

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ПРИ АЭРОСЪЕМКЕ

Е.В. Каршаков

Рассмотрена задача управления пилотируемым атмосферным летательным аппаратом в процессе отработки различных полетных заданий. Выделены основные схемы управления при выполнении аэросъемочных работ. Дан сравнительный анализ современных систем управления. Приведены результаты разработки программного комплекса и его применения в аэросъемочных работах. Рассмотрены ключевые вопросы реализации алгоритмов управления.

Ключевые слова: управление процессом съемки, планирование траектории, переключение режимов управления, спутниковая навигационная система.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из традиционных задач управления движением — задача проводки управляемого объекта по априорно заданной пространственной траектории. Регуляторы для соответствующей системы управления могут строиться с применением критериев, требующих минимизации отклонения от заданной пространственной траектории, расхождения заданных и фактических скоростей и, возможно, ускорений. При выполнении аэросъемочных работ система управления может работать в нескольких режимах с различными критериями и переключение с одного режима на другой может происходить в моменты, не предусмотренные полетным заданием, по причине, зависящей не от качества управления, а от качества съемочного материала. Принимая во внимание такую возможность, разработчики иногда переходят к формированию управления, исходя из смены критериев управления в зависимости от сценария [1, 2]. Такой подход связан с задачей разработки системы сценариев и программированием задачи выбора текущего сценария.

Полетные задания, с которыми чаще всего приходится сталкиваться при промышленных аэросъемочных работах, можно отнести к двум типам. В случае площадной съемки площадь покрывается сетью параллельных маршрутов в двух взаимно перпендикулярных направлениях, расстояние меж-

ду которыми определяется масштабом съемки, и полетное задание заключается в последовательном прохождении маршрутов с минимальными боковым и вертикальным отклонениями. Переход от одного маршрута к следующему осуществляется на развороте за границами площади.

В случае съемки линейных объектов, таких как трубопровод, линии электропередач, дороги и т. п., полетное задание также сводится к последовательному прохождению прямолинейных участков траектории, однако переход от одного участка к другому зачастую может быть выполнен без разворота.

В аспекте развития систем управления проводкой историю промышленной аэросъемки можно разбить на несколько этапов. Первый этап — до развертывания глобальной спутниковой навигации. Тогда для выполнения кондиционной съемки на борту был необходим штурман-съемщик, который устно передавал необходимую информацию экипажу, сверяясь с известными ему ориентирами. Кроме того, съемочная аппаратура того времени требовала присутствия на борту человека-оператора, обеспечивающего ее работоспособность. Важнейшим рубежом для аэросъемки стало появление доступной спутниковой навигации, позволившей заменить штурмана-съемщика неким индикатором, указывающим пилоту его положение относительно программной траектории. Однако часть функций штурмана была делегирована борт-оператору. Именно он теперь следит за качеством

прохождения маршрутов, дает команды о необходимости нового захода на маршрут и т. п.

Следующий этап — исключение борт-оператора из процесса съемки. Это диктуется желанием минимизировать затраты на съемку, применяя аппаратуру минимальной массы и легкую авиацию. Понятно, что легкая авиация предъявляет более высокие требования к навигационному бортовому программному обеспечению. Следующим этапом должно стать применение беспилотной авиации. Однако сейчас применение легкой пилотируемой авиации кажется более предпочтительным по ряду причин. Это и проблемы, связанные с законодательной базой, и материальные затраты, которые на данном этапе выше на содержание беспилотных летательных аппаратов, чем на содержание, например, самолета «Cessna-172».

Таким образом, на данном этапе актуальны схемы управления, в которых информация о необходимости коррекции параметров движения передается пилоту через индикатор. Отметим, что в этом случае пилот становится элементом системы управления и появляется рассинхронизация элементов системы управления, которая выступает дополнительным возмущающим фактором [3]. Самый простой способ управления — показывать пилоту боковое и вертикальное отклонения на индикаторе типа «стрелка». Однако практически все, кто занимается съемкой, отказались от такой схемы проводки. Одна из главных причин — отсутствие угловой информации на таком типе индикаторов.

Еще один способ, наиболее популярный в настоящее время при аэрогеофизической съемке, — управление с помощью карты-панорамы. Пилот видит двумерное изображение местности (карту) и схему маршрутов на ней. В этом случае ему легче отслеживать траекторию летательного аппарата. Однако, чтобы «успокоить» машину на маршруте, пилоту самому надо оценить тенденцию движения, т. е. выработать вторичную навигационную информацию, такую как векторы скорости линейной и угловой, и учесть ее при управлении. Такая схема показывает себя вполне эффективной. Важный недостаток — большое время обучения пилота.

Существуют также подходы, в которых минимизируется количество визуальной информации пилоту с помощью стрелочного индикатора. Один из вариантов — вывод на индикатор вспомогательной информации, дающей энергетическую картину движения и позволяющей стабилизировать программную траекторию [4]. Другой вариант, уже применяемый в некоторых системах управления [5], — вывод на стрелку отклонения с учетом управле-

дения, которое рассчитывается с учетом текущего путевого угла и угловой скорости. Такой подход был реализован в программном обеспечении для аэрогеофизических комплексов [6]. Особенности алгоритмов, реализующих данный подход, и посвящена настоящая статья.

В работе не рассматриваются вопросы проводки по трехмерной траектории. В реальных алгоритмах управления по вертикали и в горизонтальной проекции разделены.

1. СТРУКТУРА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

Для решения задачи управления летательным аппаратом нужна высокоточная навигационная информация, обновляемая с достаточной частотой. При аэросъемочных работах всегда применяются приемники спутниковой навигационной системы с высокой частотой дискретизации и малой погрешностью позиционного решения, поскольку производится съемка достаточно крупных масштабов, требующая высокой детальности и большой точности привязки измерений.

На основе многолетнего практического опыта высокоточной проводки летательного аппарата при аэрогеофизических исследованиях ниже рассмотрены основные аспекты реализации методов управления траекторной проводкой. Имеет смысл выделить следующие принципиально различные фазы траекторного управления:

- на участке вывода объекта в район выполнения задачи;
- управление в режиме проводки по прямолинейному участку траектории;
- в режиме перехода с одного участка траектории на другой.

Практические задачи широкого класса могут быть решены путем последовательного переключения именно этих фаз управления.

Важнейший режим при выполнении полетного задания — проводка по заданной прямолинейной траектории. Предполагается, что подвижный объект уже находится в непосредственной близости от заданного отрезка и движется примерно параллельно ему. Как правило, здесь предъявляются высокие требования к точности следования заданному отрезку.

Другой режим, оказывающий влияние на экономические показатели выполнения съемки, — наведение на заданную точку с заданным курсом. Он может быть переходным между различными прямолинейными участками, и траектория движения в этом режиме криволинейная. Особенность данной фазы проводки состоит в вариативности типа траектории. Форма переходной кривой зави-



сит от начальных координат, начального направления движения объекта, координат точки нацеливания и требуемого направления полета в этой точке. Важно отметить, что при таком режиме возмущающие факторы могут влиять не только на точность сближения, но и на сам тип переходной траектории. Этот же режим должен обеспечить вывод летательного аппарата в район выполнения работы.

Еще одна особенность заключается в том, что в процессе выполнения полетного задания пилот по той или иной причине может перестать следовать указаниям индикатора. Поэтому алгоритм должен непрерывно адаптироваться к новым условиям. Обычно систему управления проводкой подвижного аппарата проектируют, исходя из предположения, что возмущающие факторы в процессе функционирования являются внешним по отношению к системе воздействием. В ряде случаев приходится иметь дело с преодолением внешних воздействий катастрофического характера. Примером такого рода воздействий можно считать, например, внезапное появление стаи птиц на пути летательного аппарата. Для отработки этой нештатной ситуации аппарат должен оперативно выполнить маневр, на короткое время прекращающий выполнение траекторной проводки. И хотя такой маневр завершится спустя всего лишь несколько секунд, положение и направление движения аппарата могут весьма значительно отклониться от расчетных.

Еще один вариант возникновения нештатной ситуации — нарушение в цепи информационного обеспечения системы управления. Например, возможно кратковременное пропадание видимости спутников. Поведение системы управления и в этом случае также должно оставаться адекватным.

1.1. Алгоритм прямолинейной проводки

Основным параметром для построения алгоритма управления при прямолинейной проводке выбирается боковое уклонение x , поскольку именно эта величина служит критерием оценки качества выполнения съемки. Величина, подаваемая на указатель пилота, должна обеспечивать возможность минимизации уклонения x . За основу взят алгоритм классического ПИД-регулятора [7]:

$$u_j = k_p x_j + k_i \sum_{n=0}^j x_n + k_d (x_j - x_{j-1}), \quad (1)$$

где j — номер шага согласно отсчетам спутниковой навигационной системы, k_p , k_i и k_d — коэффициенты усиления для пропорциональной, интеграль-

ной и дифференциальной составляющих, u_j — величина, которая подается на индикатор пилота.

Для реализации в бортовом программном обеспечении соотношение (1) записывается в рекуррентной форме:

$$u_j = u_{j-1} + k_p (x_j - x_{j-1}) + k_i x_j + k_d (x_j - 2x_{j-1} + x_{j-2}). \quad (2)$$

Данный алгоритм имеет определенный физический смысл. Величина u_j представляет собой умноженное на некоторый коэффициент K прогнозируемое боковое уклонение с учетом текущих значений скорости и ускорения, длина прогнозируемой траектории при этом определяется коэффициентами k_p и k_d . Наличие интегрального члена регулятора, помимо прочего, обеспечивает сглаживание координат прогнозируемого положения. Дело в том, что в формулу (2) входит боковое уклонение x , вычисленное с учетом измеренных спутниковой навигационной системой координат, а также его первая и вторая разности. Погрешность измерения координат приводит к появлению шумовой составляющей величины u_j , влияние которой уменьшается при интегрировании.

Общий коэффициент пропорциональности K можно интерпретировать как $K = 1/\Delta L$. Тогда u_j является тангенсом угла между направлением на прогнозируемую точку и направлением на точку-аттрактор, находящуюся на линии программной траектории, отнесенную на расстояние ΔL вперед по ходу движения.

Теперь стоит учесть тот факт, что алгоритм должен привести летательный аппарат на маршрут с нужным направлением из любой, сколь угодно удаленной точки. При использовании формы (2) на большом удалении от маршрута индикатор будет «на упоре», что не пригодно для работы, так как пилоту нужно знать направление сближения с маршрутом. Поэтому было решено на индикатор подавать сигнал, пропорциональный не тангенсу угла, а самому углу. В этом случае при очень большом удалении $D \gg \Delta L$ индикатор будет «вести» пилота по направлению, примерно ортогональному маршруту, а при сближении будет плавно выводить на маршрут.

Для ограничения времени влияния интегрального члена регулятора был применен логарифмический фильтр

$$u_j = (1 - \lambda)u_{j-1} + \lambda \arctg\{k_p (x_j - x_{j-1}) + k_i x_j + k_d (x_j - 2x_{j-1} + x_{j-2})\}, \quad (3)$$

где $\lambda \ll 1$ — коэффициент логарифмического фильтра. Очевидно, что при малом боковом от-

клонении это соотношение эквивалентно формуле (2) с точностью до коэффициента λ .

Такой алгоритм при адекватном подборе коэффициентов обеспечивает эффективное сближение с программной линией. Коэффициенты соотношения (3) вычисляются как функции следующих параметров:

- время реакции пилота;
- съемочная скорость летательного аппарата;
- рабочий крен при маневре;
- длина ΔL выноса аттрактора;
- масштаб съемки.

1.2. Алгоритм управления на переходной траектории

Переходная траектория не может быть фиксированной, в каждый момент времени она вычисляется с учетом текущих параметров движения и параметров, требующихся для захода на маршрут.

В наиболее общем случае программная траектория строится из четырех участков: начальный вираж, промежуточный отрезок прямой, завершающий вираж и завершающий отрезок прямой. Наличие четвертого участка создает запас общей длины траектории на случай неидеального следования пилотом показаниям индикатора и дает возможность «успокоить» машину после выхода из завершающего виража. Входные параметры для расчета траектории:

- съемочная скорость летательного аппарата;
- рабочий крен при маневре;
- длина завершающего прямолинейного участка;
- координаты летательного аппарата;
- координаты начала маршрута;
- курс маршрута.

Поскольку траекторий может быть несколько, выбирается кратчайшая. В точках перехода с одного из вариантов переходной траектории на другой до определенного момента выбор делается в пользу текущей кривой, а не кратчайшей.

Для алгоритма управления используется ПИД-регулятор, аналогичный описываемому формой (2), однако основным параметром служит не боковое, а угловое отклонение от курса программной траектории α .

1.3. Переключение режимов управления

В алгоритме управления проводкой летательного аппарата выполняются три варианта переключений:

- с траектории захода на прямолинейный участок;
- с прямолинейного участка на траекторию захода;

— с прямолинейного участка на прямолинейный участок.

Первый из них осуществляется при выполнении условий на максимальное боковое отклонение согласно техническому заданию на съемку. Второй — при пересечении траверса конца маршрута.

Третий вариант переключения возможен, когда два участка маршрута имеют общую точку, и направления этих участков расходятся не сильно. Физические параметры, вошедшие в настройки алгоритма прямолинейной проводки, позволяют оценить максимальное боковое отклонение от маршрута, если будет осуществлено переключение на проводку по следующему участку до пересечения траверса конца текущего участка. Если размер этого отклонения не противоречит техническому заданию, то в момент перехода точки-аттрактора через точку сопряжения двух участков, выполняется переключение на проводку по следующему отрезку. В противном случае выполняется заход на новый отрезок с разворотом после пересечения траверса конца текущего участка.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ

Описанные алгоритмы управления были реализованы в бортовом программном обеспечении NavDat для аэрогеофизических комплексов [8], разработанном с участием группы авторов [6]. Алгоритмы показали свою работоспособность на различных летательных аппаратах при самых высоких требованиях к точности выполнения полетного задания. Программа NavDat в течение нескольких лет успешно применяется при выполнении различных видов аэросъемочных работ.

Программа NavDat включает в себя алгоритм имитации полета, который позволяет анализировать влияние различных факторов на качество управления.

2.1. Результаты моделирования управления на прямолинейном участке

Процесс управления моделировался в целях изучения влияния параметров настроек алгоритма на прямолинейном участке. Параметры движения задавались близкими к рабочим параметрам полета самолета Ан-2:

- время реакции пилота 2 с;
- съемочная скорость летательного аппарата 40 м/с;
- рабочий крен при маневре 10° (радиус разворота ~ 900 м);
- длина ΔL выноса аттрактора 750 м.

Влияние баланса между временем реакции пилота и длиной выноса аттрактора можно просле-

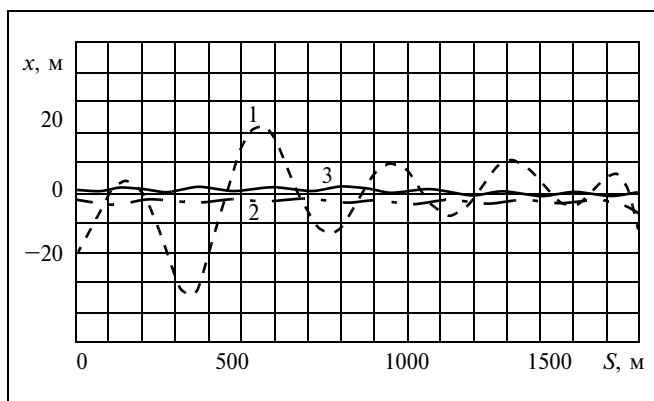


Рис. 1. Боковое уклонение x при движении вдоль прямолинейного участка S в нормальном режиме: 1 — $\Delta L = 100$ м; 2 — $\Delta L = 3000$ м; 3 — $\Delta L = 750$ м

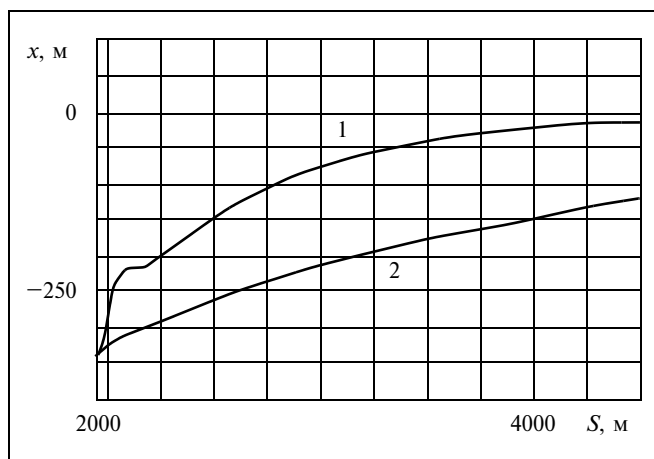


Рис. 2. Боковое уклонение x при движении вдоль прямолинейного участка S после воздействия возмущений: 1 — $\Delta L = 750$ м; 2 — $\Delta L = 3000$ м

дить на рис. 1. Когда длина выноса приближается к расстоянию, соответствующему времени реакции пилота и составляющему $2 \text{ с} \times 40 \text{ м/с} = 80 \text{ м}$, то качество управления существенно падает.

Однако, значительное увеличение ΔL также не выгодно. При внешних возмущениях может произойти существенное отклонение от линии маршрута. Скорость, с которой летательный аппарат вернется на маршрут, зависит от ΔL . Это иллюстрирует рис. 2.

Длительность периода колебаний, которая присутствуют в графике бокового уклонения на рис. 1, обусловлена, с одной стороны, наличием зоны нечувствительности к показаниям индикатора, которая введена в алгоритм имитации полета, а с другой — коэффициентом фильтра λ (весом интег-

рального члена в уравнении регулятора), значение которого определяется параметрами шума навигационного решения бортовой спутниковой навигационной системы.

2.2. Результаты летных работ

На рис. 3 приведены результаты вылета, полученные на вертолете Ми-8 при электромагнитных съемках масштаба 1:25 000, 250 м между маршрутами, по двум разным схемам управления: по карте-панораме (а) и по стрелочному указателю, управляемому программой NavDat (б). Видно, что во втором случае проводка по маршрутам и заход выполнены аккуратнее.

Среднеквадратичное отклонение от программной траектории при управлении с помощью стрелочного указателя составляет 2,5 м, что соответствует требованиям съемки масштаба 1:1000 (10 м между маршрутами), а с помощью карты-панорамы — 18 м, это удовлетворяет условиям съемки только масштаба 1:10000 (100 м между маршрутами).

На рис. 4 показана фактическая линия пути, полученная при переключении режимов управления с одного прямолинейного участка на другой в процессе тепловой инфракрасной съемки линий электропередач на легкомоторном самолете «Cessna-172». Максимальное боковое уклонение составило 35 м при допустимых 70 м.

В целом бортовая программа, реализующая рассматриваемые алгоритмы, показала себя надежным универсальным средством для выполнения аэросъемочных работ разного уровня сложности на целом ряде пилотируемых летательных

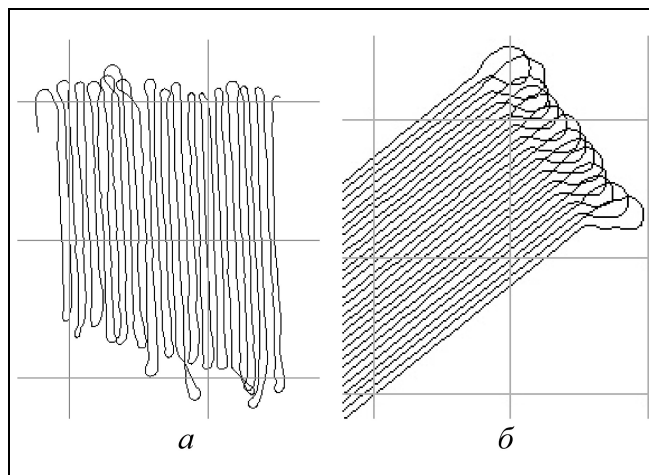


Рис. 3. Фрагмент фактических линий пути при управлении с применением: а — карты-панорамы; клетки 5×5 км; б — стрелочного указателя

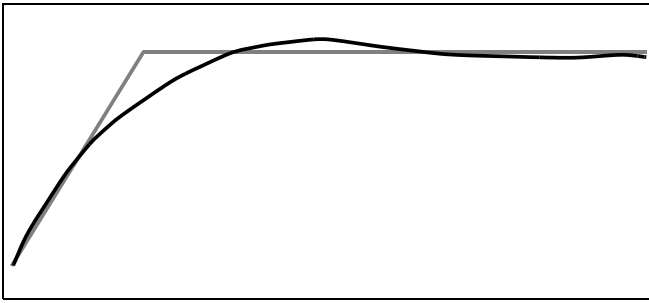


Рис. 4. Фактическая линия пути (черная) при переходе с одного прямолинейного участка программной траектории на другой (светлая линия)

аппаратов. Это и аэрофотосъемка, и аэрогеофизическая съемка с выпускными и буксируемыми системами и без таковых. В качестве носителей использовались вертолеты Ми-2, Ми-8, «Eurocopter AS350», самолеты Ан-2, Ан-3, «Cessna-172» и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе детального анализа различных сценариев выполнения полетных заданий систематизированы сценарии траекторного управления, в результате удалось выделить общие принципы построения траекторий проводки летательного аппарата. Задача выполнения полетного задания разбита на подзадачи, к которым относятся управление движением летательного аппарата вдоль заданной прямой с минимизацией параметра бокового отклонения, управление движением по круговой траектории (скорректированный разворот) с минимизацией отклонения вектора скорости от направления касательной к заданной окружности. В свете предложенного подхода различные типы полетных заданий представляют собой последовательный переход из одной фазы проводки в другую.

Для реализации алгоритмов, учитывающих возможное влияние дестабилизирующих факторов, потребовалась разработка методов динамического расчета переходных участков траекторий. В качестве исходных параметров переходного участка приняты координаты начальной текущей точки и точ-

ки нацеливания, а также текущего вектора скорости и вектора направления отрезка нацеливания.

На основе выбранных принципов разработано бортовое программное обеспечение NavDat. Программа работает под управлением операционной системы LINUX. Алгоритмы управления проводкой составляют лишь часть программного комплекса, который, помимо этого, решает задачи записи и контроля данных всего аэросъемочного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенко Н.И., Крючковский Д.А., Маломуж Т.В. Методы снижения влияния факторов субъективности и неопределенности в системах поддержки принятия решений // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. — 2003. — № 1 (11). — С. 116—120.
2. Шерстюк В.Г. Формальная модель гибридной сценарно-прецедентной СППР // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. — 2004. — № 1 (13). — С.114—122.
3. О рассинхронизированных по измерениям системах управления / В.Г. Борисов и др. // Автоматика и телемеханика. — 1997. — № 3. — С. 98—112.
4. Павлов Б.В., Шевченко А.М. Средство информационной поддержки пилота на этапах взлета и посадки // Изв. ЮФУ. Технические науки. — 2011. — № 3 (116). — С. 206—214.
5. Гулько Ф.Б., Новосельцева Ж.А. Решение нестационарных задач фильтрации и упреждения при произвольной помехе методами моделирования // Автоматика и телемеханика. — 1966. — № 10. — С. 153—168.
6. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Управление проводкой атмосферного летательного аппарата // Сб. материалов VI всеросс. науч.-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления». — Таганрог, 2011. — С. 57—62.
7. O'Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998—2002: a survey // Proc. of the American Control Conference. — Denver, Colorado, 2003. — P. 1494—1499.
8. Система навигации и сбора данных NavDat. — URL: http://www.gtcomp.ru/ru/products/navdat_ru.html (дата обращения 10.01.2012).

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Каршаков Евгений Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
☎ (495) 334-90-80, ✉ karshak@mail.ru.

Поздравляем

автора нашего журнала д-ра физ.-мат. наук **Анатолия Ивановича Яшина** с присуждением премии имени Mindel C. Sheps за 2012 год, присуждаемой Population Association of America (РАА) за выдающийся вклад в математическую демографию, методологию демографии, моделирование и анализ популяционных данных. Работы, отмеченные премией, были начаты в Институте проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова.

Подробнее на сайте <http://www.mpocok.narod.ru/>