Модель функционирования радиолокационной станции обнаружения элементов космического мусора

Functioning model of a radar station for detection of space debris elements

Васильев / Vasiliev V.
Виктор Афанасьевич
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского), доцент кафедры программного-алгоритмического обеспечения АССН.
г. Санкт-Петербург

Платонов / Platonov S.
Сергей Александрович
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
заместитель начальника кафедры программного-алгоритмического обеспечения АССН.
г. Санкт-Петербург

Мишуков / Mishukov O.
Олег Александрович
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
научный сотрудник военного института (научно-исследовательского).
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: модель – model; радиолокационная станция – radar station; элемент космического мусора – space debris element; эффективная площадь рассеяния – effective scattering area; рубеж обнаружения – detection limit; погрешность моделирования – modeling error; параметры – parameters; базовая цель – base target.

В статье представлена модель функционирования радиолокационной станции (РЛС) обнаружения элементов космического мусора (ЭКМ), в которой учитываются основные тактико-технические характеристики перспективных РЛС обнаружения космических объектов. Представленная модель позволяет компенсировать возможные погрешности моделирования при использовании имеющейся моделирующей базы с большим количеством параметров и обладает простотой реализации на современных вычислительных средствах. Модель может быть использована на этапе разработки технических предложений и эскизных проектов РЛС обнаружения для оценивания вероятности обнаружения элементов космического мусора с учетом параметров перспективных РЛС обнаружения малоразмерных ЭКМ.

The article presents a model of functioning of a radar station for detecting elements of space debris, which takes into account the main tactical and technical characteristics of advanced radar stations for detecting space objects. The presented model makes it possible to compensate for possible modeling errors when using the existing modeling base with a large number of parameters and is easy to implement on modern computing tools. The model can be used at the stage of development of technical proposals and draft designs of detection radar stations for estimating the probability of detecting space debris elements, taking into account the parameters of advanced radar stations for detecting small-sized space debris elements.

Введение

Проектирование перспективных образцов радиолокационных станций (РЛС) обнаружения малоразмерных элементов космического мусора (ЭКМ) является сложной задачей, требующей проведения моделирования на различных этапах разработки РЛС. При оценке тактико-технических характеристик (ТТХ) радиолокационных станций обнаружения ЭКМ ключевую роль играет процесс обнаружения радиолокационных целей и выдачи данных о целях на пункты сбора и обработки информации автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом простран-

стве [1, 2]. Эта система представляет географически распределенную сеть информационных средств наблюдения, функционирующих в радио- и оптическом диапазонах длин волн, с единым центром обработки данных. Развитие и совершенствование радиолокационной техники повлекло за собой усложнение как систем в целом, так и их моделей функционирования, учитывающих большое количество параметров моделирующей базы [3]. Усложнение моделей в свою очередь привело к увеличению возможных погрешностей моделирования. Для компенсирования возможных погрешностей моделирования требуется разработка новых упрощенных моделей функционирования РЛС обнаружения ЭКМ, способных с одной стороны адекватно учитывать ТТХ современных РЛС, а с другой стороны обладать простотой реализации на современных вычислительных средствах. Представленная модель, по сути, является упрощенной математической моделью функционирования перспективной РЛС обнаружения малоразмерных ЭКМ. Модель ориентирована на разработку технических предложений и эскизных проектов при создании перспективных образцов РЛС обнаружения ЭКМ и в значительной степени опирается на ТТХ существующих РЛС.

В связи с тем, что в создаваемой РЛС будут использоваться меандровые сигналы и реализованы различные режимы работы, имеющие разные точности измерения дальности и угловых координат, для оценивания эффективности функционирования РЛС необходима модель, учитывающая указанные особенности [4]. Анализ существующих моделей позволяет сделать вывод о невозможности их использования для проектирования данной РЛС без существенных доработок. Таким образом, для оценивания возможностей и параметров перспективных РЛС обнаружения малоразмерных ЭКМ в процессе их создания необходимо разработать упрощенную модель функционирования, учитывающую особенности ТТХ данных РЛС.

Цель работы – разработка математической модели функционирования РЛС обнаружения ЭКМ, учитывающей основные ТТХ перспективных РЛС и позволяющей компенсировать возможные погрешности моделирования при использовании имеющейся моделирующей базы с большим количеством параметров.

В свободном пространстве на расстоянии r от РЛС плотность потока мощности прямой электромагнитной волны (ЭМВ), создаваемой направленной антенной, определяется отношением излучаемой импульсной мощности зондирующего сигнала $P_и$ к поверхности сферы $4\pi r^2$. С учетом направленных свойств антенны, обладающей коэффициентом усиления $G(\beta,\varepsilon)$, указанная плотность мощности увеличивается в $G(\beta,\varepsilon)$ раз и будет определяться выражением [5–7]:

$$S_c = \frac{P_и G(\beta,\varepsilon)}{4\pi r^2}, \qquad (1)$$

где $G(\beta,\varepsilon)$ – коэффициент усиления антенны, β и ε – угловые координаты по азимуту и углу места, $P_и$ – импульсная мощность зондирующего сигнала.

Плотность потока мощности отраженной волны в точке расположения приемной антенны РЛС определяется выражением:

$$S_{пр} = \frac{S_c \sigma}{4\pi r^2}, \qquad (2)$$

где S_c – плотность потока мощности прямой ЭМВ, σ – ЭПР КО, r – расстояние до ЭКМ.

Подставив в выражение (2) выражение (1) получим:

$$S_{пр} = \frac{P_и G(\beta,\varepsilon)\sigma}{(4\pi r^2)^2}. \qquad (3)$$

Умножая выражение (3) на эффективную площадь приемной антенны $A'(\beta,\varepsilon)$, получим мощность отраженного сигнала, поступающего на согласованный вход приемника:

$$P_{пр} = S_{пр} A'(\beta,\varepsilon) = \frac{P_и G(\beta,\varepsilon) A'(\beta,\varepsilon)\sigma}{(4\pi r^2)^2} \qquad (4)$$

Полагая, что параметры антенны $G(\beta,\varepsilon)$ и $A'(\beta,\varepsilon)$ не изменяются за время локации ЭКМ, проинтегрируем соответственно левую и правую части уравнения (4) за время длительности принятого и зондирующего импульсов.

Получим уравнение для расчета энергии отраженного сигнала:

$$E_{пр} = \frac{E_и G(\beta,\varepsilon) A'(\beta,\varepsilon)\sigma}{(4\pi r^2)^2}, \qquad (5)$$

где $E_и$ – энергия зондирующего сигнала, $A'(\beta,\varepsilon)$ – эффективная площадь приемной антенны, $G(\beta,\varepsilon)$ – коэффициент усиления антенны, σ – ЭПР ЭКМ,

r – расстояние до ЭКМ.

Следует отметить, что при условии согласования антенны со входом приемника, справедливо следующее равенство [6–8]:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A, \qquad (6)$$

где A – эффективная площадь приемной антенны, λ – длина волны.

Обнаружительные характеристики РЛС зависят от отношения сигнал/шум по мощности [9, 10]:

$$q = \frac{E_{пр}}{N_0}, \qquad (7)$$

где $E_{пр}$ – энергия отраженного сигнала, N_0 – спектральная плотность шума в приемном тракте РЛС

$N_0 = k * T * \Delta$, k – постоянная Больцмана, T – шумовая температура приемного тракта РЛС, Δ – ширина полосы приемного тракта.

От параметра q также зависят и точностные характеристики РЛС в единичных замерах [10, 11].

Значения шумовой температуры приемного тракта с учетом фонов неба и ширины полосы приемного тракта принимаются равными $T \approx 320$ К при $\Delta \approx 1$ МГц для длинноволновой части дециметрового диапазона длин волн и $T \approx 1170$ К при $\Delta \approx 0{,}8$ МГц для коротковолновой части метрового диапазона длин волн.

Зная эффективную дальность действия РЛС $R_{эф}$ по ЭКМ с ЭПР σ, можно оценить эффективную дальность действия этой же станции $\tilde{R}_{эф}$ по ЭКМ с ЭПР $\tilde{\sigma}$.

Для получения соответствующего соотношения приравняем значение энергии отраженного сигнала $E_{пр}$ для $r = R_{эф}$ и ЭПР ЭКМ σ к значению энергии отраженного сигнала $E_{пр}$ для $r = \tilde{R}_{эф}$ и ЭПР КО $\tilde{\sigma}$.

$$\frac{\sigma}{R_{эф}^4} = \frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{R}_{эф}^4}, \tag{8}$$

Из равенства (8) получим выражение для определения $\tilde{R}_{эф}$:

$$\tilde{R}_{эф} = R_{эф}\sqrt[4]{\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma}}, \tag{9}$$

где $\tilde{R}_{эф}$ – эффективная дальность действия РЛС по ЭКМ с ЭПР $\tilde{\sigma}$,

$R_{эф}$ – эффективная дальность действия РЛС по ЭКМ с ЭПР σ.

Приведенные энергетические соотношения характерны для работы РЛС с коротким импульсом и высокой скважностью излучения.

Вместе с тем в настоящее время взят курс на переоснащение радиолокационных средств контроля околоземного космического пространства радиолокаторами с транзисторными генераторными устройствами в оконечных каскадах, что требует использование ими меандрового сигнала [11].

При работе РЛС с меандровым сигналом, имеющим период зондирования $T_{зд}$, станция в течение времени $T_{зд}/2$ работает на передачу, и в течение времени $T_{зд}/2$ работает на прием. При этом отраженный от цели сигнал может быть полностью принят только на дальности зондирования $R_{зд}$. В данном случае справедливо равенство:

$$R_{зд} = \frac{T_{зд}}{2}. \tag{10}$$

Для других дальностей до цели существуют потери, выражаемые коэффициентом потерь $\eta_{зд}(r)$:

$$\eta_{зд}(r) = \begin{cases} \dfrac{r}{R_{зд}}, & \text{если } r < R_{зд}, \\ 1 - \dfrac{r - R_{зд}}{R_{зд}}, & \text{если } r \geq R_{зд}. \end{cases}, \tag{11}$$

где r – дальность до цели относительно РЛС, $R_{зд}$ – дальность зондирования.

В соответствии с вышеизложенным для РЛС с меандровым сигналом выражение (5) можно переписать в виде:

$$E_{пр} = \frac{\eta_{зд}(r) E_и G(\beta,\varepsilon) A'(\beta,\varepsilon)\sigma}{(4\pi r^2)^2}, \tag{12}$$

где $\eta_{зд}(r)$ – коэффициент потерь отраженного зондирующего сигнала от ЭКП.

Для решения задачи пересчета эффективной дальности действия РЛС с меандровым сигналом при изменении ЭПР ЭКМ предположим, что для участвующих в расчетах $R_{эф}$ и $\tilde{R}_{эф}$ справедливо неравенство $R_{эф} < R_{зд}$. В этом случае справедливо соотношение:

$$\tilde{R}_{эф} = R_{эф}\sqrt[3]{\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma}}, \tag{13}$$

где $R_{эф}$ – эффективная дальность действия РЛС по ЭКМ с ЭПР σ,

$\tilde{R}_{эф}$ – эффективная дальность действия РЛС по ЭКМ с ЭПР $\tilde{\sigma}$.

Для РЛС обнаружения ЭКМ время выдачи первого типового сообщения с вероятностью 0.95 по ЭКМ или разрешенной базовой цели с момента начала ее обнаружения на дальности R, при отсутствии преднамеренных помех, в автономном режиме должно составлять:

$$\Delta t = \begin{cases} \Delta t_1 + \dfrac{R - R_{.1баз}}{R_{2баз} - R_{.1баз}}(\Delta t_2 - \Delta t_1), \text{ при } R > R_{.1баз}; \\ \Delta t_2, \quad \text{при } R < R_{.1баз} \end{cases}, \tag{14}$$

где R – дальность до цели, $R_{1баз}$ и $R_{2баз}$ – дальности рубежей обнаружения для цели с базовым значением ЭПР, Δt_1 и Δt_2 – времена обнаружения на опорных рубежах $R_{1баз}$ и $R_{2баз}$.

Базовые значения рубежей обнаружения $R_{1баз}$ и $R_{2баз}$, а также времена обнаружения Δt_1 и Δt_2 на этих рубежах справедливы для цели с базовым значением ЭПР, в качестве которой будет принята третья ступень ракеты-носителя «Циклон-3». ЭПР указанного ЭКМ для коротковолновой части метрового диапазона $\sigma_{баз} \approx 7{,}6$ м^2, а для длинноволновой части дециметрового диапазона $\sigma_{баз} \approx 5{,}5$ м^2.

Для остальных ЭКМ рубежи пересчитываются в соответствии с выражением

$$R_{экм} = R_{баз}\sqrt[4]{\frac{\sigma_{экм}}{\sigma_{баз}}}, \tag{15}$$

где $R_{баз}$ – рубеж обнаружения для базовой цели, $R_{экм}$ – рубеж обнаружения для остальных ЭКМ.

Для РЛС, имеющих ограничения эффективной дальности действия по базовой цели, обусловленные конструктивной дальностью, дальность второго опорного рубежа принимается равной конструктивной дальности действия РЛС [11].

В случае когда дальности первых опорных рубежей не известны из испытаний соответствующих информационных средств, они принимаются равными частному от деления дальности до второго опорного рубежа на $\sqrt{2}$.

Для РЛС, использующих меандровый сигнал, рубежи обнаружения ЭКМ пересчитываются в соответствии с выражением

$$R_{экм} = R_{баз}\sqrt[3]{\frac{\sigma_{экм}}{\sigma_{баз}}}, \qquad (16)$$

где $R_{баз}$ – рубеж обнаружения для базовой цели, $R_{экм}$ – рубеж обнаружения для остальных ЭКМ.

Выражение (16) учитывает особенности меандрового зондирующего сигнала, который будет применяться в перспективных РЛС обнаружения ЭКМ.

В выражениях (15) и (16) величины $\sigma_{экм}$ и $\sigma_{баз}$ представляют собой медианные значения ЭПР соответственно для рассматриваемого ЭКМ и базовой цели. В порядке уточнения для каждой РЛС вводится понятие максимальной эффективной дальности действия по базовой цели, которая может быть пересчитана для произвольного ЭКМ с использованием выражений (15) и (16).

При обнаружении ЭКМ определяется время $t_{вх}$ его входа в зону действия РЛС [10]. Время начала процесса обнаружения $t_н$ полагается равным $t_{вх}$. Опорные величины рубежей обнаружения пересчитываются для ЭПР рассматриваемого ЭКМ. На основании пересчитанных дальностей опорных рубежей R_1 и R_2 находятся требуемое время обнаружения по формуле (14). Если в течение времени Δt ЭКМ находится в пересчитанной с учетом его ЭПР зоне действия РЛС, то он считается обнаруженным.

Выводы

Таким образом, представленная математическая модель функционирования РЛС обнаружения ЭКМ позволяет компенсировать возможные погрешности моделирования при использовании имеющейся моделирующей базы за счет применения упрощенных вычислений наиболее существенных параметров. Данная модель может использоваться на этапе разработки технических предложений и эскизных проектов перспективных РЛС обнаружения малоразмерных ЭКМ для оценивания их возможностей и параметров.

Литература

1. Лаврентьев, В. Г. Основные аспекты мониторинга техногенного состояния околоземного космического пространства для обеспечения безопасности космической деятельности / В.Г. Лаврентьев, И.И. Олейников, А.М. Червонов // Механика, управление и информатика. – 2015. – Т. 7, № 1 (54). – С. 216–228.

2. Олейников, И. И. Методы выявления и оценки параметров опасных ситуаций при обеспечении безопасности полета космических аппаратов в околоземном космическом пространстве / И.И. Олейников, В.П. Павлов, М.В. Ковалева // Вестник Московского авиационного института. – 2012. – Т. 19, № 5. – С. 32–37.

3. Халиков, Э. М. Моделирование процессов сбора и обработки информации в автоматизированных системах управления радиолокационными станциями / Э.М. Халиков, А.В. Уланов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 12-2. – С. 410–416.

4. Горохов, А. Х. Основы радиолокации и элементы РЛС: Учебное пособие / А.Х. Горохов, Н.Л. Кашпур. – Самара: Самарский государственный университет, 2014. – 247 с.

5. Ботов, М. И. Основы теории радиолокационных систем и комплексов: учебник / М.И. Ботов, В.А. Вяхирев. – Красноярск: СФУ, 2013. – 530 с.

6. Теоретические основы локации и навигации: Учеб. пособие в 2-х ч. Ч. 2. Радиолокационные системы / В.А. Авдеев [и др.] ; под общ. ред. И.С. Герасименко. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2016. – 214 с.

7. Белоус, А. И. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия в 2-х кн. Книга 1 / А.И. Белоус, М.К. Мерданов, С.В. Шведов. – М.: Техносфера, 2016. – 728 с.

8. Радиолокационные системы: учебник / под общ. ред. В.П. Бердышева. – Красноярск: СФУ, 2011. – 400 с.

9. Ботов, М. И. Введение в теорию радиолокационных систем: монография / М.И. Ботов, В.А. Вяхирев, В.В. Девотчак. – Красноярск: СФУ, 2012. – 394 с.

10. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы / П.А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2015. – 440 с.

11. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга: учебник / А.Н. Фомин [и др.] ; под общ. ред. И.Н. Ищука. – Красноярск: СФУ, 2016. – 292 с.