

Д. А. Затучный

МЕТОДЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫМ РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ АТАКАМ НА НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

D. A. Zatuchnyy

METHODS OF PREVENTING UNAUTHORIZED ELECTRONIC ATTACKS ON THE NAVIGATION SYSTEM OF THE AIRCRAFT OF CIVIL AVIATION

Аннотация. Рассмотрены методы борьбы с различными организованными радиотехническими воздействиями на навигационные системы воздушного судна гражданской авиации. Заметно усиливающаяся активность различных террористических группировок выдвигает на первый план проблемы обеспечения безопасности как страны в целом, так и отдельных ее отраслей хозяйственной деятельности. Естественно это относится к обеспечению безопасности на транспорте, и в частности, в гражданской авиации. В настоящее время можно предположить о возможном и скорее всего объективно естественном, новом направлении в террористической деятельности, связанным с нанесением радиотехнических ударов по навигационным системам обеспечения полета воздушного судна. Проведена классификация помех функционированию навигационных систем воздушного судна гражданской авиации. Организованные помехи функционированию навигационных систем воздушного судна гражданской авиации разделены на помехи, имеющие своей целью полное разрушение навигационного сообщения и имитирующие навигационный сигнал. Обоснована возможность постановки террористическими группировками заградительных помех, так как мощность сигналов спутниковой радионавигационной системы довольно мала и поэтому они совершенно уязвимы для подавления даже передатчиками, работающими с небольшой мощностью. Приведен метод противодействия заградительным помехам, воздействующим на навигационные системы воздушного судна гражданской авиации, при террористических радиотехнических атаках на основе использования свойства для узкополосных систем, связанного с наличием провалов в их диаграмме направленности. Приведен метод определения и отбраковки навигационных помех путем анализа пространства сигналов. Приведено отличие этого метода от метода фазовых антенных решеток, где процедура подавления помехового сигнала построена на создании некоторого провала в диаграмме направленности путем вычитания из сигнала главной антенны взвешенной суммы сигналов антенн, определенных как периферийные. Приведены результаты проведенного эксперимента по подавлению заградительной помехи.

Abstract. In this article, methods of combating various organized radio-technical impacts on the navigation systems of a civil aviation aircraft are considered. The noticeably increasing activity of various terrorist groups highlights the problems of ensuring the security of both the country as a whole and its separate branches of economic activity. Naturally, this refers to the provision of safety in transport, and in particular in civil aviation. At the present time, it is possible to assume a possible and, most likely, objectively natural, new direction in terrorist activities related to the infliction of radio-technical strikes on the navigation systems for ensuring the flight of aircraft. Classification of interference to the functioning of the civil aviation aircraft navigation systems was carried out. The organized interference to the operation of the civil aviation aircraft navigation systems is divided into interference, with the aim of completely destroying the navigation message and imitating the navigation signal. The possibility of terrorists posing blocking interference is justified, since the signal strength of the satellite radio navigation system is rather small and therefore they are completely vulnerable to suppression even by transmitters operating with low power. The method of counteraction to obstructive interference affecting navigation systems of civil aviation aircraft is given, in the case of terrorist radio-technical attacks based on the use of the property for narrowband systems, connected with the presence of gaps in their directional pattern. A method for determining and rejecting navigation interference by analyzing signal space is presented. This method differs from the method of phase array antennas, where the procedure for suppressing the interference signal is based on creating a certain dip in the radiation pattern by subtracting the weighted sum of antenna signals, determined as peripheral signals from the main antenna signal. The results of the experiment on suppression of interference noise are presented. The method of rejecting such a noise based on the integrated use of the reception indicator of the satellite radio navigation system and the inertial navigation system is considered. The method of rejecting such a noise based on the integrated use of the reception indicator of the satellite radio navigation system and the inertial navigation system is considered. The method is based on the solution of the inverse navigation problem, which con-

Рассмотрен случай создания противником имитационной помехи, которая может быть выявлена не сразу, но является наиболее опасной на наиболее ответственных этапах полета при решении навигационных задач с ограниченным временным ресурсом. Рассмотрен метод отбраковки подобной помехи, основанный на комплексном использовании приемоиндикатора спутниковой радионавигационной системы и инерциальной навигационной системы. В основе метода лежит решение обратной навигационной задачи, состоящей из двух этапов. Первоначально происходит вычисление координат воздушного судна по инерциальной навигационной системе и перевод их в эквивалентные псевдодальности. На втором этапе происходит сравнение этих псевдодальностей с псевдодальностями, вычисленными по спутниковой радионавигационной системе. Если эта разница превышает некоторое допусковое значение, то этот сигнал исключается из обработки.

Ключевые слова: организованная навигационная помеха, имитация навигационного сигнала, определение и отбраковка навигационной помехи, заградительная помеха, псевдодальность.

sists of two stages. Initially, the coordinates of the aircraft are calculated using the inertial navigation system and translating them into equivalent pseudo-ranges. At the second stage, these pseudoranges are compared with pseudoranges computed from the satellite radio navigation system. If this difference exceeds a certain tolerance value, then this signal is excluded from the processing.

Key words: organized navigation noise, imitation of the navigation signal, detection and rejection of navigational interference, obstructive interference, pseudo-range.

Введение

Стремительный прогресс в области информационных технологий затронул практически все стороны жизни. В обороты речи вошли понятия «информационная атака» и «информационная защита», «информационная безопасность» и, наконец, «информационное оружие».

Лучшим доказательством серьезности возникающих проблем является принятие «Доктрины информационной безопасности РФ», утвержденной Президентом РФ 5 декабря 2016 г., где рассмотрены направления возможного несанкционированного информационного воздействия на все стороны жизнедеятельности человека и техники.

Заметно усиливающаяся активность различных террористических группировок выдвигает на первый план проблемы обеспечения безопасности как страны в целом, так и отдельных ее отраслей хозяйственной деятельности. Естественно, это относится к обеспечению безопасности на транспорте и, в частности, в гражданской авиации (ГА). Известны трагические случаи с катастрофами воздушных судов (ВС), взрыв в аэропорту Домодедово. Указанные случаи свидетельствуют о том, что гражданская авиация является объектом для террористических атак.

При этом перечисленные случаи характеризуются тем, что до последнего времени террористические атаки на ВС проводились путем прямой «лобовой» атаки – взрывчатые средства проносились непосредственно на борта ВС. В силу того, что наше государство, как и другие страны мира, уделяет достаточно большое внимание этой проблеме, особого нарастания угроз в этом направлении ожидать не приходится, что, конечно, не исключает случаев отдельных преступлений.

Если исходить из того, что преступные элементы не откажутся от совершения преступлений в отношении ГА, то можно предположить о возможном и скорее всего объективно естественном, новом направлении в этой деятельности, связанным с **нанесением радиотехнических ударов по навигационным системам обеспечения полета ВС**. К тому же, судя по средствам массовой информации, преступные группировки располагают для этого необходимым инженерно-научным потенциалом, финансовыми средствами и соответствующей экспериментальной базой.

Классификация помех функционированию навигационных систем воздушного судна гражданской авиации

По характеру воздействия помехи навигационным системам ВС ГА можно разделить на следующие виды:

1) организованные, связанные с умышленным воздействием со стороны террористических группировок или хулиганских элементов;

- 2) естественные, связанные с характером отражения от подстилающей поверхности и спецификой полярных широт;
 - 3) радиоэлектронные, связанные с индустриальной деятельностью и спецификой среды распространения сигнала;
 - 4) непредумышленные, связанные с необходимостью маневра ВС или посадки на необорудованные площадки в горной или труднодоступной местности.
- Организованные помехи, в свою очередь, можно разделить на следующие виды:
- 1) подавление навигационного сигнала (разрушение навигационного сообщения);
 - 2) имитация навигационного сигнала (спуфинг).

Навигационная помеха воздушному судну гражданской авиации в виде разрушения навигационного сообщения

Основная задача, которую ставят перед собой террористические группировки при создании организованных помех функционированию навигационных систем ВС ГА, является изменение навигационной области путем различных воздействий на навигационные сигналы.

Заградительные помехи, приводящие к полному разрушению навигационного сообщения, являются одним из возможных способов для террористических группировок при организации радиотехнических атак на навигационные системы ВС.

Для обеспечения высокой помехоустойчивости при функционировании навигационных систем ВС ГА необходимо учитывать три составляющие:

- 1) рациональное использование различных параметров самого сигнала, которые влияют на его помехоустойчивость;
- 2) при возникновении небольшого отношения сигнал-шум должно быть обеспечено функционирование всех навигационных систем ВС ГА, отвечающих за определение его местоположения;
- 3) разработка методов и алгоритмов, дающих возможность для эффективной борьбы с различными навигационными помехами ВС ГА.

Подавление помехи происходит путем обработки в корреляторе шумоподобных сигналов, используемых в качестве сигналов СРНС. Основной характеристикой этого действия является коэффициент усиления шумоподобного сигнала, который рассчитывается следующим образом:

$$K_{\text{шпс}} = 2B,$$

где B – это база сигнала.

Проведенные исследования показали, что база сигнала, используемого для санкционированных потребителей СРНС ГЛОНАСС, равняется 5110. В данном случае коэффициент характеризует подавление навигационных помех, исходя из использования возможностей сигнала:

$$K_{\text{пснг}} = 10 \log_{10}(2 \cdot 5110) = 40 \text{ дб.}$$

Возможность постановки террористическими группировками заградительных помех вполне реальна, так как мощность сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС) довольно мала и поэтому они совершенно уязвимы для подавления даже передатчиками, работающими с небольшой мощностью [1].

Развитие современной радиоэлектронной техники дает возможность легко реализовать устройства подавления и способствует повышению количества умышленных инцидентов подавления. Использование генератора навигационного сигнала, который находится в пределах диапазона $L1$ или $L2$, может рассматриваться как одна из разновидностей заградительной помехи. Следует отметить, что для эффективной борьбы с подобными помехами необходимо учитывать такие факторы, как свойства навигационной помехи, тип источника помехи и место, откуда происходит ее излучение [5].

Суть метода противодействия заградительным помехам, воздействующим на навигационные системы ВС ГА, при террористических радиотехнических атаках путем использования свойства для узкополосных систем, связанного с наличием провалов в их диаграмме направленности, заключается в фиксировании одного из антенных элементов (АЭ). Определим его в качестве главного. Другие антенные элементы будем называть периферийными. Таким образом, идея предложенного способа состоит в вычислении величины фазовых набегов навигационных помех на выходе АЭ, которые мы назвали периферийными, и последующем вычитании из главного АЭ данной помехи.

Суть метода определения и отбраковки навигационных помех путем анализа пространства сигналов заключается в следующем. Рассмотрим ситуацию с N разнесенными антеннами, J ($J < N$) источниками сильных помех и S источниками слабых полезных сигналов. Следует отметить, что уровень собственного шума антенн является меньше уровня помех, но больше уровня полезного сигнала. Также необходимо учитывать, что все сигналы из имеющегося набора являются, во-первых, взаимно некоррелированными, а, во-вторых, распространяются в пространстве, в котором отсутствуют переотражения.

Для каждого АЭ сигналы переводятся в цифровую форму и проходят процедуру накопления. Далее производится вычисление выборочной ковариационной матрицы. Следующим этапом необходимо провести процедуру спектрального разложения этой матрицы с целью получения собственных значений, а для этих значений находятся соответствующие им собственные вектора. Эти собственные вектора в N -мерном пространстве образуют некоторый базис. Точками в этом базисе являются отсчеты с АЭ.

На основе анализа имеющихся изначально данных имеется набор из J собственных значений, превосходящих некоторое минимальное собственное значение λ_{\min} и $N - J$ собственных значений, сгруппированных около него. Следовательно, образуется $N - J$ собственных векторов, создающих базис подпространства шумов, которые могут также содержать полезный сигнал или сигналов антенн, которые являются маломощными и некоррелированными и J собственных векторов, создающих базис подпространства помех или сигналов антенн, которые являются коррелированными. Таким образом, отбрасываются находящиеся в подпространстве помех составляющие сигналов с антенной системы.

Главное отличие этого метода от метода фазовых антенных решеток (ФАР), где процедура подавления помехового сигнала построена на создании некоторого провала в диаграмме направленности путем вычитания из сигнала главной антенны взвешенной суммы сигналов антенн, определенных как периферийные состоит в том, что при использовании данного метода используется процедура декорреляции сигналов, которые достигают антенной решетки. На следующем этапе происходит детектирование помехи, а затем ее исключение путем удаления необходимых составляющих.

Получение вектора сигналов X является главным свойством метода выделения и исключения помех путем анализа пространства сигналов. Метод борьбы с заградительными помехами, основанный на создании провала в направлении помехи, дает возможность определить только одну компоненту вектора сигналов X . К достоинству этого метода следует отнести то обстоятельство, что он дает возможность определить вектора помех X по отдельности. Это возможно, в том числе, и для случая идентичности спектров помех.

Следует заметить, что определение вектора сигнала дает возможность определить максимальное значение сигнала с созданием модели луча в направлении на каждый НКА.

Был проведен эксперимент по подавлению заградительной помехи. Эксперимент проводился в безэховой камере – экранированной комнате без внешних излучений и покрытой специальным радиографическим материалом. В центре комнаты находилась антенная решетка. Источником помехи являлся генератор, работающий на частоте $L1 \approx 1600$ МГц.

Результаты эксперимента представлены на рис. 1.

Результаты подавления составляют 45–46 дБ для узкой полосы.

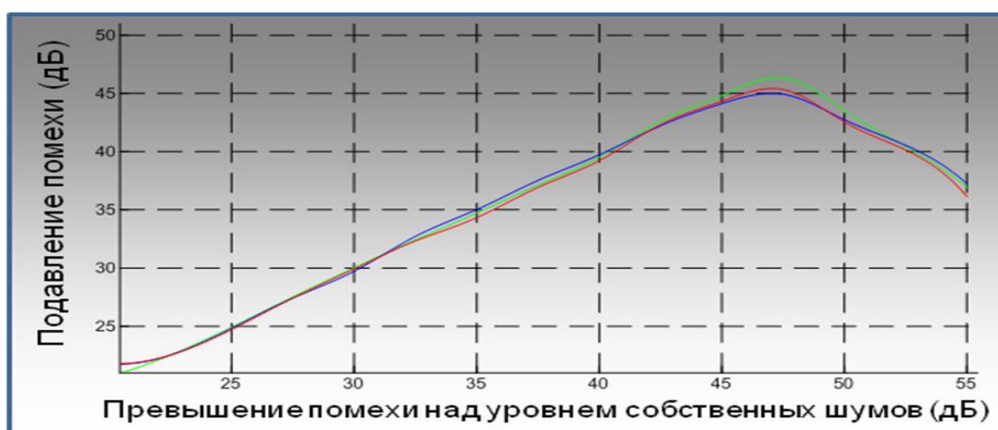


Рис. 1. Результаты эксперимента по подавлению заградительной помехи

Навигационная помеха воздушному судну гражданской авиации в виде имитации навигационного сигнала

В случае постановки противником помехи, полностью разрушающей навигационное сообщение, можно сразу перейти от использования СРНС к альтернативным навигационным системам.

Следовательно, более интересен случай создания противником имитационной помехи, которая может быть выявлена не сразу. Эта помеха опасна на наиболее ответственных этапах полета при решении навигационных задач с ограниченным временным ресурсом (например, заход на посадку), так как затрудняет деятельность пользователя и не сразу выявляется. В этом случае возможно определение местоположения ВС, но с большими ошибками. При этом для выявления этой помехи необходимо дополнительное время.

Таким образом, для террористических группировок может быть достаточно актуальна задача создания сигналоподобной имитационной помехи с целью внести погрешности в определение местоположения ВС [2]. Если подобный сигнал будет излучаться ретранслятором, установленным на подвижном объекте (например, беспилотном летательном аппарате), то возникает проблема, связанная с быстрой «выбравкой» подобной помехи (рис. 2).

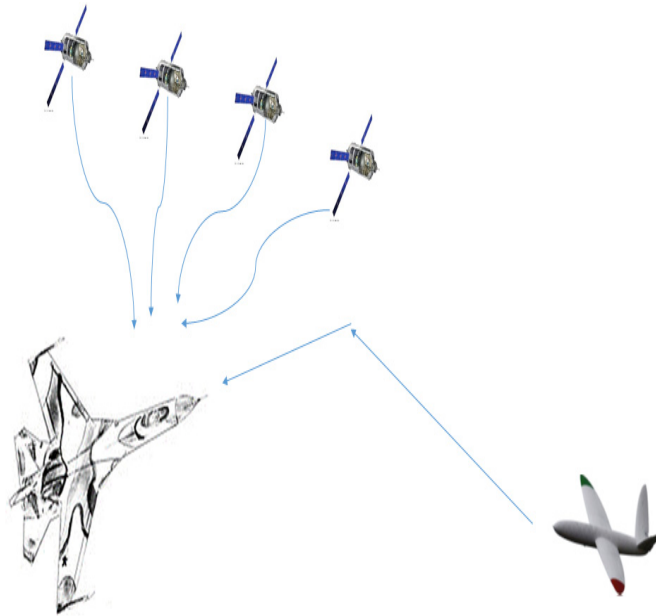


Рис. 2. Создание имитационной навигационной помехи

Из вышеизложенного явно следует актуальность создания способов возможного снижения подобного радиотехнического воздействия террористической группировки на точность определения местоположения ВС [3].

Рассмотрим следующий метод. При нормальном функционировании в штатном режиме всех НКА рабочего созвездия СРНС и ИНС в момент времени t_k создается вектор разностей скоростей Δv_k , измеренных ИНС $v_k^{\text{ИНС}}$ и приемником СРНС $v_k^{\text{СРНС}}$ в один и тот же момент времени t_k [6]:

$$\Delta v_k = v_k^{\text{СРНС}} - v_k^{\text{ИНС}}. \quad (1)$$

Найденная оценка Δv_k поступает в блок прогноза, представляющий собой разомкнутый фильтр Калмана [11].

Начиная с момента t_k в течение интервала времени Δt с частотой обновления навигационной информации проводится пересчет текущих координат ИНС с учетом наблюдаемых расхождений по координатам СРНС и ИНС в эквивалентные псевдодальности до всех КА рабочего созвездия $R_{k+i}^{\text{ИНС}}$ [7]:

$$R_{k+i}^{\text{ИНС}} = \sqrt{(X_{k+i}^{\text{КА}} - X_{k+i}^{\text{ИНС}})^2 + (Y_{k+i}^{\text{КА}} - Y_{k+i}^{\text{ИНС}})^2 + (Z_{k+i}^{\text{КА}} - Z_{k+i}^{\text{ИНС}})^2}. \quad (2)$$

Прогнозируемый вектор псевдодальностей на основе информации от ИНС $R_{k+i}^{ИНС}$, а также вектор псевдодальностей, измеренных ПИ СРНС $PR_{k+i}^{СРНС}$, поступают в блок анализа различий псевдодальностей [12].

В этом блоке формируется вектор, представляющий собой разность векторов $R_{k+i}^{ИНС}$ и $PR_{k+i}^{СРНС}$ [8]:

$$\Delta R_{k+i} = R_{k+i}^{ИНС} - PR_{k+i}^{СРНС},$$

$$\Delta R_{k+i} = \begin{bmatrix} \Delta r(1)_{k+i} \\ \Delta r(2)_{k+i} \\ \text{-----} \\ \Delta r(j)_{k+i} \\ \text{-----} \\ \Delta r(m)_{k+i} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где m – число КА, находящихся в режиме сопровождения в измерительных каналах ПИ СРНС.

Псевдодальности $\Delta r(j)_{k+i}$ вектора различий ΔR_{k+i} , полученного путем обработки информации рассматриваемых навигационных приборов, могут быть выбраны в качестве диагностических признаков для обнаружения «ложных спутников», созданных противником с целью создать уводящую помеху [9].

Предположим ситуацию, когда в момент времени t_k , находящийся в пределах интервала Δt , при очередном обновлении информации происходит «захват» «ложного спутника» в качестве j -го КА рабочего созвездия. Это приводит к появлению аномально большой компоненты $|\Delta r_e(j)_{k+i}|$ вектора ΔR_{k+i} , соответствующей j -му измерительному каналу. Если j -я компонента превышает порог, соответствующий допустимому уровню ошибки определения координат в горизонтальной плоскости (Horizontal Alert Level, HAL), задаваемому для разных этапов полета ВС стандартами [10]:

$$|\Delta r_e(j)_{k+i}| \geq \Delta r_{\max}, \tag{4}$$

то принимается решение о наличии аномального измерения в j -м измерительном канале ПИ СРНС j -й КА исключается из решения навигационной задачи [4].

Диагностирование заключается в проверке условия:

$$\Delta R_{k+i}^j \geq \Delta r_{\max}. \tag{5}$$

Полученное соотношение позволяет ответить на вопрос о наличии аномального измерения, которое приводит к ошибкам, сравнимым с максимальными ошибками определения горизонтальных координат для текущего этапа полета ВС. Аномальное измерение псевдодальности, причина которого не приводит к ошибкам, превышающим допустимую, при диагностировании, заключающемся в сравнении каждой компоненты вектора различий ΔR_{k+i} с величиной (4), будет квалифицировано как нормальное [13, 14].

Заключение

В данной работе рассмотрены методы борьбы с двумя основными видами организованных навигационных помех, которые возникают при радиотехнических атаках на навигационные системы воздушного судна гражданской авиации: заградительной помехи и имитационной помехи (спуфинг). Данные методы применимы к борьбе с помехами на этапах полета воздушного судна, требующим ограниченного временного ресурса – заход на посадку. К перспективному направлению дальнейших научных исследований в этом направлении следует отнести разработку методов борьбы с «интеллектуальными» помехами, которые могут быть вполне эффективны на этапе полета по маршруту.

Библиографический список

1. Соколов, И. М. Использование адаптивных рекурсивных фильтров в антенном подавителе помех глобальных навигационных спутниковых систем / И. М. Соколов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 210. – С. 94–96.
2. Кинкулькин, И. Е. Контроль целостности интегрированной системы СРНС–ИНС / И. Е. Кинкулькин, Д. М. Сурков, В. Д. Рубцов // Новости навигации. – 2003. – № 2.
3. Трифонов, А. П. Квазиоптимальная оценка дальности и скорости по лазерным измерениям дальности / А. П. Трифонов, А. В. Курбатов, О. В. Чернояров, Б. И. Шахтарин // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60, № 11. – С. 1193.
4. Акиншин, Н. С. Повышение точности навигационного обеспечения потребителя путем ее комплексирования с инерциальной навигационной системой / Н. С. Акиншин, Д. А. Затучный, Ю. И. Мамон, Д. В. Шевченко // Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации : сб. докл. 7-й Всерос. конф. – М., 2017. – С. 177–182.
5. К проблеме повышения виброустойчивости бортовой электронной аппаратуры / Е. А. Данилова, Е. А. Кузина, А. В. Лысенко, В. А. Трусов, Н. К. Юрков // Научный вестник МГТУ ГА. – 2017. – Т. 20, № 5. – С. 109–115.
6. Юрков, Н. К. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Н. К. Юрков, П. Г. Андреев, А. С. Жумабаева // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 201–203.
7. Исследование программных пакетов моделирования влияния электромагнитных воздействий на изделия радиоэлектронных средств / С. А. Бростилов, Т. Ю. Бростилова, Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, А. О. Бекбаулиев // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 206–209.
8. Криницкий, Г. В. Алгоритм обработки сигналов в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем, предназначенной для обеспечения точного захода на посадку в условиях воздействия радиопомех / Г. В. Криницкий. – Научный вестник МГТУ ГА. – 2017. – Т. 20, № 5. – С. 43–49.
9. Затучный, Д. А. Выбор линии передачи данных для реализации режима автоматического зависящего наблюдения / Д. А. Затучный // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 186. – С. 149–151.
10. Затучный, Д. А. Оценка степени влияния различных факторов на навигационные определения ВС с использованием СРНС / Д. А. Затучный // Научный вестник МГТУ ГА. – 2010. – № 159. – С. 143–147.
11. Затучный, Д. А. Определение степени влияния среды на систему связи / Д. А. Затучный // Научный вестник МГТУ ГА. – 2010. – № 152. – С. 91–98.
12. Затучный, Д. А. Статистическая оценка достоверности навигационной информации, передаваемой с борта воздушного судна в режиме автоматического зависящего наблюдения / Д. А. Затучный // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 46–50. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-6.
13. Затучный, Д. А. К вопросу о достоверности передаваемой информации в режиме автоматического зависящего наблюдения / Д. А. Затучный // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 225–226.
14. Затучный, Д. А. Статистическая оценка достоверности навигационной информации, передаваемой с борта воздушного судна в режиме автоматического зависящего наблюдения / Д. А. Затучный // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 54–56.

Затучный Дмитрий Александрович
 кандидат технических наук, профессор,
 кафедра вычислительных машин, комплексов,
 систем и сетей,
 Московский государственный технический
 университет гражданской авиации
 (125993, Россия, г. Москва,
 Кронштадтский бульвар, 20)
 E-mail: zatuch@mail.ru

Zatuchnyy Dmitriy Aleksandrovich
 candidate of technical sciences, professor,
 sub-department of calculable machines, complexes,
 systems and networks,
 Moscow State Technical University of Civil Aviation
 (125993, 20 Kronshtadtskiy avenue, Moscow, Russia)

УДК 621.396.98.004.1

Затучный, Д. А.

Модели гористой подстилающей поверхности в задаче длинноволновой фазовой радионавигации / Д. А. Затучный // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 21–27. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-3.