РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2024, том 11, выпуск 3, с. 91–103

____ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

УДК 629.7.054.07 EDN INRFOW

Анализ оптимального исполнения системы амортизации бесплатформенного измерительного прибора при помощи модифицированного метода роя частиц

П.А.Илюшин, *P.Ilyushin@russian.space*

филиал АО «ЦЭНКИ» — «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова», Москва, Российская Федерация

В. П. Наумченко, V.Naumchenko@russian.space

филиал АО «ЦЭНКИ» — «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова», Москва, Российская Федерация

Д. Г. Пикунов, D.Pikunov@russian.space

филиал АО «ЦЭНКИ» — «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В настоящей работе продолжается исследование вариантов поиска оптимальной системы амортизации и демпфирования бесплатформенного инерциального измерительного прибора, основанного на вибрационно-струнных акселерометрах. Приводятся сводные результаты проведенных ранее исследований и делается заключение о невозможности решения возникающей многокритериальной задачи оптимизации напрямую. Описывается способ повышения производительности работы скрипта на языке Python при использовании многопроцессорных вычислений, приводятся характеристики примененной модификации алгоритма оптимизации методом роя частиц и результаты ее работы.

Ключевые слова: инерциальный прибор, бесплатформенная инерциальная измерительная система, система амортизации и демпфирования, многокритериальная оптимизация, метод роя частиц

Для цитирования: Илюшин П. А., Наумченко В. П., Пикунов Д. Г. Анализ оптимального исполнения системы амортизации бесплатформенного измерительного прибора при помощи модифицированного метода роя частиц. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы.* 2024. Т. 11. № 3. С. 91–103.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2024, том 11, выпуск 3, с. 91–103

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

Analysis of the Optimal Design of the Shock Absorption System for a Strapdown Measuring Unit Using a Modified Particle Swarm Method

P. A. Ilyushin, P.Ilyushin@russian.space

Research Institute of Applied Mechanics named after V.I. Kuznetsov — branch of TSENKI JSC, Moscow, Russian Federation

V. P. Naumchenko, V.Naumchenko@russian.space

Research Institute of Applied Mechanics named after V.I. Kuznetsov – branch of TSENKI JSC, Moscow, Russian Federation

D. G. Pikunov, *D.Pikunov*@russian.space

Research Institute of Applied Mechanics named after V.I. Kuznetsov — branch of TSENKI JSC, Moscow, Russian Federation

Abstract. In this paper we continue the investigation of the optimal variants of amortization and dampening system of a strapdown inertial measurement unit based on vibrational-string accelerometers. The report provides the results of investigations carried out earlier and makes a conclusion that it is impossible to solve the emerging multicriterion optimization problem directly. We describe a way to increase the performance of the Python script when using multiprocessor computing. The applied characteristics and the results of the particle swarm optimization algorithm modification are provided.

Keywords: inertial measurement unit, strapdown inertial measurement system, amortization and dampening system, multicriterion optimization, particle swarm optimization

For citation: P. A. Ilyushin, V. P. Naumchenko, D. G. Pikunov Analysis of the Optimal Design of the Shock Absorption System for a Strapdown Measuring Unit Using a Modified Particle Swarm Method. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 91–103. (in Russian)

Введение

В настоящее время на предприятии осуществляется разработка вибростойкого бесплатформенного инерциального измерительного прибора повышенной точности. Он предназначен для решения задач ориентации и навигации в составе космического аппарата (КА) [1]. Особенностью разрабатываемого прибора является необходимость предоставления им достоверных показаний на принципиально разных участках полета: при выведении в составе ракеты-носителя [2] и при управлении КА, включая нештатные режимы их полета с повышенными уровнями вибрации.

Для предоставления достоверных показаний в систему управления КА в приборе применены инерциальные чувствительные элементы (ЧЭ) двух типов: вибрационно-струнные акселерометры (ВСА) [3] и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) [4] навигационного класса точности разработки предприятия [5, 6]. В ходе экспериментальных и математических исследований прибора была зафиксирована необходимость применения системы амортизации для обеспечения вибростойкости ВСА и прибора в целом [7-10]. При превышении допустимого уровня вибрации происходит удар подвижной части ВСА о его корпус [11] с последующим разрывом струны. В результате проведенных работ и исследования источников [12-17] был определен облик необходимой системы амортизации и демпфирования (САД) и обнаружен комплекс ее конструктивных характеристик, обеспечивающий вибростойкость ВСА [18]. На предыдущем этапе работы была выбрана принципиальная конструкция и состав САД, представлена описывающая ее нелинейная модель и результаты ее экспериментальной верификации. Настоящая работа будет посвящена анализу информации, получаемой при итерационном задании значимых параметров в принятой системе уравнений и ее численного решения.

Для уточнения полученных результатов и обнаружения иных перспективных исполнений проводился поиск наилучшего набора конструктивных характеристик САД при помощи методов поиска оптимального решения в многофакторной задаче [19]. Глобальной целью работы является разработка САД для обеспечения вибростойкости ВСА. Цель настоящей работы — создание вычислительной системы, анализирующей частное исполнение САД, формирующей набор данных численных решений рассматриваемой системы уравнений, агрегирующей полученную информацию и принимающей решение об эффективности отобранных вариантов исполнения. Это потребовало решения ряда задач, в том числе выделения значимых критериев и исследование возможности применения методов решения многокритериальных задач оптимизации, в частности модифицированного алгоритма роя частиц [20, 21]. Научная новизна проводимой работы заключается в том, что решается задача обеспечения вибростойкости бесплатформенного инерциального прибора при максимально возможном сохранении точности его измерений и габаритных характеристик с применением математического моделирования и методов оптимизации.

Методы работы

Основой САД является блок чувствительных элементов (БЧЭ), на котором расположены ВСА. БЧЭ связан с корпусом прибора при помощи равножестких пружин. Для снижения собственных колебаний БЧЭ применяются виброгасящие демпферы (ВД) и нелинейные диссипативные силы трения. Благодаря этим элементам вибрационное воздействие с корпуса прибора доходит до критичных элементов ВСА с существенными ослаблениями на опасных частотах, превышающих собственные частоты САД.

Исследование описанного объекта проводилось посредством математического моделирования системы уравнений, определяющей движение в САД при наличии внешнего механического воздействия [22]. Базовая математическая модель была линейной [23] и позволяла оценивать только вибростойкость ВСА при сохранении допустимых перемещений в БЧЭ. Финальная математическая модель реализована при помощи скрипта на высокоуровневом языке программирования общего назначения Python с применением общедоступных библиотек с открытым кодом, решающего следующие задачи в отдельных модулях:

- создание входного воздействия, включающего перемещения по штатной траектории и отклонения от нее при включении заложенных нештатных режимов;
- формирование набора входных конструктивных параметров экземпляра САД;
- численное решение нелинейной системы уравнений, описывающей модель движения в САД, при помощи функции solve_ivp и метода LSODA из пакета scipy.integrate [24];
- решение задачи навигации [25, 26] по показаниям ВСА (интегралы проекций кажущихся линейных ускорений на чувствительные оси) и ВОГ (интегралы проекции абсолютных угловых скоростей на чувствительные оси) в форме кватернионов [27];
- 5) сравнение полученных координат с ожидаемыми, фиксация ошибок определения координат, агрегирование и сохранение данных замеров на жестком диске;
- 6) анализ данных с жесткого диска, вычисление критериев оптимальности, с учетом факта касания в САД, оценка эффективности рассматриваемого экземпляра в сравнении с ранее полученными;
- формирование нового набора входных конструктивных параметров экземпляра САД по методике выбранного метода оптимизации [28].

В настоящей работе рассматриваются только погрешности ЧЭ, связанные с линейным и угловым движением подвижных элементов ВСА и САД. Собственные погрешности не учитываются, но предусмотрены в скрипте и при необходимости могут быть добавлены в математическую модель измерений ВСА и ВОГ. ВОГ как оптоэлектронное устройство считается нечувствительным к линейным ускорениям [29], а фиксирующим только угловые колебания. Исходными данными для моделирования, таким образом, являются варьируемые величины конструктивных элементов САД, влияющие на решение системы уравнений численными методами и приводящие тем самым к изменению значимых для последующего анализа величин.

Если рассматривать задачу с системной точки зрения, можно представить ее в виде блок-схемы (рис. 1).

На схеме: M_b , f_b , Q_b , M_d , f_d , Q_d , F_f – конструктивные параметры элемента САД (масса БЧЭ, частота БЧЭ, добротность БЧЭ, масса ВД, частота ВД, добротность ВД, максимальная сила трения соответственно); A_{\max} , t_{\max} — амплитуда и продолжительность входного воздействия; R, dR, ddR — вектор линейного перемещения элемента, его скорость и ускорение для корпуса (*in*), БЧЭ (*b*) и *i*-го BCA (ai) соответственно; e, de, dde — вектор углового перемещения, его скорость и ускорение для корпуса (*in*) и БЧЭ (*b*) соответственно; σR — СКО при измерении траектории движения по показаниям прибора, первый символ обозначает расположение ВОГ, второй — расположение и исполнение BCA для корпуса (c), БЧЭ (b) и BCA (a) соответственно; t_h — модельное время, через которое произошло касание в ВСА или в БЧЭ; c_h – критерий, учитывающий время, через которое произошло касание в ВСА или в БЧЭ (величина барьера); С — вычисленное значение скалярного критерия эффективности; С_{тах} — максимальное допустимое значения критерия; c_S, c_M, c_F, c_D — нормированные базовые критерии, учитывающие габариты, погрешность, уязвимость и сложность изготовления соответственно.

В рамках исследовательских работ был проведен цикл запусков в области подходящих исполнений САД с варьированием параметров посредством перебора. Из-за большого набора варьируемых параметров было зафиксировано много лишних шагов даже с учетом относительной малости области исследования. Также были проанализированы некоторые доступные в Python методы оптимизации [30]. При поисках решения детерминированными методами использовался пакет SciPy. Все рассмотренные прямые методы оптимизации (CG, COBYLA, Nelder-Mead, SLSQP), кроме Powell, не выходили за пределы барьера, причем методы завершались с признаком успеха, т.е. происходило нахождение локального минимума в области неуспешных решений. Метод Powell предоставил результат, близкий к итоговому минимальному значению, но это заняло продолжительный интервал времени. При моделировании квазиньютонов-



Рис. 1. Блок-схема алгоритма поиска оптимального исполнения САД

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for searching for the optimal implementation of amortization and dampening

ского метода (BFGS) при вычислении градиента было введено ограничение на дискретность шага, чтобы ускорить процесс нахождения оптимального исполнения. При попадании в область минимума в этом случае возникли автоколебания около точки экстремума. Поиск решения стохастическими методами осуществлялся посредством генетического алгоритма, реализованного в пакетах SciPy и Deap. Для покрытия большего диапазона исполнений САД установлены различные вероятности мутации и скрещивания при использовании каждого из пакетов. При высокой вероятности не возникла стабильная популяция с удовлетворительной средней приспособленностью. При низкой вероятности появились элитные особи и заметных изменений в популяции после этого не происходило.

Результаты математического моделирования

По итогам моделирования работы всех методов получен набор данных, содержащий результаты 6925 итераций. Из них уникальными оказались 3997, а удовлетворяющими условию отсутствия касания — 2310. С целью анализа возможности сокращения размерности задачи была построена корреляция Пирсона для массива данных с удовлетворяющими решениями (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона для базовых критериев

Базовый критерий	Погреш- ность	Уязви- мость	Габа- риты	Слож- ность
Погрешность	1,00	0,38	0,33	-0,56
Уязвимость	0,38	1,00	-0,17	0,26
Габариты	0,33	-0,17	1,00	0,35
Сложность	-0,56	0,26	0,35	1,00

Было подтверждено, что базовые критерии слабо связаны между собой, а значит, отказ от одного из них при выборе исполнения САД не корректен. Интересно, что критерий погрешности как наиболее комплексный по своему существу больше всех связан с другими базовыми критериями. Также была предпринята попытка найти оптимальное исполнение напрямую посредством поиска неулучшаемых решений по методу Парето. Протяженность парето-фронта даже для пары критериев оказалась высокой, а единый для всех критериев парето-фронт содержит 1892 неулучшаемых точек. Таким образом, получить решение напрямую не получилось.

Задачу было решено решать посредством скаляризации, для этого введены несколько скалярных критериев. В качестве основного при поиске оптимального решения принимался метод контрольных показателей с соответствующим скалярным критерием. Этот критерий обеспечивает наибольший запас надежности при изготовлении образца САД на предприятии:

$$C = \max\left(\sqrt{(c_S - 1)^2 + (c_M - 1)^2 + \sqrt{+(c_F - 1)^2 + (c_D - 1)^2}}, c_h\right)$$

По итогам проведенных работ можно отметить, что детерминированные методы оказались менее эффективны в глобальном поиске оптимальных исполнений, в то время как стохастические — в локальном [31]. Для полного массива удовлетворяющих решений были построены графики попарной зависимости характерных параметров, их парето-фронты и параметры наилучших исполнений при скаляризации с разными критериями (рис. 2).



Рис. 2. Примеры парето-фронтов и наилучших при скаляризации исполнений для характерных пар параметров, построенные по результатам всех замеров Fig. 2. Examples of Pareto fronts and the best executions for scalarization for characteristic pairs of parameters, constructed from the results of all measurements

Модификация математического аппарата

В ходе проведения работ было замечено, что основное процессорное время уходит на обращение к оракулу (решение системы уравнений и вычисление траектории движения), а не на вычисление параметров экземпляра САД для осуществления следующего шага. Поэтому применение готовых алгоритмов на языке более низкого уровня не дало заметных преимуществ, а в части гибкости настроек, напротив, наложило дополнительные ограничения. Было решено реализовать алгоритм оптимизации в скрипте в явном виде.

При использовании детерминированных методов оптимизации обращение к оракулу осуществляется последовательно, в стохастических методах от этого недостатка проще уйти. Было решено ввести параллельные вычисления при помощи пакета multiprocessing. Это позволило ограничить длительность вычислений не суммой времен (для удовлетворяющего исполнения 900 с) каждого обращения к оракулу, а наибольшим временем из группы одновременно выполняемых процессов. Ближе к завершению работы алгоритма почти каждое обращение приводит к удовлетворяющему решению, в итоге многопроцессорность сокращает время вычисления пропорционально размеру группы. При допустимости полной загрузки процессора возможно реализовать очередь без пауз между вычислениями в группах. Удалось обеспечить непрерывное вычисление одной итерации при загрузке 12-поточного процессора на 100%.

Особенность методов глобальной оптимизации заключается в том, что в них ищется решение в два этапа: поиск и локализация. На этапе поиска необходимо обработать как можно большее число различных точек для обнаружения широких областей, потенциально содержащих экстремум. Затем на этапе локализации происходит углубленное исследование обнаруженных областей с обнаружением в итоге исполнений с наилучшей пригодностью. При исследовании генетического алгоритма было обнаружено, что даже на последних итерациях возможны случайные выходы из области оптимальных исполнений, а это дополнительно затягивает поиск. Так возникла задача осуществления сужения области исследуемых параметров с увеличением номера итерации.

Было решено исследовать метод роя частиц, обладающий описанным свойством. Его преимуществом для рассматриваемой задачи является последовательное приближение к глобальному экстремуму с сохранением широты поиска за счет стохастических вычислений. Благодаря вычислению скорости движения достигается некая детерминированность движения в сторону минимума при конечном числе итераций. Генетический алгоритм, в свою очередь, сходится теоретически на бесконечности. В настоящей работе рассматривается вариант, совмещающий принципы нескольких популяционных алгоритмов. Новые свойства метода вводятся за счет учета относительного расположения частиц, использования инерциального компонента, когнитивного компонента и социального компонента.

В канонический алгоритм были добавлены оператор, смещающий влияние от локальных знаний частицы к глобальным, оператор, учитывающий знания частицы о состоянии своих соседей, и оператор, уменьшающий оценку частицей своей пригодности со временем. С математической точки зрения это приводит к появлению дополнительных свободных коэффициентов, что усложняет оценку пригодности алгоритма для решения задач оптимизации общего плана. Однако с инженерной точки зрения, когда не стоит вопрос о скорости сходимости и пригодности алгоритма для решения с интетических задач, такое решение вполне пригодно. В итоге при работе алгоритма для каждой частицы на итерации существуют 2 аттрактора — память о ее предыдущем лучшем значении и восприятие зафиксированного глобального лучшего значения. Есть вектор, определяющий инерционность ее движения и не позволяющий изменять направление движения мгновенно. Таким образом, присутствуют как детерминированность, основанная на суперпозиции, описанных векторов, так и стохастичность в виде случайного вклада этих векторов на каждой итерации и для каждой частицы в суммарный вектор скорости.

Дополнительно было решено заменить скалярный критерий контрольных показателей на скалярный критерий экспертной оценки, поскольку этот критерий потенциально более удобен с эксплуатационной точки зрения и позволяет заранее определить оптимальный облик САД в понимании именно заказчика прибора:

$$C = \max \left(K_S \cdot c_S + K_M \cdot c_M + K_F \cdot c_F + K_S \cdot c_D, c_h \right),$$

где K_S, K_M, K_F, K_D — свободные коэффициенты оценки важности базовых критериев габаритов,

погрешности, уязвимости и сложности соответственно.

Вычисление конструктивных параметров САД осуществляется для каждой частицы в каждой итерации индивидуально и учитывает как ее собственные параметры, так и параметры соседних с ней частиц: где M — общее число частиц в итерации; N — общее число итераций; R — общее число ком-

$$\begin{split} C_i^j &= \min_{j=1..R} \left(\begin{array}{c} \left(1 + \frac{\left|\overrightarrow{P}_i^n - \overrightarrow{P}_j^n\right|}{\sqrt{R}} \cdot \left|\alpha_J\right|\right) \cdot C_j^n + \\ \left\langle \left|\left|i - j\right| - \left\langle\left|i - j\right| \geqslant \frac{M}{2}\right\rangle \cdot M\right| > \\ \left\langle \left(1 + \left\langle\alpha_N \geqslant 0\right\rangle \cdot \left(1 + \left|\alpha_N\right| \cdot \frac{n - N}{N}\right) \cdot \frac{M}{2}\right)\right\rangle \cdot C_{\max} \end{array} \right) \rightarrow \overrightarrow{P}_i^j = \overrightarrow{P}_j^n; \end{split} \\ \begin{cases} \overrightarrow{P}_i^G &= \begin{bmatrix} \overrightarrow{P}_i^G, \quad C_i^j \geqslant C_i^G; \\ \overrightarrow{P}_i^J, \quad C_i^j < C_i^G; \\ \overrightarrow{P}_i^J, \quad C_i^j < C_i^G; \\ C_i^G &= \begin{bmatrix} C_i^G, \quad C_i^j \geqslant C_i^G; \\ C_i^G, \quad C_i^j \geqslant C_i^G; \\ C_i^G, \quad C_i^j < C_i^G; \\ C_i^j, \quad C_i^j < C_i^G; \\ C_i^G &= \begin{bmatrix} (1 + \left|\alpha_I\right|) \cdot C_i^L; \quad C_i^n \geqslant C_i^L \\ C_i^n, \quad C_i^n < C_i^L; \\ C_i^n, \quad C_i^n < C_i^L; \\ \overrightarrow{P}_i^n &= \overrightarrow{P}_i^{n-1} + \overrightarrow{V}_i^n, \end{aligned} \right) \end{split}$$

понентов в векторе параметров каждого экземпляра САД; і, ј — номер частицы, изменяется в диапазоне от 0 до R - 1; n - номер текущей итераций, изменяется в диапазоне от 0 до N-1; V_i^n — вектор скорости движения для *i*-й частицы в n-й итерации; $\vec{P_i^n}, \vec{P_j^n}$ — вектор нормированных параметров САД для *i*-й или *j*-й частицы в *n*-й итерации соответственно; \vec{P}_i^j — вектор нормированных параметров САД при наилучшем критерии эффективности для i-й частицы среди всех j-х частиц в n-й итерации; \vec{P}_i^L — вектор нормированных параметров САД при локальном наилучшем критерии эффективности для *i*-й частицы; \vec{P}_i^G вектор нормированных параметров САД при глобальном наилучшем критерии эффективности для i-й частицы; C^G_i — значение глобального наилучшего критерия эффективности для *i*-й частицы; C_i^L — значение локального наилучшего критерия эффективности для *i*-й частицы; C_i^n , C_j^n — значение полученного критерия эффективности для *i*-й или *j*-й частицы в *n*-й итерации соответственно; C_i^j — значение наилучшего критерия эффективности для *i*-й частицы среди всех *j*-х частиц в *n*-й итерации; r_0^1 — случайная величина, имеющая непрерывное равномерное распределение на отрезке от 0 до 1; |...| — модуль скалярного значения или вектора; (...) — операция, возвращающая 1 при истинности внутреннего логического выражения и θ при его ложности; α_V — свободный коэффициент алгоритма, задающий степень влияния значения скорости частицы на предыдущей итерации на значение текущей скорости частицы; α_L — свободный коэффициент алгоритма, задающий степень влияния координат вектора нормированных параметров САД при локальном наилучшем критерии эффективности на значение текущей скорости частицы; α_G — свободный коэффициент алгоритма, задающий степень влияния координат вектора нормированных параметров САД при глобальном наилучшем критерии эффективности на значение текущей скорости частицы; α_I — свободный коэффициент алгоритма, задающий скорость ухудшения оценки локального критерия эффективности с увеличением номера итерации; α_J — свободный коэффициент алгоритма, задающий степень

Обозначение коэффициента	Значение коэффициента и исполнение алгоритма роя частиц							
	Канонический, топология связи			Модифицированный, дополнения				
	кольцо	полная	переменная	восприятие	память	комплекс		
α_J	0	0	0	1	0	1		
α_I	0	0	0	0	1	1		
α_N	-1	0	1	0	0	0		
$lpha_V$	0,5							
$lpha_L$	2,5							
α_G	2,0							
K_S	0,25							
K_M	0,375							
K_F	0,1							
K_D	0,275							

Таблица. 2. Принятые при моделировании значения свободных коэффициентов

ухудшения оценки критерия эффективности при увеличении расстояния между частицами; α_N — свободный коэффициент алгоритма, задающий топологию оценки глобального критерия эффективности.

Решение искалось в нескольких запусках при приведенных выше значениях свободных коэффициентов (табл. 2).

Было проведено моделирование с заданием размера роя в 10 частиц и ограничения продолжительности в 15 итераций. В итоге получен набор данных, позволяющий оценить изменение средней и наилучшей приспособленности роя с увеличением номера итерации (рис. 3). Наилучшим вариантом оказалась комплексная модификация с полносвязанной топологией, учитывающая расстояние между частицами и число итераций, прошедших от обнаружения локального минимума. Этот вариант обеспечил самое быстрое достижение минимального значения критерия, а также успешное завершение вычислений всеми частицами в итерации без достижения барьера. Для этой модификации дополнительно был установлен меньший шаг дискретизации параметров и больший размер роя, с теми же свободными параметрами. Для этого запуска построен характер движения частиц роя для начальной и финальной (30-й) итераций (рис. 4–6).



Рис. 3. Изменение критерия эффективности частиц с увеличением номера итерации. Слева — среднее значение в итерации, справа — минимальное

Fig. 3. Changing the particle efficiency criterion with increasing iteration number. Left shows the average value in the iteration, right shows the minimum value



Рис. 4. Изменение нормированных масс частиц при увеличении номера итерации. Слева — стартовая итерация, справа — финальная





Рис. 5. Изменение нормированных частот частиц при увеличении номера итерации. Слева — стартовая итерация, справа — финальная

Fig. 5. Change in normalized particle frequencies with increasing iteration number. Left - initial iteration, right - final iteration



Рис. 6. Изменение нормированных добротностей частиц при увеличении номера итерации. Слева — стартовая итерация, справа — финальная



С увеличением номера итераций величины параметров всех частиц устремились в определенную область. Наилучшее решение ожидаемо находится в области неулучшаемых по базовым критериям исполнений с учетом коэффициентов важности их скалярного критерия, определенного методом экспертной оценки. Вполне логично, что область для массы достаточно растянута, поскольку масса в том или ином виде влияет на все базовые критерии причем зачастую с противоположным вкладом. Частота сходится к заметно более узкой области, следовательно, для всех базовых критериев ее влияние локализуется практически в одной допустимой точке. Добротность устремилась в область максимальных значений, причем также с сохранением достаточно широкого фронта. Это связано со степенью влияния базовых критериев на скалярный. Поэтому уже на этапе проработки концепции при изменении относительной важности критериев алгоритм обозначит область параметров, на которые следует ориентироваться при разработке конструкции прибора и его изготовлении. Наилучшим решением стало исполнение САД со следующими конструктивными параметрами:

$$M_b = 1, 2$$
 кг, $f_b = 25, 4$ Гц, $Q_b = 40,$
 $M_d = 0, 1$ кг, $f_d = 27$ Гц, $Q_d = 8, 6.$

Заключение

В ходе работ было установлено, что наиболее удобным и эффективным решением является внедрение в решаемую техническую задачу полноценно проработанного в доступных источниках алгоритма оптимизации в явном виде. Причем благодаря введению параллельных вычислений на нескольких процессорах при использовании стохастического алгоритма удалось снизить суммарное время расчета не менее чем в 5 раз. В детерминированных алгоритмах использовать многопроцессорность напрямую невозможно, но при их модернизации это также осуществимо.

Была обнаружена группа подходящих исполнений САД, обеспечивающих вибростойкость ВСА и оптимальных с точки зрения примененных критериев эффективности. Метод роя частиц обладает важными преимуществами в части поиска глобального оптимального значения в сравнении с исследованными ранее методами. Наилучшим решением стало исполнение САД с параметрами, отличными от ранее обнаруженных решений, но подтверждающими ранее обнаруженные тенденции к влиянию габаритов САД на перемещения в ВСА и, следовательно, погрешность измерения прибора.

В результате проведенных работ получен большой массив данных, подтвердивший возможность решения поставленной задачи, причем в различных вариантах исполнения САД. Принцип использования критериев оценки эффективности позволяет выделить диапазон подходящих параметров экземпляра САД прибора при его изготовлении и настройке и провести его натурные испытания. А принцип построения вычислительной системы для поиска оптимального решения без жесткой привязки к конкретному объекту позволяет искать наиболее эффективные исполнения и по другим техническим вопросам, в которых можно выделить количественные критерии оценки.

Список литературы

- Козлов Д.И., Аншаков Г.П., Мостовой Я.А., Сологуб А.В. Управление космическими аппаратами зондирования Земли: Компьютерные технологии. М.: Машиностроение, 1998. С. 366.
- 2. Беляев А.В. Пять доступных лекций по наведению ракет. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Эдиториал УРСС, 2018. С. 88.
- Харьков И.А., Шустров А.Д., Селиванова Л.М. Трехкомпонентный дифференциальный вибрационно-струнный акселерометр // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2003. № 4. С. 120–125.
- Курбатов А.М., Курбатов Р.А., Горячкин А.М. Повышение точности волоконнооптического гироскопа за счет подавления паразитных эффектов в интегральнооптических фазовых модуляторах // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 2. С. 52–69.
- 5. Наумченко В.П., Илюшин П.А., Пикунов Д.Г., Соловьев А.В. Обработка показаний инерциальных приборов на унифицированном программноматематическом комплексе // Вопросы электро-

C. 8–16.

- 6. Илюшин П.А., Наумченко В.П., Соловьев А.В. Анализ шумовых характеристик бесплатформенного инерциального блока космического назначения // Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основанию ПАО «РКК "Энергия"». Сб. тезисов докладов. 2021. С. 261-263.
- 7. Росин Э.И., Малышев В.В. Пружинный амортизатор. СССР. Пат. SU 507723 A1, заявка: 2092904, 1975.01.06; опубликовано: 1976.03.25.
- 8. Росин Э.И., Богданова В.Д., Рыбкин В.К. Пространственный виброгаситель. СССР. Пат. SU 557219 А, заявка: 2305820, 1975.12.30; опубликовано: 1977.05.05.
- 9. Суконкина М.Л., Гайнов С.И. Обзор методов и устройств виброзащиты приборных платформ // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. С. 311-319.
- 10. Гаврилин Б.Н., Галавкин В.В., Голубев К.А. и др. Амортизированный блок датчиков первичной информации бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Пат. RU 121364 U1, заявка: 2011151326/28, 2011.12.16; опубликовано: 2012.10.20.
- 11. Иванов А.П. Динамика систем с механическими соударениями. М.: Международная программа образования, 1997. С. 336.
- 12. Илюшин П.А., Наумченко В.П., Пикунов Д.Г. Анализ качества работы инерциальных приборов при воздействии внешних вибрационных возмущений // Новые материалы и технологии в ракетнокосмической авиационной и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Сб. материалов 17-й Молодежной конференции ООО «12 апреля». 2021. C. 72.
- 13. Sun Mh., Gu Wz., Ding M., Sun Xy. The Influence of Vibration on Performance of Navigation Tasks. In: G. Sun, S. Liu, (eds.) / Advanced Hybrid Information Processing. ADHIP 2017. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Vol. 219. Springer. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73317-3_36
- 14. Ibrahim R.A. Recent advances in nonlinear passive vibration isolators // Journal of Sound and Vibration. Vol. 314. Iss. 3-5. 2008. P. 371-452.

- механики. Труды ВНИИЭМ. 2023. Т. 195, №4. 15. Максимов С.А., Наумченко В.П., Илюшин П.А., Пикинов Д.Г., Соловьев А.В. Анализ системы амортизации и демпфирования бесплатформенного инерциального измерительного прибора // Труды МАИ. 2023 № 129. https://trudymai.ru/published.php?ID= =173032
 - 16. Илюшин П.А., Наумченко В.П., Пикунов Д.Г., Соловьев А.В. Исследование обеспечения стойкости к внешним вибрационным возмущениям бесплатформенного инерциального измерительного прибора при помощи нелинейных элементов системы амортизации / Молодежь. Техника. Космос: Труды 14-й Общероссийской молодежной научно-технической конференции. 2022. Т. 2. С. 29-31.
 - 17. Илюшин П.А., Наумченко В.П., Пикунов Д.Г., Соловьев А.В. Моделирование работы нелинейной системы амортизации и демпфирования бесплатформенного инерциального измерительного прибора // Вестник НИЯУ МИФИ. 2022. № 11(6). С. 403-412.
 - 18. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний: пер. с англ. М.: Мир. 1988. С. 448.
 - 19. Овсянников Г.Н. Факторный анализ в доступном изложении: Изучение многопараметрических систем и процессов. М.: Ленанд. 2022. С. 176.
 - 20. Казакова Е.М. Краткий обзор методов оптимизации на основе роя частиц // Вестник КРАУНЦ. Физ.мат. науки. 2022. Т. 39. № 2. С. 150-174.
 - 21. Yu Wu, Jianing Deng, Leilei Li, Xichao Su, Liyang Lin. A hybrid particle swarm optimizationgauss pseudo method for reentry trajectory optimization of hypersonic vehicle with navigation information model // Aerospace Science and Technology. Vol. 118. 2021. 107046.
 - 22. Вульфсон И.И. Краткий курс теории механических колебаний. М.: ВНТР. 2017. С. 241.
 - 23. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учеб. и практикум для вузов. М.: Юрайт. 2022. C. 276.
 - 24. Медведева Н.В., Скряга Е.С. Сравнение численных методов решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений // Международный студенческий научный вестник. 2018. №2. https://eduherald.ru/ru/article/view?id=18343
 - 25. Чиб В.Ф. Основы инерциальной навигации. Гиперкомплексные и теоретикогрупповые методы в теории инерциальной навигации. М.: Ленанд, 2014. C. 200.

- 26. Yurong Lin, Wei Zhang, Jianqiong Xiong. Specific force integration algorithm with high accuracy for strapdown inertial navigation system // Aerospace Science and Technology. Vol. 42. 2015. P. 25–30. https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.01.001
- 27. *Арнольд В.И.* Геометрия кватернионов. М.: МЦНМО. 2017. С. 144.
- Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: Учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. С. 446.
- 29. *Курбатов Л.Н.* Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. М.: Физматкнига. 2013. С. 404.

- Хватов А.А., Никитин Н.О., Калюжная А.В. Современные методы оптимизации с примерами на Python. СПб.: Университет ИТМО. 2023. С. 48.
- 31. Агибалов О.И. Оптимизация многомерных задач на основе комбинирования детерминированных и стохастических алгоритмов // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 9. С. 7–11.

Дата поступления рукописи в редакцию 06.05.2024 Дата принятия рукописи в печать 21.08.2024