

Санкт-Петербургский государственный университет

Математическое обеспечение и администрирование  
информационных систем

Системное программирование

Калитеевский Василий Николаевич

Инверсная кинематика в задаче  
управления сверхлёгким БПЛА с  
дополнительным бортовым управляющим  
микрокомпьютером

Магистерская диссертация

Научный руководитель:  
д. ф.-м. н., профессор Терехов А. Н.

Рецензент:  
генеральный директор ООО "Смыслолёт",  
к. ф.-м. н. Амелин К. С.

Санкт-Петербург  
2017

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Software and Administration of Information Systems

System Programming

Vasiliy Kaliteevskiy

Inverse kinematics in ultralight UAV control  
problem with additional on-board  
microcomputer

Master's Thesis

Scientific supervisor:  
Doctor of Physics and Mathematics,  
Professor Andrey Terekhov

Reviewer:  
SmartFly LLC, CEO  
Konstantin Amelin

Saint-Petersburg  
2017

# Оглавление

Введение	4
1. Постановка задачи	7
2. Литературный обзор	8
2.1. Применение БПЛА . . . . .	8
2.2. Системы отсчета . . . . .	9
2.3. Кинематика и динамика . . . . .	14
2.4. Силы и моменты . . . . .	15
2.5. Линеаризация . . . . .	16
2.6. Полетный контроллер ArduPilot . . . . .	17
3. Модуль управления	18
4. Модель полёта	20
5. Реализация	23
6. Тестирование и анализ	25
Заключение	27
Список литературы	28

# Введение

Беспилотные летательные аппараты играют все более заметную роль в военно-оборонительных целях. БПЛА успешно решают задачи разведки, наблюдения и коммуникации в том числе в экстремальных условиях и длительных полетах [2]. В последнее время БПЛА также успешно применяются для решения многих гражданских задач, предоставляя широкие возможности службам по чрезвычайным ситуациям (предупреждения о стихийных бедствиях, контроль пожарной безопасности), пограничным службам (патрулирование зон), предприятиям сельского хозяйства, службам охраны, средствам массовой информации, а также в других областях [1].

В мире представлено огромное количество различных БПЛА, отличающихся по своим спецификациям и набору характеристик (назначение, вес, размер, продолжительность полета и высота полета, система запуска и приземления, наличие систем автопилотирования и навигации, формат аэрофото и видеосъемки) [2].

Хорошо подобранные аппаратная и программная части являются залогом успешного выполнения описанных задач. Поэтому необходимо максимизировать собственные возможности БПЛА, что включает в себя как подбор качественных аппаратных решений, рассчитанных на возможные экстремальные условия и повышенные нагрузки, так и программную часть, обеспечивающую стабильное бесперебойное управление БПЛА в условиях зашумленности и задержек со стороны датчиков. Управляющий модуль также должен быть оптимизирован с точки зрения энергопотребления, так как БПЛА имеют ограниченный запас энергии из-за того, что вес аккумуляторных батарей сказывается на летных характеристиках аппарата [12].

Проблема заключается в том, что от показаний датчиков до принятия решения блоком управления БПЛА нужно выполнить большое количество преобразований и вычислений. При этом блок управления должен эффективно работать в режиме реального времени, поэтому эти вычисления нужно проводить оптимальным образом. Для дости-

жения этой цели при проектировании физики полета БПЛА необходимо рассмотреть ряд проблем. Во-первых, модель БПЛА необходимо рассматривать в различных системах координат, что заставляет постоянно использовать пространственные математические преобразования. Это связано, например, с тем, что классическая система уравнений движения рассматривается в инерциальных системах отсчета, то есть в системе отчета земли, однако само движение проще описывается относительно положения тела беспилотника, то есть в постоянно меняющейся системе координат летящего БПЛА. Во-вторых, различные силы и моменты, которые действуют на БПЛА, также описываются в системе координат БПЛА, в то время как имеющиеся датчики лишь частично дают показания в этой системе координат. Так, например, датчики ГЛОНАСС/GPS дают показания в системе координат Земли. Для того, чтобы иметь возможность обрабатывать показания всех датчиков, нужно рассматривать все необходимые системы координат и уметь с помощью математических преобразований переходить от одной системы координат к другой. В-третьих, нетривиальной задачей является описание кинематики и динамики процесса полета. Для описания движения БПЛА с шестью степенями свободы понадобится 12 различных переменных, описывающих координаты, скорость, углы и угловые моменты беспилотника в рамках нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих физику полета БПЛА [2].

Также необходимо рассмотреть все силы и моменты, которые действуют на БПЛА во время движения. Стоит заметить, что сюда входит и ветер, который в случае с малыми беспилотными летательными аппаратами играет очень существенную роль. Причем входит сюда как постоянный ветер, имеющийся в каком-то месте в какое-то время, так и отдельные порывы ветра, которые необходимо учитывать [12]. Также стоит отметить, что силы и моменты сил, действующих на БПЛА сильно зависят от характеристик самого БПЛА, что тоже надо учитывать. Это как площадь поверхности и форма крыла, так и факт наличия или отсутствия у БПЛА оперения [11].

Для эффективности работы управляющего модуля производится

линеаризация дифференциальных уравнений. Таким образом, все силы и моменты действующие на БПЛА будут рассматриваться как продольные и боковые, что сильно упрощает понимание процесса полета, а также взаимодействие с ним с помощью автопилота.

Модуль управления в свою очередь, состоит из следующих модулей: Path Planner, Path Manager, Path Follower, Autopilot. Модуль Path Planner задает точки, через которые планируется полет БПЛА. Модуль Path Manager преобразует последовательность этих точек в последовательность линий и дуг Дубина [11], как части траектории по которой планируется полет БПЛА. Далее по ходу следования пути уже сам автопилот отслеживает прохождение БПЛА по этому пути, внося корректировки по ходу следования и передавая команды на все доступные для обеспечения следования пути средства, такие как двигатель, элероны, рули и пр.

В качестве завершающей части нужно подготовить аппаратную составляющую, в качестве которой был выбран микроконтроллер ТРИК вместе с автопилотом ArduPilot, однако прежде чем начинать реализацию на реальном микроконтроллере систему надо протестировать. Для этой цели используется имитационная среда Simulink в пакете прикладных программ Matlab [6].

# 1. Постановка задачи

Целью данной магистерской работы является разработка программно-аппаратного модуля для автоматического пилотирования БПЛА. Для достижения этой цели были сформулированы следующие задачи.

1. Изучение физической составляющей процесса полета сверхлегких БПЛА.
2. Создание архитектуры программного-аппаратного модуля управления БПЛА.
3. Разработка модели на основе изученных алгоритмов на базе созданной архитектуры.
4. Реализация модуля.
5. Тестирование модуля.

## 2. Литературный обзор

### 2.1. Применение БПЛА

Беспилотные авиационные системы (UAS) все чаще встречаются в оборонных программах и оборонной стратегии во всем мире. Технологические достижения позволили создать как крупные беспилотные летательные аппараты (например, Global Hawk, Predator), так и более компактные беспилотные летательные аппараты большей мощности (например, Wasp, Nighthawk). Как показали недавние конфликты, имеется множество военных применений для беспилотных летательных аппаратов, включая разведку, наблюдение, оценку ущерба от боевых действий и коммуникации [2].

Гражданское применение БПЛА не так развито, хотя их потенциал очень велик. Они могут осуществлять мониторинг окружающей среды, мониторинг лесных пожаров, осуществлять пограничный патруль, наблюдать за воздушной почвой и заниматься картографированием, мониторингом движения, точечным сельским хозяйством, оказывать помощь в случае стихийных бедствий, образовывать специальные сети связи и осуществлять поисково-спасательные службы в сельских районах [13]. Для того чтобы успешно выполнять эти задачи, надежность таких систем должна возрастать, их возможности должны быть расширены, легкость эксплуатации должна увеличиваться, а стоимость должна уменьшаться [3].

Терминология беспилотной авиационной системы относится не только к самолету, но и ко всему вспомогательному оборудованию, используемому в системе, включая датчики, микроконтроллеры, программное обеспечение, наземные станции, пользовательские интерфейсы и аппаратуру связи. Беспилотные летательные аппараты (UA) обычно можно разделить на две категории: самолеты и винтокрылые летательные аппараты [3]. Оба типа самолетов имеют отличительные характеристики, которые затрудняют проектирование автономного поведения. Классификация "сверхлёгкий БПЛА" используется для обозначения класса са-

молетов с размахом крыла от 1 до 3 метров. Небольшие беспилотные летательные аппараты обычно работают на топливе и, как правило, требуют взлетно-посадочную полосу для взлета и посадки, хотя некоторые используют катапульту для взлета и скользящий подъемник для посадки, но таких примеров довольно мало. Сверхлёгкие летательные аппараты обычно рассчитаны на работу от 10 до 12 часов при полезной нагрузке от 5 до 25 кг [2].

## 2.2. Системы отсчета

Предлагается реализовать собственный автопилот с целью получить кастомизируемое, масштабируемое программное обеспечение, с помощью которого можно в дальнейшем внедрять различные инновационные решения, а также тестировать различные математические идеи и гипотезы.

Прежде чем приступать к самой физике полета, включая основной набор сил и моментов действующих на БПЛА, надо задать различные необходимые системы отсчета, которые будут в дальнейшем использоваться при вычислении физики полёта. Это связано с рядом следующих причин.

1. Классическое уравнение движения Ньютона описывается в фиксированной, инерциальной системе отсчета. Однако, его проще описать в системе отсчета БПЛА.
2. Аэродинамические силы и моменты, действующие на тело БПЛА проще описываются в системе отсчета самого БПЛА.
3. Бортовые датчики, такие как акселерометр и гироскоп выдают значения относительно положения тела в пространстве, то есть в системе отсчета БПЛА, тогда так датчики GPS / ГЛОНАСС выдают значения в системе координат Земли.
4. Траектория полета БПЛА, как и набор точек для следования также задаются в системе отсчета Земли.

Основные используемые системы отсчета (рис. 1):

1. Базовая инерциальная система отсчета (inertial frame) . Система отсчета Земли.  $F^i$
2. Система отсчета БПЛА (vehicle frame).  $F^v$ . Достигается с помощью сдвига относительно  $F^i$ .
3. Система отсчета БПЛА с отклонением по горизонтальному направлению (vehicle-1 frame).  $F^{v1}$ . Достигается с помощью поворота, относительно  $F^v$  на угол  $\psi$ .
4. Система отсчета БПЛА с отклонением по горизонтальному и вертикальному направлению (vehicle-2 frame).  $F^{v2}$ . Достигается с помощью поворота, относительно  $F^{v1}$  на угол  $\theta$ .
5. Система отсчета БПЛА с отклонением по горизонтальному, вертикальному направлению, а также с помощью поворота относительно направляющей оси (body frame).  $F^b$ . Достигается с помощью поворота, относительно  $F^{v2}$  на угол  $\phi$ .
6. Система отсчета БПЛА, повернутая на угол атаки (stability frame).  $F^s$ . Достигается путем поворота относительно  $F^b$  на угол  $\alpha$ .
7. Система отсчета БПЛА, повернутая на угол сноса ветром (wind frame).  $F^w$ . Достигается путем поворота относительно  $F^s$  на угол  $\beta$ .

Матрица поворота на некоторый угол  $\nu$  в общем виде выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \cos(\nu) & \sin(\nu) & 0 \\ -\sin(\nu) & \cos(\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для того, чтобы делать преобразования между системой отсчета Земли  $F^i$  и системой отсчета БПЛА  $F^b$  нужно перемножить все промежуточные матрицы. Тогда матрица перевода будет выглядеть следующим образом:

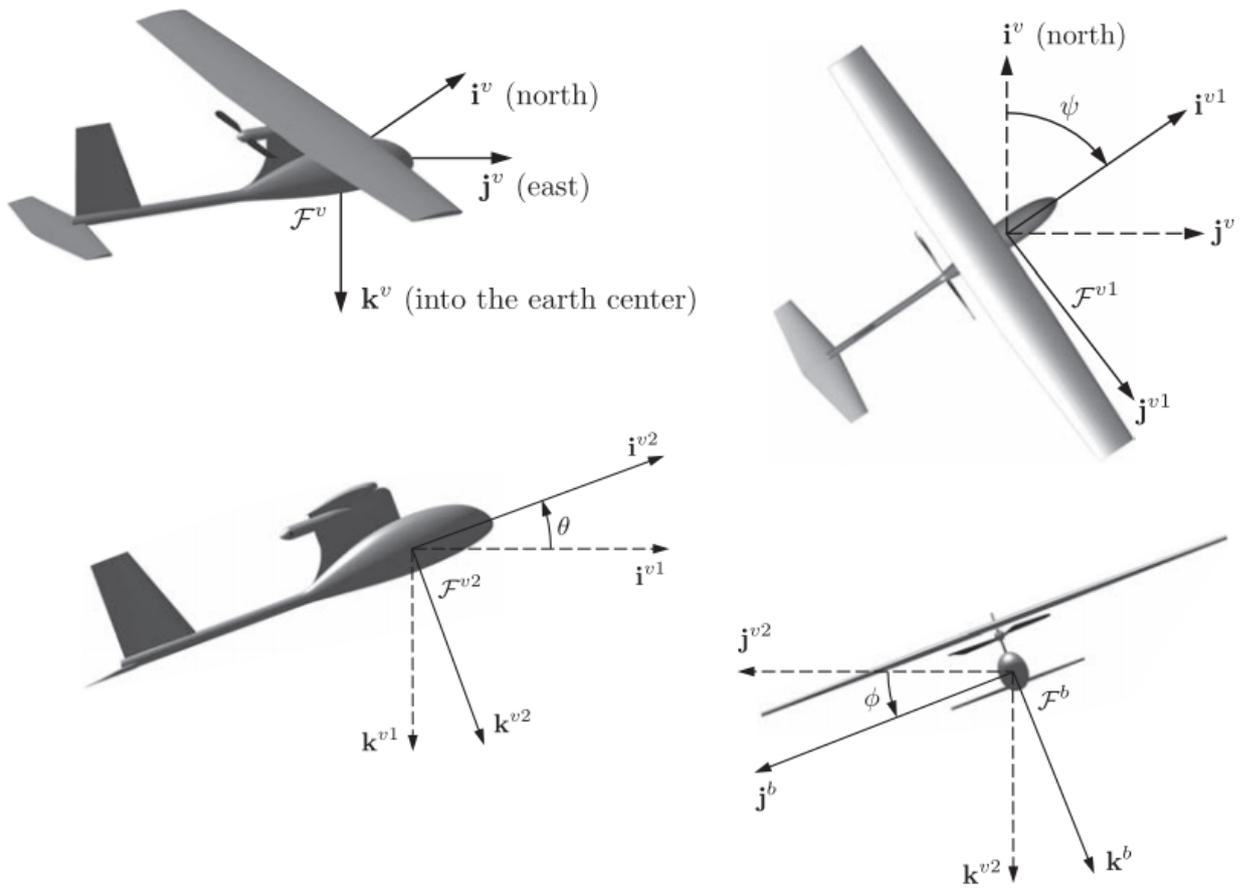


Рис. 1: Различные системы отсчета.

$$R_v^b(\phi, \theta, \psi) = R_{v_2}^b(\phi)R_{v_1}^{v_2}(\theta)R_v^{v_1}(\psi) =$$

$$\begin{pmatrix} C(\theta)C(\psi) & C(\theta)S(\psi) & -S(\theta) \\ S(\phi)S(\theta)C(\psi) - C(\phi)S(\psi) & S(\phi)S(\theta)S(\psi) + C(\phi)C(\psi) & S(\phi)C(\theta) \\ C(\phi)S(\theta)C(\psi) + S(\phi)S(\psi) & C(\phi)S(\theta)S(\psi) - S(\phi)C(\psi) & C(\phi)C(\theta) \end{pmatrix},$$

где  $C() = \cos()$ , а  $S() = \sin()$ .

Одна из целей готового автопилота заключается в том, чтобы по полученной координате точки, автопилот смог привести БПЛА в эту точку с помощью соответствующих средств управления (элеронами, рулями и пр.), то есть смог бы правильно направлять вектор скорости БПЛА[7]. Так как координата точки указывается в системе отсчета земли первое что нужно сделать это научиться представлять вектор скорости БПЛА в системе отсчета земли. [8]

Допустим БПЛА движется в системе отсчета  $\mathcal{F}^b$  относительно земли (системы отсчета  $\mathcal{F}^i$ ) как показано на рис. 2. В этом случае вектор скорости  $\mathbf{p}$  представляется как [2]:

$$\mathbf{p} = p_x \mathbf{i}^b + p_y \mathbf{j}^b + p_z \mathbf{k}^b.$$

То есть движение во времени можно задать формулой [2]:

$$\frac{d}{dt_b} \mathbf{p} = \dot{p}_x \mathbf{i}^b + \dot{p}_y \mathbf{j}^b + \dot{p}_z \mathbf{k}^b.$$

Тогда смещение вектора  $\mathbf{p}$  в системе отсчета  $\mathcal{F}^b$  относительно системы отсчета  $\mathcal{F}^i$  будет задаваться формулой:

$$\frac{d}{dt_i} \mathbf{p} = \dot{p}_x \mathbf{i}^b + \dot{p}_y \mathbf{j}^b + \dot{p}_z \mathbf{k}^b + p_x \frac{d}{dt_i} \mathbf{i}^b + p_y \frac{d}{dt_i} \mathbf{j}^b + p_z \frac{d}{dt_i} \mathbf{k}^b.$$

Если представить вращение (угловую скорость)  $\mathcal{F}^b$  относительно  $\mathcal{F}^i$  как  $\omega_{b/i}$ , тогда приращения вектора по каждому из направлений можно представить, как:

$$\dot{\mathbf{i}}^b = \omega_{b/i} \times \mathbf{i}^b$$

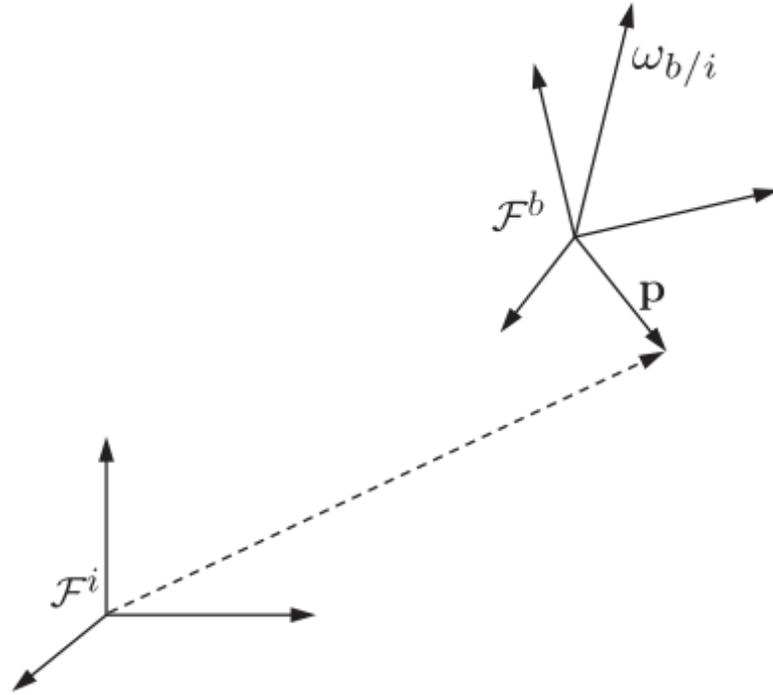


Рис. 2: Вектора сил в различных проекциях.

$$\dot{j}^b = \omega_{b/i} \times \mathbf{j}^b$$

$$\dot{k}^b = \omega_{b/i} \times \mathbf{k}^b$$

И если подставить в предыдущее уравнение, то получится:

$$p_x^b + p_y^b + p_z^b = p_x(\omega_{b/i} \mathbf{i}^b) + p_y(\omega_{b/i} \mathbf{j}^b) + p_z(\omega_{b/i} \mathbf{k}^b) = \omega_{b/i} \times \mathbf{p}$$

И наконец, если подвести все вышеизложенное под одну черту, то мы получим мгновенную скорость БПЛА выраженную через систему координат земли:

$$\frac{d}{dt_i} \mathbf{p} = \frac{d}{dt_b} \mathbf{p} + \omega_{b/i} \times \mathbf{p}$$

## 2.3. Кинематика и динамика

Движение беспилотного летательного аппарата в пространстве, имеющего 6 степеней свобод, описывается с помощью двенадцати переменных, показанных в таблице:

Название	Описание
$p_n$	Координата БПЛА по оси на север в $F^i$
$p_e$	Координата БПЛА по оси на восток в $F^i$
$p_d$	Координата БПЛА по оси направленной в центр Земли в $F^i$
$u$	Скорость вдоль оси $i^b F^b$
$v$	Скорость вдоль оси $j^b F^b$
$w$	Скорость вдоль оси $k^b F^b$
$\phi$	Угол крена, заданный в $F^{v2}$
$\theta$	Угол тангажа, заданный в $F^{v1}$
$\psi$	Угол рысканья, заданный в $F^v$
$p$	Угловая скорость крена
$q$	Угловая скорость тангажа
$r$	Угловая скорость рысканья

Формулы перерасчета этих переменных для летящего БПЛА можно найти в следующих книгах по механике[4], пространственной динамике[11], динамике полета[9], робототехнике[10].

$$\begin{pmatrix} \dot{p}_n \\ \dot{p}_e \\ \dot{p}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(\theta)C(\psi) & S(\phi)S(\theta)C(\psi) - C(\phi)S(\psi) & C(\phi)S(\theta)C(\psi) + S(\phi)S(\psi) \\ C(\theta)S(\psi) & S(\phi)S(\theta)S(\psi) + C(\phi)C(\psi) & C(\phi)S(\theta)S(\psi) - S(\phi)C(\psi) \\ -S(\theta) & S(\phi)C(\theta) & C(\phi)C(\theta) \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{u}_n \\ \dot{u}_e \\ \dot{u}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} rv - qw \\ pw - ru \\ qu - pv \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Gamma_1 pq - \Gamma_2 qr \\ \Gamma_5 pr - \Gamma_6(p^2 - r^2) \\ \Gamma_7 pq - \Gamma_1 qr \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Gamma_3 l + \Gamma_4 n \\ \frac{1}{J_y} m \\ \Gamma_4 l + \Gamma_8 n \end{pmatrix}.$$

## 2.4. Силы и моменты

В момент полета БПЛА подвергается нетривиальному воздействию различных сил и моментов разных природ, а именно гравитационной ( $f_g$ ), аэродинамической ( $f_a, m_a$ ) и движущей ( $f_p, m_p$ ). Тогда суммарное действие сил и моментов на БПЛА можно описать формулами [2]:

$$f = f_g + f_a + f_p$$

$$m = m_a + m_p.$$

Сила гравитации в инерциальной системе координат описывается простым вектором:

$$f_g^v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix}.$$

В системе координат тела БПЛА:

$$f_b^v = \begin{pmatrix} -mg * \sin(\theta) \\ mg * \cos(\theta) \sin(\phi) \\ mg * \cos(\theta) \cos(\phi) \end{pmatrix}.$$

Когда самолет летит по воздуху он генерирует своими крыльями силу подъема и силу торможения, как показано на Рис. 3. Сила и распределение давления действующего на самолет зависит от скорости по воздуху, плотности воздуха, формы и положения самолета в воздухе.

Так, динамическое давление описывается формулой  $\frac{1}{2}V_a^2$ , где  $\rho$  - плотность воздуха, а  $V_a$  - скорость самолета относительно воздуха.

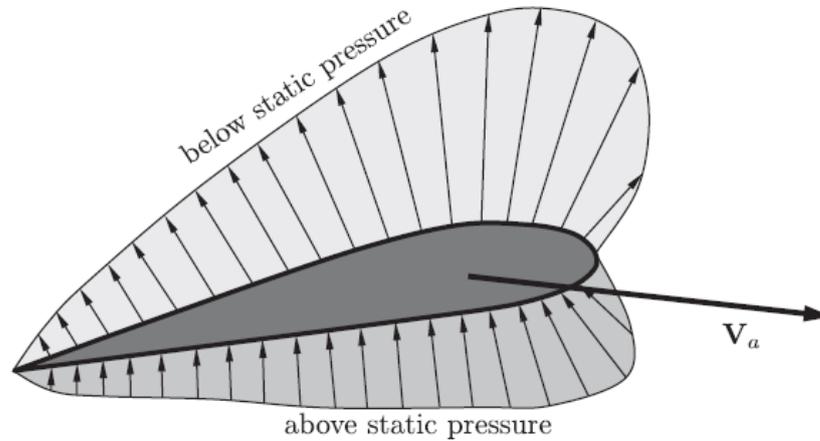


Рис. 3: Распределение плотности воздуха вокруг крыла во время полета.

Сила торможения, сила подъема, и момент сил обычно описываются следующими формулами [11]:

$$F_{lift} = \frac{1}{2}V_a^2 S C_L$$

$$F_{drag} = \frac{1}{2}V_a^2 S C_D$$

$$m = \frac{1}{2}V_a^2 S c C_m,$$

где  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_m$  - безразмерные величины, характеризующие аэродинамические коэффициенты,  $S$  - площадь поверхности крыла,  $c$  - величина, равная половине крыла.

## 2.5. Линеаризация

Как было показано выше, уравнения движения БПЛА представляют собой довольно сложный набор из 12 нелинейных, дифференциальных уравнений первого порядка. Из-за их сложности проектирование контроллеров на их основе затруднено и требует более простых подходов.

Динамику для самолетов можно приблизительно разложить на продольное движение, которое включает в себя скорость относительно воздуха, угол тангажа и высоту и в поперечное движение, которое включает в себя углы крена и направления. Несмотря на то, что существует связь между продольным и поперечным движением, для большинства БПЛА она достаточно мала, и её нежелательные эффекты можно смягчить с помощью алгоритмов управления, предназначенных для подавления помех.

Линеаризация 12 основных уравнений, описывающих полёт БПЛА хорошо продемонстрирована в [2], и здесь приведена не будет в силу избыточной сложности.

## 2.6. Полетный контроллер ArduPilot

Популярным используемым решением для автопилотирования БПЛА является полетный контроллер ArduPilot. Этот продукт является полноценным решением БПЛА, который позволяет помимо радиоуправляемого дистанционного пилотирования - автоматическое управление по заранее созданному маршруту, то есть полет по точкам, а так же обладает двухсторонней передачей телеметрических данных с борта на наземную станцию. Он разрабатывается сообществом DIY Drones и базируется на проекте с открытым исходным кодом Arduino.

Полетный контроллер обладает хорошими преимуществами:

- низкая цена;
- возможность установить до 166 полетных точек;
- редактирование маршрута в полете;
- беспроводная конфигурация настроек;
- поддержка различных рам и форм БПЛА;
- поддержка авиасимулятора через ПО Mission Planner.

### 3. Модуль управления

Модуль управления работает по принципу изображенному на 4. Модуль Path Planner задает точки, через которые планируется полет БПЛА. Модуль Path Manager преобразует последовательность этих точек в последовательность линий и дуг Дубина, как части траектории по которой планируется полет БПЛА. Далее по ходу следования пути(Path Following) уже сам атопилот отслеживает прохождение БПЛА по этому пути, внося корректировки по ходу следования и передавая команды на все доступные для обеспечения следования пути средства, такие как двигатель, элероны, рули и пр.

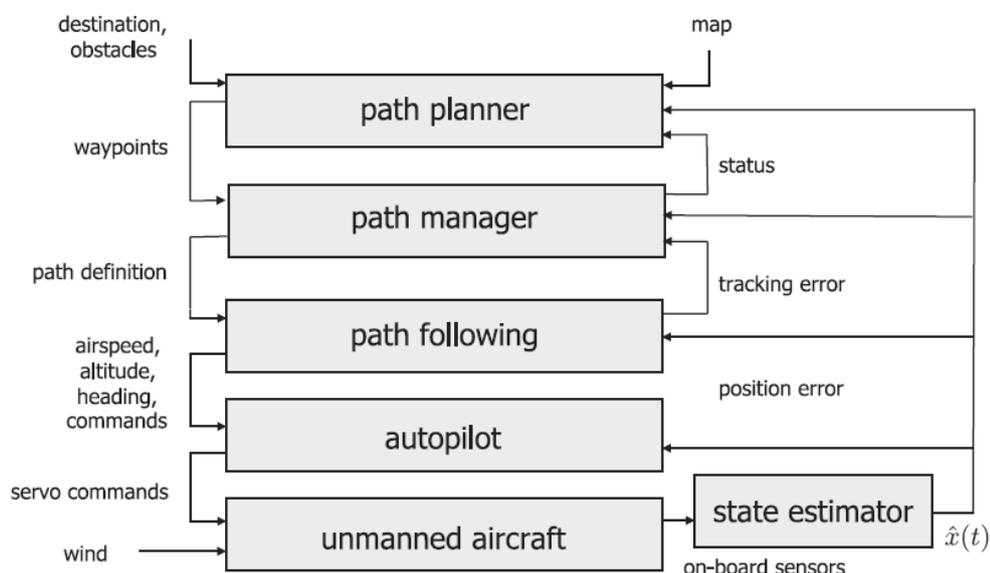


Рис. 4: Системная архитектура модуля управления БПЛА.

Для планирования пути есть два класса проблем. Первый это алгоритмы point-to-point, цель которых заставить БПЛА пролететь через все заданные точки, минуя препятствия. Второй класс проблем представляют из себя алгоритмы покрытия заданного региона с помощью БПЛА. Например, для аэрофотосъемки. Мы остановимся только на первом классе, рассматривая point-to-point алгоритмы.

Так как модуль управления должен учитывать погрешности и ошибки, которые поступают вместе с показаниями датчиков, то для этого су-

существует модуль `State estimator`, которые эти самые ошибки оценивает и вносит соответствующие коррективы.

## 4. Модель полёта

Прежде чем внедрять предложенную архитектуру на БПЛА, была смоделирована система апробации полета БПЛА в среде Simulink пакета прикладных программ Matlab. Matlab/Simulink это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы.

Среда очень удобна тем, что позволяет программировать дифференциальные уравнения с помощью встроенных S-функций [6]. Рисует положение БПЛА в режиме реального времени, как показано на рис. 5. По ходу следования БПЛА своему маршруту Simulink в каждый момент времени отображает все параметры всех заданных физических величин и наглядно позволяет проверить корректность работы, а также анализировать физику движения БПЛА. Такой вывод показан на рис. 6. Позволяет задавать сложную структуру взаимодействия модулей. Основная блок-диаграмма, которая показана на рис. 7 содержит в себе также модули: `navDynamics`, отвечающий за кинематику и динамику процесса движения, `forcesMoments`, отвечающий за перерасчет сил и моментов, `drawAircraft` - за отображение БПЛА в графической среде.

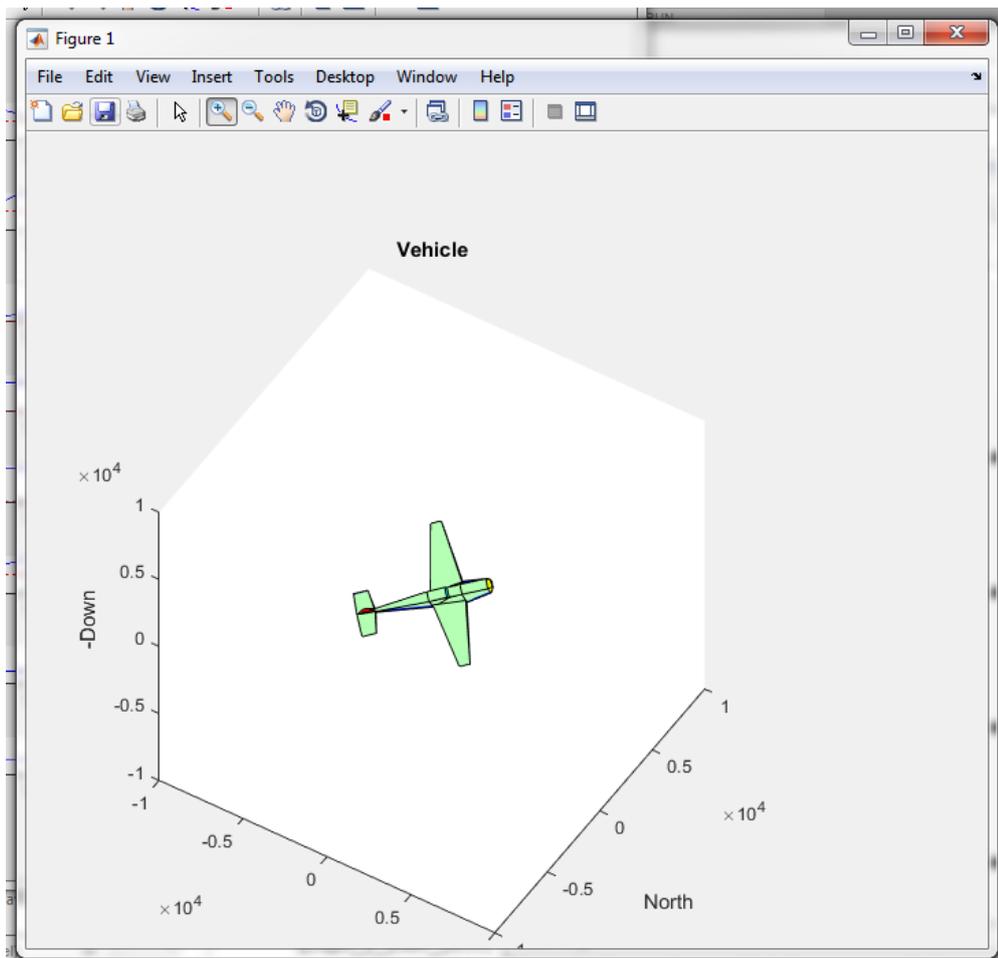


Рис. 5: Отображение модели БПЛА в режиме реального времени.

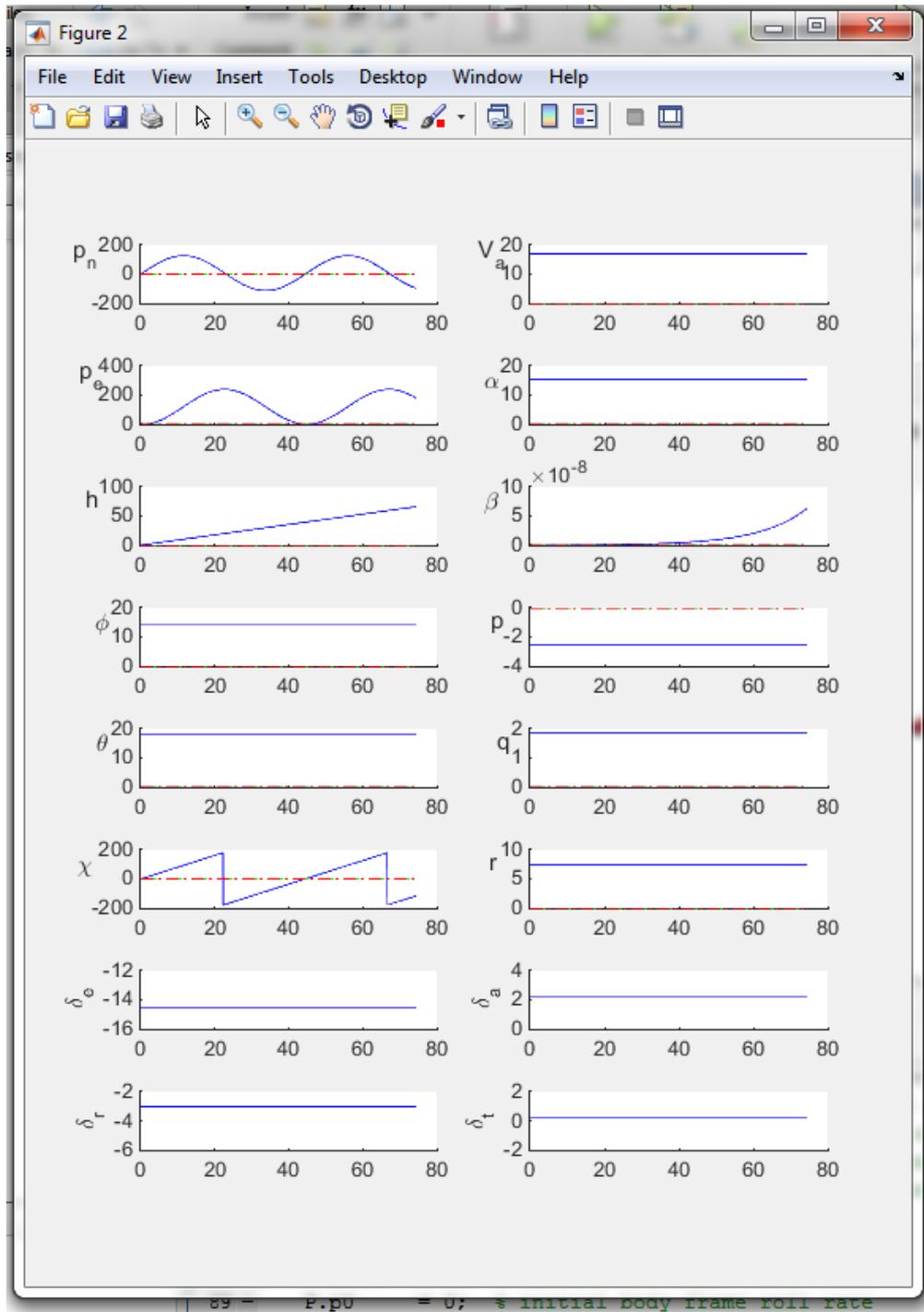


Рис. 6: Matlab/Simulink показывает все заданные параметры движения в режиме реального времени.

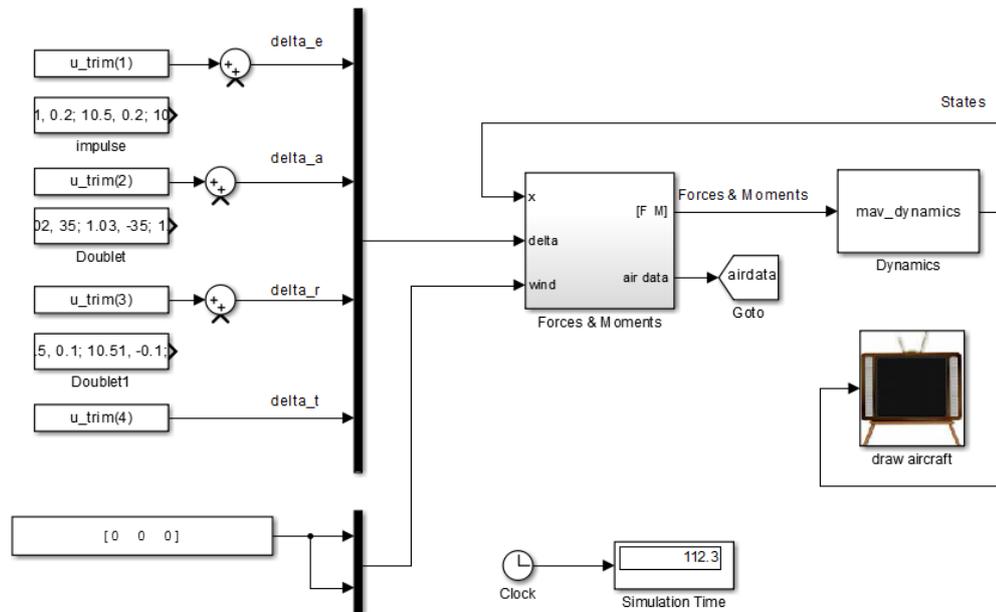


Рис. 7: Главная составляющая тестового модуля, представляющая из себя блок-диаграмму в виде направленных графов.

## 5. Реализация

Реализация автопилота будет совершена на платформе ТРИК, изображенной на Рис. 8.

ТРИК — это миникомпьютер, совместимый с широким спектром периферийных устройств, содержащий все необходимое оборудование для создания на его базе автономных робототехнических систем. Контроллер может управлять двигателями прямого тока и сервоприводами, обрабатывать информацию как с цифровых датчиков, так и с аналоговых, работать с видео модулями и микрофонами, имеет интерфейсы Wi-Fi, Bluetooth 4.0 (включая LE), USB, Micro-SD и ANT. В контроллере установлены встроенные защиты от перегрузки по току и от глубокой разрядки аккумулятора.[14]

ТРИК разработан на базе процессора OMAP-L138 C6-Integra™ DSP + ARM® SoC [5] производства Texas Instruments. Процессор имеет высокоуровневую архитектуру, изображенную на рис. 9. Этот процессор имеет два вычислительных модуля:

1. управляющее ядро ARM (ARM926EJ-S™ RISC MPU), обеспечива-

- ющее работу операционной системы Linux на контроллере;
2. ядро DSP (C674x Fixed/Floating-Point VLIW DSP) специально разработанное для обработки большого объема данных, представляемых в виде векторов.



Рис. 8: Примеры плат ТРИК.

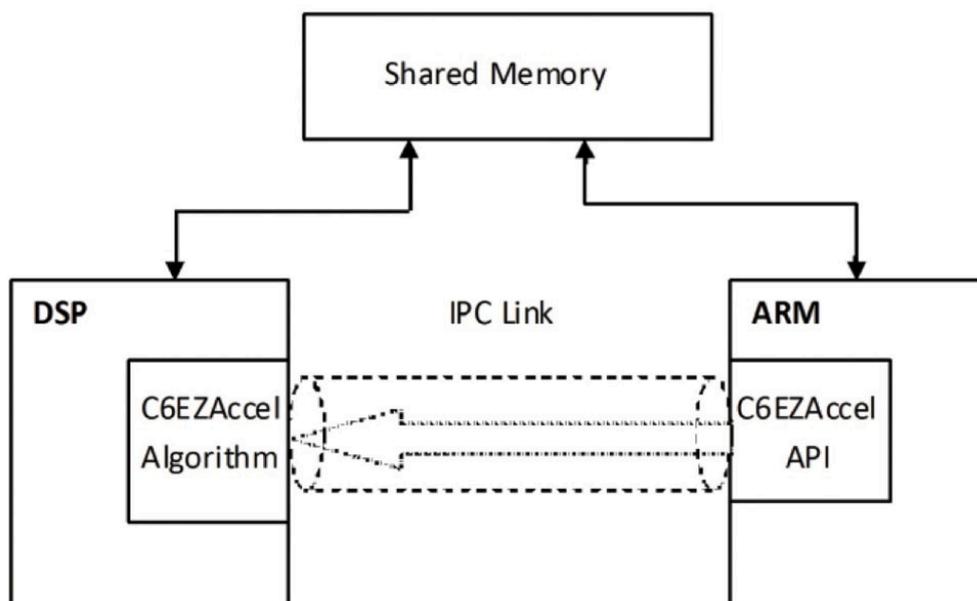


Рис. 9: Высокоуровневая архитектура процессора OMAP L138 (ARM+DSP)

## 6. Тестирование и анализ

Для тестирования полученного решения использовался полетный контроллер ArduPilot. Особенность контроллера заключается в том, что помимо радиоуправляемого дистанционного пилотирования, контроллер может как лететь по заранее созданному маршруту (т.е. по точкам), так и принимать команды от управляющего микрокомпьютера во время полета. Причем, контроллер имеет возможность смены режима во время полёта, что особенно важно для тестирования [13]. Контроллер обладает возможностью двухсторонней передачи телеметрических данных с борта на наземную станцию и ведение журнала во встроенную память.

Контроллер ArduPilot применялся в тестировании как средство стабилизации БПЛА в воздухе в то время, как основную функциональность автопилота — следование по прямой и умение войти в поворот по оптимальной траектории, выполнял модуль управления. Для этого БПЛА поднимался в воздух, с дистанционного управления выходил на определенную высоту, затем переходил в режим управления с микрокомпьютера. Далее основной модуль программного обеспечения БПЛА выполнял свою миссию полёта по нескольким точкам. Для этого по построенной траектории, микрокомпьютер должен был подавать управляющие сигналы на контроллер, который самостоятельно борется с различными помехами и уже обработанный управляющий сигнал передает непосредственно на рули БПЛА. Микрокомпьютер получает телеметрию во время полета и в режиме реального времени подстраивается под внешние условия и, тем самым, постоянно корректирует траекторию следования. Затем после окончания выполнения маневров, автопилот переходит в режим ручного управления для осуществления посадки.

Выполненный эксперимент показывает возможность полученного решения для использования в качестве управляющего модуля полётом БПЛА. В качестве дальнейшего совершенствования возможна разработка в направлении независимого самостоятельного полётного кон-

троллера, платформы тестирования различных научных теорий по шумопадавлению, фильтрации сигналов и проверки различных гипотез [1] по эффективности и оптимизации управления БПЛА.

## Заключение

В результате проделанной работы разработан программно-аппаратный комплекс для автоматического пилотирования БПЛА. Для достижения этой цели, были решены следующие задачи:

1. изучена физическая составляющая процесса полета сверхлегких БПЛА;
2. спроектирована архитектура модуля управления БПЛА;
3. разработана модель поведения алгоритма управления БПЛА на базе MatLab/SimuLink;
4. выполнена реализация программно-аппаратного модуля;
5. выполнена апробация созданных средств.

Также полученная система является хорошей платформой для тестирования идей и гипотез для БПЛА, моделирования математических процессов.

## Список литературы

- [1] Amelin K. Tyushev K., V. Kaliteevskii. Communication and maintaining of data integrity method for decentralized network of autonomous group of mobile robots // Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2016 International Conference on / IEEE. — 2016. — P. 372–377.
- [2] Beard Randal W, McLain Timothy W. Small unmanned aircraft: Theory and practice. — Princeton university press, 2012.
- [3] Crouch Collier Craig. Integration of mini-UAVs at the tactical operations level implications of operations, implementation, and information sharing : Ph. D. thesis / Collier Craig Crouch ; Monterey California. Naval Postgraduate School. — 2005.
- [4] Goldstein Herbert. Classical mechanics. — Pearson Education India, 2011.
- [5] Instruments Texas. Раздел сайта компании «Texas Instruments», посвященный процессору OMAP L138. — 2015. — URL: <http://www.ti.com/product/omap-1138> (online; accessed: 18.12.2015).
- [6] Matlab. Документация по S-функциям. — 2015. — URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/matlab-s-functions-1.html> (online; accessed: 18.12.2015).
- [7] Nelson Robert C. Flight stability and automatic control. — WCB/McGraw Hill New York, 1998. — Vol. 2.
- [8] Roskam J. Aircraft Flight Dynamics and Automatic Flight Controls, Parts I and II // DAR, Co., Lawrence, KS. — 1995.
- [9] Shuster Malcolm D. A survey of attitude representations // Navigation. — 1993. — Vol. 8, no. 9. — P. 439–517.
- [10] Spong Mark W, Hutchinson Seth, Vidyasagar Mathukumalli. Robot modeling and control. — wiley New York, 2006. — Vol. 3.

- [11] Wiesel William E. Spaceflight [Space flight] dynamics.— Tata McGraw-Hill Education, 1989.
- [12] Амелин К.С. Метод ориентирования сверхлегкого БПЛА при редком обновлении данных о его местоположении.— // Стохастическая оптимизация в информатике. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2014.
- [13] Калитеевский В.Н. Метод коммуникации в децентрализованной сети автономной группы мобильных роботов.— // Стохастическая оптимизация в информатике. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2014.
- [14] ТРИК. Сайт компании «ТРИК».— 2015.— URL: <http://www.trikset.com/> (дата обращения: 18.12.2015).