

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ АКТИВНЫХ ПОМЕХ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В. И. Павлов¹, С. В. Артемова², Т. Ю. Дорохова¹, В. В. Аксенов¹

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (1),
prav1@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
кафедра информатики (2), ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский
технологический университет», г. Москва, Россия*

Ключевые слова: активные помехи; подвижный объект; радиолокационная система; самонаведение.

Аннотация: Приведены энергетические соотношения при действии активных помех на радиолокационные информационные системы подвижных объектов для полупассивного и вновь разрабатываемого полупассивного способов самонаведения. На базе энергетических соотношений определена дальность информационного контакта средств, участвующих в реализации способов самонаведения. Указаны перспективы разработки полупассивного способа самонаведения подвижных объектов.

Введение

Многие подвижные объекты (ПО), такие, например, как самолеты, корабли, автомобили и пр., оборудуются бортовыми радиолокационными информационными системами (РИС), позволяющими получать сведения об окружающей обстановке. Бортовые РИС применяются также для самонаведения, то есть сближения ПО с каким-либо объектом, называемым целью. Радиолокационные информационные системы принято классифицировать по способу целеуказания: активные – облучающие цель и наводящиеся по отраженному сигналу (априорно известному); полупассивные – предполагающие, что цель облучается какой-либо другой внешней системой и наводящиеся по отраженному сигналу (опять же – априорно известному); пассивные – наводящиеся по сигналам, излучаемым собственно целью [1]. Весьма важными характеристиками для информационных систем ПО являются пространственная область их применимости, в частности дальность информационного контакта с целью, и помехоустойчивость. Дальность применимости существующих бортовых РИС для различных вариантов их технической реализации и расположения относительно целей достаточно хорошо исследована теоретически и подтверждена практикой [2].

Самонаведение ПО, как правило, осуществляется в условиях активного помехового противодействия со стороны цели, реализуемого станциями постановки помех (ПП) на основании информации от станций радиотехнической разведки (РТР). Известными и часто применяемыми приемами противодействия являются постановка помех прикрития (станция ПП расположена вне цели) и самозащиты (станция ПП входит в состав оборудования цели) [3]. Кроме того, для понижения

радиолокационной заметности и, соответственно, дальности обнаружения, современные объекты, имеющие важное значение, выполняют по так называемой технологии Stealth для уменьшения их эффективной площади отражения [4]. В работе [5] предложен способ полупассивного самонаведения (ППС) ПО, одной из отличительных особенностей которого является повышенная дальность информационного контакта с целью, оборудованной станцией постановки активных помех. Сущность способа ППС заключается в провоцировании станций ПП на излучение помеховых сигналов с желаемыми параметрами с последующим использованием помеховых сигналов для самонаведения ПО [6].

Цель работы – обоснование энергетических соотношений при действии активных помех на радиолокационные информационные системы подвижных объектов и определение потенциальных дальностей применимости подвижных объектов для различных методов самонаведения.

Постановка задачи

Сравнению подлежат энергетические соотношения при функционировании РИС, применяемых для реализации существующего полуактивного и разрабатываемого полупассивного способов самонаведения ПО. В силу объективных обстоятельств данные способы в отличие от других обеспечивают наибольшую дальность применимости ПО. К этим обстоятельствам, прежде всего, относятся: относительно большие мощность P и коэффициент усиления G антенны передатчика зондирующего сигнала; влияние на дальность информационного контакта с целью длины волны λ зондирующего сигнала, эффективной площади рассеяния σ цели, а также особенностей распространения электромагнитной энергии по каналам «запроса» и «ответа» в соответствии с уравнениями радиолокации и противорадиолокации.

Для выявления наиболее существенных факторов влияния на дальность применимости ПО рассматривается следующая ситуация. Цель представляет собой летательный аппарат (ЛА), выполненный по технологии Stealth и оборудованный станциями РТР и ПП, при этом станция ПП может обладать передатчиком помех генераторного (постоянная выходная мощность) и/или ретрансляционного (варьируемая выходная мощность) типов. Цель реализует прием помехового противодействия – самозащита. Подвижный объект представляет собой самонаводящийся ЛА, оборудованный бортовой РИС полуактивного/полупассивного типа. В качестве источника зондирующего сигнала при полуактивном самонаведении выступает станция подсвета цели (ПЦ), излучающая сигнал, несущая частота которого согласована с частотой приемника бортовой полуактивной РИС самонаводящегося ЛА. Используемый диапазон длин волн при этом X : $\lambda = 2 \dots 4$ см. В качестве источника зондирующих сигналов при полупассивном самонаведении выступает станция ПЦ, излучающая два сигнала, один – в диапазоне L : $\lambda = 7 \dots 15$ см (применяется для обнаружения объектов с малой σ), второй, названный провоцирующим зондирующим сигналом (ПЗС), – в диапазоне X : $\lambda = 2 \dots 4$ см. При этом направления излучений зондирующих сигналов диапазонов L и X при полупассивном самонаведении совпадают. Цель, самонаводящиеся ПО и источники зондирующих сигналов располагаются на одной высоте, позволяющей не учитывать влияние земной поверхности на распространение сигналов. Габаритные характеристики приемников (приемных антенн) и качественные характеристики алгоритмов обработки входных сигналов в полуактивной и полупассивной РИС одинаковые. Данные допущения позволяют не учитывать ослабление сигналов в атмосфере и потери при обработке в приемниках. Мощности передатчиков зондирующих

сигналов, в том числе ПЗС, одинаковые и соответствуют средним значениям для существующих станций ПЦ [7]. Предполагается равенство ширины полосы пропускания приемника РИС ширине спектра помех, а также согласованность поляризации антенн станции ПП и приемника РИС ПО.

Обоснование энергетических соотношений

Энергетические соотношения при создании активных помех РИС ПО рассматриваются на примере ретрансляционного передатчика помех, как наиболее часто применяемого. Данный передатчик излучает помеховый сигнал, уровень мощности которого согласован с мощностью принимаемого станцией РТР зондирующего сигнала подавляемой РИС и способен переходить в режим генераторного передатчика.

Определим мощности отраженного от цели зондирующего сигнала P_c и помехи P_{Π} для случая противодействия полуактивной РИС, воспользовавшись схемой, представленной на рис. 1 [3]:

$$P_c = \frac{PG}{4\pi D^2} \sigma \frac{G_{\text{РИС}} \lambda^2}{(4\pi d)^2}; \quad (1)$$

$$P_{\Pi} = \frac{PG}{4\pi D^2} \frac{G_{\text{РТР}} \lambda^2}{4\pi} G_{\text{ПП}} \frac{G_{\text{РИС}} \lambda^2}{(4\pi d)^2}, \quad (2)$$

где D, d – соответственно удаление станции ПЦ и самонаводящегося ПО от цели; $G_{\text{РИС}}$ – коэффициент усиления антенны РИС ПО в направлении цели; $G_{\text{РТР}}, G_{\text{ПП}}$ – соответственно коэффициенты усиления антенны станций РТР и ПП в направлении ПО.

При действии широкополосной шумовой помехи максимальная дальность обнаружения цели $D_{\text{мп}}$ с требуемыми показателями вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги уменьшается по сравнению с максимальной дальностью обнаружения $D_{\text{м}}$ при отсутствии помехи в K_D раз

$$K_D = D_{\text{мп}} / D_{\text{м}} = 1 / \sqrt[4]{N_{\Pi} / N_0}, \quad (3)$$

где N_0, N_{Π} – спектральные плотности мощности внутреннего шума приемника РИС и шумовой помехи соответственно.

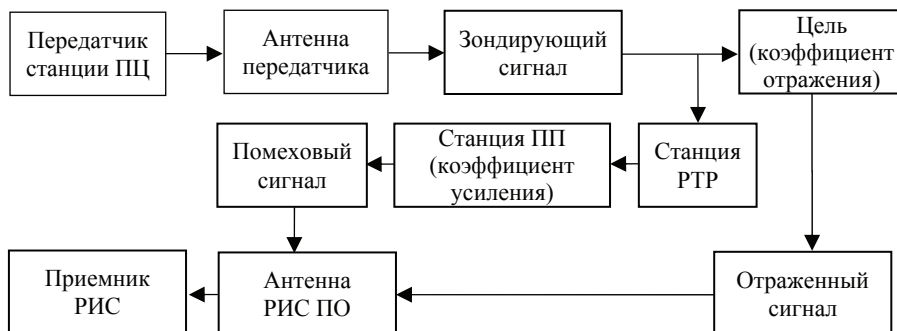


Рис. 1. Схема для определения мощности отраженного от цели зондирующего сигнала и помехи

Определим энергетические соотношения для случая противодействия полупассивной РИС с учетом того, что помеховый сигнал станции ПП, совмещенной с целью, рассматривается в качестве полезного. В данном случае в качестве источника зондирующего сигнала рассматривается передатчик ПЗС. Мощности принимаемого станцией РТР $P_{РТР}$ и принимаемого РИС ПО $P_{РИС}$ сигналов будут [8]:

$$P_{РТР} = \frac{PG G_{РТР} \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2}; \quad (4)$$

$$P_{РИС} = \frac{P_{ПП} G_{ПП} G_{РИС} \lambda^2}{(4\pi d)^2}. \quad (5)$$

Определение дальности информационного контакта радиолокационных информационных системам подвижных объектов с целью

Соотношения (1) – (5) являются основанием для определения и последующего сравнения потенциальной дальности информационного контакта РИС с целью для полупассивного и полупассивного способов самонаведения ПО. Особенность и отличие реализации ППС ПО заключается в излучении ПЗС в направлении цели по информации от внешних источников, например, от станции ПЦ диапазона L. В данном случае за счет высокой чувствительности станции РТР и функционирования станции ПП цели в соответствии с правилами радиоэлектронного противодействия [9 – 11] следует ожидать увеличения дальности информационного контакта.

Дальности при полупассивном самонаведении ПО при отсутствии $d_{ПА}$ и наличии $d_{ПАп}$ помех будут:

$$d_{ПА} = \sqrt{\frac{PG G_{РИС} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2 P_{\min}}}; \quad (6)$$

$$d_{ПАп} = \sqrt{\frac{PG G_{РИС} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2 P_{\min}}} \sqrt[4]{\frac{1}{N_{\Pi} / N_0}}, \quad (7)$$

где P_{\min} – чувствительность приемника РИС ПО при обнаружении сигнала с требуемыми показателями вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги; D – дальность обнаружения цели станцией ПЦ, определяемая в соответствии с основным уравнением радиолокации:

$$D = \sqrt[4]{\frac{PG t_n k_{ип} G_{прмПЦ} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 \alpha_{\Pi} N_{0ПЦ} k_{ш} q_{тр}}}, \quad (8)$$

где t_n – длительность когерентного накопления; $k_{ип}$, $G_{прмПЦ}$ – соответственно коэффициент использования площади и коэффициент направленного действия приемной антенны станции ПЦ; $k_{ш}$, $N_{0ПЦ}$ – соответственно коэффициент и спектральная плотность внутренних шумов приемника; α_{Π} – обобщенный коэффициент потерь; $q_{тр}$ – требуемое отношение сигнал/шум при обнаружении.

При ППС ПО дальности по каналу «запроса» $D_{ППз}$ и каналу «ответа» $D_{ППо}$ будут:

$$D_{ППз} = \sqrt{\frac{PG G_{РТР} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{РТР \min}}}; \quad (9)$$

$$d_{\text{ППо}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ПП}} G_{\text{ПП}} G_{\text{РИС}} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\text{min}}}}, \quad (10)$$

где $P_{\text{РТР min}}$ – чувствительность приемника станции РТР цели.

Определение потенциальных дальностей применимости ПО для различных методов самонаведения

Определение потенциальных дальностей применимости ПО осуществлялось в соответствии с формулами (6) – (10) с учетом следующих обстоятельств. Применение ПО возможно при устойчивом сопровождении входного сигнала, принимаемого РИС, что происходит на дальности меньшей по сравнению с дальностью информационного контакта с целью. При реализации способа ППС ПО удовлетворены основные требования к ПЗС: ПЗС формируется исходя из технических характеристик полупассивной системы самонаведения ПО; ПЗС имитирует один из возможных режимов сопровождения цели РИС, а источник имеет способность к излучению различных ПЗС; ПЗС может быть режимом сопровождения цели или только его имитировать; направление излучения ПЗС может согласовываться с РЛС обнаружения дециметрового и сантиметрового диапазонов. Станция ПП цели функционирует в соответствии с правилами радиоэлектронного противодействия, в том числе обеспечивая мощность помеховых сигналов в месте расположения подавляемой РИС, превышающую на 15 – 20 % мощность отраженных от цели зондирующих сигналов.

Результаты моделирования по формулам (6) – (10) для одинаковых технических характеристик полуактивной и полупассивной РИС ПО показаны на рис. 2.

На рисунке 2, *а, б*, графики зависимостей соответствующих дальностей от длины волны зондирующего сигнала показаны для наиболее характерных значений эффективной площади рассеяния целей σ , в том числе выполненных по технологии Stealth. На рисунке 2, *в*, приведены графики зависимостей дальностей по так называемым каналам «запроса» и «ответа». В связи с тем, что в соответствии с сущностью способа ППС станция ПЦ излучает ПЗС в направлении цели без необходимости ее сопровождения, то зависимость дальности по каналу

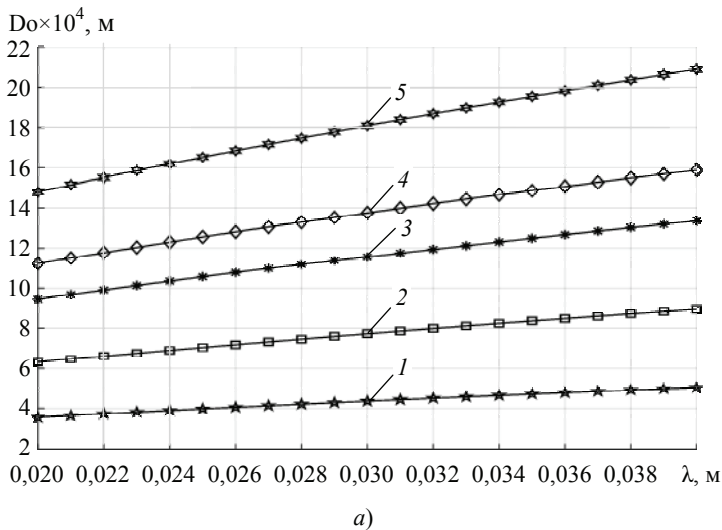
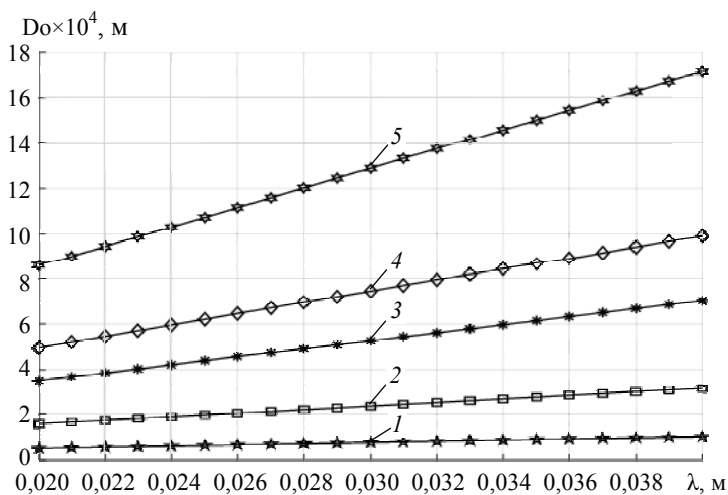
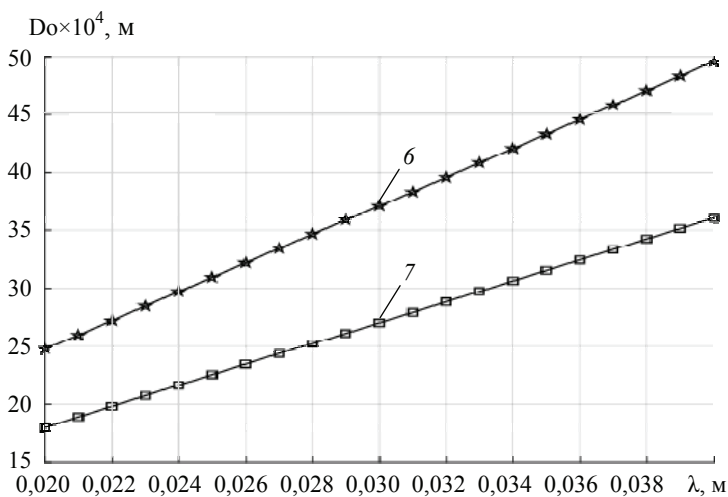


Рис. 2. Дальности обнаружения цели станцией ПЦ (а) (начало):
1 – $\sigma = 0,01$; 2 – $\sigma = 0,1$; 3 – $\sigma = 0,5$; 4 – $\sigma = 1$; 5 – $\sigma = 3$



б)



е)

Рис. 2. Дальности полуактивного (б) и полупассивного (е) самонаведения ПО (окончание):
 1 – $\sigma = 0,01$; 2 – $\sigma = 0,1$; 3 – $\sigma = 0,5$; 4 – $\sigma = 1$; 5 – $\sigma = 3$; 6 – запрос; 7 – ответ

запроса от σ отсутствует. Также подобная зависимость отсутствует и по каналу ответа из-за того, что слежение в РИС ПО осуществляется за излучаемым станцией ПП помеховым сигналом. Данное обстоятельство в совокупности с различиями распространения электромагнитной энергии при полуактивном и полупассивном способах самонаведения ПО, описываемыми уравнениями радиолокации и противорадиолокации, являются причиной существенно большей дальности ППС ПО.

Заключение

Для одного из наиболее распространенных случаев применения самонаводящегося ПО, указанного в постановке задачи, получены энергетические соотношения при действии активных помех на бортовые РИС и определены потенциальные дальности применимости ПО для полуактивного и вновь разрабатываемо-

го полупассивного методов самонаведения. Дальность применимости относится к числу важнейших характеристик самонаводящихся ПО. Показан высокий потенциал по данному показателю способа ППС ПО. При моделировании учитывались только наиболее существенные факторы влияния. Учет дополнительных факторов, таких как увеличение длины волны и повышение энергетического потенциала станции ПЦ диапазона L, применение генераторного режима постановки помех станцией ПП цели, возможность применения ПО при отличающихся от нуля ракурсах цели и ряд других, будет естественным образом способствовать увеличению дальности применимости по способу ППС. Моделирование выполнено на базе научно-исследовательской лаборатории «Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Статья подготовлена при поддержке РФФИ, грант № 20-08-00091-а.

Список литературы

1. Широков, Ю. Ф. Основы теории радиолокационных систем : электрон. учеб. пособие. – Текст : электронный / Ю. Ф. Широков. – Самара : Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. С. П. Королева, 2012. – URL : <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Osnovy-teorii-radiolokacionnyh-sistem-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54211> (дата обращения: 17.04.2020).
2. Меркулов, В. И. Многопозиционные радиолокационные системы управления. Возможности и ограничения / В. И. Меркулов // Радиотехника. – 2013. – № 1. – С. 69 – 72.
3. Перунов, М. Ю. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / М. Ю. Перунов, К. И. Фомичев, Л. М. Юдин ; под ред. М. Ю. Перунова. – М. : Радиотехника, 2003. – 416 с.
4. Палий, А. И. Радиовойна / А. И. Палий. – М. : Рипол Классик, 2013. – 214 с.
5. Пат. 2181869 Российская Федерация, МПК F41G 7/22, F42B 15/01. Способ полупассивного самонаведения управляемых ракет класса «воздух – воздух» с радиолокационной головкой самонаведения: / В. И. Павлов, А. А. Маштак, Д. В. Зайцев ; заявитель и патентообладатель Тамбовский военный авиационный инженерный институт. – № 2000100556/02 ; заявл. 10.01.2000 ; опубл. 27.04.2002, Бюл. № 12. – 3с.
6. Павлов, В. И. Особенности полупассивного способа самонаведения средств поражения на объекты, выполненные по технологии «Stealth» / В. И. Павлов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2017. – № 1 (96). – С. 119 – 123.
7. Коваливский, А. Бортовые радиолокационные станции России. – Текст : электронный / А. Коваливский // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2017. – № 4 (46). – URL : <https://dfnc.ru/aviazcia/bortovye-radiolokatsionnye-stantsii-rossii/> (дата обращения: 17.04.2020).
8. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием : монография / В. Н. Лепин, В. Н. Антипов, А. Ю. Викентьев [и др.] ; под ред. В. Н. Лепина. – М. : Радиотехника, 2017. – 416 с.
9. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / Под ред. В. Г. Радзиевского. – М. : Радиотехника, 2006. – 424 с.
10. Муромцев, Д. Ю. Анализ и синтез радиосистем на множестве состояний функционирования / Д. Ю. Муромцев, Ю. Л. Муромцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 241 – 251.
11. Савин, Л. В. Сетевая война. Введение в концепцию / Л. В. Савин. – М. : Евразийское движение, 2011. – 130 с.

Energy Relations under the Active Interference on the Radar Information Systems of Moving Objects

V. I. Pavlov¹, S. V. Artemova², T. Yu. Dorokhova¹, V. V. Aksenov¹

*Department of Design of Electronic and Microprocessor Systems (1),
vpavl@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia;*

*Department of Informatics (2), MIREA – Russian Technological University,
Moscow, Russia*

Keywords: active interference; moving object; radar system; homing.

Abstract: Energy relations are given under the influence of active interference on the radar information systems of moving objects for semi-active and newly developed semi-passive self-guidance methods. On the basis of energy relations, the range of information contact of the means involved in the implementation of homing methods is determined. The prospects of developing a semi-passive homing method for moving objects are indicated.

References

1. <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Osnovy-teorii-radiolokacionnyh-sistem-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54211> (accessed 17 April 2020).
2. Merkulov V.I. [Multiposition radar control systems. Possibilities and limitations], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2013, no. 1, pp. 69-72. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Perunov M.Yu. [Ed.], Fomichev K.I., Yudin L.M. *Radioelektronnoye podavleniye informatsionnykh kanalov sistem upravleniya oruzhiyem* [Radio-electronic suppression of information channels of weapon control systems], Moscow: Radiotekhnika, 2003, 416 p. (In Russ.)
4. Paliy A.I. *Radiovoyna* [Radio war], Moscow: Ripol Klassik, 2013, 214 p. (In Russ.)
5. Pavlov V.I., Mashtak A.A., Zaytsev D.V. *Sposob polupassivnogo samonavedeniya upravlyayemykh raket klassa «vozdukh – vozdukh» s radiolokatsionnoy golovkoy samonavedeniya* [Semi-passive homing of guided air-to-air missiles with a homing radar], Russian Federation, 2002, Pat. 2181869. (In Russ.)
6. Pavlov V.I. [Features of a semi-passive method of homing weapons on objects made using the Stealth technology], *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences], 2017, no. 1 (96), pp. 119-123. (In Russ., abstract in Eng.)
7. <https://dfnc.ru/aviaczia/bortovye-radiolokatsionnye-stantsii-rossii/> (accessed 17 April 2020).
8. Lepin V.N. [Ed.], Antipov V.N., Vikent'yev A.Yu., Koltyshev Ye.Ye., Mukhin V.V., Trushchinskiy A.Yu., Frolov A.Yu., Yankovskiy V.T. *Pomekhozashchita radioelektronnykh sistem upravleniya letatel'nyimi apparatami i oruzhiyem: monografiya* [Interference protection of electronic control systems for aircraft and weapons: monograph], Moscow: Radiotekhnika. 2017, 416 p. (In Russ.)
9. Radziyevskiy V.G. [Ed.] *Sovremennaya radioelektronnaya bor'ba. Voprosy metodologii* [Modern electronic warfare. Methodological issues], Moscow: Radiotekhnika, 2006, 424 p. (In Russ.)
10. Muromtsev D.Yu., Muromtsev Yu.L. [Analysis and synthesis of radio systems on a set of functioning states], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 241-251. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Savin L.V. *Setetsentrchnaya i setevaya voyna. Vvedeniye v kontseptsiyu* [Network-centric and network warfare. Introduction to the concept], Moscow: Yevraziyskoye dvizheniye, 2011, 130 p. (In Russ.)

Energetische Verhältnisse bei aktiver Interferenz auf Radarinformationssysteme der beweglichen Objekte

Zusammenfassung: Es sind die energetischen Verhältnisse unter dem Einfluss aktiver Interferenzen auf die Radarinformationssysteme beweglicher Objekte für semi-aktive und neu entwickelte semi-passive Selbstannäherungsmethoden angegeben. Auf der Grundlage von Energiebeziehungen wird die Reichweite des Informationskontakts der Mittel bestimmt, die an der Implementierung von Selbstannäherungsverfahren beteiligt sind. Die Aussichten für die Entwicklung eines semi-passiven Verfahrens der Selbststeuerung von beweglichen Objekten sind angegeben.

Rapports énergétiques lors de l'action des interférences actives sur les systèmes informatiques de localisation radio des objets mobiles

Résumé: Sont mentionnés les rapports énergétiques lors de l'action des interférences actives sur les systèmes informatiques à radar des objets mobiles pour les méthodes semi-actives et nouvellement développées semi-passives d'autoguidage. A la base des rapports énergétiques, est déterminée la portée du contact informatique des moyens impliqués dans la mise en œuvre des méthodes d'autoguidage. Sont indiquées les perspectives de l'élaboration d'une méthode semi-passive d'autoguidage des objets mobiles.

Авторы: *Павлов Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Артемова Светлана Валерьевна* – доктор технических наук, профессор кафедры информатики института комплексной безопасности и специального приборостроения, ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия; *Дорохова Татьяна Юрьевна* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Аксенов Виктор Владимирович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Шамкин Валерий Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.