

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ НА БАЗЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ПРИНЦИПА МАКСИМУМА В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Костоглотов, вед. науч. сотр. ФГУП «Ростовский-на-Дону Научно-исследовательский институт радиосвязи», д-р техн. наук, проф., *kostoglotov@me.com.ru*

А.А. Кузнецов, д-рант Военно-воздушной академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина МО РФ, г. Воронеж, канд. техн. наук, доц., *smithaa@yandex.ru*

С.В. Лазаренко, д-рант ФГБОУ ВПО «Донской государственной технической университет», канд. техн. наук, *rh3311@mail.ru*

Д.С. Андрашитов, преп. Военной академии ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, г. Москва, канд. техн. наук, *dima-andrahitov@rambler.ru*

Рассмотрены инновационные решения задач обработки информации и управления, полученные на базе фундаментального подхода, названного объединенным принципом максимума. Показано, что применение полученных оригинальных решений в информационно-управляющих системах для решения задач управления, оценивания и идентификации позволяет повысить их эффективность.

Ключевые слова: принцип Гамильтона–Остроградского, объединенный принцип максимума, сопровождение целей, навигационная задача, оптимальное управление, структурно-параметрическая идентификация.

THE ANALYSIS OF EFFECTIVENESS OF INNOVATIVE SOLUTIONS BASED ON JOINT MAXIMUM PRINCIPLE IN THE INFORMATION PROCESSING AND MANAGEMENT

A.A. Kostoglotov, Leading Researcher, FSUE «The Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication», Ph.D. of Engineering, Professor, *kostoglotov@me.com.ru*

A.A. Kuznetsov, Doctoral Student, Military-Air Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Ministry of Defence of Russia, Voronezh city, Doctor of Engineering, Assistant Professor, *smithaa@yandex.ru*

S.V. Lazarenko, Doctoral Student, Federal State Institution of Higher Education «Don state technical university» (Rostov-on-Don), Doctor of Engineering, *rh3311@mail.ru*

D.S. Andrahitov, Teacher, Military Academy of Rocket Strategic Forces named after Peter the Great, Moscow, Doctor of Engineering, *dima-andrahitov@rambler.ru*

The innovative solutions of problems of information processing and management received on the basis of the fundamental approach called the integrated principle of a maximum are considered. It is shown that application of the received original decisions in management of information systems for the solution of problems of management, estimation and identification allows to increase their efficiency.

Keywords: Hamilton-Ostrogradsky's principle, the integrated principle of a maximum, target tracking, a navigation task, optimum control, structural – parametrical identification.

Введение

Научные изыскания в области разработки информационно-управляющих систем (ИУС) обеспечивают получение оригинальных технических решений, которые являются главной составляющей любой инновации. При этом получение нового научного результата во мно-

гом определяет конечный эффект инновационной деятельности. Поэтому перспективные научные школы развивают фундаментальные направления исследований в целях повышения эффективности функционирования технических систем различного назначения. Наряду с техническими и технологическими методами основой для повышения эффективности служат методы оптимального синтеза. Существующие в настоящее время устоявшиеся методы анализа и синтеза информационных и управляющих процессов существенно исчерпали свой потенциал, требуют решения краевых задач большой размерности и обладают недостаточной для современного уровня техники эффективностью решений в виде цифровых алгоритмов функционирования.

Поиск новых и модернизация существующих методов синтеза является сложной научно-технической задачей, для решения которой в начале 2000-х годов разработан новый подход, названный авторами объединенным принципом максимума (ОПМ) [1, 2]. Предметное содержание этого подхода нашло свое выражение в применении к интегралу действия Гамильтона–Остроградского игольчатой вариации Л.С. Понтрягина. Подход позволил определить условия оптимальности, отличающиеся универсальностью, простотой, устойчивостью решений. ОПМ является дальнейшим развитием принципа максимума Л.С. Понтрягина применительно к объектам, движение которых подчиняется принципу Гамильтона–Остроградского.

Практика применения нового подхода показала, что ОПМ может служить фундаментом инновационных решений, необходимых для повышения эффективности радиолокационных систем (РЛС) различного назначения, решающих задачи навигации, сопровождения, селекции маневрирующих целей и т. д. Особая актуальность потребности в новых решениях обусловлена необходимостью повышения эффективности РЛС в связи с неуклонным ростом маневренных возможностей космических, воздушных, морских и наземных объектов [3, 4]. Эти системы относят к ИУС, функционирующим в условиях информационного конфликта, сложной помеховой обстановки. Общий недостаток таких систем, приводящий к снижению их эффективности при работе с маневрирующими целями, заключается в том, что в основе реализованных решений лежат разработанные 50–60 лет назад базовые соотношения, полученные из предположений о том, что оценки координат движения формируются на основе кинематических соотношений без учета инерционности [3–6]. Как отмечают специалисты [3], для обеспечения гарантированно устойчивого высокоточного сопровождения современных маневрирующих целей требуются новые модели, подобные динамическим [4], синтез которых с успехом реализуется на базе нового подхода.

За последние годы на базе ОПМ были получены решения различных прикладных задач [1]. В частности применение аппарата ОПМ к задачам радиолокационного сопровождения, навигации, управления и структурно – параметрической идентификации позволило получить совокупность результатов [7–23], представляющих собой семейство алгоритмов с новыми принципами определения параметров функционирования, отличительным признаком которых являются наличие нелинейных структур.

Основные положения ОПМ

Исходные положения динамики – аксиомы Ньютона и принцип Даламбера – позволяют сформулировать законы движения в виде дифференциальных уравнений, которые служат составной частью формулировки оптимизационных задач. Однако равноправными являются и вариационные формулировки, устанавливающие стационарные свойства некоторых величин, зависящих от параметров системы.

Новый подход к получению условий оптимальности, базируется на использовании инвариантных многообразий в виде признака действительного движения динамической системы, который определяется аналогом принципа Гамильтона–Остроградского или Гаусса [24].

Применение к этому интегралу игольчатого варьирования Л.С. Понтрягина позволяет получить необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума без введения вектора сопряженных переменных, что существенно упрощает решение задачи синтеза оптимальных систем.

Условие оптимальности решения задач управления, оценивания и идентификации, заключается в поиске максимума функции обобщенной мощности [1, 19]:

$$\Phi(q, \dot{q}, u) = \max_{Q \in \bar{Q}} \sum_{s=1}^n \left[\lambda Q_s + \frac{\partial F}{\partial q_s} \right] \dot{q}_s, \quad (1)$$

где n – число степеней свободы динамической системы, λ – множитель Лагранжа, Q_s – причинный фактор (управление), приводящий к изменению наблюдаемого состояния q_s , F – положительная-определенная подынтегральная функция целевого функционала.

Синтез оптимального управления

Синтез управления электродвигателем. При построении прецизионных инерциальных систем, где используется гироскоп с газодинамическими опорами, требуется управлять приводным двигателем. Разгон ротора до величины, соответствующей переключению электропривода в режим управления по электродвижущей силе должен происходить в соответствии с заданным режимом. Сложности реализации традиционных процедур синтеза управления обусловлены нелинейностью модели бесконтактного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами, которая формализована уравнением Лагранжа второго рода. С достаточной степенью достоверности она аппроксимируется уравнением математического маятника, что обеспечивает сравнение полученного результата с известными [24–26].

Из условия максимума функции обобщенной мощности (1) в [27] синтезировано управление из области кусочно-постоянных функций:

$$Q_1 = |Q| \operatorname{sign} \left(-\frac{\dot{q}|\dot{q}|}{\lambda^{-1} 2|U|} - (q - y) \right), \quad (2)$$

где q, \dot{q} – угол поворота и скорость его изменения, $|Q|$ – допустимое управление, y – желаемый закон изменения угла.

Кроме того, в [23] показано, что для уравнений состояния, представленных системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка, условие (1) может быть преобразовано к классической форме принципа максимума Л.С. Понтрягина.

Сравнение (2) с результатами [26] позволяет утверждать, что полученное решение отличается простотой, позволяет увеличить эффективность по критериям быстродействия и точности на 14% и 18%, соответственно. Синтезированное управление обеспечивает значительное снижение вычислительных затрат: более 4 раз в сравнении с [26] и на 11% меньше, чем решение ОПМ [24]. Процедура синтеза характеризуется универсальностью, а значит может быть использована для любых Лагранжевых систем и не требует решения двухточечных краевых задач. Это, например, обеспечивает возможность ее применения в задачах управления манипуляторами роботов, ориентацией космических аппаратов, прицельного разгона, торможения, наведения, выведения на заданную орбиту и т.д.

Синтез управления манипулятором

Существует ряд прикладных задач, когда требуется управлять объектом в положении неустойчивого равновесия. Оценку эффективности предлагаемых решений проводят по результатам процесса приведения двухзвенного маятника из произвольного начального положения в неуравновешенное состояние и его удержания. Уравнение состояния такой дина-

мической системы представляет собой упрощенную модель механического двухзвенного манипулятора робота с безредукторными приводами и абсолютно жесткими элементами конструкции, а также может использоваться при решении других задач. К примеру, в задаче об ориентации космических аппаратов.

Применение ОПМ также позволяет получать решения из области непрерывных функций, которые для задачи перемещения двухзвенного манипулятора робота из начального положения $t = 0, \varphi_s(0), \dot{\varphi}_s(0), (s = 1, 2)$ в неуравновешенное состояние $\varphi_1(t_k), \varphi_2(t_k)$ и управления заданным движением $x_1(t) = 0.3 \sin 4t, x_2(t) = 0.2 \sin 7t$ относительно этого нового положения, имеют вид [28]:

$$Q_{2s} = \lambda^{-1} \left[-\frac{\dot{\varphi}_s |\dot{\varphi}_s| D}{L_s |\varphi_s - x_s| + \varepsilon_s} - (\varphi_s - x_s) \right]; \quad s = 1, 2; \quad (3)$$

где L_s, ε_s – параметры, которые определяются формой линии переключения.

Результаты математического моделирования приведены на рис. 1, где линия 1 – решение (3), линия 2 – решение в форме обратной связи (2).

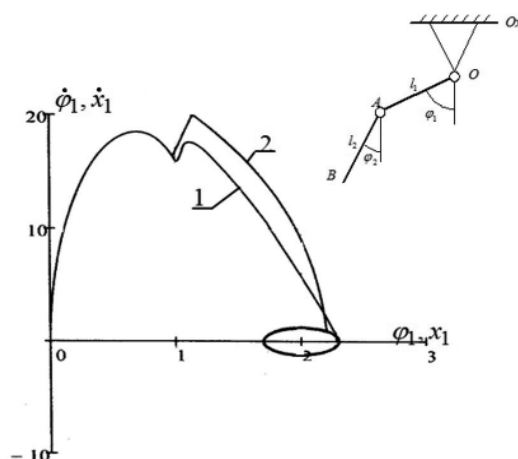


Рис. 1. Фазовый портрет

Полученный закон управления (3) расширяет класс управлений принципиально новыми решениями, не сводящимися к решениям по методу принципа максимума Л.С. Понтрягина.

Синтез терминального управления манипулятором

Использование ОПМ для синтеза терминального управления однозвенным манипулятором, переводящим его из начального состояния $(q(0), \dot{q}(0))$ в состояние покоя $(q(t_1), \dot{q}(t_1))$, приводит к следующему результату:

$$Q_3 = \frac{6A^2(q - D) + (6ABC - 2B^3)}{2A(\dot{q} - C) - (2B^2 - 6AC)}, \quad (4)$$

где t_1 – заданное время достижения состояния,

$$A = -t_1^{-3} \left[12(q(t_1) - q(0) - \dot{q}(0)t_1) - 6t_1(\dot{q}(t_1) - \dot{q}(0)) \right],$$

$$B = t_1^{-2} \left[6(q(t_1) - q(0) - \dot{q}(0)t_1) - 2t_1(\dot{q}(t_1) - \dot{q}(0)) \right], C = \dot{q}(0), D = q(0).$$

Результаты сравнения (4) с «мягким» управлением из [29] приведены на рис. 2, где сплошной линией обозначена фазовая траектория для (4), а пунктирной – для решения из [29], которое в отличие от предлагаемого при приближении к точке фазового пространства $(q(t_1), \dot{q}(t_1))$ приводит к резкому увеличению Q_3 . Данное обстоятельство хорошо изучено и для борьбы с ним разработаны различные приемы устранения такой особенности.

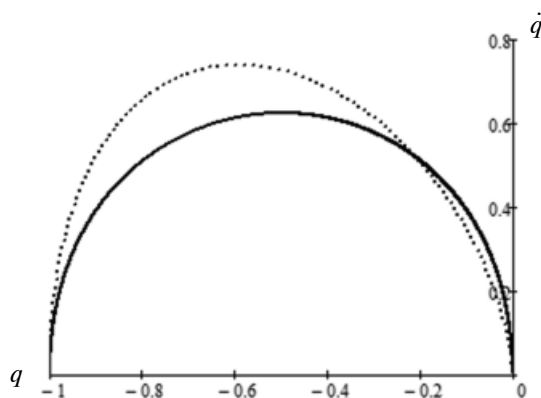


Рис. 2. Фазовый портрет

Управление (4) обеспечивает возможность выбора параметров регулирующего устройства и безударный режим изменения состояния динамической системы с минимальным объемом энергетических затрат в сравнении с решением из [29].

Таким образом, использование ОПМ позволяет получать новые конструктивные решения экстремальных задач в форме обратных связей как функций наблюдаемого состояния без решения двухточечных краевых задач высокой размерности.

Синтез систем сопровождения и навигации

В последнее время новые требования предъявляются к системам навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые должны обеспечивать высокую точность определения текущих координат для эффективного решения задач управления и получения с борта видео и радиоизображений. Результирующая точность зависит от различных факторов, в число которых входит оценка экстраполируемого движения, которая с учетом высокоманевренных свойств БПЛА является порой определяющей.

Известные экстраполяторы построены на базе кинематических моделей движения [3–6]. Их отклонение от действительного движения приводит к появлению динамических ошибок, которые по оценкам специалистов могут приводить к существенному снижению точности и даже сбоям в работе систем навигации и сопровождения [3, 4].

На основе ОПМ разработаны динамические модели движения маневрирующих целей, что позволяет определить структуру динамического адаптивного экстраполятора [7–13]:

$$\ddot{\hat{q}} = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} \dot{\hat{q}} \\ \hat{q} \\ L|\dot{\hat{q}}| \end{bmatrix} + R_{\xi}^{-1}(y - \hat{q}), \quad \hat{q}(t_0) = \hat{q}_0, \dot{\hat{q}}(t_0) = \dot{\hat{q}}_0. \quad (5)$$

где a – коэффициент квадратичной формы кинетической энергии, \hat{q} – оценка наблюдаемой РЛС координаты, R_{ξ} – интенсивность помех в канале наблюдений, L – константа кривой переключения, y – измерительная информация.

Конечномерная аппроксимация (5) приводит к следующему выражению:

$$\hat{q}(k+1) = b\hat{q}(k) + c\hat{q}(k-1) + d \frac{\hat{q}^2(k-1)}{\hat{q}(k)} + v(k), \quad (6)$$

где k – текущий момент времени; b, c, d, v – постоянные коэффициенты.

Отличительной особенностью нового алгоритма является наличие нелинейного элемента.

Решение задачи синтеза фильтра сопровождения с использованием ОПМ и метода инвариантного погружения [12] имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= f(\hat{x}) + PH^T R_{\xi}^{-1} [y(t) - H\hat{x}], \\ \dot{P} &= P \frac{\partial f^T(\hat{x})}{\partial \hat{x}} + \frac{\partial f(\hat{x})}{\partial \hat{x}} P + GR_{\eta} G^T - PHH^T P, \\ P(0) &= P^0, \quad \hat{x}(0) = x^0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}$ – вектор состояния, $f(x(t), t) = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ -|\dot{q}|\dot{q} \\ aL|q| \end{bmatrix}$ – полученная на базе ОПМ функция динамики

цели, R_{η} – матрица интенсивностей внешних воздействий, $H(\hat{x}(t), t)$ – известная вектор-функция наблюдения.

Полученные уравнения отличаются от известного алгоритма Калмана новой структурой функции $f(x(t), t)$.

Разработанный фильтр превосходит фильтр с моделью Зингера по точности оценивания на 6–12% и требует на 10% меньших вычислительных затрат. На участке маневрирования разработанный фильтр реагирует быстрее на маневр цели.

Синтез систем селекции целей при контроле радиоэлектронной обстановки

Задача контроля радиоэлектронной обстановки требует селекции целей, что сводится к процедуре разделения цифровых потоков принимаемых сигналов, когда в пределах видимости возможны наблюдения от десятков до сотен объектов, при этом источники излучения характеризуются близкими частотными и временными параметрами и эффективными для их разделения являются пространственные признаки с учетом движения объектов локации. Необходимость учета признаков движения остро проявляется при разделении сигналов от групповых высокоманевренных целей, когда ошибки измерений радиоканала становятся сравнимыми с динамическими ошибками за счет движения объектов.

Актуальность задачи связана с тем, что в существующих средствах радиоконтроля для разделения сигналов используются антенные системы с узкими диаграммами направленности, обеспечивающими рэлеевское разрешение по пространству в совокупности со статистической обработкой потоков импульсов. Недостатками таких средств являются низкое разрешение по пространству групповых целей, малое число статистически разделяемых импульсных потоков и низкое быстродействие, связанное с необходимостью медленного сканирования по пространству.

Одним из вариантов решения задачи разделения цифровых потоков является использование пространственного признака (пеленга) в качестве параметра разрешения сигналов. Практическая реализация процесса разделения цифровых потоков может быть основана на методах кластерного анализа.

Особенность задачи кластеризации в данном случае обусловлена двумя обстоятельствами. Первое связано с тем, что разработку алгоритма кластеризации необходимо проводить по специальному критерию, который определяется статистикой набега фазы импульса сигнала, отличной от гауссовской, и метрикой амплитудно-фазовых распределений формируемых фронтами излучений множества источников импульсных сигналов. Второе связано с тем, что среди множества объектов существуют и достаточно динамичные, движущиеся со скоростью от 20 до 80 узлов. Это может внести существенные динамические ошибки при определении пеленгов.

К примеру, при скорости ~ 40 узлов динамическая ошибка определения пространственной координаты за несколько периодов обзора $T = 25$ с достигает 500 м, а на расстоянии до цели 10 км $\sim 2,5^\circ$ по азимуту. Это говорит о том, что в некоторых случаях динамические ошибки пеленга становятся сравнимыми со случайными, что при последующем использовании методов сверхразрешения может привести к существенным ошибкам.

При наличии движения объекта излучения задача кластеризации требует построения алгоритма оценки дрейфа центра кластера, как правило используется алгоритм скользящего среднего. Сложность его реализации состоит в отсутствии модели движения центра кластера, что приводит к различным эвристическим вариантам, когда принимается некоторая гипотеза о характере движения, которая в действительности часто не подтверждается.

Результаты моделирования [14] показывают, что оценки смещения пеленга, полученные с использованием (5), на выборке, содержащей более 20 отсчетов, обеспечивает снижение ошибки определения центра кластера на 35% в сравнении с оценками скользящего среднего, что демонстрирует преимущества их применения.

Синтез систем обработки информации средств контроля космического пространства

Важной считается задача обеспечения эффективной работы средств контроля космического пространства (СККП).

Использование предлагаемого экстраполятора ОПМ значительно повышает устойчивость работы алгоритмов обработки, что демонстрируется на рис. 3, где в безразмерных единицах показаны результаты работы традиционного α - β алгоритма и предлагаемого алгоритма [14].

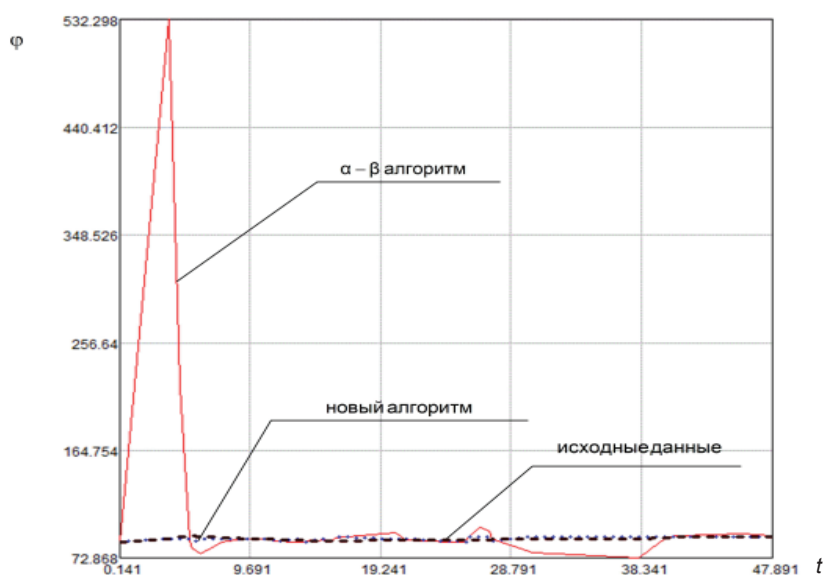


Рис. 3. Процессы функционирования алгоритмов обработки информации

СККП является постоянно дежурящей боевой системой мирного времени двойного назначения и предназначена для сбора, приема и предварительной обработки информации от средств наблюдения, идентификации поступающих измерений с орбитами известных космических объектов (КО), первоначального определения орбит вновь запускаемых КО, уточнения орбит КО и прогнозирования движения КО, селекции космических аппаратов на фоне последних ступеней ракет-носителей, фрагментов и осколков, планирования наблюдений (расчета и выдачи целеуказаний наблюдательным средствам), определения продолжительности существования КО, времени и возможного района их падения, сопровождения КО (периодического уточнения орбит КО с требуемой точностью, обеспечивающей идентификацию КО) и ведения Главного каталога СККП.

В условиях нештатных ситуаций и регламентов точностные параметры системы претерпевают существенные изменения, в соответствии со спецификой работы системы с различным числом видимых объектов период обновления измерительной информации изменяется, нередко случаи случайных выбросов в потоке измерительной информации вследствие воздействия большого числа различных факторов. Эти факторы вносят существенные возмущения в алгоритмы обработки и часто приводят к потере наблюдаемых или возникновению неопознанных КО. Одной из причин является недостаточная эффективность функционирования экстраполяторов движения, представляющих основу алгоритмов СККП.

Проведенное статистическое моделирование показывает, что при обработке данных об угловом положении КО φ использование при функционировании экстраполяторов типа скользящее среднее в составе α - β алгоритмов приводит к существенным возмущениям и повышает вероятность сбоя в работе всей системы СККП.

Синтез систем контроля параметров ИУС

Этапы совершенствования процедур, обеспечивающих уменьшение погрешности инерциальных навигационных систем, характеризуются применением теории ошибок и методов статистической динамики. Это требует знания параметров математической модели, что определяет необходимость использования алгоритмов идентификации.

Разработанные с использованием ОПМ новые методы идентификации обеспечивают синтез оригинальных алгоритмов оценивания параметров, которые отличаются от известных, характеризуются высокой точностью и скоростью сходимости, как правило, требуют меньшего объема вычислений [1, 15, 17, 19, 22, 30]. Их отличия обусловлены различными моделями динамики процесса идентификации. Так, например, использование модели в форме дифференциального уравнения второго порядка приводит к следующему алгоритму идентификации параметров микроэлектромеханических акселерометров:

$$\ddot{\hat{q}}(t) = \lambda^{-1} \left[-\frac{a[y - \hat{q}]\dot{\hat{q}}}{2\|Q\hat{q} + C_1\|} \hat{q} - [y - \hat{q}] \right], \quad \dot{\hat{q}}(0) = \hat{q}_0, \quad \hat{q}(0) = \hat{q}_0, \quad (8)$$

$$\ddot{\hat{z}} = \mu^{-1} \left[-\frac{a[y - \hat{q}]\dot{\hat{z}}g}{2\|\eta\hat{z} + C_2\|} - [y - \hat{q}]g \right], \quad \dot{\hat{z}}(0) = \hat{z}_0, \quad \hat{z}(0) = \hat{z}_0,$$

$$\ddot{g} = \hat{z}\dot{g} + b\dot{g} + \hat{q}g, \quad g(0) = g_0, \quad \dot{g}(0) = \dot{g}_0,$$

где \hat{q} – оценка выходного измерительного сигнала, a – коэффициент инерции, λ и μ – неопределенные множители Лагранжа, $|Q|$ и $|\eta|$ – соответственно допустимые значения входного измери-

тельного сигнала и причинной характеристики, приводящей к изменению неизвестного параметра \hat{z} , пропорциональной постоянной времени акселерометра, b – известный параметр, C_1, C_2 – постоянные, g – функция чувствительности.

Результаты моделирования процесса определения входного сигнала и неизвестного параметра приведены на рис. 4.

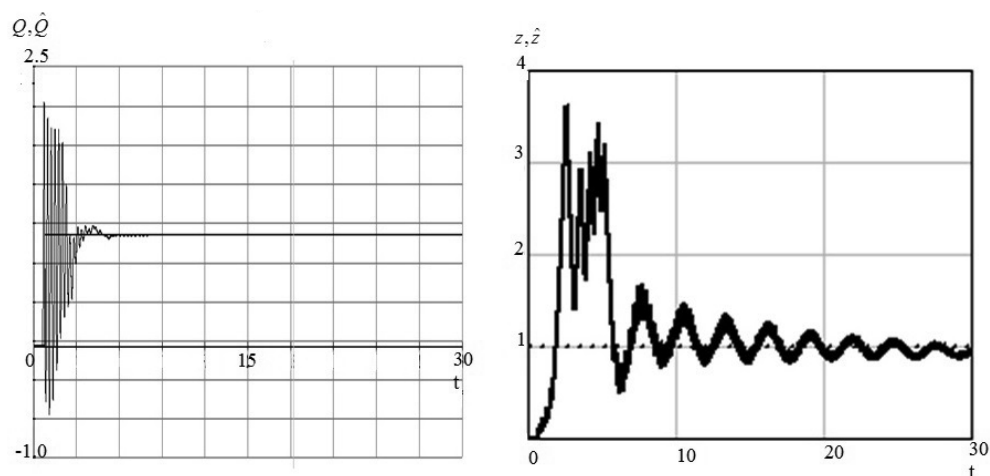


Рис. 4. Динамика протекающих процессов

Алгоритм (8) позволяет в сравнении с традиционным снизить вычислительные затраты более чем на 40 %, при увеличении точности в среднем на 11 %.

Количественные оценки эффективности предлагаемых решений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка эффективности применения инновационных решений ОПМ в технических приложениях

Критерий эффективности	Объем вычислительных затрат	Точность
Область применения		
Системы управления	11 %	14 %
Системы радиолокационного сопровождения	10 %	6–12 %
Системы селекции целей (разделения цифровых потоков)	–	35 %
Системы испытаний и контроля	40 %	11 %

Заключение

Использование ОПМ обеспечивает синтез управлений нелинейными динамическими системами, в том числе с заданным терминальным состоянием, в замкнутой форме функции наблюдаемого состояния. Его применение расширяет класс управлений принципиально новыми управлениями, не сводящимися к решениям принципа максимума Л.С. Понтрягина, и позволяет решать трудно разрешимые на основе традиционных подходов задачи.

За счет использования представленной методологии при синтезе систем обработки радиолокационной информации обеспечивается адаптация алгоритмов сопровождения и на-

вигации к наблюдаемой динамике подвижного объекта. При решении задачи синтеза систем обработки информации средств наблюдения СККП это проявляется в значительном увеличении устойчивости работы алгоритмов обработки.

Использование методологии ОПМ в задачах идентификации параметров позволяет получать новые экономичные в вычислительном плане алгоритмы, обеспечивающие высокую скорость сходимости и точность оценивания.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-08-03798а, 15-38-20835 мол_а_вед.

Список литературы

1. Костоготов А.А., Костоготов А.И., Лазаренко С.В. Объединенный принцип максимума в информационных технологиях анализа и синтеза: монография. РТИСТ (фил.) ГОУ ВПО «ЮРГУЭС». Ростов-на-Дону, 2010. 165 с.
2. Костоготов А.А. Объединенный принцип Понтрягина–Гамильтона–Остроградского // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2007. № 6, с. 13–17.
3. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования: монография. М.: Радиотехника, 2014. 528 с.
4. Li X. Rong, Vesselin P., Jilkov A. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003, vol. 39, no. 4, October. p. 1333–1364.
5. Фарица А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
6. Blackman S.S., Popoli R.F. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Boston. MA: Artech House, 1999. 1229 p.
7. Костоготов А.А., Костоготов А.И., Лазаренко С.В. Объединенный принцип максимума в задачах оценки параметров движения маневрирующего летательного аппарата // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 4, с. 450–457.
8. Костоготов А.А., Кузнецов А.А., Лазаренко С.В., Ценных Б.М. Анализ функционирования фильтра объединенного принципа максимума при сопровождении маневрирующей цели: сборник трудов «XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014» / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014, с. 3378–3383.
9. Костоготов А.А., Кузнецов А.А., Лазаренко С.В., Ценных Б.М. Численные методы в задачах синтеза вычислительных процедур при интеграции навигационных данных о движении беспилотного летательного аппарата на основе объединенного принципа максимума: сборник трудов «Международной научно-практической конференции «Транспорт-2014». Ростов-на-Дону, 2014, с. 67–69.
10. Костоготов А.А., Кузнецов А.А., Мурашов А.А. Сравнительная оценка характеристик фильтра объединенного принципа максимума и вариантов реализации фильтра Калмана при сопровождении маневрирующей цели // Радиотехника. 2014, № 8, с. 45–49.
11. Костоготов А.А., Кузнецов А.А., Лазаренко С.В., Ценных Б.М. Синтез фильтра сопровождения с адаптацией к маневру на основе объединенного принципа максимума: сборник материалов XXI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь. RLNC-2015» / Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. Т. 2, с. 668–679.
12. Костоготов А.А., Кузнецов А.А., Лазаренко С.В., Ценных Б.М. Совмещенный синтез адаптивного к маневру фильтра сопровождения // Радиотехника. 2015, № 7, с. 95–103.
13. Костоготов А.А., Кузнецов А.А., Лазаренко С.В. Экстраполятор с эффектом структурной адаптации: сборник докладов конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века С&Т-2015» / Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015, с. 409–419.
14. Костоготов А.А., Мурашов А.А. Синтез алгоритмов разделения цифровых потоков на основе объединенного принципа максимума: сборник материалов XXI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь. RLNC-2015» / Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. Т. 3, с. 1278–1284.

15. Костоглотов А.А. Метод идентификации параметров голономных систем на основе аппарата асинхронного варьирования // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2003. № 2, с. 86–92.
16. Дерюшев В.В., Костоглотов А.А., Кузнецов А.А. Вариационные принципы в задаче идентификации параметров динамических объектов // Наука – производству. 2004. № 2, с. 32–41.
17. Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В. Многопараметрическая идентификация конструктивных параметров методом объединенного принципа максимума // Инженерный вестник Дона. 2011. Т. 15. № 1, с. 208–218.
18. Устройство идентификации параметров динамических систем на основе вариационных принципов: пат. 2464615 Рос. Федерация. № 2011130583/08; заявл. 21.07.11; опубл. 20.10.12 г.
19. Костоглотов А.А. Методы многопараметрической идентификации динамических систем на основе объединенного принципа максимума: монография / РТИСТ ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС». Ростов-на-Дону, 2011. 103 с.
20. Дерябкин И.В., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Чеботарев А.В., Ценных Б.М. Метод идентификации параметров динамических систем на основе совмещенного с физическими принципами синтеза // Нелинейный мир. 2012. Т. 10. № 11, с. 801–809.
21. Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В., Андрашитов Д.С. Многопараметрическая вариационная идентификация динамических систем на основе объединенного принципа максимума // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 4, с. 68–76.
22. Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Андрашитов Д.С., Дерябкин И.В. Вариационный метод многопараметрической идентификации динамических систем на основе итерационной регуляризации // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 6, с. 67–72.
23. Костоглотов А.А., Кузнецов А.А., Андрашитов Д.С., Дерябкин И.В., Лазаренко С.В. Синтез алгоритма автономного управления математическим маятником на основе объединенного принципа максимума // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2010. № 3, с. 9–14.
24. Лазаренко С.В. Метод синтеза оптимального управления с использованием принципа Гаусса // Радиотехника. 2013. № 12, с. 37–43.
25. Коновалов А.С., Якимовский Д.О. Управление электроприводами космических аппаратов в особых режимах // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6, с. 26–31.
26. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994, 343 с.
27. Андрашитов Д.С., Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В., Ценных Б.М. Универсальный метод синтеза оптимальных управлений нелинейными динамическими системами // Инженерный вестник Дона. 2014. № 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2251> (дата обращения: 26.08.2015 г.).
28. Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В., Чеботарев А.В. Метод механико-математического синтеза при построении оптимального управления механическими системами // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6, 2012 г. Available at: <http://www.science-education.ru/106-7733> (дата обращения: 26.08.2015 г.).
29. Разоренов Г.Н. Метод синтеза законов «мягкого» и «сверхмягкого» управления конечным состоянием систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2013. № 2, с. 3–17.
30. Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Мурашев А.А. Метод структурно-параметрической идентификации инерциальных навигационных систем // Оборонная техника. 2014, № 5–6, с. 49–66.

References

1. Kostoglotov A.A., Kostoglotov A.I., Lazarenko S.V. (2010) *Ob "edinennyi printsip maksimuma v informatsionnykh tekhnologiyakh analiza i sinteza: monografiya. RTIST (fil.)* [The integrated principle of a maximum in information technologies of the analysis and synthesis: monograph. RTIST (Phil.). *GOU VPO «YuRGUES»* [Public Educational Institution of Higher Professional Training «YuRGUES»]. Rostov-on-Don, 165 p.
2. Kostoglotov A.A. (2007) *Ob "edinennyi printsip Pontryagina–Gamil'tona–Ostrogradskogo* [Integrated principle of Pontryagin-Hamilton-Ostrogradsky]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy*

region. *Seriya: Estestvennye nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Natural sciences], no. 6, pp. 13–17.

3. Verba V.S. (2014) *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniya. Printsipy postroeniya, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniya: monografiya* [Aviation complexes of radar patrol and targeting. Principles of construction, problem of development and feature of functioning: monograph]. *Radio-tehnika* [Radio engineering]. Moscow, 528 p.

4. Li X. Rong, Vesselin P., Jilkov A. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2003, vol. 39, no. 4, October. p. 1333–1364.

5. Farina A., Studer F. (1993) *Tsifrovaya obrabotka radiolokatsionnoy informatsii* [Digital processing of radar information]. *Radio i svyaz'* [Radio and communication]. Moscow, 320 p.

6. Blackman S.S., Popoli R.F. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Boston. MA: Artech House, 1999, 1229 p.

7. Kostoglotov A.A., Kostoglotov A.I., Lazarenko S.V. (2009) *Ob "edinennyi printsip maksimuma v zadachakh otsenki parametrov dvizheniya manevriruyushchego letatel'nogo apparata* [The integrated principle of a maximum in problems of an assessment of parameters of the movement of the maneuvering aircraft]. *Radiotekhnika i elektronika* [The Radio technician and the electronic engineer], vol. 54, no. 4, pp. 450–457.

8. Kostoglotov A.A., Kuznetsov A.A., Lazarenko S.V., Tsennykh B.M. (2014) *Analiz funktsionirovaniya fil'tra ob "edinennogo printsipa maksimuma pri soprovozhdenii manevriruyushchey tseli: sbornik trudov «XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014»* [The analysis of functioning of the filter of the integrated principle of a maximum at maintenance of the maneuvering purpose: the collection of works «XII All-Russian meeting on problems of management VSPU-2014»]. *Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN* [Institute of problems of management of V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences]. pp. 3378–3383.

9. Kostoglotov A.A., Kuznetsov A.A., Lazarenko S.V., Tsennykh B.M. (2014) *Chislennyye metody v zadachakh sinteza vychislitel'nykh protsedur pri integratsii navigatsionnykh dannykh o dvizhenii bespilotnogo letatel'nogo apparata na osnove ob "edinennogo printsipa maksimuma: sbornik trudov «Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Transport-2014»* [Numerical methods in problems of synthesis of computing procedures at integration of navigation data on the movement of the unmanned aerial vehicle on the basis of the integrated principle of a maximum: collection of works «International scientific and practical Transport-2014» conference]. Rostov-on-Don, pp. 67–69.

10. Kostoglotov A.A., Kuznetsov A.A., Murashov A.A. (2014) *Sravnitel'naya otsenka kharakteristik fil'tra ob "edinennogo printsipa maksimuma i variantov realizatsii fil'tra Kalmana pri soprovozhdenii manevriruyushchey tseli* [A comparative assessment of characteristics of the filter of the integrated principle of a maximum and options of realization of the filter of Kallman at maintenance of the maneuvering purpose]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], no. 8, pp. 45–49.

11. Kostoglotov A.A., Kuznetsov A.A., Lazarenko S.V., Tsennikh B.M. (2015) *Sintez fil'tra soprovozhdeniya s adaptatsiyey k manevru na osnove ob "edinennogo printsipa maksimuma: sbornik materialov XXI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz». RLNC-2015»* [Synthesis of the filter of maintenance with adaptation to maneuver on the basis of the integrated principle of a maximum: collection of materials of the XXI international scientific and technical conference «Radar-location, navigation, communication. RLNC-2015»]. *Izdatel'skiy dom VGU* [VSU publishing house]. Voronezh, vol. 2, pp. 668–679.

12. Kostoglotov A.A., Kuznetsov A.A., Lazarenko S.V., Tsennikh B.M. (2015) *Sovmeshchennyi sintez adaptivnogo k manevru fil'tra soprovozhdeniya* [The combined synthesis of the maintenance filter, adaptive to maneuver]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], no. 7, pp. 95–103.

13. Kostoglotov A.A., Kuznetsov A.A., Lazarenko S.V. (2015) *Ekstrapolyator s efektom strukturnoy adaptatsii: sbornik dokladov konferentsii «Kibernetika i vysokie tekhnologii XXI veka C&T-2015»* [Ekstrapolyator with effect of structural adaptation: collection of reports of the «Cybernetics and High Technologies of the XXI Century of C&T-2015»]. *Izdatel'skiy dom VGU* [VSU publishing house]. Voronezh, pp. 409–419.

14. Kostoglotov A.A., Murashov A.A. (2015) *Sintez algoritmov razdeleniya tsifrovyykh potokov na osnove ob "edinennogo printsipa maksimuma: sbornik materialov XXI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'. RLNC-2015»* [Synthesis of algorithms of division of digital streams on the

basis principle of a maximum: collection of materials XXI of the international scientific and technological conference «Radar-location, navigation, communication. RLNC-2015». *Izdatel'skiy dom VGU* [VSU publishing house]. Voronezh, vol. 3, page 1278–1284.

15. Kostoglotov A.A. (2003) *Metod identifikatsii parametrov golonomnykh sistem na osnove apparata asinkhronnogo var'irovaniya* [Metod of identification of parameters the holonomic systems on the basis of the device of an asynchronous variation]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], no. 2, pp. 86–92.

16. Deryushev V.V., Kostoglotov A.A., Kuznetsov A.A. (2004) *Variatsionnye printsipy v zadache identifikatsii parametrov dinamicheskikh ob'ektov* [The variation principles in a problem of identification of parameters of dynamic objects]. *Nauka – proizvodstvu* [Science – to production], no. 2, pp. 32–41.

17. Kostoglotov A.A., Kostoglotov A.I., Lazarenko S.V. (2011) *Mnogoparametricheskaya identifikatsiya konstruktivnykh parametrov metodom ob'edinennogo printsipa maksimuma* [Multiparametric identification of design data by method of the integrated principle of a maximum]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering bulletin of Don], vol. 15, no. 1, pp. 208–218.

18. *Ustroystvo identifikatsii parametrov dinamicheskikh sistem na osnove variatsionnykh printsipov: pat. 2464615 Ros. Federatsiya. № 2011130583/08; zayavl. 21.07.11; opubl. 20.10.12 g.* [The device of identification of parameters of dynamic systems on the basis of the variation principles: stalemate. 2464615 Dews. Federation, no. 2011130583/08; claim 21.07.11; Published 20.10.12].

19. Kostoglotov A.A. (2011) *Metody mnogoparametricheskoy identifikatsii dinamicheskikh sistem na osnove ob'edinennogo printsipa maksimuma: monografiya* [Methods of multiple parameter identification of dynamic systems on the basis of the integrated principle of a maximum: monograph]. *RTIST FGBOU VPO «YuRGUES»* [RTIST FGBOU VPO «YURGUES's»]. Rostov-on-Don, 103 p.

20. Deryabkin I.V., Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Chebotaryov A.V., Tsennikh B.M. (2012) *Metod identifikatsii parametrov dinamicheskikh sistem na osnove sovmeshchennogo s fizicheskimi printsipami sinteza* [Metod of identification of parameters of dynamic systems on the basis of the synthesis combined with the physical principles]. *Nelineynyy mir* [The Nonlinear world], vol. 10, no. 11, pp. 801–809.

21. Kostoglotov A.A., Kostoglotov A.I., Lazarenko S.V., Andrashitov D.S. (2012) *Mnogoparametricheskaya variatsionnaya identifikatsiya dinamicheskikh sistem na osnove ob'edinennogo printsipa maksimuma* [Multiparametric variation identification of dynamic systems on the basis of the integrated principle of a maximum]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [The Information and measuring and operating systems], vol. 10, no. 4, pp. 68–76.

22. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Andrashitov D.S., Deryabkin I.V. (2012) *Variatsionnyy metod mnogoparametricheskoy identifikatsii dinamicheskikh sistem na osnove iteratsionnoy regulyarnizatsii* [A variation method of multiple parameter identification of dynamic systems on the basis of iterative regularization]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of modern radio electronics], no. 6, pp. 67–72.

23. Kostoglotov A.A., Kuznetsov A.A., Andrashitov D.S., Deryabkin I.V., Lazarenko S.V. (2010) *Sintez algoritma avtonomnogo upravleniya matematicheskim mayatnikom na osnove ob'edinennogo printsipa maksimuma* [Synthesis of algorithm of an off-line control a mathematical pendulum on the basis of the integrated principle of a maximum]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Technical science], no. 3, pp. 9–14.

24. Lazarenko S.V. (2013) *Metod sinteza optimal'nogo upravleniya s ispol'zovaniem printsipa Gaussa* [Metod of synthesis of optimum control with use of the principle of Gauss]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], no. 12, pp. 37–43.

25. Konovalov A.S., Yakimovsky D.O. (2008) *Upravlenie elektroprivodami kosmicheskikh apparatov v osobykh rezhimakh* [Control of electric drives of spacecrafts in particular treatments]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Management information systems], no. 6, pp. 26–31.

26. Kolesnikov A.A. (1994) *Sinergeticheskaya teoriya upravleniya* [Synergistic Theory of management]. *Energoatomizdat* [Energoatom Publishers]. Moscow, 343 p.

27. Andrashitov D.S., Kostoglotov A.A., Kostoglotov A.I., Lazarenko S.V., Tsennikh B.M. (2014) *Universal'nyy metod sinteza optimal'nykh upravleniy nelineynymi dinamicheskimi sistemami* [Universal method of synthesis of optimum managements of nonlinear dynamic systems]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering bulletin of Don], no. 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2251> (date of the address: 26.08.2015).

28. Kostoglotov A.A., Kostoglotov A.I., Lazarenko S.V., Chebotaryov A.V. (2012) *Metod mekhaniko-matematicheskogo sinteza pri postroenii optimal'nogo upravleniya mekhanicheskimi sistemami* [Metod of the mechanic-mathematical synthesis at creation of optimum control of mechanical systems]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], no. 6. Available at: <http://www.science-education.ru/106-7733> (date of the address: 26.08.2015).

29. Razorenov G.N. (2013) *Metod sinteza zakonov «myagkogo» i «sverkhmyagkogo» upravleniya konechnym sostoyaniem sistem* [Metod of synthesis of laws of «soft» and «supersoft» management of a final condition of systems]. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Inf. Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], no. 2, pp. 3–17.

30. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Murashev A.A. (2014) *Metod strukturno-parametricheskoy identifikatsii inertial'nykh navigatsionnykh sistem* [Metod of structural and parametrical identification of inertial navigation systems]. *Oboronnaya tekhnika* [Defensive equipment], no. 5–6, pp. 49–66.