

Виноходов Т.В., Капицин Д.Р., Соколов В.А.

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет, Россия

AERONET. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ НЕПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

АННОТАЦИЯ

В ближайшие 10–20 лет благодаря развитию технологий существенно расширится применение беспилотных авиационных и околоземных космических систем, комплексных решений и услуг на их основе. Возникнет новый глобальный сетевой рынок информационных, логистических и иных услуг, предоставляемых флотом беспилотных аппаратов, постоянно находящихся в воздухе и на низких космических орбитах.

Развитие беспилотных авиационных и космических систем приведет к росту распределенных систем безопасности полетов и обмена информацией. Повышение надежности защищенных сетевых коммуникаций обеспечит массовое безопасное использование беспилотных аппаратов, в том числе и в городских условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Беспилотный летательный аппарат; пассивная радиолокация; тепловое излучение; импульсный метод; радиоизлучение; радиолокационная.

Vinokhodov T.V., Kapitsin D.R., Sokolov V.A.

Saint-Petersburg State Polytech University, Russia

AERONET. DETERMINING THE COORDINATES OF A STATIONARY OBJECT BY USING THE METHOD OF PASSIVE RADIOLOCATION

ABSTRACT

In the next 10-20 years due to the development of technologies greatly expands the use of unmanned aircraft and near-Earth space systems, integrated solutions and services based on them. There will be a new global network market information, logistics and other services provided by the unmanned fleet that are constantly in the air and at low space orbit.

The development of unmanned aircraft and space systems will lead to growth of distributed safety systems and information sharing. Increased reliability secure network communications ensure the safe use of mass unmanned vehicles, including urban areas.

KEYWORDS

Drone; passive radar; thermal radiation; pulse method; radio waves; radar station.

Введение

Многие задачи, решаемые современными комплексами беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), требуют наличия высокоскоростных линий передачи информации между БПЛА и наземным комплексом управления (НКУ) Наиболее распространенная на сегодняшний день технология передачи информации заключается в непрерывной трансляции изображения по мере его получения в цифровом или аналоговом формате, структура которого не меняется в течение всего полета [2].

Несмотря на большое количество возможных вариантов реализации систем передачи командно-телеметрической информации и информации полезной нагрузки, оптимальным и наиболее часто используемым остается вид связи, при котором данные передаются напрямую между БПЛА и НКУ. В последние годы, благодаря значительному прогрессу в области коммуникации, современные радиолокационные станции (РЛС) стали оснащаться новыми полупроводниковыми приборами и технологиями обработки сигналов, однако базовые концепции системного уровня, заложенные в основу радиолокации, до сих пор остаются практически неизменными [3]. Как правило, РЛС:

- излучает идентичный сигнал всю свою «жизнь»;
- излучает в каждый момент времени только на одной частоте;
- «видит» в каждый момент времени только небольшую площадь пространства;
- механически сканирует область пространства.

При этом потенциальные стратегии для будущих концепций радиолокационных систем должны будут включать:

- интеллектуальное кодирование сигнала, например, OFDM (orthogonal frequency division multiplexing – с ортогональным частотным разделением каналов), CDMA (code division multipleaccess – с кодовым разделением множественного доступа), получившее широкое распространение в современных системах связи [3];



Рис. 1: Системы связи комплексов БПЛА

- MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) РЛС – метод многопозиционной радиолокации; - цифровое формирование диаграммы направленности для более высокого углового разрешения с широким обзором без применения движущихся механических частей, улучшение технологии обработки принимаемых сигналов; -формировали изображений – применение эффективных фазированных подсистем, использующих виртуально увеличиваемые размеры массива, с уменьшенными размерами и стоимостью для формирования полного изображения с высокой разрешающей способностью;
- совершенствование и развитие радиотепловой (пассивной) локации, комплексирование активных и пассивных радиотехнических систем;
- RadCom (Radar and Communication Systems) – интеграция радиолокационного и информационного каналов в единой аппаратуре, расширяющая возможности обмена оперативной информацией между отдельными станциями. Остановившись подробнее на развитии радиотепловой локации, стоит отметить, что основной её задачей является определение местоположения объектов по их собственным излучениям в радиодиапазоне. Кроме того, методами пассивной радиолокации в ряде случаев могут быть определены направление и скорость перемещения объекта и другие его характеристики. При пассивной радиолокации могут использоваться любые радиокосебания, излучаемые объектами как с помощью специальных предметов, так и в результате собственного радиоизлучения [3].

Основные задачи пассивной радиолокации совпадают с задачами активной радиолокации. Активная радиолокация для определения местоположения объектов и их характеристик использует собственные радиокосебания. Для их получения средства активной радиолокации имеют в своём составе мощные генераторные устройства, энергия которых излучается в требуемых

направлениях с помощью специальных антенн. Средства же пассивной радиолокации имеют лишь приёмные пункты.

Отсутствие мощных передающих устройств у средств пассивной радиолокации в значительной мере затрудняет определение радиолокационных позиций.

При известном расположении приёмных пунктов (геометрии комплекса) положение объекта в пространстве определяется совокупность трёх первичных координат объекта. Первичные координаты позволяют вычислить пространственные. В зависимости от используемых первичных координат различают следующие методы пассивной радиолокации [1]:

1. Угломерные методы. Основаны на использовании угловых измерений. В простейших случаях достаточно лишь двух пунктов, в которых необходимо измерить два азимута и один угол места, либо два угла места и один азимут. Координаты определяются таким выражением:

$$x = \frac{B(1 - \gamma^2) \cos \beta}{2 \gamma \sec \epsilon - \sin \beta},$$

$$y = \frac{B \gamma \sec \epsilon - \gamma \sin \beta}{2 \gamma \sec \epsilon - \sin \beta},$$

$$z = \frac{B(1 - \gamma^2) \tan \beta}{2 \gamma \sec \epsilon - \sin \beta}$$

$$\gamma = \frac{r}{B}$$

где B – база (расстояние между приемными пунктами);

$x; y; z$ – координаты источника радиоизлучения [2].

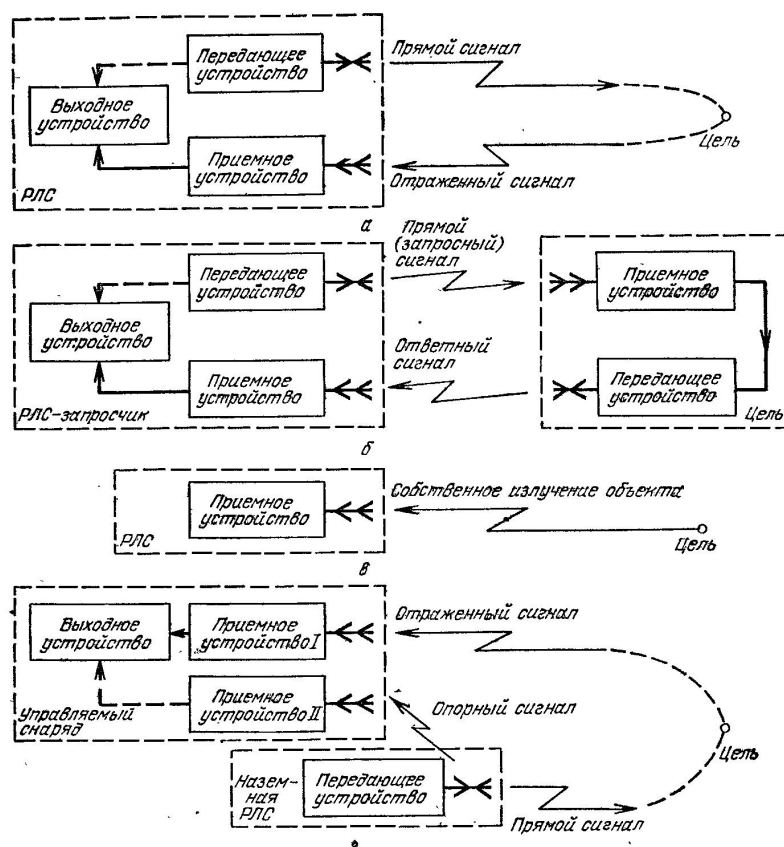


Рис. 2: Упрощенные схемы формирования радиолокационных сигналов: а – при активной локации с пассивным ответом; б – при активной локации с активным ответом; в – при пассивной локации; г – при полуактивной локации

2. Разностно-дальномерные методы. Разностно-дальномерный способ определения координат предусматривает измерение разностей расстояний от излучаемого объекта до пассивных РЛС. Для определения координат объекта на плоскости требуется определить не менее двух значений разности расстояний, для чего необходимо иметь по крайней мере 3 разнесённых РЛС.

3. Угломерно-разностно-дальномерный метод. Угломерно-разностно-дальномерный способ является комбинацией первых двух и заключается в определении направлений и разности расстояний от объекта до РЛС. При этом способе надо иметь не менее двух РЛС. В случае, когда наряду с измерением разности дальностей в одном из них измеряется азимут и угол места, вычисление координат производится с помощью выражений [1]:

$$\begin{aligned}x &= \frac{y_1 - y_2}{b - 1} \cot \beta_1 = \frac{B}{b - 1} \cot \beta_1, \\y &= \frac{y_1 b - y_2}{b - 1} = \frac{B b + 1}{2 b - 1}, \\z &= \frac{\tan \epsilon}{\sin \beta_1} \frac{y_1 - y_2}{b - 1} = \frac{\tan \epsilon}{\sin \beta_1} \frac{B}{b - 1} \\b &= \frac{\tan \beta_2}{\tan \beta_1}; y_1 - y_2 = B\end{aligned}$$

где B – расстояние между приёмными пунктами; g – разность расстояний между ПП и ИРИ; x ; y ; z – координаты ИРИ

Усреднение координаты объекта при множественном измерении

Для получения более точных координат объекта можно воспользоваться способом множественных измерений. Т.к. погрешность измерения является случайной приборной погрешностью $\Delta \vec{r}$, то выборка из n результатов независимых измерений подчиняется нормальному распределению. Тогда при определении среднего значения ошибка составит $\Delta \vec{r} / \sqrt{n}$. Пусть O – точка отсчета $\vec{R}_i$ – радиус-вектор БПЛА относительно O ; $\vec{r}_i$ – координата объекта относительно БПЛА. Тогда

$$\langle \vec{r} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n (\vec{R}_i + \vec{r}_i)}{n}.$$

радиус-вектор объекта относительно O :

При этом следует учитывать, что при увеличении расстояния до объекта погрешность определения его координат увеличивается. Введем коэффициент η (1/м), который определяет, во сколько раз падает достоверность измерения с увеличением расстояния. Тогда

$$\langle \vec{r} \rangle = \frac{\frac{\vec{r}_1}{C_1} + \frac{\vec{r}_2}{C_2} + \dots + \frac{\vec{r}_n}{C_n}}{k},$$

где C_i – степень достоверности i -ого измерения. При условии, что $\vec{r}_1 = \vec{r}_2 = \dots = \vec{r}_n = \vec{x}$, $\Rightarrow \langle \vec{r} \rangle = \vec{x}$ то

$$k\vec{x} = \frac{\vec{x}}{C_1} + \frac{\vec{x}}{C_2} + \dots + \frac{\vec{x}}{C_n} \Rightarrow k = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Причем $C_i = \eta |\vec{r}_i|$. Окончательно:

$$\langle \vec{r} \rangle = \sum_{i=1}^n \frac{(\vec{R}_i + \vec{r}_i)}{\eta |\vec{r}_i|} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\eta |\vec{r}_i|}.$$

Пассивная радиолокация теплового излучения

Радиоизлучение может быть теплового и нетеплового происхождения. Тепловое излучение создается внутренними электродинамическими процессами в атомах и молекулах всех веществ. Нетепловое электромагнитное излучение исходит от любого радиопередающего устройства и возникает при интенсивных электродинамических процессах. Обе разновидности излучения имеют общие свойства и различия.

1. Мощность теплового радиоизлучения мала. Это объясняется тем, что спектр частот электромагнитных волн простирается от инфракрасного до сантиметрового диапазона, причем на долю радиоволн приходится менее 1% излучаемой энергии.

2. Спектральная плотность теплового излучения максимальна в инфракрасном диапазоне волн и значительно уменьшается с переходом к миллиметровым и сантиметровым волнам, тогда как нетепловое излучение лучше всего улавливается на низких частотах.
3. Пассивная радиолокация возможна только при температурной контрастности наблюдаемых объектов, то есть при различии их яркостных температур.
4. Естественное излучение тел независимо от своего происхождения беспорядочное, то есть пассивная радиолокация является процессом обнаружения шумоподобного сигнала на фоне шумов, а это требует надлежащей обработки излучения.
5. Собственное излучение непрерывно и принимается без опорных сигналов [4].

Пассивные локаторы по типу используемых локационных характеристик объектов делятся на радиотеплолокаторы и радиолокаторы по бортовым источникам радиоизлучений (аппаратура обеспечения безопасности полетов, системы управления оружием, активные помехи средствам ПВО, непреднамеренные излучения и т. д.).

Распознавание с помощью радиотеплолокаторов:

В качестве информации для распознавания используется естественное радиоизлучение целей теплового происхождения. Характеристиками радиотеплового излучения являются амплитудно-частотный спектр, поляризация, интенсивность излучения и т. д.

Расчеты показывают, что для излучателей, имеющих комнатную температуру с площадью 1 м^2 , суммарная мощность теплового излучения равна 478 Вт, частота соответствует длине волны 9,6 мкм, а на волнах, длиннее 1 мм, излучается мощность 8 мВт, т. е. примерно 0,001 % общей мощности излучения. При увеличении температуры объектов доля мощности, приходящаяся на радиодиапазон, сокращается.

Тем не менее, из-за высокой чувствительности приемных устройств и относительно незначительного затухания радиоволн радиотепловое излучение объектов принимается с больших расстояний, чем световое и инфракрасное излучения. Следует отметить, что диаграммы направленностей (ДН) радиотепловых излучателей обладают гораздо большей равномерностью, чем ЭПР вторичного излучения, так как радиотепловое излучение определяется совокупностью не зависящих друг от друга излучателей.

В качестве объектов, которые могут распознаваться по их радиотепловому излучению, по нашему мнению, могут быть асфальтовые и бетонные покрытия дорог и аэродромов, типы реактивных самолетов (по факелам двигателей), виды летательных аппаратов при полете в атмосфере со сверхзвуковыми скоростями; типы кораблей по виду контрастов различных элементов конструкций корабля, айсберги и т. д. Аппаратурная реализация радиотеплолокационных методов осуществляется с помощью радиометров, представляющих собой широкополосные приемники супергетеродинного типа или прямого усиления. Как правило, с их помощью определяют лишь среднюю мощность сигналов и угловые координаты объектов [5].

Однако следует учитывать, что на работу радиотеплолокаторов оказывают существенное мешающее воздействие излучения земной поверхности, атмосферы, облаков, Солнца и т. д. Поэтому дальности, на которых может осуществляться распознавание, ограничены сотнями метров.

Импульсный метод

В основе наиболее распространенного вида радиолокации радиолокации с зондирующим излучением лежит явление отражения радиоволн. Импульсная РЛС периодически излучает кратковременные импульсы сверхвысокочастотных колебаний (СВЧ), а в промежутке между посылаемыми (зондирующими) импульсами принимает отраженные от объектов импульсные сигналы.

Отраженный импульсный сигнал от каждого объекта запаздывает по отношению к зондирующему сигналу на время $t_D = 2D/c$, где D – расстояние до объекта; c – скорость распространения радиоволн.

По этому интервалу времени определяется расстояние или дальность $D = t_D c / 2$, а с помощью остронаправленной антенны РЛС – направление (курсовой угол или пеленг) на обнаруженный объект (цель). При одновременном обнаружении нескольких объектов принимаемые отраженные сигналы будут смещены во времени в зависимости от дальности до этих объектов. Отмеченная особенность импульсного режима работы РЛС позволяет довольно просто одновременно наблюдать за многими объектами, расположенными в радиусе действия РЛС. К преимуществам импульсной РЛС относится также сравнительная простота использования одной и той же антенны, как для передачи, так и для приема радиолокационных сигналов.

Недостатками импульсных РЛС являются необходимость применения больших пиковых мощностей; сложность определения скорости движения объектов; невозможность измерения

очень малых расстояний и относительно большая минимальная дальность радиолокационного обнаружения, зависящие от длительности импульсов, минимальное значение которых ограничивается шириной частотного спектра и временем протекания переходных процессов в аппаратуре.

Несмотря на отмеченные недостатки, преимущества импульсного метода радиолокации, обеспечивающие работу РЛС в режиме кругового обзора, являются решающими.

Применение пассивной радиолокации для распознавания:

Пассивные локаторы по типу используемых локационных характеристик объектов делятся на радиотеплолокаторы и радиолокаторы по бортовым источникам радиоизлучений (аппаратура обеспечения безопасности полетов, системы управления оружием, активные помехи средствам ПВО, непреднамеренные излучения и т. д.) [11].

Компьютерные программы моделирования электромагнитных полей

Если источник точечный (бесконечно малый), то понятно, что волны, расходящиеся от него, в свободном пространстве будут сферическими.

То есть одинаковыми по всем трем пространственным координатам. В таких условиях решение трехмерного волнового уравнения получается довольно простым: поле убывает обратно пропорционально расстоянию.

$$\nabla \vec{E} = p/\epsilon_0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B}/\partial t \quad (2)$$

$$\nabla \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = j/\epsilon_0 c^2 + (1/c^2)\partial \vec{E}/\partial t \quad (4)$$

Но точечных источников не бывает. Реально они все протяженные. Представим протяженный источник как сумму большого числа точечных источников (а для каждого из них мы поле считать уже умеем). А потом просуммируем все поля от всех точечных источников. Точнее проинтегрируем (интеграл – это ведь сумма) по всему объему.

Получим два интегральных уравнения: интегральное уравнение электрического поля: electric-field integral equation (EFIE) и интегральное уравнение магнитного поля magnetic Field Integral Equation (MFIE).

Исходными данными для этих уравнений является геометрия рассчитываемого источника поля (антенны, например) и распределение токов в пространстве.

Два свойства EFIE делают его незаменимым для расчета антенн:

EFIE позволяет решать задачи излучения и рассеяния в неограниченной области (граница которой находится в бесконечности). Иными словами, можно рассчитывать излучающую антенну (ее поле и уходит в бесконечность).

EFIE может быть решено численными методами, в частности, методом моментов.

$$\partial^2 \vec{E}/\partial x^2 + \partial^2 \vec{E}/\partial y^2 + \partial^2 \vec{E}/\partial z^2 - (1/c^2)\partial^2 \vec{E}/\partial t^2 = 0$$

Для расчета полей в ограниченной области (например, резонатор, волновод, и т.п.) лучше подходит MFIE.

Компьютерные программы моделирования антенн (например, MMANA-GAL, GAL-ANA) работают, решая уравнение электрического поля EFIE для каждой конкретной антенны.

Вывод

В радиолокации измеряют расстояние до объекта (дальнометрия, или дистанциометрия), направление прихода сигналов (пеленгация), радиальную и угловую скорости движения объекта и т. д. Радиолокационное наблюдение объектов позволяет также выявлять их многие характерные особенности, например определять параметры ледового покрова водной поверхности, влагосодержание атмосферы, размеры и конфигурацию объекта и т. п. Данные измерений могут быть дискретными (вырабатываемыми через определённые интервалы времени) или непрерывными. Объекты могут быть одиночными или множественными либо представлять собой сплошные образования. Возможно сложное (комбинированное) наблюдение, например, радиолокационный обзор пространства в некотором секторе, позволяющий производить поиск и обнаружение новых объектов в этом секторе и одновременно непрерывно получать текущие координаты уже обнаруженных объектов.

В пассивной радиолокации объектами обработки являются случайные волновые поля, создаваемые тепловым излучением тел. Поэтому пассивную радиолокацию часто называют радиотеплолокацией или радиометрией.

В пассивной радиолокации используется собственное тепловое электромагнитное излучение объектов в радиообластях спектра. Это излучение поступает в приемник РЛС для определения угловых координат цели.

Достоинством пассивных РЛС являются скрытность их работы, связанное с отсутствием излучения. По этой же причине энергетические характеристики, габариты и масса пассивных РЛС выгодно отличает их от РЛС, работающих в активном режиме. К недостаткам радиометрических методов следует отнести малый уровень и случайный характер принимаемых сигналов и требуемое вследствие этого большое время накопления, что делает системы теплолокации очень инерционными и затрудняет их работу при больших скоростях взаимного перемещения станции и объекта.

Пассивная радиолокация тесно связана с радиопеленгацией – отраслью радионавигации, основанной на использовании методов и средств определения направления на объекты, имеющие источники радиоизлучения.

Мы выражаем глубокую признательность за оказание помощи в написании данной работы нашему научному руководителю-Тархову Дмитрию Альбертовичу.

Литература

1. Корсунов Н. И., Егоров Д. В., Математическая модель определения пространственных координат методом пассивной радиолокации // Москва: Изд. Научные ведомости, 2014 – 76 с.
2. Боев Н. М., Шаршавин П. В., Нигруца И. В., Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния Известия Южного федерального университета. Технические науки 2014.3 – с47.
3. Ильин Е. М., Климов А. Э., Пашин Н. С., Полубехин А. И., Черевко А. Г., Шумский В. Н, Пассивные локационные системы. Перспективы и решения Вестник СибГУТИ 2015.2 – с7.
4. Белоцерковский Г. М., Основы радиолокации и радиолокационные устройств Москва "Сов. Радио"1975.
5. Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н., Серебряков Г. Г., Распределенная интеллектуальная система управления группой беспилотных летательных аппаратов: архитектура и программно-математическое обеспечение Известия ЮФУ. Технические науки 2016.1 – с29.
6. Цариченко С. Г., Родиченко Н. С., Беспилотные летательные аппараты, как средство повышения эффективности оперативно-тактической деятельности пожарно-спасательных подразделений Известия Южного федерального университета. Технические науки 2015.1 – с81.
7. Петров В. Ф., Барунин А. А., Терентьев А. И., Модель системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом Известия Тульского государственного университета. Технические науки 2014.12-2 – с55.
8. Дониченко А. А., Чиров Д. С., Обоснование требований к системе связи беспилотных летательных аппаратов средней и большой дальности T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт 2015.12 – с47.
9. Тархов Д.А. Математическое моделирование физико-технических объектов на основе структурной и параметрической адаптации искусственных нейронных сетей-2006.
10. Васильев А.Н., Тархов Д. А. Параметрические нейросетевые модели классических и неклассических задач для уравнения теплопроводности Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки-Выпуск 3(153)/2012.
11. Анцифоров И.А.,Решетников А.Е. Виды радиолокации

References

1. Korsunov N.I., Egorov D.V. A mathematical model for determining the spatial coordinates of the method of passive radar – Moscow: Publishing House:Scientific statements, 2014. -76 p.
2. Boev N.M., Sharshavin P.V., Nigrutsa I.V. Building of communication systems of unmanned aerial vehicles for the transmission of information over long distances – Southern Federal University: Engineering Science, 2014.- 47p.
3. Ilyin E.M., Klimov E.M., Pashchin E.M., Polubehin E.M., Cherevko A.G.,Shumsky V.N. Passive location systems. Prospects and solves- Herald SibSUTI, 2015. 7p.
4. Belotserkovskii G.M. Fundamentals of radar and radar devices- Moscow " Soviet Radio", 1975.
5. Evdokimenko V.N., Krasilschikov M.N., Serebryakov G.G . Distributed intelligent control group drones: architecture, software and mathematicalprocuring- News SFU. Engineering 2016 -29 p.
6. Tsarichenko S.G., Rodichenko N.S. Unmanned aerial vehicles as a means of improving the efficiency of operational and tactical activities of fire-rescue units, Southern Federal University: Engineering 2015.- 81с.
7. Petrov V.F., Barunin A.A.,Terentyev A.I. Model of automatic control system of unmanned aerial vehicles- News of the Tula State University: Engineering 2014.- 55p.
8. Donichenko A.A., Chirov A.A. Justification of requirements to the communication system of unmanned aerial vehicles, enforcement of medium and long-range T-Comm – Telecommunications and Transport, 2015.-47p.
9. Tarkhov D.A. Mathematical modeling of physical and technical objects on the basis of structural and parametric adaptation of artificial neural networks-2006.
10. Vasilyev A.N., Tarkhov D.A. Parametric neural network model of classical and nonclassical problems for the heat equation Scientific and technical statements STU. Humanities and social science-Issue 3 (153) / 2012.
11. Antsiforov I.A.,Reshetnikov A.E. Types of radiolocation

Об авторах:

Виноходов Темир Васильевич, студент кафедры гидродинамики института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета им.Петра Великого;

Капицин Даниил Романович, студент кафедры гидродинамики института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета им.Петра Великого, kapitsin.dan@gmail.com;

Соколов Владимир Александрович, студент кафедры гидродинамики института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета им.Петра Великого.