

ISSN 2071-8632

4, 2013

РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР С.В. ЕМЕЛЬЯНОВ

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ И РЕШЕНИЯ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИНФОРМАТИКИ



URSS

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

4/2013

Содержание

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 **Отображения параллельных алгоритмов для суперкомпьютеров экзафлопсной производительности на основе имитационного моделирования**
Б.М. Глинский, М.А. Марченко, Б.Г. Михайленко, А.С. Родионов, И.Г. Черных,
Д.И. Подкорытов, Д.А. Караваев, Д.В. Винс
- 15 **На пути к освоению гетерогенных супервычислений в газовой динамике**
А.В. Горобец, С.А. Суков, П.Б. Богданов

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ И РЕШЕНИЯ

- 27 **Автоматизированная система уровня Tier-1 обработки данных эксперимента CMS**
Н.С. Астахов, С.Д. Белов, И.Н. Горбунов, П.В. Дмитриенко, А.Г. Долбилов,
В.Е. Жильцов, В.В. Кореньков, В.В. Мицын, Т.А. Стриж, Е.А. Тихоненко,
В.В. Трофимов, С.В. Шматов
- 37 **Моделирование распределенной системы сбора, передачи и обработки данных для крупных научных проектов (мегапроект НИКА)**
В.В. Кореньков, А.В. Нечаевский, В.В. Трофимов
- 45 **Развитие информационно-телекоммуникационных систем в ДВО РАН**
А.И. Ханчук, А.А. Сорокин, С.И. Смагин, С.П. Королёв, С.В. Макогонов,
А.Г. Тарасов, Н.В. Шестаков

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- 58 **Принципы и модели контекстно-управляемой интеграции знаний**
А.В. Смирнов, Т.В. Левашова

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИНФОРМАТИКИ

- 74 **Профиль интероперабельности в области электронной коммерции**
А.И. Олейников, Е.И. Разинкин
- 80 **Новое поколение систем безопасности на автодорогах и их применение в интеллектуальных транспортных системах**
В.М. Вишневский, Р.Н. Минниханов, А.Н. Дудин, В.И. Клименок,
А.А. Ларионов, О.В. Семенова
- 90 **Устойчивые алгоритмы фильтрации – обзор и новые результаты для систем судовождения**
И.В. Семушин, Ю.В. Цыганова, К.В. Захаров
- 114 **Abstracts**
- 116 **Содержание журнала в 2013 году**
- 125 **Именной указатель №№ 1-4, 2013**

Устойчивые алгоритмы фильтрации – обзор и новые результаты для систем судовождения

И.В. Семушин, Ю.В. Цыганова, К.В. Захаров

Аннотация. Рассматривается дискретная фильтрация с акцентом на вычислительный аспект. Дается краткий обзор численно устойчивых реализаций, основанных на базовых математических идеях: факторизация положительно определенных (ковариационных или информационных) матриц, скаляризация векторных измерений, триангуляризация матриц и ортогонализация блочных матриц. Для решения практической нелинейной задачи анализа движения целей предлагается LD-алгоритм расширенного фильтра Калмана. Обсуждается применение этого алгоритма для судовождения (включая предотвращение столкновений судов).

Ключевые слова: вычислительная обработка данных, дискретная фильтрация, расходимость фильтра, численная устойчивость, расширенный фильтр Калмана, цифровое имитирование и моделирование систем.

Введение

Вскоре после открытия Калманом своего ставшего знаменитым нового подхода к задачам фильтрации и предсказания [1] выяснилось, что это изящное решение, которое теперь принято называть «обыкновенным» (the conventional Kalman filter, СКФ), работает хорошо лишь в исключительных – так называемых хорошо обусловленных – задачах и расходится в большинстве практических задач.

Явление расходимости теоретического алгоритма СКФ, детально исследованное 10 лет спустя [2], породило поиски альтернатив, алгебраически эквивалентных СКФ, но в вычислениях значительно более устойчивых. В 1963 году Поттер нашел первое решение [3] в связи с разработкой лунохода (Lunar Excursion Module, LEM) для Программы Аполлон. По природе, это квадратно-корневой алгоритм, названный PSRF (Potter Square Root Filter).

Будучи приспособлен лишь для ограниченных случаев (некоррелированность скалярных измерений и отсутствие шума в уравнении состояния), PSRF породил две ключевые идеи: фак-

торизация (разложение на множители) ковариационных матриц, чтобы устранить опасность потери положительной определенности, и декорреляция векторных измерений и последующая их скаляризация, чтобы устранить операцию вычисления обратной матрицы в алгоритме СКФ.

Любой квадратно-корневой алгоритм фильтрации численно более устойчив, чем СКФ, так как число обусловленности квадратного корня из ковариационной матрицы есть квадратный корень из числа обусловленности соответствующей ковариационной матрицы. Этот факт широко известен и вошел в учебные курсы численных методов алгебры (разложение Холецкого) [4].

Другая идея, сейчас также вошедшая в учебные курсы [4], – ортогонализация матриц – развивалась параллельно для численного решения плохо обусловленных и переопределенных систем по методу наименьших квадратов (МНК) [5]. Важный промежуточный результат тех лет – опубликование обзора [6] и монографии Бирмана [7].

Кроме исходных аэрокосмических приложений, эти и другие современные методы калма-

морского подвижного объекта. В этой задаче расширенный фильтр Калмана, по сравнению с линейным фильтром для линейной модели, обладает меньшей численной устойчивостью из-за упрощения, лежащего в его основе, а именно: в случае фильтра первого порядка линеаризованная функция расчета следующего состояния системы включает лишь первые два элемента разложения в ряд Тейлора относительно текущей оценки. Предложенное в статье использование *LD*-алгоритма фильтрации для этой задачи повышает устойчивость фильтра к ошибкам машинного округления, предупреждая потерю матрицей ковариации ошибок фильтрации свойств положительной определенности и симметричности. Рассмотренная процедура обработки траектории судна при помощи эффективной реализации расширенного фильтра может вполне опираться на упрощенную модель движения судна. Величины, вычисляемые таким квадратно-корневым фильтром первого, а не второго [26], порядка могут быть непосредственно введены в несложные, экономичные формулы логарифма функции правдоподобия [28, 57], расширяя тем самым функциональность фильтра для успешной работы последовательного алгоритма обнаружения маневра [31], а в общем случае – и других модельных нарушений стохастической системы управления в дискретном времени.

Значение рассмотренных здесь устойчивых алгоритмов выходит за рамки классической задачи линейной фильтрации, то есть задачи оптимального LQG-оценивания (Linear-Quadratic-Gaussian). Для двойственной задачи оптимального дискретного LQ-управления соответствующие алгоритмы также построены; они рекомендованы как численно устойчивые алгоритмы итераций Риккати в обратном времени для систем адаптивного и предиктивного (со скользким горизонтом) LQ-управления [60].

Литература

1. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // *ASME Journal of Basic Engineering*, 1960, Vol. 82, pp. 34–45.
2. Fitzgerald R.J. Divergence of the Kalman Filter // *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1971, Vol. AC-16, No. 6, pp. 736–747.
3. Potter J.E. and Stern R.G.. Statistical Filtering of Space Navigation Measurements // *Proceedings of 1963 AIAA Guidance and Control Conference*, AIAA, New York, 1963.
4. Семушин И.В. Вычислительные методы алгебры и оценивания: учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. — 366 с. [ISBN 987-5-9795-0902-0] Доступно на <http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2012/Semuwin.pdf>.
5. Lawson C.L. and Hanson R.J.. *Solving Least Squares Problems*. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1974.
6. Каминский П.Г., Брайсон А.Е., Шмидт С.Ф. Обзор современных методов дискретной фильтрации, использующих квадратные корни матриц // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1973. – №6. – с. 37–53.
7. Bierman G.J. *Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation*. – Academic Press, New York, 1977.
8. Carraro C. and D. Sartore. Square Root Iterative Filter: Theory and Applications to Econometric Models // *Annales d'Economie et de Statistique*, 1987. No. 6/7, pp. 435–459.
9. Lange A.A. An Algorithmic Approach for Improving and Controlling the Quality of Upper-Air Data // *WMO Instruments and Observing Methods Report*, No. 35, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1989.
10. Brockmann E. Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System (GPS) // *Geodatisch – geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, Vol. 55, Schweizerische Geodatische Kommission, 1997.
11. Murgu A. *Neural Networks for Planning and Control in Communication Networks*: PhD thesis. – University of Jyvaskyla, Finland, 1995.
12. Lange A.A. Optimal Kalman Filtering for Ultra-Reliable Tracking, ESA CD-ROM WPP-237 // *Atmospheric Remote Sensing Using Satellite Navigation Systems*, Proceedings, Special Symposium of the URSI Joint Working Group FG, 13–15 October 2003, Matera, Italy.
13. Piovoso M. and P.A. Laplante. Kalman Filter Recipes for Real-Time Image Processing // *Real-Time Imaging – Special Issue on Software Engineering Archive*, Vol. 9, Iss. 6, December 2003.
14. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем: Пер.с англ. – М.:Мир, 1991.
15. Jover J.M., Kailath T. A Parallel Architecture for Kalman Filter Measurement Update and Parameter Estimation // *Automatica*, 1986, Vol. 22, No. 1, pp. 43–57.
16. Kailath T., Sayed A.H. and Hassibi B. *Linear Estimation*. – Prentice Hall, NJ, 1999.
17. Grewal M.S. and Andrews A.P. *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, Second Edition. – John Wiley and Sons Inc., 2001. ISBNs: 0-471-39254-5 (Hardback) and 0-471-26638-8 (Electronic).
18. Семушин И.В. Разработка способов, программ, методик и рекомендаций для обработки экспериментальных данных на ЦВМ общего и специального назначения // Отчет по НИР. № 14-129/80, № ГР: 80042284, шифр “Сигма”. – Ульяновский политехнический институт, 1983, уч. № 2796. – 166 с.

19. Семушин И.В. Эффективные алгоритмы обновления оценок по измерениям // Судостроительная промышленность, сер. “Вычислительная техника” № 28, 1992, с. 55–59.
20. Семушин И.В. Экстраполяция во времени LD ковариационных факторов для фильтра Калмана // Судостроительная промышленность, сер. “Вычислительная техника” № 28, 1992, с. 27–30.
21. Семушин И.В., Куликов Г.Ю. Сборник лабораторных работ и контрольных, тестовых заданий по курсу Вычислительная линейная алгебра. Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2000. – 119 с. URL: <http://staff.ulsu.ru/semushin/>
22. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979.
23. Огарков М.А. Методы статистического оценивания параметров случайных процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1980.
24. Валеев С.Г. Регрессионное моделирование при обработке данных. – Казань: ФЭН, 2001.
25. Денисов В.И., Чубич В.М., Черникова О.С., Бобылева Д.И. Активная параметрическая идентификация стохастических линейных систем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. [ISBN 978-5-7782-1182-7]
26. Semushin I.V., Dulov E.V. and Kalinin L.V. Stable Estimate Renewal According to Measurements // Pattern Recognition and Image Analysis, Conference Proceedings. – St. Petersburg–Moscow: МАИК “Nauka / Interperiodica” Publishing, 1996, Vol. 6, No. 1, p. 86.
27. Семушин И.В. (Гл.1 и Гл.2), Цыганова Ю.В. (Гл.3), Куликова М.В. (Гл.4), Фатьянова О.А. (Гл.5) и Кондратьев А.Е. (Гл.5). Адаптивные системы фильтрации, управления и обнаружения: коллективная монография под ред. проф. И.В. Семушина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2011. – 298 с. – ISBN 978-5-88866-399-8.
28. Куликова М.В. О скаляризованном вычислении функции правдоподобия в квадратно-корневых матричных алгоритмах фильтрации // Автоматика и телемеханика, 2009, № 5, с. 122–139.
29. Kulikova, M.V. Likelihood Gradient Evaluation Using Square-Root Covariance Filters // IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 54, No. 3, March 2009, pp. 646–651.
30. Цыганова Ю.В. Вычисление градиента вспомогательного функционала качества в задаче параметрической идентификации стохастических систем // Автоматика и телемеханика, 2011, № 9, с. 142–160.
31. Захаров К.В. Динамическая настройка алгоритма обнаружения маневра морской цели // Автоматизация процессов управления, 2011, № 4(26), с. 88–92.
32. Маттис А.В. Оптимальное управление движением морских подвижных комплексов // Автоматизация процессов управления, 2011, № 1(23), с. 88–92.
33. Li, X.R. and V.P. Jilkov. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, October 2003, Vol. 39, No. 4, pp. 1333–1364.
34. Bar-Shalom Y., Li X.R. and Kurubarajan T. Estimation with Application to Tracking and Navigation. – Wiley, 2001.
35. Сейдж Э., Мелса Дж. Л. Идентификация систем управления. – М.: Наука, 1974.
36. Daowang F.; Teng L., and Tao H.Z. Square-Root Second-Order Extended Kalman Filter and Its Application in Target Motion Analysis // Radar, Sonar & Navigation, IET, No. 4, Iss. 3, pp. 329 – 335. [doi: 10.1049/iet-rsn.2008.0070]
37. Carlson N. A. Fast triangular formulation of the square root filter // AIAA Journal, Vol. 11, No. 9, pp. 1259–1265, 1973.
38. Agee W. S. and Turner R. H. Triangular Decomposition of a Positive Definite Matrix Plus a Symmetric Dyad, with Applications to Kalman Filtering, White Sands Missile Range Tech. Rep. No. 38, Oct. 1972.
39. Willigenburg G.V. UD and LD Factorization of Nonnegative Matrices and Associated Kalman Filter Implementations // <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32537-udu-factorization-kalman-filtering> – 15 Aug 2011 (Updated 03 Mar 2012).
40. Gentleman W. M. Least squares computations by Givens transformations without square roots // Journal of the Institute for Mathematical Applications, Vol. 12, pp. 329–336, 1973.
41. Thornton C. L. and Bierman G. J. A Numerical Comparison of Discrete Kalman Filtering Algorithms: An Orbit Determination Case Study, JPL Technical Memorandum 33-771, Pasadena, 1976.
42. Dyer P., McReynolds S. Extension of square-root filtering to include process noise // Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 3, pp. 444–458, 1969.
43. Morf M. and Kailath T. Square root algorithms for least squares estimation // IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 20, pp. 487–497, 1975.
44. Higham, N. J. J-orthogonal matrices: properties and generalization // SIAM Review. V. 45. No. 3. 2003. P. 504–519.
45. Morf M., Sidhu G. and Kailath T. Some new algorithms for recursive estimation in constant, linear, discrete-time systems // IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 19, pp. 315–323, 1974.
46. Swerling P. First order error propagation in a stagewise differential smoothing procedure for satellite observations // Journal of Astronautical Sciences, Vol. 6, pp. 46–52, 1959.
47. Bar-Itzhak I.V. Medan Y. Efficient Square Root Algorithm for Measurement Update in Kalman Filtering // Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1983, Vol. 6, No.1, pp. 129–134 [Русский перевод: И. Бар-Ицхак, И. Мэден // Аэрокосмическая техника, 1984, Т. 2, №1, С. 141–147.]
48. Катханов М.Н. Теория судовых автоматических систем. – Л.: Судостроение, 1985.
49. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. – СПб.: Элмор. 1996.
50. Павленко В.Г. Ходкость и управляемость судов. – М.: Транспорт, 1991.
51. Справочник по теории корабля: Гидродинамика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. В 3-х т. Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, т. 1, 1985.
52. Barrios C., Himberg H., Motai Yu., Sadek A. Multiple Model Framework of Adaptive Extended Kalman Filtering

- for Predicting Vehicle Location // Proceedings of the 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, September 17-20, 2006, pp. 1053-1059.
53. Юдович А.Б. Столкновения морских судов, их причины и предупреждение. – М: Изд-во “Транспорт”, 1972.
54. Semoushin I.V, Tsyganova Y.V, Kulikova M.V. Fault Point Detection with the Bank of Competitive Kalman Filters // Sloot, P. M A et al (eds) Computational Science ICCS 2003. Proceedings, Part II: Lecture Notes in Computer Science. 2003. P. 417-426.
55. Hanlon P.D., Maybeck P.S. Interrelationship of Single-Filter and Multiple-Model Adaptive Algorithms // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, Vol. 34, No. 3, pp. 934-946/
56. Wald A. Sequential Analysis. — New York: Wiley, 1947.
57. Semoushin I. V., Tsyganova J. V. An Efficient Way to Evaluate Likelihood Functions in Terms of Kalman Filter Variables // Adaptive, Cooperative and Competitive Processes in Systems Modelling, Design and Analysis, Alexandru Murgu and George E. Lasker (eds.). – The International Institute for Advanced Studies in Systems Research & Cybernetics: University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada, 2001, pp. 67-74.
58. Захаров К.В. Новый метод формирования банка фильтров Калмана при обнаружении нарушения // Научный обозреватель, 2011, №9. – С. 52-54.
59. Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л. Поддержка решений по расхождению с судами. К.: Фенікс, 2010.
60. Semushin I.V. Adaptation in Stochastic Dynamic Systems – Survey and New Results III: Robust LQ Regulator Modification // Int. J. Communications, Network and System Sciences, 2012, No.5, pp.609-623 doi:10.4236/ijcns.2012.529071 Published Online September 2012 (<http://www.SciRP.org/journal/ijcns>).

Семушин Иннокентий Васильевич. Профессор кафедры информационных технологий Ульяновского государственного университета (УлГУ). Окончил Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ) им. В.И. Ульянова (Ленина) в 1964 году. Доктор технических наук. Автор 216 печатных работ, включая 3 монографии и 5 патентов. Область научных интересов: фильтрация и управление по неопределенным и подверженным непредвиденным изменениям данным. E-mail: kentvsem@yandex.ru, <http://staff.ulsu.ru/semushin/>

Цыганова Юлия Владимировна. Доцент кафедры информационных технологий УлГУ. Окончила Ульяновский государственный университет (УлГУ) в 1996 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 53 печатных работ и 1 монографии. Область научных интересов: параметрическая идентификация, адаптивная фильтрация и численно эффективные алгоритмы для стохастических систем. E-mail: tsyganovajv@gmail.com

Захаров Климент Валерьевич. Инженер-программист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Окончил Ульяновский государственный университет (УлГУ) в 2008 году. Автор 12 печатных работ. Область научных интересов: специальные статистические приложения и модели, цифровое имитирование и моделирование систем, системы судовождения и управления судном. E-mail: zaharov-k@yandex.ru