеспечивая возможность использования новой методологии интерпретационно пригодного представления нечетко-стохастических темпоральных знаний, полученных при реализации предложенного подхода. Полученные результаты с высокой эффективностью реализованы при разработке алгоритмов функционирования инерциально-спутниковых навигационных систем.

**Список публикаций:**

1. Polyakova M.V., Sokolov S.V., Bayandurova А.А. Use of irregular exact measurements in a problem of an adaptive filtration // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Т. 679. – С. 379-387.

2. Розенберг И.Н., Соколов С.В., Баяндурова А.А. Повышение точности позиционирования летательного аппарата при его движении по заданной линии траектории // Известия вузов. Авиационная техника. – 2018. – №2. – С.64-70.

3. Соколов С.В., Розенберг И.Н., Баяндурова А.А. Высокоточное позиционирование на ортодромической траектории по спутниковым измерениям // Геодезия и картография. –2018. – Т. 79. – № 9.– С. 37–44.

4. Соколов С.В., Розенберг И.Н., Баяндурова А.А. Высокоточное позиционирование на локсодромической траектории по навигационным измерениям с интенсивными помехами // Геоинформатика.-2018. - №4

5. Соколов С.В., Ковалев С.М.,Кучеренко П.А., Смирнов Ю.А. Методы идентификации нечетких и стохастических систем / Физматлит, 2018. 432 с.

6. Соколов С.В., Полякова М.В., Кучеренко П.А. Аналитический синтез адаптивного фильтра Калмана на основе нерегулярных точных измерений // Измерительная техника, №3, 2018 –С.19-23

7. S.V. Sokolov, M.V. Polyakova, P.A. Kucherenko Analytic Synthesis of a Kalman Adaptive Filter on the Basis of Irregular Precise Measurements // Measurement Techniques, Volume 61, Issue 3, 2018

8. Полякова М.В. Применение адаптивного нелинейного фильтра Калмана на основе непериодических точных измерений в решении навигационной задачи подвижного объекта // Вестник РГУПС, № 3.

9. Polyakova M.V., Sokolov S.V., Kolodenkova A.E. Adaptation of the nonlinear stochastic filter on the basis of irregular exact measurements // Proceedings of the 3rd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”, September 17-21, 2018, Sochi, Russia

10. Guda A.N., Polyakova M.V., Sokolov S.V. Application of acyclic precise measurements at the solution of the problem of adaptive nonlinear Kalman’s filtration // Proceedings of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon) 16.09–23.09, 2018, Sochi, Russia

11. Соколов С.В., Полякова М.В. Адаптивный нелинейный фильтр Калмана на основе нерегулярных точных измерений // Авиакосмическое приборостроение №11, 2018. С.10 -17

12. Polyakova M.V., Sokolov S.V., Bayandurova A.A. Use of irregular exact measurements in a problem of an adaptive filtration // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Т. 679. – С. 379-387

13. Соколов С.В, Ковалев С.М, Каменский В.В. Стохастическая оценка эфемерид навигационных спутников на возмущенных орбитах // Изв. ВУЗ. Радиоэлектроника, Т.61, №8, 2018. С.452-463

14. Соколов С.В., Ковалев С.М., Каменский В.В., Стажарова Л.Н. Параметрическая идентификация возмущенных траекторий спутниковой группировки на основе нелинейных вероятностных критериев // Авиакосмическое приборостроение, №9, 2018. С.23-33

15. Sokolov S.V., Kamensky V.V. Stochastic Estimation of Ephemerides of Navigation Satellites in Perturbed Orbits // Radioelectronics and Communications Systems, №8, 2018, Р.350-360

16. Решетникова К.А., Полякова М.В., Соколова О.И. О возможности решения задачи адаптивной фильтрации на основе непериодических точных измерений // Труды ХI Международной научно-практической конференции "ИНФОКОМ-2018", г. Ростов-на-Дону, 2018

17. Кучкова Е.И., Полякова М.В., Феденко Т.Ф. Высокоточное позиционирование летательных аппаратов на основе методов вычисления оптического потока // Труды Международной научно-практической конференции «Актуальные аспекты развития воздушного транспорта» (АВИАТРАНС-2019), 2019. - С. 212–218.

18. Феденко Т.Ф., Полякова М.В., Кучкова Е.И. Решение навигационной задачи летательного аппарата на основе использования интегрированной навигационной системы и алгоритмов адаптивной нелинейной фильтрации // Труды Международной научно-практической конференции «Актуальные аспекты развития воздушного транспорта» (АВИАТРАНС-2019), 2019. - С.246–251.

19. Полякова М.В., Соколова О.И. Общее решение задачи адаптивной Калмановской фильтрации для транспортных информационных систем, использующих нерегулярные точные наблюдения // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Том 1. Технические науки, 2019. - С. 205-209.

20. Polyakova M.V., Sokolov S.V., Kolodenkova А.Е. Adaptation of the Nonlinear Stochastic Filter on the Basis of Irregular Exact Measurements // Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 875, pp. 85–91, 2019.

21. Соколов С.В., Погорелов В.А., Шаталов А.Б. Решение задачи автономной начальной ориентации бесплатформенных инерциальных навигационных систем на возмущенном основании с использованием параметров Родрига – Гамильтона // Изв. Вузов. Авиационная техника. 2019. №1. С.4-12

22. Соколов С.В., Маршаков Д.В. Рекуррентный алгоритм формирования текущего спектра непериодических сигналов // Вестник РГУПС, №1, 2019, с. 142-149

23. Соколов С.В., Погорелов В.А., Шаталов А.Б. Стохастическая оценка параметров ориентации антенного комплекса по измерениям бесплатформенной инерциальной системы // Измерительная техника, № 12, 2019.

24. Sokolov S.V., Pogorelov V.A., Shatalov A.B. Solving the autonomous initial navigation task for strapdown inertial navigation system on the perturbed basis using Rodriguez–Hamilton parameters // Russian Aeronautics, 2019, Vol. 62, Issue 1, Р. 42–51.

25. Соколов С.В., Маршаков Д.В. Алгоритм вычисления спектров непериодических сигналов в режиме реального времени // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2019. № 4 с.57-62

26. Манин А.А., Полякова М.В., Чуб Е.Г., Соколова О.И. Оценка дисперсионной матрицы шумов дискретных измерений с использованием нерегулярных точных наблюдений // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, Часть I - Ростов-на-Дону.: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2019, 566с. с.15-24

27. Манин А.А., Соколов С.В., Чуб Е.Г. Аналитическая оценка параметров возмущений в дискретном стохастическом фильтре на основе нерегулярных точных наблюдений // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, Часть I - Ростов-на-Дону.: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2019, 566с. с с.420-430

28. Соколов С.В., Чуб Е.Г., Полякова М.В. Манин А.А. Адаптивная оценка дисперсионной матрицы шумов линейных измерений на основе непериодических точных наблюдений // Автоматизация. Современные технологии. №6. т.74. 2020. С.264-268

29. Манин А.А., Соколов С.В., Полякова М.В*.* Фильтр Калмана, адаптивный к возмущениям параметров наблюдателя // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, т.1. 2020. С. 11-18

30. Манин А.А., Соколов С.В., Полякова М.В. Алгоритм адаптации дискретного фильтра Калмана к неопределенности параметров наблюдаемого объекта // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, т.1. 2020. С.19-25

31. Sokolov S.V., Kramarov S.O., Chub E.G., Polyakova M.V. The Use of Irregular Precise Observations for Parametric Adaptation of a Discrete Stochastic Filter // Modern Information Technology and IT Education. Communications in Computer and Information Science, 2020. vol. 1201.Springer, Cham, Р. 375-383

32. Sokolov S.V., Marshakov D.V., Novikov A.I. The Current Spectrum Formation of a Non-periodic Signal: a Differential Approach // Inventions and Innovation in Electrical Engineering/Energy/Communications, № 688716.

33. Sokolov S.V., Kamenskiy V.V., Kramarov S.O., Sokolova O.I. Synthesis of Waveguide-Optical Analog-to-Digital Converter for Ultra-High-Speed Systems of Information Processing // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications, Moscow, Russia, 2020. Р.1-4

34. Sokolov S.V., Novikov A.I. Adaptive estimation of UVs navigation parameters by irregular inertial-satellite measurements // International Journal of Intelligent Unmanned Systems - Manuscript ID IJIUS-09-2020-0042.

35. Соколов С.В., Чуб Е.Г., Манин А.А. Адаптивная оценка параметров возмущений в дискретной системе на основе непериодических точных наблюдений // Датчики и системы. № 2 (244). 2020. С. 3-9.

36.Sukhanov A.V., Chub E.G., Manin A.A., Sokolov S.V. Analytical Decision for Adaptive Estimation Task for Measurement Noise Covariance Matrices Based on Irregular Certain Observations // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, 1156 AISC, Р. 589–596.

37*.*Соколов С.В., Погорелов В.А., Шаталов А.Б. Стохастическая оценка параметров ориентации антенного комплекса по результатам измерений бесплатформенной инерциальной системы // Измерительная техника. №2. 2020. С.11-19.

38. Соколов С.В., Гашененко И.Н., Погорелов В.А.Нелинейная оценка параметров начальной ориентации бесплатформенной инерциальной навигационной системы на возмущенном основании // Датчики и системы. №3(245). 2020. С.11-18.

39.Соколов С.В., Шаталов А.Б., Погорелов В.А. Решение задачи стохастической оценки параметров ориентации антенного комплекса по измерениям бескарданной инерциальной системы// Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, Издательский дом ВГУ, т.4. 2020.С.279-288.

**Список конференций**

3rd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”, September 17-21, 2018, Sochi, Russia (очный доклад).

ХI Международная научно-практическая конференция "ИНФОКОМ-2018", апрель 19-20, 2018, Ростов-на-Дону, Россия (очный доклад).

International Russian Automation Conference (RusAutoCon), September 16–23, 2018, Sochi, Russia (очный доклад).

XXIV международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», апрель17-19, 2018, Воронеж, Россия (очный доклад).

Всероссийская конференция с международным участием «Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки», ноябрь 22-23, 2018, Москва, Россия (очный доклад).

Всероссийская научная конференция «Транспорт России XXI века», октябрь 10, 2018 г., Москва, Россия (очный доклад).

VII Международный интеллектуальный конкурс студентов, аспирантов, докторантов Discovery Science: University – 2018, Май 2018, Москва, Россия (Диплом за 1 место - Баяндурова А.А.)

4th International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”, December 2-7, 2019, Ostrava, Czech – очный;

ХII Международная научно-практическая конференция "ИНФОКОМ-2019", апрель 29-30, 2019, Ростов-на-Дону, Россия – очный;

III Международная научно-практическая конференция «Методы и модели пространственного анализа», 20 марта 2019 г., Бургас, Болгария - очный;

Международная научно-практическая конференция «Актуальные аспекты развития воздушного транспорта» (АВИАТРАНС-2019), июнь 21-23, 2019, Ростов-на-Дону, Россия - очный;

Всероссийская конференция с международным участием «Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки», декабрь 5-6, 2019 г., Москва, Россия - очный;

Научно-практическая конференция «Транспорт: наука, образование, производство», апрель 23, 2019, Ростов-на-Дону, Россия - очный;

High Goals – 2019: открытый международный конкурс инициативных научно-исследовательских проектов (HG-2019), РусАльянс "СОВА" – заочный;

Молодые ученые транспортной отрасли - 2019 (Минтранс-2019): конкурс инициативных научно-исследовательских проектов – заочный;

ХIII Международная научно-практическая конференция "ИНФОКОМ-2020", апрель 29-30, 2020, Ростов-на-Дону, Россия – очный;

XXVI международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», сентябрь 29-октябрь 01, 2020, Воронеж, Россия – заочный;

IV международная научно-практическая конференция «Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития», февраль 3-4, 2020, Ростов-на-Дону, Россия - очный;

Международная научно-практическая конференция «Транспорт: наука, образование, производство», апрель 20-22, 2020, Ростов-на-Дону, Россия - очный;

IEEE Conference «Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications», March 19-20, 2020,Moscow, Russia – заочный.