



ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ЭФФЕКТИВНЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОБЛАСТИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. Ю. Федоринов, Ю. П. Иванов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В настоящее время набрало популярности развитие направление малых космических аппаратов (МКА), следовательно, возникла задача разработки современных методов и подходов для обработки информации как на бортах МКА, так и для приема ее на земных станциях. Ставится задача аналитически рассмотреть возможность применения финитно-временного и спектрально-финитного метода обработки сигнала для осуществления обмена данными между объектами в группировки МКА.

Ключевые слова: методы обработки информации, фильтрация сигналов, малые космические аппараты.

Для цитирования:

Федоринов, А. Ю. Исследование современных методов обработки информации эффективных для применения в области малых космических аппаратов / А. Ю. Федоринов, Ю. П. Иванов // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 4(38). – с. 23 – 30. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-23-30.

RESEARCH OF MODERN METHODS OF INFORMATION PROCESSING EFFECTIVE FOR USE IN THE FIELD OF SMALL SPACECRAFT

A. Y. Fedorinov, Yu. P. Ivanov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Currently, the development of the direction of small spacecraft (MCA) has gained popularity, therefore, the task has arisen of developing modern methods and approaches for processing information both on board the MCA and for receiving it at Earth stations. The task is to analytically consider the possibility of using the finite-time and spectral-finite method of signal processing to exchange data between objects in the ICA grouping.

Keywords: information processing methods, signal filtering, small spacecraft.

For citation:

Fedorinov, A. Y. Research of modern methods of information processing effective for use in the field of small spacecraft / A. Y. Fedorinov, Yu. P. Ivanov // System analysis and logistics. – 2023. – № 4(38). – p. 23 – 30. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-23-30.

Введение

Эффективность использование МКА типа Cubesat подтверждена временем и статистикой [1]. Следующий этап развития в этой области - это создание созвездий или группировок таких микроспутников, но для успешного функционирования такой системы необходимо выбрать и применить соответствующие оптимальные алгоритмы обработки информации. Самый распространенный метод фильтрации на данный момент является фильтр Калмана [2], однако уже давно была предложена альтернатива – финитно-временной [3] и спектрально-финитный [4] методы обработки сигналов. Множество научных трудов написано на эту тему, и все они подкреплены моделированием процессов сигналов с последующей обработкой [5]. Рассмотрим существующие методы подробнее.

Основной раздел.

Наиболее перспективными методами линейной оптимальной фильтрации измерительной информации являются:

1. фильтрация Калмана.
2. фильтрация Винера.
3. финитно-временная оптимальная фильтрация без обратной связи.
4. финитно-временная оптимальная фильтрация с обратной связью.



5. спектрально-финитная оптимальная фильтрация без обратной связи.
6. спектрально-финитная оптимальная фильтрация с обратной связью.

Каждый метод оптимальной фильтрации сигналов имеет свои достоинства и недостатки.

- 1) Фильтрация Калмана – широко применяется и хорошо изучена, подробное описание модели не требуется, отметим лишь ключевые аспекты - обеспечивает наилучшую точность рекуррентной оценки сигналов в классе линейных методов, но требует марковского свойства от оцениваемого сигнала и является достаточно сложным алгоритмом оценки, так как для его реализации необходимо решение нелинейного уравнения Риккати и представление модели сигнала в пространстве состояний, а структура алгоритма зависит от свойства коррелированности помех. За счёт наличия обратной связи фильтрация Калмана не обладает необходимой устойчивостью, робастностью и помехозащищённостью [6].
- 2) Фильтрация Винера – менее востребована чем Калмана, однако тоже является одной из известнейшей, по точности оценки не уступает фильтрации Калмана, в основном разработана для стационарных скалярных сигналов, не является оптимальной во время переходного процесса, при синтезе алгоритма фильтрации требуется проведения достаточно сложных операций по проведению факторизации спектральной характеристики наблюдаемого сигнала и сепарации при определении оптимальной частотной характеристики фильтра, и не обладает относительно исходных параметров необходимой робастностью и помехоустойчивостью [7].
- 3) Финитно-временная оптимальная по следу корреляционной матрицы ошибок оценок фильтрация без обратной связи дискретных сигналов, является универсальной относительно вида моделей измерения, т.е. не требует свойств марковости и стационарности от оцениваемого сигнала и помехи измерения, инвариантна к наличию регулярной составляющей наряду с флуктуационной составляющей в моделях оцениваемого сигнала и помехи измерения. В качестве примера рассмотрим следующую линейную с аддитивной помехой модель измерения и алгоритм оптимальной линейной оценки вектора полезного сигнала, определяемый соотношением (9):

$$Y_i = X_i + N_i, i=1,2,\dots,n, \quad (1)$$

$$\mathbf{X1}_i = [X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-r+1}]^T, r = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$\mathbf{Y1}_i = [Y_i, Y_{i-1}, \dots, Y_{i-r+1}]^T, r = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{X1}}_i^* = \mathbf{A}_i^* \times \mathbf{Y1}_i + \hat{\mathbf{X}}_{H_i}, \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_i^* = \mathbf{K}[\mathbf{X1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T] \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T]\}^{-1}, \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{X1}}_i^* = \left| \hat{X}_i^*, \hat{X}_{i-1}^{**}, \dots, \hat{X}_{i-r+1}^{**} \right|^T, \quad (6)$$



$$\hat{X}_{H_i} = [I - A_i^*] \times M[X1_i], \quad (7)$$

$$Apr_i^* = K[X1_{i+k_{pr}} \times Y1_i^T] \times \{K[Y1_i \times Y1_i^T]\}^{-1}, k_{pr} = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$D\varepsilon_i^* = \{Kx1_i - K\hat{x}o_i^*\}_{1,1}, \quad (9)$$

$$D\varepsilon_{np_i} = \{Kx1_i - A_i^* \times Kx1_i - \{A_i^* \times Kx1_i\}\}^T - K\hat{x}o_i^*\}_{1,1}, \quad (10)$$

$$K\hat{x}o_i^* = A_i^* \times \{K[Y1_i \cdot Y1_i^T]\} \times A_i^{*T}, \quad (11)$$

$$Kx1_i = K[X1_i \cdot X1_i^T], \quad (12)$$

где X_i, H_i – в общем случае, произвольные случайные скалярные временные последовательности, содержащие как флуктуационные, так и регулярного вида сигналы и помехи. Законы распределения сигнала и помехи произвольные. Предполагается, что сигнал X_i и помеха измерения H_i в любые моменты времени взаимно не коррелированы $K[X_i, H_i] = 0$, математические ожидания сигнала $M[X_i] \neq 0$ и помехи $M[H_i] = 0$. Корреляционные матрицы

$Kx1_i = K[X1_i \cdot Y1_i^T]$, $Ky1_i = K[Y1_i \cdot Y1_i^T]$, $Kx1_i$, $K\hat{x}o_i^*$ и матричный оператор оптимальной

оценки A_i^* , имеют размерности $r \times r$. Корреляционные матрицы $Kx1_i$ и $K[H_i \times H_i^T]$ могут

быть известны и в этом случае производится синтез в условиях полной априорной определённости или если одна из них неизвестна или обе неизвестны при условии, что помеха H_i является белым шумом, синтез алгоритма может быть осуществлён в условиях параметрической априорной неопределённости. Наличие в обозначении оптимальных оценок двух звёздочек отражает тот факт, что эти оценки интерполированы полученными измерениями в текущий момент времени. Соотношение (7) обеспечивает несмещённость оценок \hat{X}_i^* . Линейный матричный оптимальный по критерию минимума следа

корреляционной матрицы ошибок оценок оператор A_i^* определён на основании теоремы

ортогонального проецирования. Соотношения (9) – (12) соответственно определяют в i -ый момент времени дисперсии ошибок оценок фильтрации сигналов в случае оптимальной $D\varepsilon_i^*$ и

произвольной $D\varepsilon_{np_i}$ оценок и корреляционные матрицы оптимальных оценок сигнала $K\hat{x}o_i^*$ и

$Kx1_i$ векторного сигнала $X1_i$. Соотношение (8) определяет оптимальный прогноз оцениваемого сигнала на k_{pr} временных дискретов. Структура алгоритма не зависит от

наличия или отсутствия коррелированности помех измерения, его реализация является наиболее простой из рассматриваемых алгоритмов оценок и одновременно с финитно-

временной фильтрацией обеспечивается оптимальная интерполяция сигналов. С увеличением

количества используемых предыдущих результатов измерений оценка по точности асимптотически и достаточно быстро (3-6 используемых дискретов) приближается к точности

оценки при фильтрации Калмана. Это объясняется тем, что практические интервалы корреляции оцениваемого сигнала и памяти устройства обработки информации являются

конечными и соизмеримыми по длительности с интервалом времени, определяемым используемыми при оценке результатами измерений. Из-за отсутствия обратной связи в

структуре алгоритма обеспечивается устойчивая работа обработки сигналов в условиях как

полной априорной определённости, так и в условиях параметрической неопределённости характеристик сигнала и помех измерения, по свойствам робастности и помехозащищённости



не уступает фильтрации Калмана [8, 9, 10].

- 4) Финитно-временная с обратной связью оптимальная по следу корреляционной матрицы ошибок оценок фильтрация дискретных сигналов является также универсальной относительно вида модели измерения, т.е. относительно свойств марковости и стационарности оцениваемого сигнала и помехи измерения, инвариантна к наличию регулярной составляющей наряду с флуктуационной составляющей в моделях оцениваемого сигнала и помехи измерения. Модель измерения определяется соотношением (1), свойства сигнала и помехи измерения и содержание обозначений в данном соотношении такие же, как и при финитно-временной фильтрации без обратной связи. Алгоритм оптимальной с обратной связью линейной оценки представлен уравнениями (13÷18).

$$\mathbf{X1}_i = [X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-r+1}]^T, \quad r = 1, \dots, n, \quad (13)$$

$$\mathbf{Y1o}_i = [Y_i, \hat{Xo}_{i-1}^{**}, \dots, \hat{Xo}_{i-r+1}^{**}]^T, \quad r = 1, \dots, n, \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{X1o}}_i^* = \mathbf{Ao}_i^* \times \mathbf{Y1o}_i + \hat{\mathbf{X}}_{H_i}, \quad (15)$$

$$\mathbf{Ao}_i^* = \mathbf{K}[\mathbf{X1}_i \times \mathbf{Y1o}_i^T] \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y1o}_i \times \mathbf{Y1o}_i^T]\}^{-1}, \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{X1o}}_i^* = \left| \hat{Xo}_i^*, \hat{Xo}_{i-1}^{**}, \dots, \hat{Xo}_{i-r+1}^{**} \right|^T, \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{H_i} = [\mathbf{I} - \mathbf{Ao}_i^*] \times \mathbf{M}[\mathbf{X1}_i], \quad (18)$$

$$\mathbf{Aopr}_i^* = \mathbf{K}[\mathbf{X1}_{i+s_{pr}} \times \mathbf{Y1o}_i^T] \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y1o}_i \times \mathbf{Y1o}_i^T]\}^{-1}, \quad k_{pr} = 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

$$D\epsilon o_i^* = \{\mathbf{Kx1}_i - \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}o_i^*\}_{1,1}, \quad (20)$$

$$D\epsilon o_{np_i} = \{\mathbf{Kx1}_i - \mathbf{Ao}_i^* \times \mathbf{Kx1}_i - \{\mathbf{Ao}_i^* \times \mathbf{Kx1}_i\}^T - \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}o_i^*\}_{1,1}, \quad (21)$$

$$\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}o_i^* = \mathbf{Ao}_i^* \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y1o}_i \cdot \mathbf{Y1o}_i^T] \times \mathbf{Ao}_i^{*T}, \quad (22)$$

$$\mathbf{Kx1}_i = \mathbf{K}[\mathbf{X1}_i \cdot \mathbf{X1}_i^T]. \quad (23)$$

Корреляционные матрицы \mathbf{Ao}_i^* , $\mathbf{K}[\mathbf{X1}_i \cdot \mathbf{Y1o}_i^T]$, $\{\mathbf{K}[\mathbf{Y1o}_i \cdot \mathbf{Y1o}_i^T]\}$, $\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}o_i^*$ имеют размерности $r \times r$. Линейный матричный оптимальный по критерию минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценок, оператор \mathbf{Ao}_i^* (16) определён на основании теоремы ортогонального проецирования и с учётом оптимального прогнозирования оцениваемого сигнала и помехи измерения. Соотношения (19) – (21) соответственно определяют в i -ый момент времени дисперсии ошибок оценок фильтрации с обратной связью сигналов в случае оптимальной $D\epsilon o_i^*$ и $D\epsilon o_{np_i}$ произвольной оценок и корреляционную матрицу оптимальных оценок сигнала $\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}o_i^*$. Одновременно с фильтрацией обеспечивается оптимальная интерполяция сигналов, является относительно простой при реализации алгоритма оценки, совпадает по точности с фильтрацией Калмана, по свойствам устойчивости работы, в том числе и при использовании адаптивной фильтрации, робастности и помехозащищённости не уступает фильтрации Калмана [11, 12].



- 5) Спектрально-финитная оптимальная фильтрация без обратной связи дискретных сигналов совпадает по свойствам обработки информации с основными свойствами финитно-временной фильтрации без обратной связи. Метод спектрально-финитной фильтрации основан на представлении сигнала в виде ряда Карунена-Лоэва, который является частным случаем ряда Фурье, в спектральной области. Для дискретного сигнала ряд будет записан следующим образом:

$$Xs_i = \sum_{k=1}^N c_{ki} \varphi_k \quad (24)$$

где φ_k – оптимальный базис, а коэффициенты c_k определяются из скалярного произведения:

$$c_{ki} = (X_{s_i}, \varphi_k) \quad (25)$$

Базис определяется из следующего выражения:

$$(Ks_x, \varphi_k) = \lambda_k \varphi_k \quad (26)$$

Из определения собственных чисел и векторов видно, что в выражении φ_k является собственным вектором матрицы Ks_x – корреляционной матрицы полезного сигнала, то есть базис является оптимальным только для полезного сигнала.

Для того, чтобы сжать измерительную информацию, используемую при оценивании сигнала, оценивание происходит в спектральной области. Суть алгоритма работы фильтра состоит в следующем. Для получения оптимальной оценки на выходе фильтра, используется оператор As^* , оптимальный по критерию среднего квадрата ошибки оценки, который определяется из следствия теоремы ортогонального проецирования В. С. Пугачева:

$$As^* = M[XsYs^T]M[YsYs^T]^{-1} \quad (27)$$

Поскольку помеха и полезный сигнал являются некоррелированными случайными процессами, то:

$$As^* = M[XsXs^T]M[YsYs^T]^{-1} = Ks_x Ks_y^{-1} \quad (28)$$

Оптимальная оценка сигнала во временном представлении будет определяться через оптимальный оператор следующим образом:

$$A^* = BB^* As^* BB^T \quad (29)$$

$$X_i = A^* Y_i \quad (30)$$

где BB – матрица собственных векторов корреляционной функции полезного сигнала, то есть $BB = \varphi$.

Корреляционная матрица оценки сигнала:

$$K_x = A^* K_y A^{*T} \quad (31)$$

К недостаткам данного вида фильтрации можно отнести незначительное снижение точности оценки при использовании только первой наиболее информативной спектральной



компоненты по отношению к финитно-временной без обратной связи фильтрации сигналов и усложнение алгоритма за счёт использования разложения Карунене-Лоэва [13].

- б) Спектрально-финитная с обратной связью оптимальная фильтрация дискретных сигналов совпадает по свойствам обработки информации с основными свойствами финитно-временной фильтрации с обратной связью, но обеспечивает более высокую устойчивость, в том числе и при использовании адаптивной фильтрации [14]. К недостаткам данного вида фильтрации можно отнести незначительное снижение точности оценки при использовании только первой спектральной компоненты по отношению к финитно-временной с обратной связью фильтрации сигналов и усложнение алгоритма за счёт использования разложения Карунене-Лоэва.

Заключение

Резюмируя вышесказанное отметим что разработанная финитно-временная методология оптимальной фильтрации дискретных сигналов информационно-измерительной систем, обладающая универсальностью относительно моделей измерения и расширяющая область применения способов фильтрации сигналов, простотой реализации алгоритмов фильтрации сигналов и не уступающая по качеству обработки информации классическим методам обработки сигналов, может быть введена в использование в области МКА. Что касается спектрально-финитного алгоритма, то он не требует представлять сигнал в пространстве состояний, однако минусом является задача вычисления собственных чисел и собственных векторов, что потребует увеличения объема памяти и вычислительной мощностю устройства. Применительно к промышленности Cudesat, использование более простых и менее затратных технологий имеет смысл, так как, по сути, срок жизни изделия не велик, и эффективнее выведения большего числа менее точных объектов на орбиты, чем более дорогих, но в меньшем количестве. В подходе группировок микро-спутников применительно сказать, что МКА добиваются успеха количеством объектов, а не качеством отдельных [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кара Озан, Берклэнд Роджер, Чжан Лиуи (Лидия), Кайтац Умуралып Революционный вызов роев CubeSat [Электронный ресурс] // ВКС. 2018. №2(95). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/revolyutsionnyy-vyzov-roev-cubesat> (дата обращения: 09.11.2023).
2. Лемешко, О. В. ФИЛЬТР КАЛМАНА. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ / О. В. Лемешко // Вестник магистратуры. – 2014. – № 6-1 (33). – С. 5-8.
3. Светлов, И. В. Исследование адаптивного финитно-временного метода фильтрации сигналов и его сравнение с адаптивной фильтрацией Калмана / И. В. Светлов, Ю. П. Иванов // Системный анализ и логистика: журнал. – 2021. – №2(28) – С. 9-14. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-9-14.
4. Федоринов, А. Ю. Исследование спектрально-финитного метода фильтрации сигналов / А. Ю. Федоринов, Ю. П. Иванов // Системный анализ и логистика: журнал. – 2022. – №1(31) – С. 3-8. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-1-3-8.
5. Салий, Н. Л. Исследование методов комплексной оптимально-инвариантной нелинейной обработки сигналов в условиях нестационарных помех / Н. Л. Салий, Ю. П. Иванов // Научная сессия ГУАП: сборник докладов: в 3 ч., Санкт-Петербург, 10–14 апреля 2017 года. Том Часть I. – Санкт-Петербург: Спб ГУАП, 2017. – С. 215-219. – EDN ZVSQQD.
6. Горшков С. А., Кондратенко В. А., Солонар А. С., Крикливый М. В. Сравнительный анализ ошибок измерения калмановского и многогипотезного фильтров с объединением на входе [Электронный ресурс] // Доклады БГУИР. 2003. №3 (3).



URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-oshibok-izmereniya-kalmanovskogo-i-mnogogipoteznogo-filtrov-s-obedineniem-na-vhode> (дата обращения: 09.11.2023).

7. Джиган, В. Адаптивные фильтры. Современные средства моделирования и реализации / В. Джиган // Электроника: НТБ. – 2012. – №7. – С. 106 – 125.
8. Иванов, Ю. П. Универсальный алгоритм адаптивной оптимально-инвариантной фильтрации сигналов / Ю. П. Иванов // XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов, – Санкт-Петербург, 2010 г. – С. 321-322. – EDN SHCMYV.
9. Иванов, Ю. П. Фinitно-временной метод оптимальной фильтрации дискретных сигналов / Ю. П. Иванов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – № 5. – С. 23-27. – EDN XQNHKX.
10. Иванов, Ю. П. Универсальный фinitно-временной оптимальный метод фильтрации дискретных сигналов информационно-измерительных систем / Ю. П. Иванов // Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 5. – С. 11-17. – DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-11-17. – EDN KTPBZG.
11. Иванов, Ю. П. Спектральная марковская обработка навигационных сигналов // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 26–28 мая 2003 года / ГНЦ РФ - ЦНИИ "Электроприбор". – Санкт-Петербург, 2003. – С. 87-88. – EDN SXNPGJ.
12. Иванов, Ю.П. Спектрально-фinitный метод оптимальной линейной фильтрации сигналов // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии Первая Международная научная конференция. – 14-22 апреля 2020. – С.35-42.
13. Иванов, Ю. П. Спектральный метод оценки апостериорной достоверности невыхода случайного процесса за допустимые границы на скользящем интервале времени // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Четвертая Международная научная конференция. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 21-29. – EDN XIYFLY.
14. Иванов, Ю. П. Основные идеи фinitно-временной и спектрально-фinitной методологии обработки измерительной информации / Ю. П. Иванов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей V Международного форума. – Санкт-Петербург, 2023 года. – С. 62-63. – EDN OYIMYO.
15. Федоринов, А. Ю. Разработка системы управления движением малых космических аппаратов в группе на основе методов имитационного моделирования с использованием роевого интеллекта / А. Ю. Федоринов, В. В. Перлюк // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXV Международной научной конференции. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 256-259. – EDN KACLJR.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоринов Алексей Юрьевич –

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

e-mail: Fedorinov.aleksey@mail.ru

Иванов Юрий Павлович –

кандидат технических наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: ipi35@mail.ru



INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorinov Alexey Yurievich –

graduate student

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: Fedorinov.aleksey@mail.ru

Ivanov Yuriy Pavlovich –

postgraduate student of the Department of Air Navigation and Operation of Aviation and Rocket and Space Technology

Saint-Peterdurg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: ypi35@mail.ru