

УДК 621.3:519.2:535

Моделирование мехатронно управляемой динамической платформы с лазерной системой наведения для задач ориентирования и встреч космических аппаратов

Е. В. Ивойлов¹, С. М. Слободян², А. А. Цупин³, В. С. Деева⁴

¹аспирант, ²д. т. н., профессор, ^{3,4}к. т. н.,

Омский государственный технический университет

e-mail: zhekaiv@mail.ru, sms_46@ngs.ru, atsupin@mail.ru, veradee@mail.ru

Аннотация. Важная характеристика лазерных систем ориентирования космических аппаратов (КА) — размер пространства, в котором эффективно обнаружение объекта наблюдения. Узкая диаграмма направленности лазерного излучения является весомым фактором систем высокой точности. Этот фактор существенно затрудняет обнаружение объектов для их наведения в космическом пространстве ориентирования. Для увеличения пространства наблюдения лазерные системы устанавливают на динамические платформы. В работе проведен анализ модели N -координатной динамической платформы с лазерной системой ориентирования. Компьютерным моделированием исследована на модели $1D$ -координатной динамической платформы возможность увеличения пространства наблюдения лазерной системой с учетом влияния различных параметров.

Ключевые слова: метод, моделирование, эффективность, динамическая платформа, модель, оценка, грубое наведение, лазер, управление, пространство, система наведения, слежение

Simulation of the Mechatronic Dynamic Platform Equipped with Laser Navigation System to Operate the Spacecrafts

E. V. Ivoylov¹, S. M. Slobodyan², A. A. Tsupin³, V. S. Deeva⁴

¹postgraduate student, ²doctor of engineering science, professor,

^{3,4}candidate of engineering science,

Omsk State Technical University

e-mail: zhekaiv@mail.ru, sms_46@ngs.ru, atsupin@mail.ru, veradee@mail.ru

Abstract. The performance potential of optical and laser technologies offers the great challenge of using them in many industries and areas of science effectively. For example, high intensity precise directional electromagnetic radiation is factored into the test program with the use of a portable high-precision system. The most significantly factor is that laser targeting is used for the detection and tracking of dynamic objects of any shapes. To expand the field of vision the laser systems is installed in multimotion control platform. In this paper we propose a model of a N -degree-of-freedom motion platform. Also we investigate, using computational modeling and simulation, the potential of the $1D$ -motion platform to expand the field of vision of the laser systems and we receive influence from other variables.

Keywords: method, simulation, efficiency, dynamic platform, model, estimation, rough guidance, laser, control, space, guidance system, tracking

Введение

Освоение космического пространства для науки, экономики и обороноспособности, модернизация и разработка новой космической техники для многих отраслей российской промышленности важны и являются приоритетными. Ввиду большой плотности потока движения на орбитах космических аппаратов (КА) процедура обнаружения и измерения координат других объектов (спутников и их фрагментов) в космическом пространстве широко распространена. Она жизненно необходима для успешной реализации на этапе выполнения операций ориентирования, взаимного наведения и стыковки КА, обеспечения безопасности и долговечности их полетов на орбите. Современные требования к средствам измерения координат для перспективных КА значительно выше. Увеличение массы и габаритов космических объектов требуют повышения точности ориентирования и взаимного наведения в процессе их взаимного сближения и особенно для безопасности на этапе стыковки. Используемые в настоящее время радиотехнические системы имеют большие массу и габариты, кроме того, они чувствительны к явлениям переотражения и интерференции сигналов, опорных для ориентирования.

Для ориентирования объектов, в том числе сближением и стыковкой КА, кроме радиотехнических систем, используются лазерные системы [1–10]. Лазерные системы, в сравнении с радиотехническими, имеют меньшую массу и габариты, большую точность и разрешающую способность, лучшую помехозащищенность ввиду значительно меньшей длины волны, высокой монохроматичности и узкой диаграммы направленности лазерного излучения. Но наличие узкой диаграммы направленности лазерного излучения практически в полномасштабной сфере космического пространства ориентирования КА является сильным и весомым фактором, существенно затрудняющим быстрое вступление во взаимный контакт, для встречи и стыковки КА [1–6].

Проблемы лазерного ориентирования

Оптические и лазерные автоматические системы, выполняющие сначала сканирование про-

странства наблюдения для обнаружения в нем искомого объекта с последующим переходом в режим слежения за его перемещением, в наибольшей мере соответствуют для решения подобных задач [1–17]. Важная особенность автоматических систем [4–11, 15–17]: необходимость осуществления процедуры обнаружения искомого объекта на начальном этапе работы. Это определяет их способность к переходу в режим слежения, контроля и управления объектом и процессом наведения и стыковки КА. Поэтому для этого типа прецизионных лазерных и светодиодных систем важно обеспечение наибольшей эффективности на начальном этапе работы, именуемом режимом поиска и обнаружения. Требования к режиму поиска и обнаружения характеризуются [4, 6, 10–17] целью достижения наилучших вероятностных показателей обнаружения при наивысших чувствительности, помехозащищенности, точности, быстродействия. В конечном счете эффективность лазерных систем ориентирования определяется качеством их реализации и степенью оптимизации их параметров. Для увеличения поля наблюдения КА при обзоре лазерные системы могут быть установлены на динамические платформы [4, 5, 7, 18–21].

Динамические платформы: обзор состояния

Платформы выполняют на элементах, использующих различные физические принципы [4, 5, 7, 18–21]. Как силовые узлы они предназначены для перемещения в пространстве технических устройств. В основу работы элементов платформ кладут фундаментальные принципы пьезоэлектричества и электромагнетизма, а также электромагнитных и других физических явлений. Часто используют явления, вызванные действием электрического и магнитного полей, возникающих при протекании электрического тока управления с помощью элементов исполнения отдельных приводов.

Структура платформ — обобщение информации и опыта разработчиков динамических платформ (серии ДР, Муромского радиозавода и др.), принципы функционирования которых подробно изложены в технических источниках [4, 5, 18–21, 27].

Для оценки эффективности программного подхода имитации решения такой задачи, используя обобщенное представление структурных схем компоновки известных типов динамических платформ, в том числе отечественных, ниже исследована возможность применения для грубого наведения лазерной системы [4] на объект (КА) многокоординатной динамической платформы.

Цель работы

Цель исследования включала разработку векторного типа микропроцессорной (МП) мехатронной системы управления подвижной платформой с лазерной системой наведения на базе рекомендованных операционной средой известных средств разработки встроенного программного обеспечения серии процессоров [28–33]. При этом средства Simulink [30] использованы как основа для проектирования и имитации работы динамических лазерных систем ориентирования.

Анализ путей решения

Важнейшим направлением развития имитационных средств и устройств является разработка новых принципиальных решений построения программных, алгоритмических и компьютерных средств имитации того или иного процесса в системе, позволяющих более рационально решать задачи, связанные с имитацией и представлением этого информационного или физического процесса.

Задача сильно усложняется, когда в комплексе имитации приходится использовать виртуальное представление первичной информации разной физической природы. Это усложнение объясняется тем, что первичные преобразователи с различными принципами действия информационный сигнал о состоянии объекта наблюдения преобразуют в разные значения существенно отличающихся друг от друга параметров идентификации состояния объекта. По этой причине вопрос создания простых и надежных средств и алгоритмов имитации процессов и работы систем, обладающих достаточной точностью отражения реальности при высоком быстродействии

формирования, имитирующего процесс или систему, сигнала, до сих пор остается актуальным.

В качестве фактора, комплексно объединяющего разнородные преобразователи информации и разные системы, используется их математическое описание, учитывающее с наибольшей полнотой действие всех физических принципов, используемых для получения объединяемых в имитируемом средстве информационных сигналов и систем. Другими словами, для качественной программно-аппаратной имитации необходимо наличие адекватных реальности математических моделей процессов и систем [4, 28–33].

Ниже на виртуальном примере действия платформы по одной ($[x; y; z; v; t]$) или по углу места, азимуту, скорости движения и т. п.) из координат измерительной системы пространства наблюдения лазерной системой ориентирования объекта проведен анализ возможности практического функционирования программного имитатора обобщенного типа динамической платформы с лазерной системой. На базе стандартных [29–33] программных средств (например: Simulink, MatLab, протоколов обмена Ethernet, среды разработки встроенного программного обеспечения для сигнальных процессоров) в операционной среде Windows разработаны математические и компьютерные модели отдельных типов приводов, включая модели оригинальных пьезопроводов многомерного управления [22–27], для программной имитации работы динамической платформы. С применением некоторых оригинальных наработок [5–17, 22–28] выполнено имитационное моделирование функционирования платформы в разных режимах действия.

Современные имитаторы поведения динамических процессов и объектов обладают сложной структурой. Структурно для лазерных систем ориентирования [5–21] они многоуровневый программно-аппаратный комплекс [29–33]. Их совершенствование ведет к заметному ужесточению требований к качественным показателям лазерных систем, таким как точность, быстродействие и т. п. Для оценки эффективности выполнения поставленных требований к лазерным системам подход имитационного моделирования с использованием программных методов часто оказывается наиболее привлекательным.

Подобного рода система может быть реализована на основе привода для имитации влияния среды на деформирование волнового фронта излучения от подвижного объекта во время его движения. Другой вариант исполнения имитационного моделирования — с использованием принципа частотного управления действием мехатронного привода слежения за траекторией движения объекта на малой, с меньшей инерционностью, платформе с учетом вариаций динамических режимов движения объекта наблюдения. Реализация принципа разделения движений [4, 25] приводит к улучшению качества таких систем более простым, иногда и единственно возможным способом.

При проведении исследований методом программного имитационного моделирования желательно, чтобы лазерная система ориентирования и стыковки КА как управляющее устройство могло активно изменять параметры системы и поддерживать ее характеристики на требуемом качественном уровне. Этот уровень должен быть максимально приближен к теоретически предельно возможному или оптимальному.

Особенности варианта решения

Следуя требованиям, сформулируем задачи, программно решаемые имитатором грубого наведения, в следующей исследовательской постановке:

- формирование и исполнение сигналов задания скорости и ускорения по осям вращения динамической платформы должно производиться с учетом спектра влияния меняющегося внешнего возмущения;

- процедура моделирования учитывает вероятность возникновения скачков моментов инерции ввиду несовершенства механической системы;

- динамическая платформа должна обеспечивать двойную перегрузку воздействия по моменту исполнительного привода двигателя, в частном случае;

- работа исполнительного привода допускает кратковременное поддержание момента на заданном или требуемом уровне от его номинального значения.

Характерная особенность функционирования лазерных систем ориентирования и управления

стыковкой КА — при изменении управляющего или возмущающего воздействия существует пространственно обусловленное перекрестными связями [4] взаимовлияние автономных координатных приводов. Эта проблема особенно актуальна в работе системы с большим моментом инерции и высокой динамикой движения искомого КА. Проблема важна, поскольку целью управления лазерной системы ориентирования является слежение за перемещением и наведение КА на лазерный маяк по заданной траектории при действии возмущений любого типа. Другими словами, управление проводится с целью наиболее строго выполнения установленного технологического процесса. При этом по возможности следует исключать внешние межкоординатные перекрестные возмущения, обусловленные динамическими нагрузками, вызванные действиями подвижного КА при выполнении процесса лазерного наведения [4, 5].

Аппаратная часть моделируемой системы может быть представлена в виде обобщенной структуры динамической платформы с многокоординатным прецизионным приводом. В основе практически созданных в промышленности многокоординатных платформ применяют [18–21] как базовый тип частотно-управляемого электропривода, обычно выполняемого в комплексе «преобразователь частоты–асинхронный двигатель». В нашем случае для обеспечения прецизионности управления мы используем в цепи контуров управления параметрами лазерного пучка системы модели пьезоприводов [4, 5, 11, 22–27] как часть автономных приводов динамической платформы.

Для грубого наведения лазерных систем ориентирования целесообразно построение приводов по принципу автономности вложенных контуров оценки и управления. Принцип автономности вложенных контуров предусматривает распределение приоритета действия сигналов контуров оценки состояния измеряемых параметров, вкуче составляющих общую оценку состояния системы для формирования соответствующих сигналов управления ее состоянием. Распределение приоритета действия контуров управления основано на привлечении весового или равноценного ранжирования сигналов, формируемых в контурах управления системой. В этом подходе сущность принципа

распределения приоритета состоит в первоначальном весовом ранжировании контуров с дальнейшим принятием алгоритма формирования по данным индивидуальной оценки состояния каждым из контуров сигнала результирующего управления состоянием всей системы грубого наведения лазерной системы. Например, возможно применение [4] алгоритма «матрешки» — аддитивного сложения ошибок состояния контуров. Согласно сущности этого алгоритма [4, 25] в контуре с низшим приоритетом выделяется ошибка, которая затем вводится аддитивно в управляющее воздействие привода второй координаты как дополнительная составляющая. Следуя логике алгоритма матрешки, ошибка, выделенная в младшем по рангу приоритета i -м контуре, аддитивно подается в ближайший старший по рангу приоритета $(i + 1)$ -й автономный контур. Другими словами, каждый младший контур вложен в ближайший старший контур, а общий контур управления системой является аддитивной структурой автономных контуров всей системы наведения (структура «матрешки»). Принцип построения системы грубого наведения по алгоритму «матрешка» с многокоординатной системой приводов подобен созданию структуры комплексного N -координатного привода в виде известного построения системы подчиненного регулирования. В системах такого типа требуемая для управления характеристика каждого i -го контура формируется как для одиночного. Принцип подчиненного управления широко используется в моделировании систем и физических процессов. Создание многокоординатных систем управления на основе принципа «матрешки» с вложенными в нее автономными контурами имеет свои, определяемые свойствами конкретной системы наведения, особенности. Принцип «матрешки» и прост и сложен. В настоящее время он активно развивается и исследуется. Одна из особенностей принципа «матрешки» определена тем, что корректирующий i -ю координату в следующую $(i + 1)$ -ю координату подают с предшествующей координаты, причем отличающейся по физической трактовке координаты параметра управления. Принцип «матрешка» как подход управления относит многомерную структуру приводов [4, 22–27] к классу адаптивных систем с присущими им формами инвариантности.

Приведем некоторые особенности моделируемой структуры:

- степень приоритета и вес ранга контура определяется принципом функционирования лазерной системы ориентирования и наведения и условиями решаемой задачи;

- ранг приоритета координат учитывает их ортогональность в принятой системе координат работы лазерного средства;

- низший по рангу контур управления является автономным;

- согласно принятому принципу управления учитывается, что i -я координата является аргументом, а вторая $(i + 1)$ -я — его функцией, независимо от метода разложения траектории управления на управляющие функции (независимые, параметрические и т. п.);

- математические процедуры определения координат параметров и соответствующей оценки состояния контуров управления и всей системы в целом для формирования сигналов для каждого отдельного контура управления лазерного средства наведения как «матрешки» реализуются программным путем.

Алгоритм и модель решения

Кратко приведем вариант аналитического описания математической модели структуры с точки зрения реализации отработки аддитивных составляющих ошибки наведения в процессе имитационного моделирования. Размещение лазерной системы ориентирования на динамической платформе существенно расширяет пространство наблюдения КА путем осуществления процедуры грубого ее наведения на траекторию его движения. Лазерная прецизионная система на платформе становится электромеханической следящей системой, в общем смысле предназначенной для преобразования входного воздействия в перемещение инерционной нагрузки. Структура лазерной прецизионной системы на динамической платформе будет соответствовать обобщенной структуре системы автоматического управления.

Обозначим: $W(p)$, $V(p)$ — передаточные функции соответственно по управляющему и возму-

щающему воздействию координатных приводов; p — оператор Лапласа; индексы x, y, z — обозначения координат наблюдения в измерительной системе и системе управления КА; \mathbf{M} — вектор управления, определяет описание $m(p)$ и особенно траектория движения лазерной системы наведения при работе с КА; \mathbf{N} — вектор возмущений, определяет описание $n(p)$, включая шумы приводов и лазерной системы наведения. Формирование управляющего воздействия выполняет компьютер, МП-структура или специальный процессор управления. Другие обозначения, применяемые в описании модели, пояснены ниже.

Ошибка $\Delta(p)$ оценки рассогласования координат параметра в каждом отдельном (сепаратном) контуре управления определяется через передаточные функции контура

$$\Delta(p) = \frac{1}{1 + W(p)}m(p) + \frac{V(p)}{1 + W(p)}n(p), \quad (1)$$

$$W(p) = A(p)/B(p), \quad (2)$$

$$V(p) = C(p)/D(p), \quad (3)$$

где $A(p)$ и $B(p)$, $C(p)$ и $D(p)$ — соответствующие полиномы описания передаточных функций $W(p)$ — по управлению и $V(p)$ — по возмущению рассматриваемого сепаратного контура «матрешки».

Учтя в (1) представление полиномами (2) и (3), выражение ошибки рассогласования состояния сепаратного контура может быть представлено в виде

$$\Delta(p) = \frac{B(p)}{A(p) + B(p)}m(p) + \frac{B(p)V(p)}{A(p) + B(p)}n(p). \quad (4)$$

Заменив $A(p) + B(p) = E(p)$ и $K(p) = B(p) \times V(p)$ для упрощения соотношения (4), получим:

$$\Delta(p) \cdot E(p) = B(p)m(p) + B(p) \cdot V(p)n(p). \quad (5)$$

Математическая формализация, анализ и оценка многомерного координатной системы являются весьма громоздкими. Поэтому их рассмотрение и описание в излагаемой работе в дальнейшем, ввиду громоздкости, опустим.

Процедура адаптации управляющего воздействия низшего i -го ранга и последующей $(i+1)$ -й ко-

ординаты выполняется согласно физической и логической сущности реализации принципа «матрешка». Напомним, выше принята функциональная независимость способа закономерности разложения траектории управления на составляющие функции (младшая i -я координата принимается как аргумент функции описания $(i+1)$ -й координаты. Это позволяет предположить возможность, в частном случае, трех вариантов коррекции ошибок как управляющих воздействий для сепаратных координатных приводов:

- формирование и введение собственных компонентов в каждом сепаратном контуре;

- принятие иерархической итерационной структуры в части отработки ошибок по возмущению, включая внутренние факторы. Такой подход допускает, в отличие от классических систем итерационных процедур, введение ошибки предыдущего контура «матрешки» непосредственно в управляющее воздействие, а не в последующий контур;

- четкое выполнение принципа функционирования многокоординатной системы.

В последнем варианте в каждом предыдущем сепаратном контуре управления (или предыдущей совокупности контуров) процедура коррекции ошибки, вызванной возмущением, считается завершённой, а остаточная некомпенсированная ошибка в этом контуре (или совокупности контуров) от случайного временного возмущения поступает в следующий по рангу контур. При этом каждый последующий контур охвачен обратной связью по возмущению предшествующей координаты. По этому варианту структурная схема многомерной системы управления может быть представлена системой сепаратного описания (1)–(5) передаточных функций. Структура алгоритма реализации системы также зависит от функции изменения управляющего воздействия. Заметим, что формирование управляющих сигналов в некоторой степени также функция изменения возмущений. В общем случае, управляющий сигнал системы является интегральной, часто нелинейной квадратичной функцией соответствующих компонентов (статической δ_c , инерционной δ_i , динамической δ_d , вероятностной δ_b и т. п.) ошибки, определяющей качество управления.

Результаты практической реализации

При моделировании в качестве объекта управления принята динамическая платформа с k степенями свободы. Управление динамической платформой построено на базе протоколов Ethernet и осуществляется встроенным компьютером по локальной сети. Таким образом решалась задача программной реализации МП-средства управления лазерной системы ориентирования на базе широко известных аппаратно-программных средств [28–33].

Некоторые особенности устойчивого функционирования программно реализованного имитатора действия электромеханического средства грубого наведения лазерной системы приведены на рис. 1 и 2. Рис. 1 иллюстрирует старт-стопный пуск в движение платформы с лазерной системой при действии единичного скачка нагрузки в случайный момент времени на траектории установившегося движения платформы (тест единичного скачка или возмущения типа функции Хевисайда). Рис. 2 наглядно отражает результат устойчивости движения платформы с лазерной системой при действии дополнительного скачка нагрузки в произвольный момент времени на траектории установившегося движения платформы.

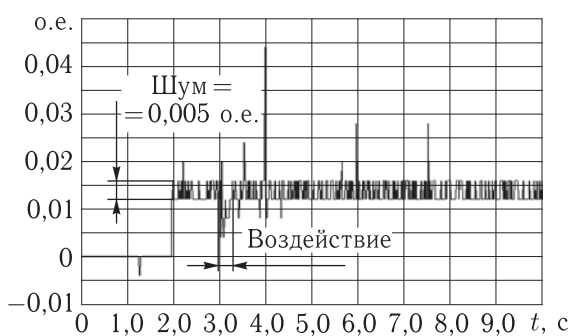


Рис. 1. Типичное поведение динамической платформы при старт-стопном тактовом пуске с действием приложения удвоенной нагрузки

Обобщим результаты проведенного исследования и оценки эффективности решения задачи увеличения размера пространства наблюдения КА на стадии ориентирования путем комплексирования лазерной системы с многомерной мехатронной

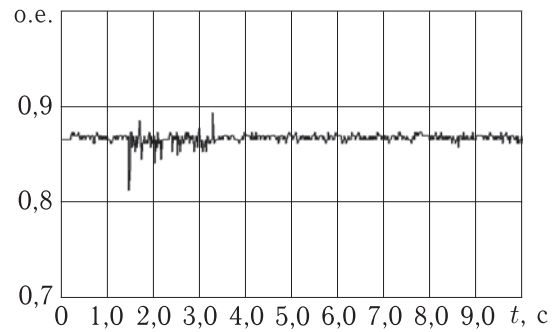


Рис. 2. Типичный переходный процесс по возмущению при движении платформы с действием приложения в произвольный момент времени удвоенной нагрузки

динамической структурой как средства поиска и обнаружения подвижных КА. Программная имитация работы грубого наведения комплексированного средства с действием процедуры поиска объектов лазерной системой, установленной на управляемую динамическую платформу, показала, с точки зрения устойчивости и управляемости, положительные результаты.

При моделировании комплексированной лазерной системы с электромеханической динамической платформой с учетом оценки влияния дополнительного возмущения выявлено повышение на единицу степени астатизма сепаратного контура для платформы с исполнительным электроприводом, передаточная функция которого по управлению имеет астатизм первого порядка, а по возмущению — нулевого. При этом статическая ошибка, обусловленная выявленным фактором дополнительного возмущения, стремится к нулевому значению. Усреднение невязок, обусловленное наличием интегрирующего звена в перекрестной обратной связи, также на единицу повышает порядок астатизма для этой компоненты сигнала управления. Анализ результатов показал, что выявленные при моделировании особенности существенно не изменяют свойств внутренних сепаратных контуров моделируемого электромеханического привода динамической платформы.

Заключение

В работе показана возможность программной реализации векторной системы управления

комплексированным лазерно-электромеханическим средством на примере имитации грубого наведения по одной из координат движения динамической платформы с лазерной системой ориентирования в режиме поиска и обнаружения КА как объекта. Алгоритм управления «матрешка» учитывает: влияние инерции при выдаче задания скорости и ускорения; исполнение задания скорости и ускорения по осям вращения динамической платформы, с учетом случайно меняющихся условий, обеспечивает двойную перегрузочную способность привода. Кроме того, алгоритм управления обеспечивает разгон, замедление, торможение вариацией параметров возбуждения привода и контроль границ поля поиска пространства наблюдения при изменении углового положения динамической платформы.

Список литературы

1. Романов А. А., Тюлин А. Е. Малоразмерные космические аппараты мониторинга подвижных объектов ОАО «Российские космические системы»: состояние и перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, № 1. С. 3–10.
2. Старовойтов Е. И. Использование лазерных систем в решении задачи встречи КА на орбите Луны // Авиакосмическое приборостроение, 2010, № 11. С. 12–17.
3. Жодзишский А. И., Нестеров О. В. Высокоточное определение в реальном времени относительного положения объектов по сигналам ГНСС // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, № 1. С. 27–33.
4. Слободян С. М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. Барнаул: Азбука, 2006. 224 с.
5. Цупин А. А., Слободян С. М. Лазерные средства навигационного оборудования для ориентирования подвижных объектов. М.: Мэйлер, 2013. 166 с.
6. Деева В. С. Метод покрытия кластерного пространства наблюдения // Доклады ТУСУРа, 2012, № 1, ч. 1. С. 253–258.
7. Слободян С. М., Цупин А. А. Многофункциональные визуально-инструментальные лазерные навигационные комплексы морского применения // Фундаментальные исследования, 2009, № 5–3. С. 102–103.
8. Деева В. С., Слободян С. М. Метод безопасного восприятия визуальной лазерной навигации // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2013, № 5. С. 64–70.
9. Слободян С. М. Лазерный створ дальнего действия для систем визуальной навигации // Датчики и системы, 2015, № 5. С. 32–35.
10. Слободян С. М., Цупин А. А. Лазерные навигационные системы автономных транспортных средств // Успехи современной радиоэлектроники, 1988, № 6. С. 13–20.
11. Слободян С. М. Анализ и оптимизация телевизионного принципа сканирования фазового пространства оптическим фазометром: 1. Поисковые траектории // Известия Томского политехнического университета, 2004, т. 307, № 6. С. 40–46.
12. Большанин А. А., Слободян С. М., Яковлев А. Р. Линейный фотоприемник с переменными параметрами // Приборы и техника эксперимента, 2009, № 6. С. 141.
13. Большанин А. А., Слободян С. М., Яковлев А. Р. Матричный фотоприемник с переменными параметрами // Приборы и техника эксперимента, 2009, № 6. С. 142.
14. Деева В. С., Слободян М. С., Слободян С. М. Детектор двумерных смещений // Приборы и техника эксперимента, 2011, № 5. С. 166–167.
15. Lukin V. P., Sazanovich V. M., Slobodyan S. M. Random image shifts during ranging in a turbulent atmosphere // Radiophysics and Quantum Electronics, 1980, v. 23, № 6. P. 484–490.
16. Volkov V. F., Peshel' A. K., Slobodyan S. M., Tyryshkin I. S. Registration of a pulsed laser beam by a matrix of charge-coupled devices // Instruments and Experimental Techniques, 1981, v. 24, № 6, pt. 2. P. 1522–1524.
17. Bol'shanin A. A., Slobodyan S. M., Yakovlev A. R., Vasil'eva L. A. Two-channel optical transducer for an industrial inspection system // Measurement Techniques, 1987, v. 30, № 10. P. 954–956.
18. Стенды динамические моделирующие. Методы и средства аттестации: ОСТ 01158-88. Введ. 01.01.89. М., 1984. 33 с.
19. <http://www.gosniias.ru/pages/stend.html>
20. Schwartz J. L., Hall C. D. System Identification of a Spherical Air-Bearing Spacecraft Simulator //

- AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Maui, Hawaii, February 2004. Art. № AAS 04-122. <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/papers/AAS04-122.pdf> (Дата обращения 22.02.2015.)
21. *Середкин В.П.* Динамические моделирующие стенды фирмы «Карко Электроникс». Обзор по материалам иностранной печати. НИЦ ГосНИИАС, 1993, № 7–8. 13 с.
 22. *Слободян М.С., Слободян С.М.* Консольный пьезопривод // Датчики и системы, 2003, № 3. С. 47–48.
 23. *Слободян М.С., Слободян С.М.* Трехкоординатный пьезопривод // Известия вузов. Приборостроение, 2004, т. 47, № 1. С. 32–36.
 24. *Слободян С.М.* Триангуляционный алгоритм трехмерного перемещения зеркала управляемой оптической системы // Метрология, 2003, № 8. С. 29–38.
 25. *Слободян С.М.* Многомерногоординатный привод микроуправления // Известия Томского политехнического университета, 2003, т. 306, № 5. С. 92–95.
 26. *Слободян М.С., Слободян С.М., Цупин А.А.* Широкоформатный лазерный створ // Известия Томского политехнического университета, 2007, т. 311, № 2. С. 34–39.
 27. *Slobodyan M.S., Slobodyan S.M., Tsupin A.A.* Optical deflector of a wave-front tilt corrector // Journal Optical Technology, 2008, v. 75, № 5. P. 301–305.
 28. *Деева В.С., Слободян С.М.* Метод повышения точности МП-датчиков // Электроника и электрооборудование транспорта, 2014, № 2. С. 46–47.
 29. *Черкесов Г.Н.* Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005. 479 с.
 30. *Дьяконов В.П.* Simulink: Самоучитель. М.: ДМК-Пресс, 2013. 784 с.
 31. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
 32. *Лазарев Ю.* Моделирование процессов и систем в MatLab: Учеб. курс. СПб.: Питер; Киев: Изд. группа БХВ, 2005. 512 с.
 33. *Морозов В.К., Рогачев Г.Н.* Моделирование информационных и динамических систем. М.: Академия, 2011. 384 с.