

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СЛЕДОВАНИЯ БПЛА ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ПРИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ МЕТОДОМ SPSA

К. С. Амелин^{1*}, О. Н. Граничин¹, В.С. Мальцев¹, С. Ф. Сергеев^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ),

Санкт-Петербург, Российская Федерация

*k.amelin@spbu.ru

²Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),

Санкт-Петербург, Российская Федерация

(Материал поступил в редакцию 30 августа 2021 года)

Аннотация

Одним из основных направлений применения БПЛА является сбор данных с точной их привязкой к выбранной системе координат (например, при аэрофотосъемке). При этом важно не только записывать точные координаты сбора данных, но и обеспечить минимальное отклонение БПЛА от заданного маршрута в условиях действия на него внешних возмущений (ветровых нагрузок). В статье предлагается процедура оценки скорости и направления ветра, с использованием метода SPSA. Представлены результаты имитационного моделирования работы алгоритма, которые подтверждены при натурных испытаниях на сверхлегком БПЛА.

Ключевые слова: система управления БПЛА, рандомизированные алгоритмы, фильтр Калмана, глобальная система позиционирования, методы предсказания случайного процесса.

Благодарности: Исследование поддержано Санкт-Петербургским государственным университетом, проект № 73555239.

IMPROVING THE ACCURACY OF FOLLOWING THE UAV ALONG A GIVEN TRAJECTORY UNDER WIND LOADS BY THE SPSA METHOD

Konstantin S. Amelin^{1*}, Oleg N. Granichin¹, Vladimir S. Malzev, Sergey F. Sergeev^{1,2}

¹Saint Petersburg University, Saint Petersburg, Russia,

k.amelin@spbu.ru

²Peter the Great Saint Petersburg Polytechnical University (SPbPU), Saint Petersburg, Russia

(Received 30 August on 2021)

Abstract

One of the main areas of UAV application is the collection of data with their exact binding to the selected coordinate system (for example, aero photography). In this case, it is important not only to get the exact coordinates of data collection, but also to ensure the minimum deviation of the UAV from the path under the conditions of external disturbances (wind loads) acting on it. In the article a procedure for assessing wind speed and direction using the SPSA method is proposed. The results of simulation modeling of the algorithm's operation which are confirmed during field tests on an ultralight UAV are presented.

Keywords: UAV control system, randomized algorithms, Kalman filter, GNSS, random process prediction methods.

Acknowledgements: This research is supported by St. Petersburg State University, project no. 73555239.

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все чаще применяются при решении различных практических задач. Для осуществления автономного полета в память бортового автопилота БПЛА записывается маршрут полета в виде набора точек в пространстве, по которым выполняется навигация. Успешное выполнение прикладных задач, таких как проведение аэрофотосъемки местности, зависит от точности позиционирования и соблюдения заданных траекторий движения по маршруту. Для определения положения в пространстве автопилот БПЛА использует данные одной или нескольких глобальных спутниковых систем позиционирования GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), BeiDou (Китай), Galileo (Евросоюз) в комбинации с данными инерциальной навигационной системы (ИНС). В ИНС входит набор сенсоров, которые используют свойства инерции аппарата (линейное ускорение, угловая скорость, магнитный азимут) для отслеживания и определения его положения в пространстве. В связи с ограничениями по энергопотреблению, габаритам и весу, которые накладываются на бортовое оборудование БПЛА, бортовые ИНС имеют относительно небольшую точность и со временем накапливают значительную погрешность, поэтому их применение ограничивается поддержанием текущего равновесия. Для позиционирования используются только данные с датчика глобальной системы навигации, которые поступают в дискретные моменты времени и часто содержат погрешности. Существенное влияние на полет оказывают также динамические характеристики БПЛА и качество работы датчиков, установленных на нем. Вместе с тем существуют внешние случайные воздействия на БПЛА в виде ветровой нагрузки, поэтому направление движения и скорость аппарата могут колебаться. Для сглаживания возникающих ошибок применяют различные линейные фильтры, среди которых наиболее популярным является фильтр Калмана и его варианты [1]. Однако такие фильтры недостаточно хорошо справляются с ошибками, у которых математическое ожидание не равно нулю [2]. К возникновению смещенной ошибки приводит также воздействие ветра. Одним из способов улучшить работу фильтра Калмана в такой ситуации является применение рандомизированных методов [3], в частности метода стохастической аппроксимации одновременных возмущений (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, SPSA) [4]. При его использовании предполагается намеренно выводить систему из состояния равновесия с целью противодействия случайным воздействиям. В данном методе заложена математическая структура, позволяющая оценивать их стохастические свойства также для задач оптимизации, подверженных шуму и неопределенностям. Благодаря этим свойствам SPSA применяют для оптимизации многих задач адаптивного управления, например, для управления группой БПЛА [5] и настройки сложных, крупномасштабных моделей [6].

В статье предлагается расширить полученные в [7] результаты применения метода SPSA для противодействия случайным изменениям силы и направления ветра, а также разработать модуль оценки ветра, базирующийся на данном методе, для апробации на реальном БПЛА.

Методы следования траектории движения БПЛА

Алгоритмы поддержания траектории

Точное следование по заданной траектории является это одним из основных требований к БПЛА. Пример управления с обратной связью для задачи отслеживания пути колесного мобильного робота приведен в работе Samson Claude (1993) [8].

Стратегии решения проблемы следования заданной траектории можно разбить разбиваются на две группы: геометрические и теоретические.

Геометрические методы представляют собой преследование целевой точки [9], законы наведения в пределах прямой видимости Line-Of-Sight (LOS) [10,11], а также их комбинации [12]. Такие алгоритмы используют виртуальную целевую точку Virtual Target Point (VTP). Законы наведения предписывают БПЛА преследовать VTP, которая в конечном итоге приводит его на

заданную траекторию. Расстояние между VTP и положением БПЛА, проецируемым на траекторию, называется виртуальным расстоянием. Стабильность законов наведения LOS существенно зависит от выбора параметра виртуального расстояния [13]. Законы преследования и наведения в прямой видимости могут быть объединены для создания нового закона наведения для следования по пути [12]. Вместо использования преследования или наведения в прямой видимости в [14] был разработан закон нелинейного наведения Non-Linear Guidance Law (NLGL) с использованием VTP. Обычно законы следования по пути выводятся из анализа устойчивости по Ляпунову, гарантирующего глобально устойчивую сходимость к желаемому пути. Другой вариант векторного поля предложен в [15], которое называется наведением касательного векторного поля. Развитие данного метода, способного обрабатывать медленные изменения ветра приведено в [13].

Теоретические методы управления, в частности, методы нелинейного управления, популярны для приложений отслеживания пути. Они обеспечивают определенную устойчивость к ветровым возмущениям. Общий подход, используемый при отслеживании пути, основанный на управлении Пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД) регулятором [16], но не работает не так хорошо, как NLGL [14].

Известно еще несколько типов теоретико-управляющих методов, которые были разработаны для решения задач следования БПЛА по заданному маршруту. Некоторые из них хорошо известные методы — это линейно-квадратичный регулятор (LQR) [17], управление скольльзящим режимом [20], управление с прогнозированием модели [19], управление с шагом назад [20], теории планирования усиления [21] и динамического программирования [22], а также управление на основе кусочно-аффинных функций [23].

Фильтрация ошибок при измерении смещения

Ошибки или неопределенности в управляющем сигнале обычно представляют собой случайный процесс. Задача предсказания такого случайного процесса наиболее типична для калмановской фильтрации, которая базируется на работах Р. Е. Калмана и Р. С. Бьюси [24]. Помимо статистических существуют минимаксные постановки задач. В них предполагается, что неопределенности лишь ограничены в некотором смысле, в остальном они могут быть произвольными. В таких постановках при заранее известном уровне возмущений получают предсказания в виде множеств, размеры которых стабилизируются со временем [25]. При этом нет возможности получить обоснованные точные оценки. Дальнейшее практическое использование оценок-множеств ведет к сложным задачам робастной устойчивости [26].

Задача определения ошибки усложняется низким ~~малым~~ разнообразием входных данных. Возможность добавить особый сигнал в системе управления может облегчить проблему реконструкции неизвестных параметров. Например, в [27] серия одиночных импульсов во входном канале позволила восстановить импульсную функцию объекта. Кроме того, специальные рандомизированные сигналы во входном канале дают возможность определить параметры объекта управления, при рассмотрении модели объекта с почти произвольными аддитивными помехами. Процедура, предложенная в [28,29], работает для любых помех и не требует априорных знаний об их характеристиках. Восстановление неизвестных значений параметров обеспечивается свойствами рандомизированных тестовых сигналов, которые добавляются в контуре управления к собственным сигналам адаптивного управления, поступающим от обратной связи.

Методы измерения параметров ветра при полете БПЛА

Для оценки параметров ветра при полете БПЛА применяют несколько методов, которые условно можно разделить на две группы: с использованием специальных датчиков и без них. Одним из методов измерения трехмерного ветра является алгоритм с использованием зонда с несколькими отверстиями multi-hole-probe algorithm (МНРА) [30], в сочетании с данными об ориентации и положении БПЛА в пространстве, и его скорости. Достижимые высокое разрешение и точность этого метода требуют точного и быстрого ИНС, а также измерения

давления с помощью зондов с несколькими отверстиями. В [31] описан алгоритм трубки Пито Pitot Tube Algorithm, (PTA), который не требует зонда с несколькими отверстиями, а только статической трубки Пито для измерения динамического давления, что делает его менее сложным и дорогим. Скорость ветра можно оценить без датчиков потока воздуха на борту, например, с помощью алгоритма NFSA (no-flow-sensor algorithm), опубликованного в [32]. NFSA использует только информацию о путевой скорости и азимуте траектории полета, получаемые от GNSS. Методы без использования специальных датчиков являются более сложными, но при этом экономически выгодными сравнению с предыдущими. На рассматриваемом в данной работе БПЛА с фиксированным крылом, использован алгоритм трубки Пито, как компромисс между стоимостью, сложностью и точностью получаемых данных.

Адаптивный рандомизированный алгоритм

В этом разделе представлен краткий обзор основных концепций, связанных с алгоритмом SPSA, более подробные технические детали описаны в соответствующей литературе [4].

Рассмотрим задачу поиска минимума дифференцируемой функции потерь:

$$L_n(\theta) : R^p \rightarrow R,$$

(нижний индекс n используется для того, чтобы показать, что на функцию потерь влияет шум, распределение которого должно удовлетворять нескольким важным условиям [40])

Существует множество стохастических алгоритмов, которые могут использоваться, чтобы найти такое приближение θ (скажем θ^*), при котором $L_n(\theta)$ минимальна. Метод SPSA вычисляет приближение θ на итерации $k + 1$ следующим образом:

$$\theta_{k+1} = \hat{\theta}_k - a_k \hat{g}_k(\hat{\theta}_k)$$

где g_k — оцениваемый градиент на k -й итерации и a_k — коэффициент, который планируется уменьшать с каждой итерацией

$$a_k = \frac{a}{(k + A)^\alpha}$$

где a , A и α — заранее выбранные коэффициенты конфигурации. Для оценки $\hat{g}_k(\cdot)$ используется следующий метод "одновременных возмущений". Пусть $\Delta_k = [\Delta_{k1} \Delta_{k2} \dots \Delta_{kp}] \in R^p$ вектор независимых случайных величин с нулевым средним (удовлетворяющих условиям, описанным в [4]), и пусть последовательность векторов Δ_k — независимая последовательность с Δ_k независимыми от $\hat{\theta}_{i,j} = 0, 1, \dots, k$. Базовый метод SPSA (bSPSA) вычисляет две новые точки в пространстве решений и оценивает соответствующие потери следующим образом

$$\begin{aligned} y_k^+ &= \hat{L}_n(\theta_k + c_k \Delta_k) \\ y_k^- &= \hat{L}_n(\theta_k - c_k \Delta_k), \end{aligned}$$

где c_k — последовательность коэффициентов:

$$c_k = \frac{c}{(k + 1)^\gamma},$$

где c и γ — положительные коэффициенты конфигурации. Далее оценка градиента на k -й итерации вычисляется по следующей формуле:

$$\hat{g}_k(\hat{\theta}_k) = \frac{y_k^+ - y_k^-}{2c_k} [\Delta_{k1}^{-1} \Delta_{k2}^{-1} \dots \Delta_{kp}^{-1}]^T.$$

Следует отметить, что все элементы вектора θ возмущены одновременно, и что только две меры потери необходимы для оценки градиента независимо от размера $\hat{\theta}$. На практике последовательность Δ_k независимо генерируют по распределению Бернулли, дающему ± 1 с вероятностью $1/2$ для каждого значения. При этом возмущения имеют одинаковую амплитуду для всех составляющих θ . Было доказано [4], что при определенных условиях $\hat{g}_k(\cdot)$ как оценка $g_k(\cdot)$, стремится к нулю при $k \rightarrow \infty$ и θ_k сходится "почти наверное" к θ^* .

Оценка параметров ветра с использованием метода SPSA

Система координат

Для оценки ветра согласно, Бойфферу [33], могут использоваться три декартовые системы координат (см. рис. 1). Первая — это земная система координат или глобальная система координат с индексом g . В ней ось x направлена на север, ось y направлена на восток и ось z направлена вниз. Вторая — связанная или локальная система координат с индексом l . При ее использовании начало координат находится в центре тяжести самолета; ось x направлена вперед, ось y направлена в сторону правого борта и ось z направлена вниз. И третья — скоростная система координат с индексом a , которая привязана к воздушной скорости БПЛА, то есть его скорости относительно воздуха. Она имеет то же начало, что и локальная система координат, ось x располагается вдоль воздушного потока, ось y находится в плоскости симметрии БПЛА и расположена перпендикулярно потоку и ось z направлена вниз относительно БПЛА.

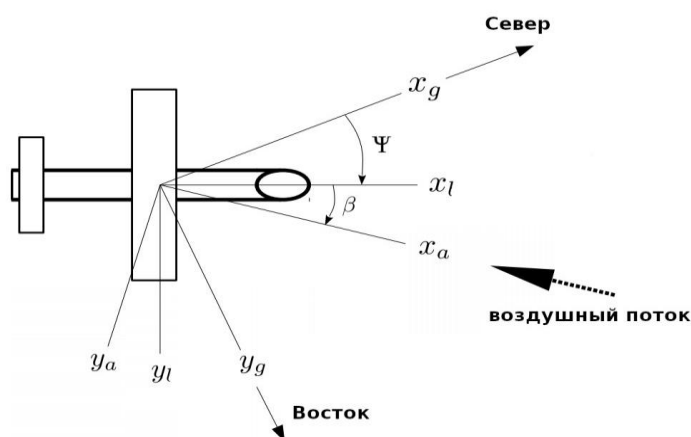


Рисунок 1 — Вид сверху на измерение ветра с индексами a, l и g , представляющими, соответственно, скоростную, локальную и глобальную системы координат. Ψ угол рыскания или истинный курс БПЛА и β — угол бокового скольжения между скоростной системой координат и локальной системой координат

Вычисление вектора ветровой нагрузки

Вектор ветра \vec{w} представляет собой направление и силу воздушного потока. Нестационарный наблюдатель, например, летящий БПЛА, видит только относительную скорость \vec{u} , но с фиксированной точки наблюдения, например, относительно глобальной системы координат, БПЛА движется со скоростью \vec{v} , которая является суммой \vec{u} и \vec{w} . Это соотношение является основой всех методов измерения ветра на БПЛА. Вектор ветра в глобальной системе координат представляет собой разность между векторами \vec{w}_g и \vec{u}_g . Вектор скорости БПЛА \vec{w}_g обычно измеряется с помощью данных GNSS и может быть измерен с достаточно хорошей точностью, тогда как вектор истинной воздушной скорости \vec{u}_g относительно БПЛА является более сложным параметром для оценивания, как и положение самолета в воздухе, например в углах Эйлера. Согласно Банге [34], вектор ветра может быть вычислен по следующей формуле:

$$\vec{w}_g = \vec{v}_g + \mathbf{T}_{gl}(\vec{u}_l + \vec{\Omega}_l \times \vec{L})$$

где \vec{u}_l — истинный вектор воздушной скорости в локальной системе координат БПЛА, \mathbf{T}_{gl} — матрица преобразования из глобальной в локальную систему координат, $\vec{\Omega}_l$ — вектор локальных угловых скоростей БПЛА, а \vec{L} — плечо рычага вектора $\vec{\Omega}_l$, представляющее расстояние между ИНС и датчиком измерения воздушной скорости. Существует два основных подхода к измерению вектора истинной воздушной скорости. В первом подходе вектор истинной воздушной скорости БПЛА может быть измерен в скоростной системе координат и затем переведен в глобальные координаты. Во втором подходе вектор истинной воздушной скорости может быть вычислен через изменения вектора \vec{v}_g в глобальной системе координат при условии, что вектор направления и сила ветра постоянны. Первый подход можно рассматривать как прямое измерение, при котором необходимо измерение вектора относительного ветра, а также данные о текущей позиции и ориентации БПЛА в пространстве. Если эти величины измеряются быстро и точно, небольшие колебания вектора ветра разрешаются во времени и пространстве. Если одна из величин отсутствует, следует сделать допущения, чтобы компенсировать это, а также применить усреднение по всей траектории полета. Метод РТА оценивает вектор ветра, который является усреднением за определенный период времени. Усредненные данные, как правило, не позволяют проводить расчеты порывов в потоке воздуха.

Рандомизация для оценки неизвестных параметров ветра в управлении БПЛА

Постановка задачи

В работе [35] приведен алгоритм расчета поправок в курс движения с применением метода SPSSA при действии ветра с постоянной скоростью, но переменным направлением в горизонтальной плоскости. В данной работе для вычисления поправок в управление рассмотрим воздействие ветровых нагрузок в горизонтальной плоскости, где оно выражается в отклонении БПЛА от заданной траектории, и по вертикали, где из-за его воздействия возникает отклонение от удерживаемой высоты. Чтобы иметь возможность отделить известные величины от неизвестных представим в виде компонент $\vec{v}_g = (v_x, v_y, v_z)$ и $\vec{w}_g = (w_x, w_y, w_z)$. Горизонтальные компоненты ветра w_x и w_y для удобства запишем в полярных координатах (θ, b) , где θ — направление ветра и b — его сила. Вертикальную компоненту ветра w_z обозначим за h . Данные о местоположении вычисляются с интервалом времени δ , т.е. в момент времени $T_k = T_0 + \delta t$ поступают тройки чисел (x_t, y_t, z_t) .

Для управления БПЛА, создания последовательности управляющих сигналов, подающихся на исполнительные механизмы, необходимо по наблюдениям $(\hat{x}_t, \hat{y}_t, \hat{z}_t)$ оценить неизвестные параметры θ, b и h .

Пусть задана точка направления на цель (A, B, H) . В каждый момент времени t БПЛА находится в точке (x_t, y_t, z_t) (Рис. 2.). В каждый такт времени от t до $t+1$ вычисляется курс, которому должен следовать БПЛА. На этом интервале времени движению объекта в направлении курса u мешает ветер.

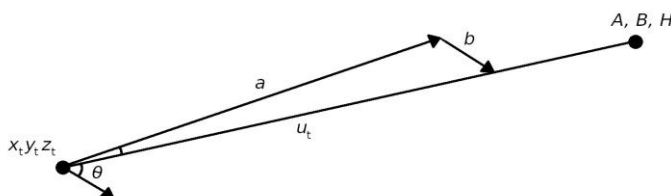


Рисунок 2 — Направление на цель, курс, смещение от ветра

Изменения угла направления ветра и его скорости можно оценить по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\theta_{t+1} &= \theta_t + \varepsilon_{t+1} \\ b_{t+1} &= b_t + \xi_{t+1}\end{aligned}$$

$$h_{t+1} = h_t + \mu_{t+1}$$

где ε , ξ и μ — независимые, центрированные и одинаково распределенные случайные величины.

Для оптимизации движения к конечной точке требуется в момент времени t по последовательности наблюдений $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)_{i=0}^t$, предложить модель для оценивания θ_{t+1} , b_{t+1} , h_{t+1} , минимизирующую среднеквадратичные отклонения:

$$\begin{aligned} E\{(\theta_{t+1} - \hat{\theta}_{t+1})^2\} &\rightarrow \min, \\ E\{(b_{t+1} - \hat{b}_{t+1})^2\} &\rightarrow \min, \\ E\{(h_{t+1} - \hat{h}_{t+1})^2\} &\rightarrow \min \end{aligned}$$

Алгоритм оценки параметров ветра

На основе алгоритма, который описан в [35], построим оценки для трех параметров ветровых нагрузок.

На каждой итерации работы автопилота вычисляется курс ψ_t , который необходимо удерживать в следующий такт времени, чтобы выйти на заданную траекторию. Также на каждой итерации известно текущее направление БПЛА ϕ_t , а соответственно и ошибка в курсе движения ε_t^θ . Также вычисляется расстояние до заданной траектории ε_t^b и расстояние до заданной высоты ε_t^h :

$$\varepsilon_t^\theta = \psi_t - \phi_t$$

$$\varepsilon_t^b = \text{distance}((x_t, y_t), \text{line}(A_n, B_n, A_{n+1}, B_{n+1}))$$

$$\varepsilon_t^h = \text{abs}(z_t - H)$$

Для оценки параметров ветра строится следующий рандомизированный алгоритм:

1. $\hat{\theta}_0 = \hat{b}_0 = \hat{h}_0 = 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta > 0$.
2. Чтение значений переменных полета БПЛА.
3. Генерация последовательности Δ_n независимых, одинаково распределенных случайных величин, равных $\pm\beta$ с одинаковой вероятностью 1/2, называемых пробными рандомизированными возмущениями.
4. Формирование оценки изменения параметров ветра:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{t+1} &= \hat{\theta}_t - \alpha_{t1} \varepsilon_t^\theta \\ \hat{b}_{t+1} &= \hat{b}_t - \alpha_{t2} \varepsilon_t^b \\ \hat{h}_{t+1} &= \hat{h}_t - \alpha_{t3} \varepsilon_t^h \end{aligned}$$

5. Публикация полученного прогноза ветра для передачи модулю оценки положения.
6. Переход к шагу 2.

Моделирование и апробация

Имитационное моделирование

Имитационное моделирование было проведено с использованием симулятора FlightGear, в основе которого лежит модель динамик полета (FDM Engine). Он позволяет симулировать полеты БПЛА в различных метеорологических условиях. Одним из настраиваемых параметров погоды является ветер. Данный симулятор позволяет задать силу ветра, частоту его изменения и величину изменения по направлению и силе.

Для тестирования полученного модуля было проведено четыре теста: при постоянном ветре, при слабых изменениях ветра, при значительных изменениях ветра и при сильных изменениях ветра. В каждом из тестов самолет должен был следовать по прямой 5 километров, при этом на

каждой итерации модуля управления вычислялось расстояние до заданной траектории в пространстве, т. е. ошибка следования по маршруту. Каждый тест запускался для оригинального алгоритма в автопилоте PX4-Autopilot (адаптированный фильтр Калмана) и для рандомизированного модифицированного алгоритма. Перед запуском основных тестов было проведено тестирование автопилота с модулем предсказания ветра, в ходе которого были подобраны коэффициенты для метода SPSA $\alpha = 0.1$ и $\beta = 0.01$, дающие наиболее точное следование заданной траектории. Ниже приведена таблица (Табл.1) с численными параметрами ветра для каждого теста:

Таблица 1 — Численные параметры ветра для тестов модуля

Параметры ветра	Без изменений	Слабые	Значительные	Сильные
Начальная сила	3 м/с	3 м/с	3 м/с	3 м/с
Изменение силы	0 м/с ²	до 2 м/с ²	до 5 м/с ²	до 10 м/с ²
Изменение направления	0 град/с	до 5 град/с	до 15 град/с	до 45 град/с

Сравнения ошибок следования по заданной траектории автопилота с модулем оценки ветра и без него показаны на графиках зависимости отклонения от времени работы (Рис. 3,4).

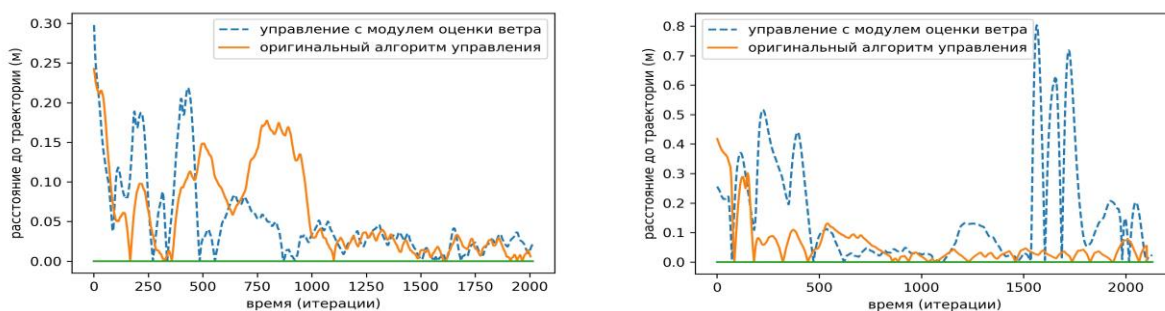


Рисунок 3 — Ошибка при постоянном ветре (слева), ошибка при слабых изменениях ветра (справа)

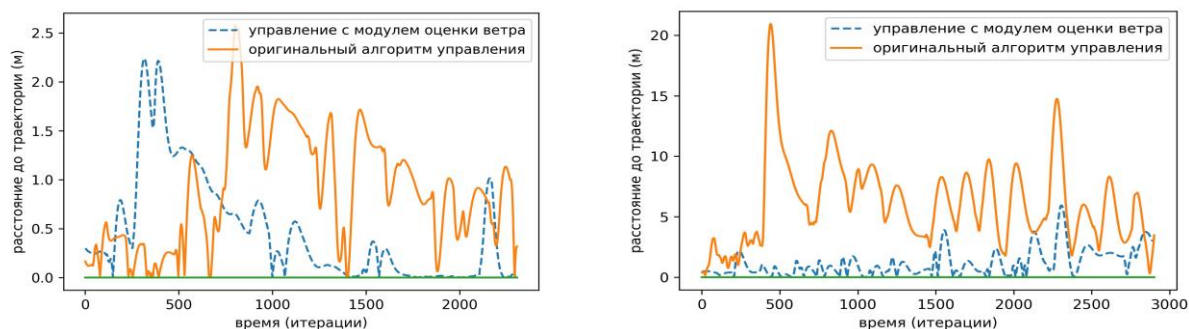


Рисунок 4 — Ошибка при значительных изменениях ветра (слева), ошибка при сильных изменениях ветра (справа)

Из представленных графиков следует, что при постоянном ветре и незначительных изменениях параметров ветра рандомизированный модуль оценки ветра улучшений, по сравнению с оригинальным, не вносит, а иногда из-за того, что намеренно выводит систему из состояния равновесия приводит к большей ошибке — до 1 метра. Однако по мере увеличения изменения силы ветра и его угла направления точность полета с использованием рандомизации возрастает и при сильных изменениях позволяет следовать траектории точнее.

Апробация на БПЛА самолетного типа

Апробация рандомизированного алгоритма проводилась на БПЛА самолетного типа с конструкцией «Утка», и автопилотом PX4. Как и при имитационном тестировании измерение ошибки следования заданной траектории проводилось по прямой в 5 километров. Было осуществлено два полета: с использованием рандомизированного модуля оценки ветра и оригинального модуля. Результат оценки показан на графике (Рис.5).

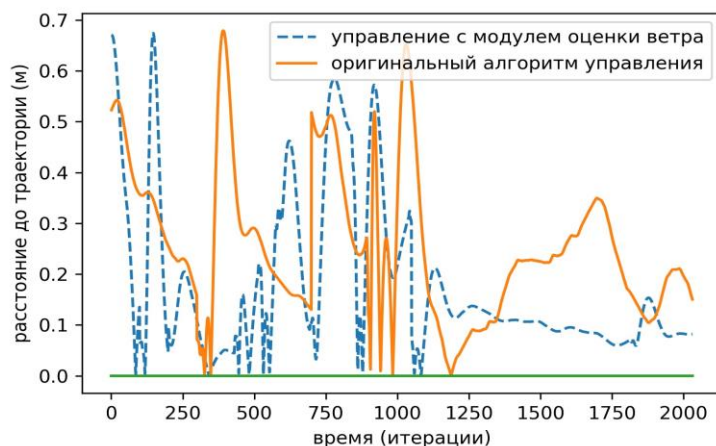


Рисунок 5 — График зависимости величины отклонения от времени полета

Из данного графика видно, что управление БПЛА с использованием модуля оценки ветра не уступает управлению без него, а иногда позволяет следовать траектории более точно. Среднее отклонение от траектории при полете без модуля оценки ветра составило 0,28 метра, а с использованием модуля оценки ветра 0,21 метра.

Таким образом, экспериментально подтверждены результаты имитационного тестирования. При больших изменениях параметров ветра модуль оценки ветра позволяет улучшить точность следования по маршруту.

Заключение

Проведено исследование применимости рандомизированного алгоритма в модуле оценки отклонения БПЛА от траектории. Предложен метод учета параметров ветра с применением метода SPSA. Разработан программный модуль внесения поправок на основе оценок для автопилота PX4. Имитационное моделирование на симуляторе FlightGear показало, что при небольших изменениях параметра ветра новый метод работает не хуже наиболее распространенного метода на основе фильтра Калмана. При значительных изменениях силы и направления ветра новый алгоритм обеспечивает меньшее отклонение. Апробация алгоритма проводилась на БПЛА самолетного типа. Результаты полетов показали, что применением нового метода оценки способно лучшим образом обрабатывать действие ветровых нагрузок, уменьшает отклонение от траектории.

Литература

1. Ribeiro Maria Isabel. Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties. – Institute for Systems and Robotics, Lisboa, Portugal, 2004. – Text unmediated.
2. Rajendra P. Palanisamy, Soojin Cho, Hyunjun Kim, Sung-Han Sim. Experimental validation of Kalman filter-based strain estimation in structures subjected to non-zero mean input // Smart Structures and Systems. – 2015. – № 2. – Vol. 15. – Pp. 489-503. – Text unmediated.
3. Duník Jindřich, Straka Ondřej, Šimandl Miroslav. The Development of a Randomised Unscented Kalman Filter // IFAC Proceedings Volumes. – 2011. – Vol. 44, no. 1. – Pp. 8-13. – 18th IFAC World Congress. – Text unmediated.

4. Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation // Introduction to Stochastic Search and Optimization. – J.C. Spall, 2003. – Pp. 176-207. – Text unmediated.
5. Antal C., Granichin O., Levi S. Adaptive autonomous soaring of multiple UAVs using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation // 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). – 2010. – Pp. 3656-3661. – Text unmediated.
6. Alessandri A., Parisini T. Nonlinear modeling of complex large-scale plants using neural networks and stochastic approximation // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans. – 1997. – Vol. 27, no. 6. – Pp. 750-757. – Text unmediated.
7. Amelin K., Granichin O. Randomized controls for linear plants and confidence regions for parameters under external arbitrary noise // 2012 American Control Conference (ACC). – 2012. – Pp. 851- 856. – Text unmediated.
8. Samson Claude. Time-Varying Feedback Stabilization of Car-like Wheeled Mobile Robots // Int. J. Rob. Res. – 1993. – Vol. 12, no. 1. – Pp. 55-64. – Text unmediated.
9. Conte Gianpaolo, Duranti Simone, Merz Torsten. Dynamic 3D path following for an autonomous helicopter // IFAC Proceedings Volumes. – 2004. – Vol. 37, no. 8. – Pp. 472-477. – IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon, Portugal, 5-7 July 2004. – Text unmediated.
10. Fossen Thor I., Breivik Morten, Skjetne Roger. Line-of-sight path following of underactuated marine craft // IFAC Proceedings Volumes. – 2003. – Vol. 36, no. 21. – Pp. 211-216. – Text unmediated.
11. Ambrosino G., Ariola M., Ciniglio U. al. Path Generation and Tracking in 3-D for UAVs // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2009. – Vol. 17, no. 4. – Pp. 980-988. – Text unmediated.
12. Kothari Mangal, Postlethwaite Ian, Gu Da-Wei. A Suboptimal Path Planning Algorithm Using Rapidly-exploring Random Trees // International Journal of Aerospace Innovations. – 2010. – Vol. 2, no. 4. – Pp. 93-104. – Text unmediated.
13. Bingyu Zhou, Satyavada H., Baldi S. Adaptive path following for Unmanned Aerial Vehicles in time-varying unknown wind environments // 2017 American Control Conference (ACC). – 2017. – Pp. 1127-1132. – Text unmediated.
14. Park Sanghyuk, Deyst John, How Jonathan P. Performance and Lyapunov Stability of a Nonlinear Path Following Guidance Method // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2007. – Vol. 30, no. 6. – Pp. 1718–1728. – Text unmediated.
15. Chen H., Chang K., Agate C. S. UAV Path Planning with Tangentplus-Lyapunov Vector Field Guidance and Obstacle Avoidance // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2013. – Vol. 49, no. 2. – Pp. 840-856. – Text unmediated.
16. Sun M., Zhu R., Yang X. UAV Path Generation, Path Following and Gimbal Control // 2008 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. – 2008. – Pp. 870-873. – Text unmediated.
17. Adaptive Optimal Path Following for High Wind Flights / Ashwini Ratnoo, Sujit P.B, Mangal Kothari, Postdoctoral Fellow. – Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011. – Text unmediated.
18. Healey A.J., Lienard D. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1993. – Vol. 18, no. 3. – Pp. 327-339. – Text unmediated.
19. Tracking controllers for small UAVs with wind disturbances: Theory and flight results / S. Jackson, J. Tisdale, M. Kamgarpour et al. // 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. – 2008. – Pp. 564-569. – Text unmediated.

20. Ahmed M., Subbarao K. Nonlinear 3-D trajectory guidance for unmanned aerial vehicles // 2010 11th International Conference on Control Automation Robotics Vision. – 2010. – P. 1923–1927.
21. Cunha R., Silvestre C., Pascoal A. A path following controller for model-scale helicopters // 2003 European Control Conference (ECC). – 2003. – Pp. 2248-2253. – Text unmediated.
22. Da Silva J.E., de Sousa J.B. A dynamic programming approach for the motion control of autonomous vehicles // 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). – 2010. – Pp. 6660-6665. – Text unmediated.
23. Shehab S., Rodrigues L. Preliminary results on UAV path following using piecewise-affine control // Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005. – 2005. – Pp. 358-363. – Text unmediated.
24. Kim Youngjoo, Bang Hyochoong. Introduction to Kalman Filter and Its Applications. – 2018. – 11. – ISBN: 978-1-83880-536-4. – Text unmediated.
25. Garulli Andrea, Giarre Laura, Zappa Giovanni. Identification of approximated Hammerstein models in a worst-case setting // Automatic Control, IEEE Transactions on. – 2003. – Vol. 47, no. 1. – Pp. 2046-2050. – Text unmediated.
26. Кунцевич В.М. Робастная устойчивость и синтез дискретных систем управления нелинейными объектами // Проблемы управления и информатики систем. – 2007. – № 4. – Том 39. – С. 5– 22. – Текст непосредственный.
27. Александров А.Г., Орлов Ю.Ф. Конечно-частотная идентификация: динамический алгоритм // Проблемы управления. – 2009. – № 4. – С. 2–8. – Текст непосредственный.
28. Граничин О.Н., Фомин В.Н. Адаптивное управление с использованием пробных сигналов // Автоматика и телемеханика. – 1986. – № 2. – С. 100–112. – Текст непосредственный.
29. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных по мехам / О.Н. Граничин, Б.Т. Поляк; Рос. акад. наук, Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова. – М.: Наука, 2003. – 291 с. – Текст непосредственный.
30. Norman Wildman, M. Hofsäß, F. Weimer et al. MASC - a small Remotely Piloted Aircraft (RPA) for wind energy research // Advances in Science and Research. – 2014. – Vol. 11, no. 5. – Pp. 55-61. – Text unmediated.
31. Dobrowolski Bolesław, Kabaciński Mirosław, Pospolita Janusz. A mathematical model of the self-averaging Pitot tube // Flow Measurement and Instrumentation. – 2005. – Vol. 16, no. 8. – Pp. 251-265. – Text unmediated.
32. Stephanie Mayer, Gautier Hattenberger, Pascal Brisset et al. A ‘No-Flow-Sensor’ Wind Estimation Algorithm for Unmanned Aerial Systems // International Journal of Micro Air Vehicles. – 2012. – Vol. 4, no. 03. – Pp. 15-30. – Text unmediated.
33. J-L. Boiffier, John Wiley and Sons, Baffins Lane. Done G.T.S. Dynamics of Flight: The Equations // The Aeronautical Journal (1968). – 1999. – Vol. 103, no. 1025. – Pp. 358. – Text unmediated.
34. Bange J. Coordinated Path Following for Time-Critical Missions of Multiple UAVs via L1 Adaptive Output Feedback Controllers // Airborne Measurement of Turbulent Energy Exchange between the Earth Surface and the Atmosphere. – P. 174. – Text unmediated.
35. Amelin K.S. Randomization in control for a small UAV fly optimization under unknown arbitrary wind disturbances // Cybernetics and Physics. – 2012. – Vol. 1, no. 2. – Pp. 79-88. – Text unmediated.

References

1. Ribeiro Maria Isabel. Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties. – Institute for Systems and Robotics, Lisboa, Portugal, 2004.
2. Rajendra Prasath Palanisamy, Soojin Cho, Hyunjun Kim, Sung-Han Sim. Experimental validation of Kalman filter-based strain estimation in structures subjected to non-zero mean input // Smart Structures and Systems. – 2015. – Vol. 15, no. 02. – P. 489-503.
3. Duník Jindřich, Straka Ondřej, Šimandl Miroslav. The Development of a Randomised Unscented Kalman Filter // IFAC Proceedings Volumes. – 2011. – Vol. 44, no. 1. – P. 8-13. – 18th IFAC World Congress.
4. Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation // Introduction to Stochastic Search and Optimization. – J. C. Spall, 2003. – P. 176-207.
5. Antal C., Granichin O., Levi S. Adaptive autonomous soaring of multiple UAVs using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation // 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). – 2010. – P. 3656-3661.
6. Alessandri A., Parisini T. Nonlinear modeling of complex large-scale plants using neural networks and stochastic approximation // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans. – 1997. – Vol. 27, no. 6. – P. 750-757.
7. Amelin Konstantin, Granichin Oleg. Randomized controls for linear plants and confidence regions for parameters under external arbitrary noise // 2012 American Control Conference (ACC). – 2012. – Pp. 851-856.
8. Samson Claude. Time-Varying Feedback Stabilization of Car-like Wheeled Mobile Robots // Int. J. Rob. Res. – 1993. – Vol. 12, no. 1. – Pp. 55-64.
9. Conte Gianpaolo, Duranti Simone, Merz Torsten. Dynamic 3D path following for an autonomous helicopter // IFAC Proceedings Volumes. – 2004. – Vol. 37, no. 8. – Pp. 472-477. – IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon, Portugal, 5-7 July 2004.
10. Fossen Thor I., Breivik Morten, Skjetne Roger. Line-of-sight path following of underactuated marine craft // IFAC Proceedings Volumes. – 2003. – Vol. 36, no. 21. – Pp. 211-216.
11. G. Ambrosino, M. Ariola, U. Ciniglio et al. Path Generation and Tracking in 3-D for UAVs // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2009. – Vol. 17, no. 4. – Pp. 980-988.
12. Kothari Mangal, Postlethwaite Ian, Gu Da-Wei. A Suboptimal Path Planning Algorithm Using Rapidly-exploring Random Trees // International Journal of Aerospace Innovations. – 2010. – Vol. 2. – no. 4. – Pp. 93-104.
13. Bingyu Zhou, Satyavada H., Baldi S. Adaptive path following for Unmanned Aerial Vehicles in time-varying unknown wind environments // 2017 American Control Conference (ACC). – 2017. – Pp. 1127-1132.
14. Park Sanghyuk, Deyst John, How Jonathan P. Performance and Lyapunov Stability of a Nonlinear Path Following Guidance Method // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2007. – Vol. 30, no. 6. – Pp. 1718-1728.
15. Chen H., Chang K., Agate C. S. UAV Path Planning with Tangentplus-Lyapunov Vector Field Guidance and Obstacle Avoidance // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2013. – Vol. 49, no. 2. – Pp. 840-856.
16. Sun M., Zhu R., Yang X. UAV Path Generation, Path Following and Gimbal Control // 2008 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. – 2008. – P. 870-873.
17. Adaptive Optimal Path Following for High Wind Flights / Ashwini Ratnoo, Sujit P.B, Mangal Kothari, Postdoctoral Fellow. – Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011.

18. Healey A. J., Lienard D. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. – 1993. – Vol. 18, no. 3. – Pp. 327-339.
19. Tracking controllers for small UAVs with wind disturbances: Theory and flight results / S. Jackson, J. Tisdale, M. Kamgarpour et al. // 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. – 2008. – Pp. 564- 569.
20. Ahmed M., Subbarao K. Nonlinear 3-D trajectory guidance for unmanned aerial vehicles // 2010 11th International Conference on Control Automation Robotics Vision. – 2010. – Pp. 1923-1927.
21. Cunha R., Silvestre C., Pascoal A. A path following controller for model-scale helicopters // 2003 European Control Conference (ECC). – 2003. – Pp. 2248-2253.
22. Da Silva J. E., de Sousa J. B. A dynamic programming approach for the motion control of autonomous vehicles // 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). – 2010. – Pp. 6660-6665.
23. Shehab S., Rodrigues L. Preliminary results on UAV path following using piecewise-affine control // *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005*. – 2005. – Pp. 358-363.
24. Kim Youngjoo, Bang Hyochoong. *Introduction to Kalman Filter and Its Applications*. – 2018. – 11. – ISBN: 978-1-83880-536-4.
25. Garulli Andrea, Giarre Laura, Zappa Giovanni. Identification of approximated Hammerstein models in a worst-case setting // *Automatic Control, IEEE Transactions on*. – 2003. – Vol. 47, no. 1. – Pp. 2046-2050.
26. Kuntsevich V.M. Robust stability and synthesis of discrete control systems for nonlinear objects // *Problems of the dynamics of control systems (Automation)*. – 2007. – Vol. 39, no. 4. – Pp. 5-22. (In Russian).
27. Alexandrov A.G., Orlov Yu.F. Finite-frequency identification: dynamic algorithm // *Control problems*. – 2009. – Pp. 2-8. (In Russian).
28. Granichin O.N., Fomin V.N. Adaptive control using probe signals // *Automation and telemechanics*. – 1986, no. 2. – Pp. 100-112. (In Russian).
29. Granichin O.N., Polyak B.T. *Randomized Estimation and Optimization Algorithms with Almost Arbitrary Noises*. – Nauka, 2003. (In Russian).
30. Norman Wildmann, M. Hofsäß, F. Weimer et al. MASC - a small Remotely Piloted Aircraft (RPA) for wind energy research // *Advances in Science and Research*. – 2014. – Vol. 11, no. 5. – Pp. 55-61.
31. Dobrowolski Bolesław, Kabaciński Mirosław, Pospolita Janusz. A mathematical model of the self-averaging Pitot tube // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2005. – Vol. 16, no. 08. – Pp. 251-265.
32. Stephanie Mayer, Gautier Hattenberger, Pascal Brisset et al. A ‘No-Flow-Sensor’ Wind Estimation Algorithm for Unmanned Aerial Systems // *International Journal of Micro Air Vehicles*. – 2012. – Vol. 4, no. 3. – Pp. 15-30.
33. J-L. Boiffier. John Wiley and Sons, Baffins Lane. Done G.T.S. *Dynamics of Flight: The Equations*. // *The Aeronautical Journal* (1968). – 1999. – Vol. 103, no. 1025. – P. 358.
34. Bange J. Coordinated Path Following for Time-Critical Missions of Multiple UAVs via L1 Adaptive Output Feedback Controllers // *Airborne Measurement of Turbulent Energy Exchange between the Earth Surface and the Atmosphere*. – P. 174.
35. Amelin K.S. Randomization in control for a small UAV fly optimization under unknown arbitrary wind disturbances // *Cybernetics and Physics*. – 2012. – Vol. 1, no. 2. – Pp. 79-88.

Информация об авторах

Амелин Константин Сергеевич, к.ф.-м.н., Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), научно-образовательный центр «Математическая робототехника и искусственный интеллект», директор, 199034, Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., д. 7-9, тел.: +7(904)510-51-09, , к.amelin@spbu.ru, ORCID: 0000-0002-3643-5132

Граничин Олег Николаевич, д.ф.-м.н., СПбГУ, профессор, 199034, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., д.7-9, Институт проблем машиноведения (ИПМаш РАН), тел.: +7(812)428-42-10, о.granichin@spbu.ru, ORCID: 0000-0002-3631-7347

Мальцев Владимир Сергеевич, СПбГУ, научно-образовательный центр «Математическая робототехника и искусственный интеллект», исследователь, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д.7-9, тел.: +7(921)567-19-64

Сергеев Сергей Федорович, д.псих.н., профессор СПбГУ, профессор, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д.7-9; Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), НИЛ «Эргономика сложных систем», заведующий лабораторией, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, тел: +7(911)995-09-29, ssfpost@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6677-8320

Information about the authors

Konstantin S. Amelin, PhD in Physics and Mathematics, Saint Petersburg University, Scientific and Educational Center «Mathematical Robotics and Artificial Intelligence», Director, 7-9, Universitetskaya naberezhnaya, Saint Petersburg, 199034, Russia, tel.: +7(904)510-51-09, к.amelin@spbu.ru, ORCID: 0000-0002-3643-5132

Oleg N. Granichin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Saint Petersburg University, Professor, 7-9, Universitetskaya naberezhnaya, Saint Petersburg, 199034, Russia, tel.: +7(812)428-42-10, о.granichin@spbu.ru, ORCID: 0000-0002-3631-7347

Vladimir S. Malzev, Saint Petersburg University, Scientific and Educational Center «Mathematical Robotics and Artificial Intelligence», Researcher, 7-9, Universitetskaya naberezhnaya, Saint Petersburg, 199034, Russia, tel.: +7(921)567-19-64

Sergey F. Sergeev, Doctor of Psychological Science, Professor, Saint Petersburg University, Professor, 7-9, Universitetskaya naberezhnaya, Saint Petersburg, 199034, Russia; Peter the Great Saint Petersburg Polytechnical University (SPbPU), Scientific and Research Laboratory of Complex Systems, Head of Laboratory, 29, Politekhnikeskaya ul., Saint Petersburg, 195251, Russia, tel.: +7(911)995-09-29, ssfpost@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6677-8320