

УДК 621.396.96

Г. Г. ОСИНОВЫЙ¹, В. Н. БЫКОВ²¹ *Государственное предприятие «КБ «Южное», Днепр, Украина*² *Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина*

МОДЕЛЬ ЗАЩИТЫ МАЛОРАЗМЕРНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ПАССИВНО-АКТИВНЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ

Разработана обобщенная модель защиты малоразмерных наземных объектов от радиометрических пассивно-активных систем миллиметрового диапазона. Определены методы и устройства, позволяющие снизить эффективность обнаружения объектов на фоне земной поверхности. Это метод активной защиты от пассивных и пассивно-активных радиометрических систем, ухудшающий работу систем благодаря влиянию на входные усилительные каскады приемника мощной узкополосной помехи. Рассмотрен метод и устройство «подсветки» широкополосным шумовым сигналом пары «наземный объект – фон земной поверхности» с целью снижения контраста «объект – фон» до значения, которое не позволяет принять однозначное решение о наличии /отсутствии объекта в данной области пространства. Приводится метод и устройство пассивной защиты, которое экранирует объект и таким образом снижает дальность обнаружения малоразмерного наземного объекта.

Ключевые слова: *летательный аппарат, малоразмерный наземный объект, матричная радиометрическая система, миллиметровый диапазон, шумовая подсветка, маскировочное покрытие.*

Введение

Радиотехнические средства навигации высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) (сверхзвуковых самолетов, баллистических и крылатых ракет) по наземным объектам-ориентирам предназначены для периодической коррекции результатов счисления пути (траектории полета ЛА), осуществляемого с помощью геотехнических средств, например, с помощью основной инерциальной навигационной системы ЛА [1]. Наземными объектами-ориентирами могут служить как площадные, протяженные естественные природные образования (границы «берег – река», «лес – поле»), искусственные сооружения антропогенного характера (окраины городов, железнодорожные мосты, переправы, автострады), так и малоразмерные, в том числе подвижные, наземные объекты народно-хозяйственного и военного назначения (автомобили, элементы военной техники, искусственные объекты-реперы).

В качестве радиотехнических средств навигации ЛА применяются дальномерные, угло-дальномерные, разностно-дальномерные, бортовые радиолокационные станции, корреляционно-экстремальные системы, доплеровские измерители путевой скорости [1, 2]. Одной из разновидностей бортовых радиолокационных систем являются пассивные радиометрические системы навигации корреляционно-экстремального типа, работающие в коротковолновой части радиодиапазона

– в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн. Для надежной работы радиотехнических систем навигации необходим набор устойчиво сохраняемых информативных признаков ориентиров навигации. К таким признакам в первую очередь относится отношение сигнал – шум на входе приемника системы навигации, для радиометрических систем – это устойчивый радиояркий контраст «объект – фон».

Процесс распознавания объекта на фоне земной поверхности с помощью информационной системы, в данном случае радиометрической системы миллиметрового диапазона (РМС ММД), осуществляется в несколько этапов [1,3]. На первом этапе осуществляется обнаружение объекта, в результате чего радиометрической системой принимается решение о наличии или отсутствии объекта в искомом пространстве. В случае обнаружения объекта на втором и последующих этапах осуществляется общая (грубая) и точная идентификация объекта, то есть объект опознается информационной системой (что это машина, трактор, объект военной техники и т.д.) и далее принимается решение о детализации типа и характеристик объекта (если это автомобиль, то какой – грузовой, легковой, марка автомобиля и др.).

Необходимость защиты отдельных ориентиров навигации от радиотехнических навигационных систем диктуется необходимостью сокрытия факта наличия отдельных наземных объектов, соблюдением коммерческой или военной тайны и другими факторами.

Такая защита (маскировка) отдельных наземных объектов может привести к ошибкам или даже срыву процессов обнаружения и навигации высокоскоростных ЛА.

Анализ результатов работ, проведенных в данном направлении, позволяет сделать вывод о том, что оценить комплексно возможность создания и эффективность методов и средств защиты малоразмерных наземных объектов возможно с учетом обобщенной модели функционирования радиометрической системы обнаружения миллиметрового диапазона и большого количества разнородных факторов, влияющих на работу такой системы.

В работе [4] приведена модель функционирования пассивно-активной радиометрической системы миллиметрового диапазона. РМС обнаружения представлена в данной работе в виде матричной корреляционно-экстремальной системы, которая функционирует по принципу формирования и обработки текущих и эталонных изображений (ТИиЭИ) наземного объекта на фоне земной поверхности. В работе проанализированы факторы влияния на корреляционную обработку изображений геометрических искажений, изменения радиояркости температуры объекта и фона, масштаба, сдвига и поворота изображений на некоторый угол, неоднородностей нагрева обтекателя антенны. Однако в указанной модели не детализированы факторы, которые могут ухудшить или даже нарушить процесс формирования текущих изображений и обработки ТИиЭИ, и в конечном итоге сорвать процесс формирования унимодальной решающей функции, выявление координат ее экстремума и вычисление ошибки определения координат летательного аппарата. Этими факторами являются разного рода помехи, снижающие радиояркостный контраст «объект – фон земной поверхности».

Целью данной статьи является разработка обобщенной модели защиты малоразмерных наземных объектов от пассивно-активных систем обнаружения миллиметрового диапазона радиоволн, учитывающей влияние помех искусственного характера на процесс обнаружения.

Результаты разработки модели

Для обнаружения и идентификации наземных площадных и малоразмерных объектов в бортовом вычислителе корреляционно-экстремальной системы должен присутствовать набор эталонных изображений объектов, в которых учтена априорная неопределенность условий функционирования объектов (размеры объектов, конфигурация, скорость и направление движения и т.д.)

На рис. 1 представлена обобщенная модель защиты малоразмерного наземного объекта от пас-

сивно-активных систем обнаружения. Данная модель позволяет определить основные факторы влияния на процесс функционирования РМС, и, таким образом, обосновать основные методы защиты наземного объекта от пассивно-активных систем обнаружения. На рис. 1 введены следующие обозначения: $F_{исп}$ – оператор источника собственной шумовой подсветки объекта, $F(N_{уп})$ – оператор узкополосной помехи РМ приемника, $F(N_{прм})$ – оператор внутренних шумов РМ приемника, $F_{прм}$ – оператор РМ приемника, $F_{ип}$ – оператор источника подсветки РМ системы обнаружения (шумовой либо детерминированной), $F_{ти}$ – оператор текущего изображения, $F_{эи}$ – оператор эталонного изображения, $R\{F_{эи} * F_{ти}\}$ – оператор решающей функции алгоритма совмещения изображений.

Анализ мешающих воздействий. Проанализируем основные виды мешающих воздействий, влияющих на процесс формирования системой первичной обработки, в случае корреляционно-экстремальной радиометрической системы, текущего изображения наземного объекта и процесс сравнения текущих и эталонных изображений в системе вторичной обработки (в спецвычислителе).

Рассматриваемые условия формирования и корреляционно-экстремальной обработки (КЭО) изображений можно охарактеризовать, согласно модели (рис.1), следующим образом. Визируемый наземный объект представлен оператором $F_o[T_o(\epsilon_j, \mu_j), \sigma_o; \chi_j; V_o, \alpha_o]$, который определяется собственной радиояркостью температуры объекта T_o , зависящей от диэлектрической (ϵ_j) и магнитной (μ_j) проницаемости, а также (в случае активной шумовой подсветки) эффективной поверхностью рассеяния σ_o . Объект также имеет собственную излучательную способность χ_j . Объект может изменять свое местоположение, двигаться со скоростью V_o под углом азимута α_o .

Объект расположен на определенном, в общем случае неоднородном фоне земной поверхности. Фон характеризуется собственной радиояркостью температурой T_ϕ , определяемой термодинамическим состоянием поверхности в различных погодных условиях, что влечет за собой изменение диэлектрической (ϵ_i) и магнитной (μ_i) проницаемости поверхности. Фон представлен оператором $F_\phi[T_\phi(\epsilon_i, \mu_i), \sigma_\phi; \chi_i]$.

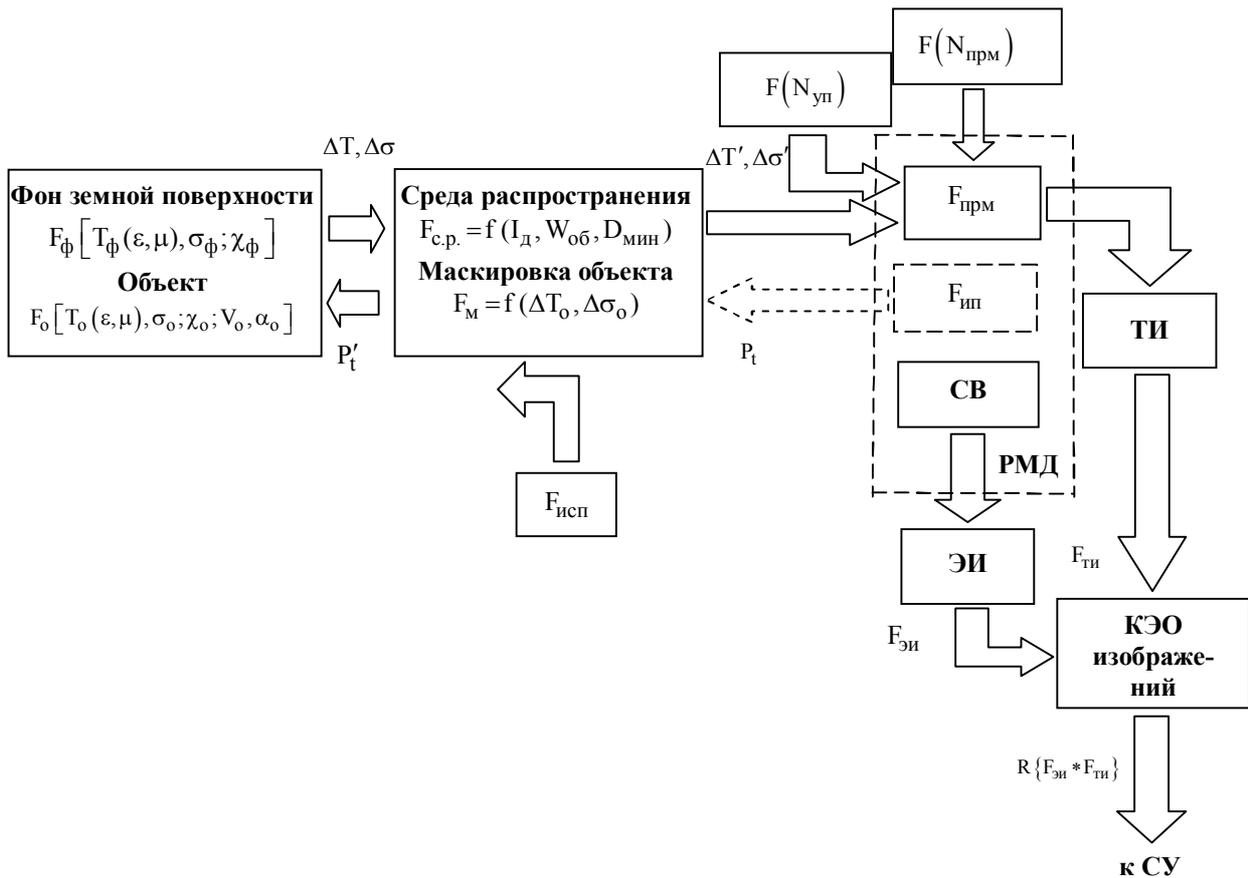


Рис. 1. Обобщенная модель защиты малоразмерных наземных объектов от пассивно-активных радиометрических систем обнаружения

Излучательная способность объекта и фона изменяется от времени суток и года. Сочетание объекта и фона образует радиояркостный контраст «объект – фон» ΔT и (в случае подсветки объекта) разность эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) $\Delta \sigma$ пары «объект – фон».

Радиояркостный контраст пары «объект – фон» с учетом изменчивости погодных-климатических условий, вследствие изменения электрофизических характеристик пары, можно представить в виде оператора поверхности визирования:

$$F'_{пв} = F_{пв} [T_o - T_{\phi} \pm \delta T, \sigma_o - \sigma_{\phi} \pm \delta \sigma, \chi_j - \chi_i \pm \delta \chi], \quad (1)$$

где $\pm \delta T, \pm \delta \sigma, \pm \delta \chi$ – изменения радиояркостного контраста, ЭПР и излучательной способности пары «объект – фон» в результате влияния перечисленных выше факторов.

Источник шумовой подсветки (ИШП) объекта излучает в сторону объекта шумовой сигнал со средней мощностью P_t , который ослабляется в среде распространения (радиоканале) до величины P'_t .

Среда распространения представлена оператором $F_{ср}(I_d, W_{об}, D_{мин})$, она ослабляет контраст и разность ЭПР до значений $\Delta T', \Delta \sigma'$ вследствие влияния дождя с интенсивностью I_d , облачности с водностью $W_{об}$ и тумана, ограничивающего прямую оптическую видимость $D_{мин}$.

Анализ мер, затрудняющих обнаружение и идентификацию объектов. Анализ методов активной и пассивной защиты наземных объектов позволяет сделать следующие выводы. Пассивные радиометрические корреляционно-экстремальные системы обнаружения (навигации) миллиметрового диапазона не восприимчивы к пассивным помехам (угловые и дипольные отражатели, дымы, аэрозоли), инвариантны к мощным источникам лазерного излучения. Обладая повышенной скрытностью функционирования вследствие отсутствия излучения собственного сигнала, РМС ММД в значительной мере защищены от влияния мощных источников широкополосного сверхвысокочастотного радиоизлучения [4].

В результате проведенного анализа [4] в качестве методов защиты наземных объектов, снижающих

щих качество работы РМС обнаружения ММД, необходимо рассмотреть следующие методы.

1. Активные методы защиты от РМ систем обнаружения:

- создание активной мощной узкополосной помехи (оператор $F(N_{уп})$) на входе РМ приемника системы обнаружения вводит в «насыщение» входные каскады приемника и тем самым нарушает работу РМ приемника системы обнаружения;

- выравнивание радиояркого контраста «объект – фон» ($|\Delta T_{пас}| \cong \Delta T_{акт}$) за счет собственной подсветки объекта широкополосным шумовым сигналом (оператор $F_{исп}$) уменьшает вероятность и дальность обнаружения объекта радиометрическими пассивно-активными системами обнаружения.

2. Пассивные методы защиты от РМ систем обнаружения:

- применение маскировочных покрытий (оператор F_M), снижающих величину контраста «объект – фон» ($\Delta T \leq \Delta T_{пор}$), то есть экранирующих объекты, уменьшает вероятность и дальность обнаружения объекта радиометрическими пассивно-активными системами обнаружения.

Операторы $F_{исп}$ и F_M могут быть отнесены к оператору поверхности визирования $F'_{пв}$.

Взаимодействие полезного РМ сигнала и шумов носит аддитивный характер. К полезному РМ сигналу до входа РМ приемника добавляются шумы различной физической природы, такие как: шумы обтекателя антенны и преднамеренные помехи, и в первую очередь мощная узкополосная помеха, о которой говорилось ранее, попадающая в спектр широкополосного сигнала. Влияние шумов антенного обтекателя рассматривалось ранее в работе [4] и в данной работе учитываются в виде изменения контраста и/или ЭПР как постоянная составляющая ошибки.

В РМ приемнике миллиметрового диапазона доминирующими являются шумы высокочастотного тракта собственно приемника $N_{прм}$.

Оператор влияния мощной узкополосной помехи $F(N_{уп})$ должен быть отнесен к оператору приемника $F_{прм}$.

Формирование текущих и эталонных изображений, формирование решающей функции радиометрическими системами обнаружения. Многоканальный (матричный) радиометрический приемник осуществляет прием и обработку радиометрического сигнала, поступающего с выхода ан-

тенны $F_{прм}(\Delta T'_a, \Delta \sigma'_a)$, и формирует двумерное текущее радиометрическое изображение.

На качество текущих изображений и, в конечном счете, на качество корреляционно-экстремальной обработки в сильной степени влияют междискретные (межпиксельные) и геометрические искажения ТИ $F_{иск}$, что выражается в дополнительном снижении полезного контраста и разности ЭПР $F_{ти}(\Delta T'', \Delta \sigma'')$. Оператор $F_{иск}$ может быть отнесен к оператору приемника $F_{прм}$.

Оператор ТИ может быть представлен следующим образом:

$$F_{ти}(\Delta T'', \Delta \sigma'') = \left\{ \begin{array}{l} F_{пв} [T_o - T_{\phi} \pm \delta T, \sigma_o - \sigma_{\phi} \pm \delta \sigma, \chi_j - \chi_i \pm \delta \chi]; \{F_{исп}; F_M\} \\ F_{ср} [I_d, W_o, D_{мин}]; \\ F_{прм} [N_{уп}, N_{прм}]; \{F_{иск} \} \end{array} \right\}. \quad (2)$$

Эталонное изображение характеризуется оператором с неискаженным радиометрическим контрастом «объект – фон» и/или неискаженной разностью ЭПР $F_{эи}(\Delta T, \Delta \sigma)$.

В результате корреляционной обработки (КЭО) осуществляется двумерное совмещение текущего и эталонного изображений, вычисляется решающая функция алгоритма совмещения изображений $F_{си}(F_{ти} * F_{эи}) = R(t, \vec{r})$. Далее вычисляются координаты экстремума РФ и ошибки определения координат объекта $\delta X_o, \delta Y_o$, которые поступают в систему управления (СУ) движением ЛА.

В соответствии с представленной в работе [4] и приведенной в данной работе (см. рис. 1) моделью функционирования корреляционно-экстремальной РМС, решающая функция, формируемая матричной РМ системой, имеет вид:

$$R(t, \vec{r}) = F_{си} \{F_{эи}(\Delta T, \Delta \sigma) * F_{ти}(\Delta T'', \Delta \sigma'')\} = \left\{ \begin{array}{l} F_{эи}(\Delta T, \Delta \sigma) * \\ \left\{ \begin{array}{l} F_{пв} [T_o - T_{\phi} \pm \delta T, \sigma_o - \sigma_{\phi} \pm \delta \sigma, \chi_j - \chi_i \pm \delta \chi]; \{F_{исп}; F_M\}; \\ * F_{ср} [I_d, W_o, D_{мин}]; \\ \left\{ \begin{array}{l} F_{прм} [N_{уп}, N_{прм}]; \{F_{иск} \} \end{array} \right\} \end{array} \right\} \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Выводы

В разработанной обобщенной модели защиты проанализированы факторы, снижающие заметность

наземного об'єкта від пасивно-активних радіометричних систем виявлення. Данні фактори представлені оператором джерела власної шумової підсвітки об'єкта $F_{\text{исп}}$ і оператором маскуючих покриттів $F_{\text{м}}$, які впливають на поверхню виявлення, т.е. на електрофізичні характеристики пари «об'єкт – фон», що призводить до зниження радіояскравого контрасту ΔT і ЕПР пари $\Delta \sigma$. В результаті це дозволить зменшити дальність виявлення об'єктів з високою заданою ймовірністю, або знизити ймовірність виявлення нижче заданої на певній дальності.

В якості джерела власної шумової підсвітки може служити малогабаритний джерело (генератор) шуму міліметрового діапазону з центральною частотою $f \approx 37$ ГГц і смугою частоти $\Delta f \approx (1-10)$ ГГц (в 8 мм діапазоні) або генератор шуму з аналогічною смугою частот в 3 мм діапазоні хвиль ($f \approx 90$ ГГц). По попереднім розрахункам джерело власної шумової підсвітки повинно бути розташоване на відстані порядку 1 км. Це, наприклад, може бути безпілотний ЛА, барражуючий на данній висоті.

В якості маскуючого покриття (МП), що реалізує метод пасивної захисту наземних об'єктів, може бути використано мережеве маскуюче покриття, характеристики якого наведені в роботі [4]. МП представлено в формі радіопоглинаючого матеріалу на мережній основі, що ускладнює оптичну візуалізацію і послаблює природне випромінювання об'єкта в сантиметровому і міліметровому діапазонах хвиль. По попереднім оцінкам [4] застосування одношарового МП такого типу знизить РМ контраст «об'єкт – фон» на (5–7) дБ.

Таким чином, представлено модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від пасивно-активних радіометричних систем виявлення (навігації), яка враховує специфіку роботи кореляційно-екстремальних систем і основні фактори, що впливають на процес співставлення зобра-

жень, що ускладнює процес виявлення наземних об'єктів.

Розгляд данної моделі дозволяє сформулювати напрямки досліджень по реалізації методів і засобів захисту наземних об'єктів від радіометричних систем виявлення.

Література

1. Skolnik, M. I. *Radar Handbook [Text] / M. I. Skolnik. – 3rd Edition. – McGraw-Hill Professional, 2014. – 1352 p.*
2. Баклицкий, В. К. *Корреляційно-екстремальні методи навігації і наведення [Текст] / В. К. Баклицкий. – Тверь : Книжний клуб, 2009. – 360 с.*
3. Nardon, L. *The Dilemma of Satellite Imagery Control [Text] / L. Nardon // Military Technology. – 2002. – Vol. 26, Issue 7. – P. 37–45.*
4. *Матричні радіометричні кореляційно-екстремальні системи навігації літальних апаратів [Текст] : монографія / В. І. Антюфеев, В. Н. Быков, А. М. Гричанюк, Д. Д. Иванченко, Н. Н. Колчигин, В. А. Краюшкин, А. М. Сотников. – Х. : Щедра усадьба плюс, 2014. – 372 с.*

References

1. Skolnik, M. I. *Radar Handbook*, 3rd Edition, McGraw-Hill Professional Publ., 2014. 1352 p.
2. Baklickij, V. K. *Korreljacionno-jekstremal'nye metody navigacii i navedenija* [Correlation-extreme methods navigation and guidance]. Tver', Knizhnyj klub Publ., 2009. 360 p.
3. Nardon, L. *The Dilemma of Satellite Imagery Control. Military Technology*, 2002, vol. 26, iss. 7, pp. 37–45.
4. Antjufeev, V. I., Bykov, V. N., Grichanjuk, A. M., Ivanchenko, D. D., Kolchigin, N. N., Krajushkin, V. A., Sotnikov, A. M. *Matrichnye radiometricheskie korreljacionno-jekstremal'nye sistemy navigacii letatel'nyh apparatov* [The matrix radiometric correlation-extreme navigation systems of aircraft]. Har'kov, Shhedraja usad'ba plus Publ., 2014. 372 p.

Поступила в редакцію 20.01.2017, розглянута на редколегії 16.02.2017

МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ МАЛОРОЗМІРНИХ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ВІД РАДІОМЕТРИЧНИХ ПАСИВНО-АКТИВНИХ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ

Г. Г. Осинувий, В. М. Биков

Розроблено узагальнену модель захисту малорозмірних наземних об'єктів від радіометричних пасивно-активних систем міліметрового діапазону, які застосовуються для розвідки і наведення високошвидкісних літальних апаратів. Визначено методи і засоби, які дозволяють знизити ефективність виявлення об'єктів на

фоні земної поверхні. Це метод активної протидії пасивним і пасивно-активним радіометричним системам, який порушує роботу систем завдяки дії на вхідні каскади підсилення сигналу приймачів могутньої вузько-смужової завади. Розглядається метод і засіб, який його реалізує, «підсвічування» широкосмужовим шумовим сигналом пари «наземний об'єкт – фон земної поверхні» з ціллю зниження контрасту «об'єкт – фон» до значень, які не дозволяють прийняти однозначне рішення про наявність або відсутність об'єкту в даній області простору. Приводиться метод й засіб пасивного захисту об'єкта, який екранує об'єкт й таким чином знижує дальність виявлення малорозмірного наземного об'єкта.

Ключові слова: літальний апарат, малорозмірний наземний об'єкт, матрична радіометрична система, міліметровий діапазон, шумове підсвічування, маскувальне покриття.

MODEL FOR THE PROTECTION OF SMALL-SIZE GROUND TARGETS FROM RADIOMETRIC PASSIVE-ACTIVE DETECTION SYSTEMS

G. G. Osinovy, V. N. Bykov

A generalized model is developed for protection of small-size ground targets from radiometric passive-active systems of millimeter range. Methods and means to reduce effectiveness of object detection on the earth's surface background are discussed. It is a method of active defence (jamming) from passive and passive-active radiometric systems that violates the system performance by influencing the input amplifier circuits of the receivers with a powerful narrow band interference. We consider a method and a device implementing for «backlighting» the pair of «ground-based object – earth's surface background» with a wide band noise signal in order to reduce the contrast «object – background» up to the values that would not allow making an unambiguous decision regarding presence/absence of the object in the given area. A method and a device for passive protection that shields an object and thus reduces the detection range of the small ground object are suggested.

Keywords: aircraft, small ground object, matrix radiometric system, millimeter bands, the noise lighting, camouflage cover.

Осиновий Геннадий Геннадиевич – начальник проектного отдела, Государственное предприятие «КБ «Южное», Днепр.

Быков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр., профессор кафедры теоретической радиофизики, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, e-mail: viktor_n_bykov@mail.ru.

Osinovy Gennady Gennadyevich – Chief of project Department, State enterprise «CB «South», Dnieper.

Bykov Viktor Nikolayevich – Dr. of technical Sciences, senior researcher, leading researcher, Professor, Department of theoretical Radiophysics, Kharkov national University named after V. N. Karazin, Kharkov, e-mail: viktor_n_bykov@mail.ru.