

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.7>

УДК: 621.396.669

КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОИСКА ОБЪЕКТОВ ЗА СЧЕТ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЕРЕОТРАЖЕННЫХ ОТ ПОВЕРХНОСТИ СИГНАЛОВ БОРТОВОГО РАДИОВЫСОТОМЕРА КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

А.В. Сухов¹, В.И. Филатов², С.Б. Савилкин³

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

³ Центр визуализации и спутниковых информационных технологий, НИИ Системных
исследований РАН, 117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1

Статья поступила в редакцию 11 июля 2024 г.

Аннотация. В статье описана математическая модель, позволяющая оценить вероятность обнаружения объектов за счет регистрации переотраженного от подстилающей поверхности сигнала. При этом общая комплексная математическая модель состоит из трех частных моделей – пространственной, временной и энергетической. Приведены расчеты и результаты аналитических вычислений и статистического моделирования. В основе вычислений использованы базовые математические выражения для расчетов радиосигналов с учетом электродинамических свойств подстилающей поверхности. В ходе расчетов рассматривался частный случай, при котором функционирование радиовысотомера производилось над гладкой (по критерию Релея) поверхностью, при котором происходило зеркальное отражение излучаемых радиоволн, что вызывает наибольший по мнению авторов интерес.

Ключевые слова: переотраженный радиосигнал, подстилающая поверхность, вероятность обнаружения.

Финансирование: Публикация выполнена в рамках НИР ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0003.

Автор для переписки: Савилкин Сергей Борисович, Savilkin@mail.ru

Введение

Использование бортовых радиовысотомеров (РВ) создает потенциальную возможность для радиотехнического обнаружения маловысотных объектов (МО) [1]. Наибольший интерес при этом вызывает процесс обнаружения с борта космического аппарата (КА). Это обусловлено следующими особенностями:

- диапазон частот бортовых РВ составляет около 4.2 ± 0.2 ГГц и обладает небольшим затуханием при распространении [2];
- шумовая температура приемника на борту КА значительно ниже, чем на воздушном, что позволяет обеспечить чувствительность до -200 дБ [7];
- большая по сравнению с воздушным бортом высота пролета позволяет одновременно осуществлять обнаружение на значительно большей поверхности.

1. Математическая модель обнаружения переотраженного от поверхности радиосигнала

Для того, чтобы в конечном итоге получить оценку координат МО и оценить ошибку их измерения на начальном этапе необходимо оценить саму вероятность регистрации отраженного сигнала на выходе приемного устройства КА. При этом для получения оценки вероятности требуется разработать математическую модель, позволяющую учитывать частные значения вероятностей пространственного, временного и радиообнаружений:

$$KM : \begin{cases} M_{P_s} : \langle H_{КА}, h_{МО}, \varphi_{0.5}, R_3, g, d_{отр}, D_{отр}, S_{ис}, R_{рвид}, R_{обн}, S_{гип} \rangle \rightarrow P_s \\ M_{P_t} : \langle n_{КА}, V_{МО}, n_{учРВ}, k_{ИКА}, T, L_{РВmin}, L_{РВmax}, T_{пМОmin}, T_{пМОmax}, T_{прКАmin}, T_{прКАmax}, \alpha, \varepsilon_{ош}, \Delta_{ДВ}, N \rangle \rightarrow P_t \\ M_{P_e} : \langle H_{КА}, h_{МО}, \varphi_{0.5}, f, G_{КА}, G_{МО}, N_0, R_3, c, \varepsilon, \sigma, D_H, Z, q \rangle \rightarrow P_e \\ P_{KM} = P_s \cdot P_t \cdot P_e \end{cases} \quad (1)$$

где:

$H_{КА}$ – высота круговой орбиты КА, км;

$h_{МО}$ – высота пролета МО, км;

$\varphi_{0.5}$ – ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности, град;

R_3 – радиус Земли, км,

g – коэффициент рефракции радиоволн;

$d_{отр}$ – диаметр зоны отражения сигнала РВ на поверхности;

$D_{отр}$ – диаметр зоны отражения главного лепестка;

$S_{ис}$ – площадь зоны главного лепестка, км²;

$R_{рвид}$ – радиус зоны радиовидимости КА;

$R_{обн}$ – радиус зоны возможного обнаружения МО;

$S_{гип}$ – площадь гиперболической поверхности пролета КА, км²;

$n_{КА}$ – количество КА на орбите;

$V_{МО}$ – скорость МО, км/ч;

$n_{учРВ}$ – количество участков излучения РВ;

$k_{1КА}$ – количество пролетов одного КА в зоне возможного пролета МО в сутки;

T – суточное время, ч;

$L_{РВmin}$ – минимальная протяженность участка пролета МО, км;

$L_{РВmax}$ – максимальная протяженность участка пролета МО, км;

$T_{пМОmin}$ – минимальное время пролета МО, с;

$T_{пМОmax}$ – максимальное время пролета МО, с;

$T_{прКАmin}$ – минимальное время пролета КА в зоне возможного обнаружения, с;

$T_{прКАmax}$ – максимальное время пролета МО, с;

α – требуемая достоверность результатов моделирования;

$\varepsilon_{ош}$ – абсолютная ошибка;

$\Delta_{дв}$ – ошибка интерполяции;

N – количество требуемых прогонов моделирования;

f – центральная частота сигнала РВ, Гц;

$G_{КА}$ – коэффициент усиления антенны КА, дБ;

$G_{МО}$ – коэффициент усиления антенны МО, дБ;

N_0 – плотность мощности шумов, Вт/Гц;

c – скорость света;

ε – диэлектрическая проницаемость;

σ – удельная проводимость, См;

D_H – наклонная дальность, км;

Z – потери сигнала при распространении, дБ;

q – отношение сигнал-шум;

$P_{км}$ – комплексная вероятность обнаружения МО.

Таким образом, комплексная математическая модель обнаружения переотраженного от поверхности радиосигнала РВ с помощью КА сводится к определению частных значений вероятностей обнаружения переотраженного от поверхности сигнала в пространстве (P_s), времени (P_t), и радиолинии (P_e). Важно отметить, что указанные вероятности являются независимыми величинами.

На начальном этапе в соответствии с (1) рассчитаем пространственную вероятность P_s в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1.

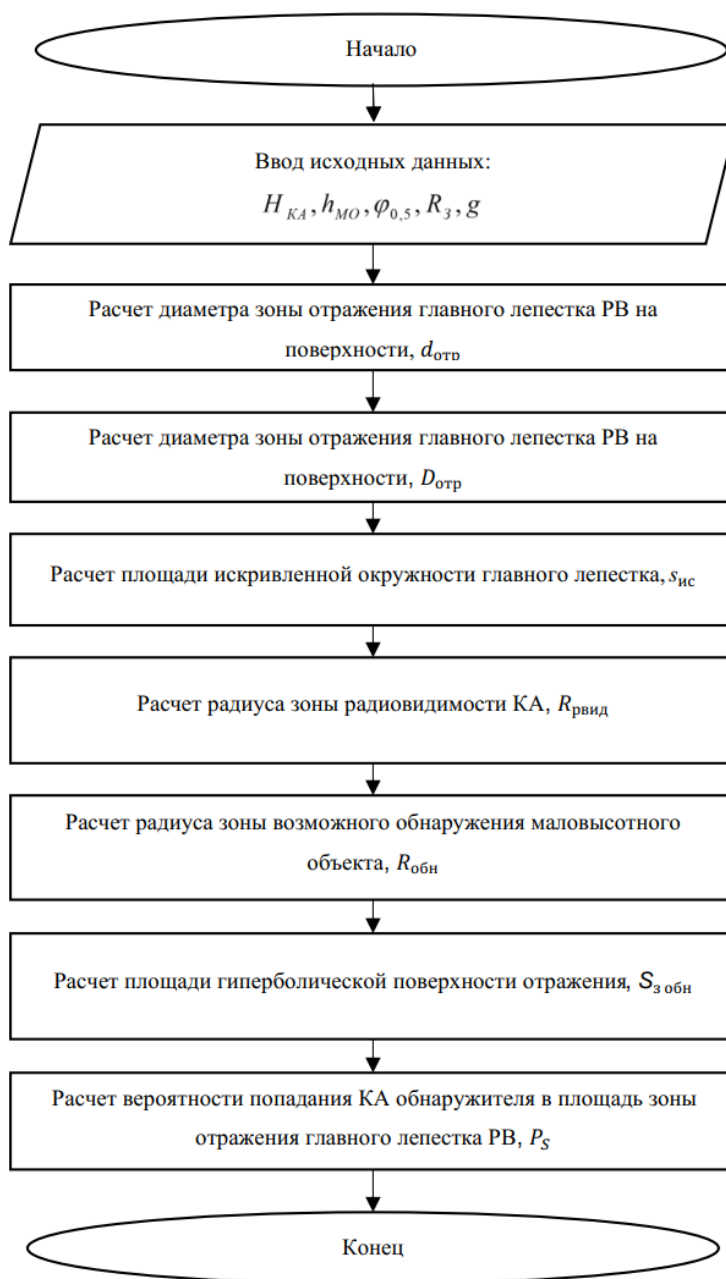


Рис. 1. Алгоритм расчета пространственной вероятности попадания спутника в площадь зоны отражения главного лепестка сигнала РВ.

В процессе решения задачи обнаружения сигнала и проведении моделирования, в соответствии с алгоритмом (рис. 1), были использованы следующие исходные данные и приняты допущения:

- $R_3 = 6378$ км, ширина диаграммы главного (ДН) лепестка бортового РВ $\varphi_{0.5} = 70^\circ$;
- коэффициент, учитывающий рефракцию радиоволн на трассе «поверхность-КА» $g = 1,1$ [6], $h_{MO} = 100$ м;
- отражение сигнала РВ происходит от гладкой поверхности с зеркальным отражением, соответствующей критерию Релея;
- отражение от поверхности учитывалось только по ширине главного лепестка, а отражением от боковых лепестков пренебрегалось как пренебрежимо малым;
- обнаружение производится с помощью КА, $H_{КА} = 900$ км, $n_{КА} = 5$;
- подразумевается, что излучение РВ осуществляется не непрерывно, а только лишь на некоторых интервалах времени случайной длительности.

Траектории пролета КА и геометрическое представление зоны максимума отражения сигнала РВ представлены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что одним из необходимых условий обнаружения является наличие в области поверхности переотраженного сигнала минимально требуемой для обнаружения мощности. Такая поверхность представляет собой гиперболическую круговую область зоны главного лепестка РВ радиусом R и точек траектории пролета спутников.

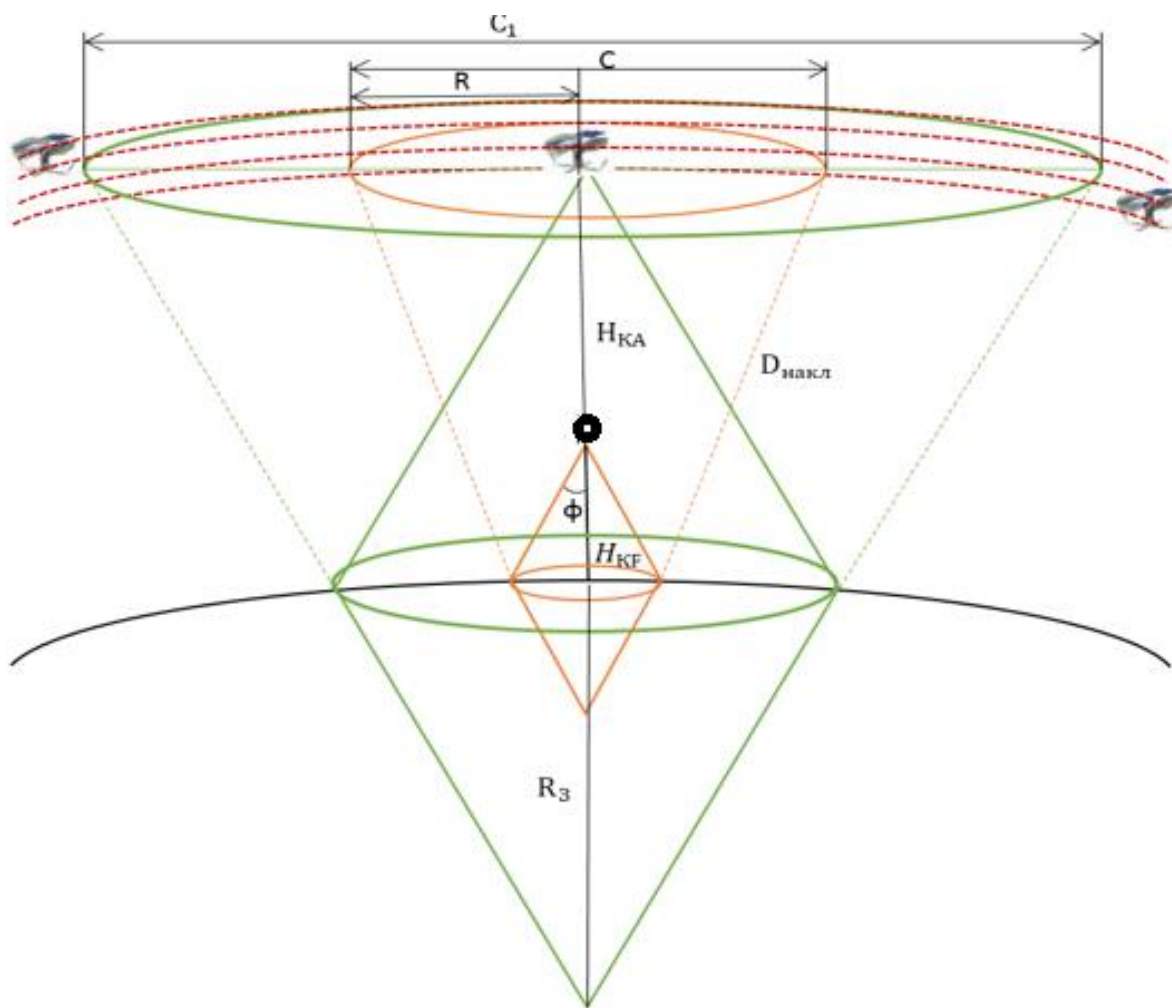


Рис. 2. Траектории пролета КА и геометрическое представление зоны максимума отражения сигнала РВ.

Сечение областей пересечения сигнала РВ с траекториями КА, обнаруживающего сигнал, представлены на рисунке 3.

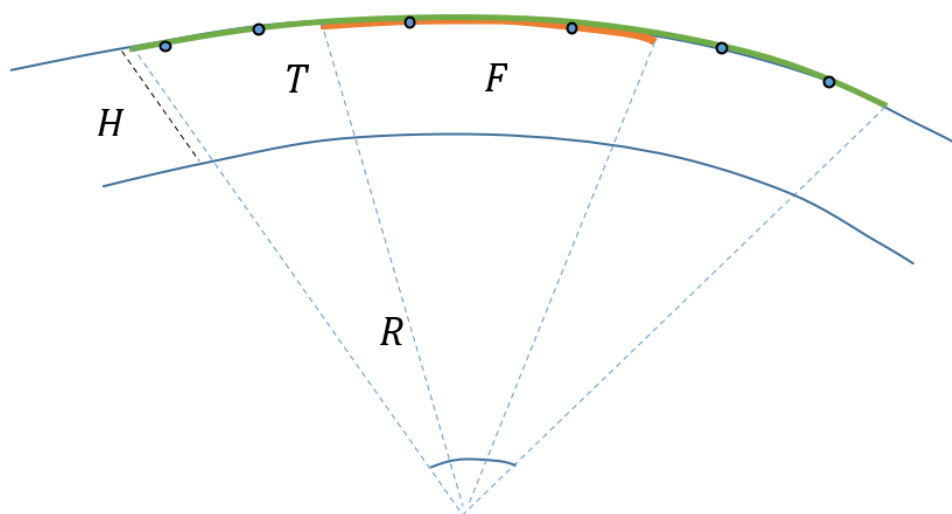


Рис. 3. Сечение областей пересечения сигнала РВ с траекториями пролета КА.

Из рисунка 3 следует, что при условии достоверного пролета КА в круговой искривленной поверхности $T \in [A, B]$, минимальные размеры T много больше F , $T \gg F$. На первом этапе проведена оценка вероятности появления КА в области переотраженного сигнала. Данная задача может быть решена методами геометрической вероятности. Геометрический вариант допустимо решать, рассматривая статичное положение зоны главного лепестка, а появление траектории КА в зоне обнаружения подчиняется равномерному распределению [4, 5].

Для решения задачи заданы параметры орбиты КА и параметры движения МО [3]. Поскольку антенна бортового РВ имеет ярко выраженный главный лепесток ДН, то для расчетов в качестве главного параметра направленности принималась ширина главного лепестка по уровню половинной мощности $\varphi_{0.5}$ [4].

На поверхности зона отражения представляет собой круговую площадку, диаметр которой $d_{\text{отр } \varphi_{0.5}}$ можно определить следующим образом:

$$d_{\text{отр}} = 2 \cdot h_{\text{МО}} \cdot \text{tg} \left(\frac{\varphi_{0.5}}{2} \right). \quad (2)$$

Диаметр зоны отражения главного лепестка $D_{\text{отр}}$ на высоте траекторий КА $H_{\text{КА}}$, в свою очередь, можно определить из выражения (6):

$$D_{\text{отр}} = 2 \cdot \left(\frac{H_{\text{КА}}}{\cos \left(\frac{\varphi_{0.5}}{2} \right)} + h_{\text{МО}} \cdot \sqrt{1 + \text{tg} \left(\frac{\varphi_{0.5}}{2} \right)^2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{0.5}}{2} \right). \quad (3)$$

Тогда, площадь искривленной окружности зоны главного лепестка будет равна:

$$S_{\text{ис}} = \frac{\pi R_3}{2} (4 \cdot h + c). \quad (4)$$

При этом параметры c и h равны соответственно

$$c = D_{\text{отр}} = 2 \cdot \left(\frac{H_{\text{КА}}}{\cos \left(\frac{\varphi_{0.5}}{2} \right)} + H_{\text{кр}} \cdot \sqrt{1 + \text{tg} \left(\frac{\varphi_{0.5}}{2} \right)^2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{0.5}}{2} \right), \quad (5)$$

$$h = \left(H_{КА} + R_3 - \sqrt{(H_{КА} + R_3)^2 - (H_{КА} + h_{МО})^2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\varphi_{0.5}}{2}\right)} \right). \quad (6)$$

Тогда, с учетом выражений (4), (5), (6) площадь искривленной окружности зоны главного лепестка будет равна:

$$S_{ис} = n_{КА} \cdot \frac{\pi(R_3 + H_{КА})}{2} \left[4 \cdot \left(H_{КА} + R_3 - \sqrt{(H_{КА} + R_3)^2 - \left(\frac{D_{отр}}{2}\right)^2} \right) + D_{отр} \right]. \quad (7)$$

Радиус зоны радиовидимости КА:

$$R_{рвнд} = \frac{R_3}{H_{КА} + R_3} \cdot \sqrt{(H_{КА} + R_3)^2 - R_3^2}. \quad (8)$$

Радиус зоны возможного обнаружения МО:

$$R_{обн} = R_{рвнд} \frac{H_{КА} + R_3}{R_3} = \sqrt{(H_{КА} + R_3)^2 - R_3^2}. \quad (9)$$

Поскольку на КА поиск сигналов организуется за счет амплитудного, фазоугломерного или электронного сканирования диаграммой направленности антенны, то будем считать, что время, необходимое на обнаружение излучаемого сигнала, будет пренебрежимо мало. Траектории пролета КА в зоне максимума отражения представлены на рис. 4.

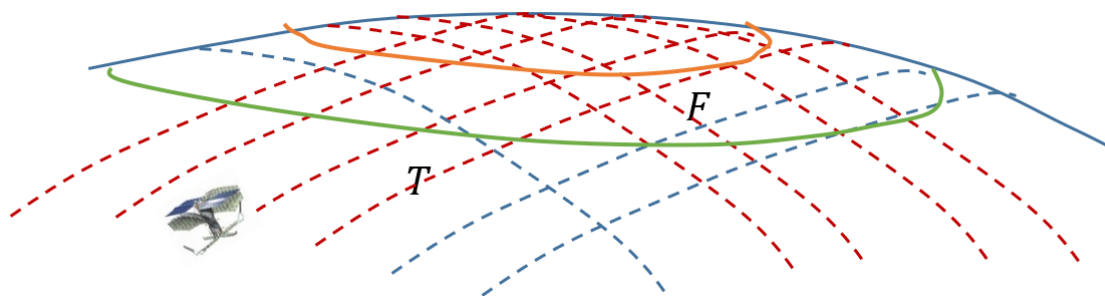


Рис. 4. Траектории пролета КА в зоне максимума отражения.

В таком случае, площадь зоны возможного обнаружения МО спутником будет рассчитываться как:

$$S_{зобн} = \frac{\pi(R_3 + H_{КА})}{2} \left[4 \left(H_{КА} + R_3 - \sqrt{(H_{КА} + R_3)^2 - R_{обн}^2} \right) + 2R_{обн} \right]. \quad (10)$$

Вероятность попадания КА в площадь зоны отражения главного лепестка РВ определяется из отношения площади искривленной окружности зоны главного лепестка $S_{ис}$ к площади зоны возможного обнаружения МО $S_{зобн}$:

$$P_s = \frac{2 \cdot \left[H_{КА} + R_3 - \sqrt{(H_{КА} + R_3)^2 - \left(g \cdot \frac{H_{КА}}{\cos\left(\frac{\varphi_{0.5}}{2}\right)} + h_{КР} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_{0.5}}{2}\right)^2} \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{0.5}}{2}\right) \right)^2 \right]}{\left(2 \cdot H_{КА} + \sqrt{(H_{КА} + R_3)^2 - R_3^2} \right)} + \frac{\left(g \cdot \frac{H_{КА}}{\cos\left(\frac{\varphi_{0.5}}{2}\right)} + h_{КР} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_{0.5}}{2}\right)^2} \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{0.5}}{2}\right) \right)}{\left(2 \cdot H_{КА} + \sqrt{(H_{КА} + R_3)^2 - R_3^2} \right)} = 0,286 \quad (11)$$

Заключительным этапом алгоритма, приведенного на рисунке 1, является расчет вероятности попадания КА в площадь зоны отражения главного лепестка сигнала РВ. На основании приведенных допущений и исходных данных в результате получено значение вероятности, равное $P_s = 0,286$. Таким образом, модель пространственного обнаружения переотраженного от поверхности сигнала РВ МО позволяет определить значение вероятности попадания КА в площадь зоны отражения главного лепестка сигнала РВ.

2. Расчет вероятности обнаружения МО

На втором этапе проведем оценку вероятности временного обнаружения P_t , которая позволит учитывать влияние интервалов излучения РВ и пролеты КА.

Расчет вероятности наложения интервалов времени пролета КА и интервалов времени включения РВ проведен в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 5.

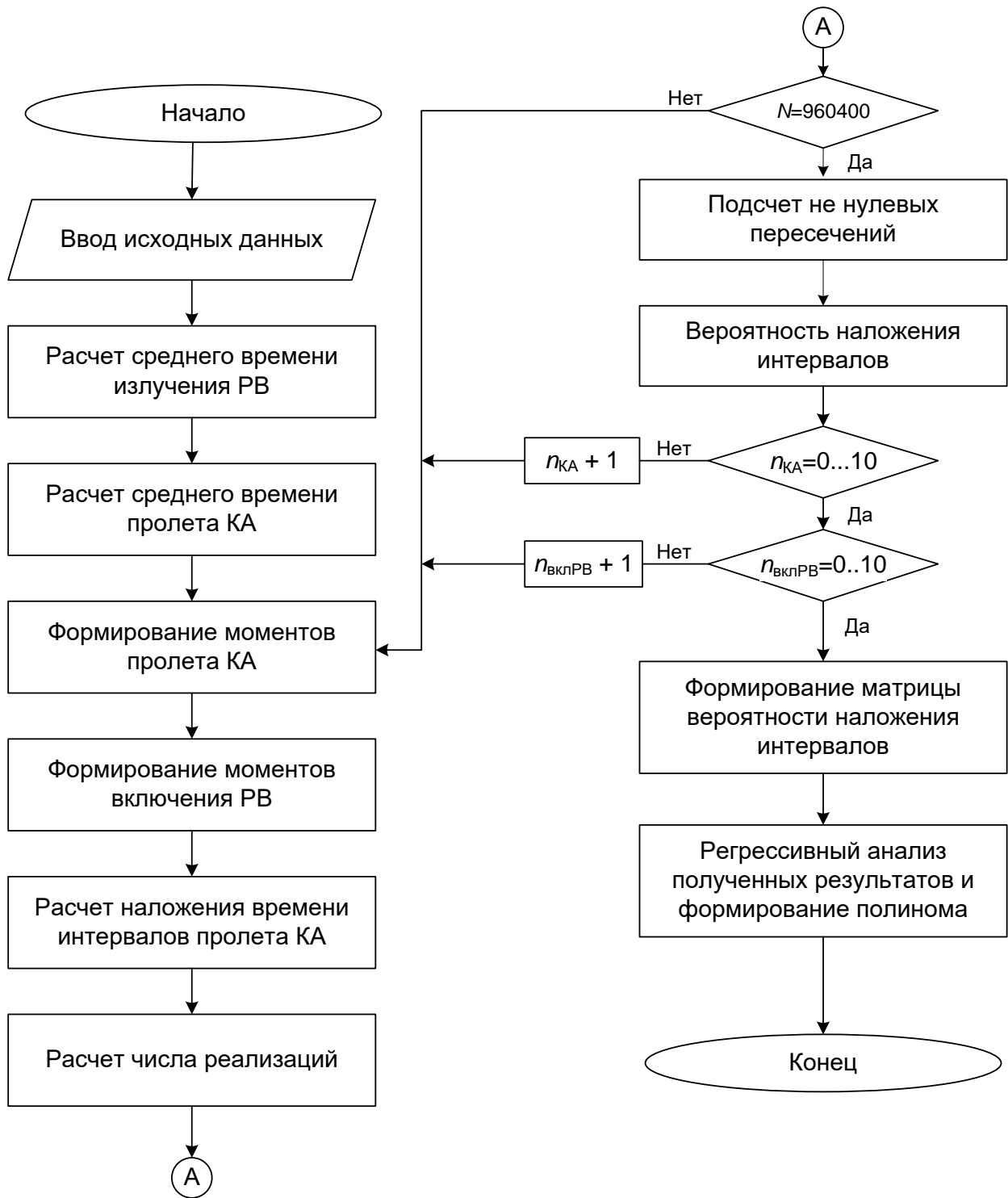


Рис. 5. Алгоритм расчета вероятности наложения интервалов времени пролета КА и интервалов времени включения РВ.

В качестве исходных данных для моделирования и расчетов были использованы следующие параметры:

$n_{КА} = 5$ – количество КА, распределенных равноудаленно на орбите; $k_{КА} = 8$, $T = 24$ часа, $n_{учРВ} = 5$, $L_{РВmin}$, $L_{РВmax}$, $V_{МО} = 900$ км/ч, $T_{пМОmin}$, $T_{пМОmax}$, $T_{прКАmin}$, $T_{прКАmax}$, $\alpha = 0.95$, $\varepsilon_{ош} = 0,001$.

Расчет вероятности наложения интервалов времени пролета КА, обнаруживающего сигнал и интервалов времени включения бортового РВ, проведен путем интерпретации данной задачи (рисунок 6).

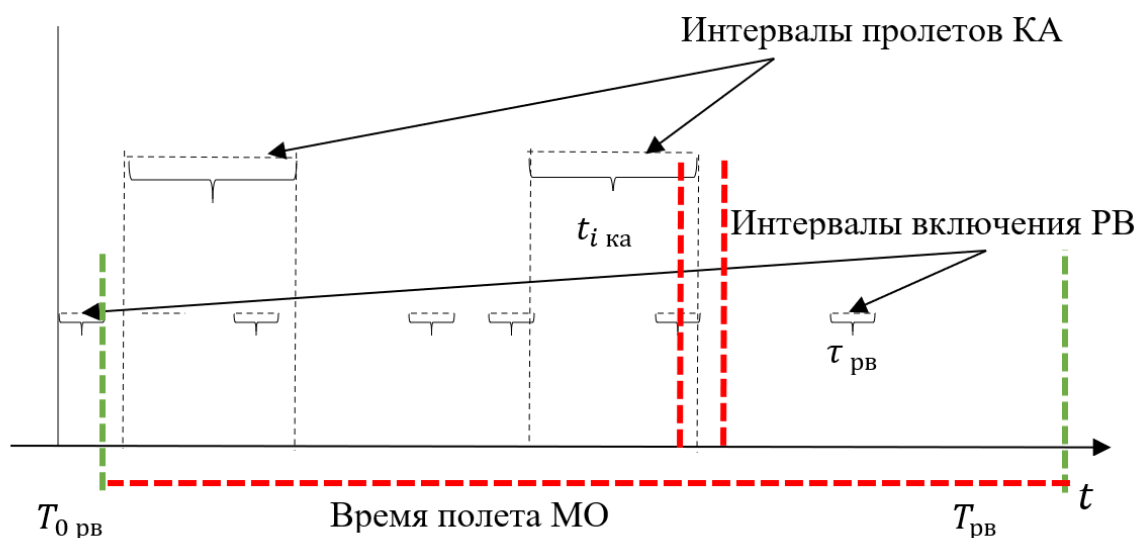


Рис. 6. Интерпретация задачи наложения интервалов пролетов КА и включения РВ.

Из рисунка 6 следует, что случайные включения РВ возможно обнаружить только тогда, когда совпадают моменты пролета МО с моментами пролета КА. Поэтому, необходимо учитывать одновременное нахождение КА и МО в зоне обнаружения.

Для решения данной задачи были рассмотрены различные аналитические методы и подходы, которые в итоге не позволили в достаточной степени описать функциональную зависимость P_i от каких-либо параметров. Поэтому в дальнейшем использовалось статистическое моделирование.

Среднее значение протяженности участка пролета $L_{кор ср}$, км, рассчитано согласно выражения 6. Для этого промоделировали $i = 100$ значений $L_{кор}$,

распределенных по равномерному закону в интервале $L_{\text{кор}i} \in (25, 30)$ и определили оценку математического ожидания:

$$L_{\text{PB ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{100} L_{\text{PB}i}}{100}. \quad (12)$$

На основании полученного значения $L_{\text{кор ср}}$ среднее время излучения РВ на участках $t_{\text{РВ}}$, мин. может быть рассчитано следующим образом:

$$t_{\text{РВ}} = n_{\text{учРВ}} \cdot \frac{L_{\text{РВ ср}}}{V_{\text{МО}}}. \quad (13)$$

Статистическое моделирование величины $t_{n\text{кр}}$ (времени полета n -й МО до цели) в количестве испытаний симулированных полетов МО $n_{\text{прРВ}} = 100$. Данное значение принадлежит интервалу $t_{n\text{МО}} \in (T_{n\text{МОmax}}, T_{n\text{МОmin}})$ и распределено по нормальному закону. По результатам моделирования оценку математического ожидания полученного значения приравниваем к $t_{\text{кр}}$ – среднему времени полета МО до посадки, мин.:

$$t_{\text{МО}} = m(t_{n\text{МО}}) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{пр}}} t_{n\text{МО}i}}{n_{n\text{МО}}}, \quad (14)$$

где $m(t_{n\text{МО}})$ – оценка математического ожидания полета МО от момента старта до посадки, значения $T_{n\text{МОmin}}$ часа и $T_{n\text{МОmax}}$ часа соответственно.

Статистическое моделирование величины $t_{n\text{рКА}}$, принадлежащей интервалу $t_{n\text{рКА}} \in (T_{\text{прКАmax}}, T_{\text{прКАmin}})$ и распределенное по нормальному закону в количестве испытаний симулированных полетов КА $n_{n\text{рКА}} = 100$, для рассматриваемых условий $T_{\text{прКАmin}}$ мин, $T_{\text{прКАmax}}$ мин. По результатам проведенного моделирования получена оценка значения математического ожидания, данное значение присваивается $t_{\text{КА}}$ – среднему времени пролета КА в зоне обнаружения, мин.:

$$t_{\text{КА}} = m(t_{\text{прМО}}) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{прКА}}} t_{n\text{рКА}i}}{n_{\text{прКА}}}, \quad (15)$$

где, $m(t_{\text{прМО}})$ – оценка математического ожидания времени пролета КА.

Для расчета количества пролетов каждого КА $k_{КА}$ в зоне обнаружения за время пролета КР $t_{кр}$ используем введенные значения $n_{КА}$ и $k_{1КА}$, а также рассчитанное значение $t_{кр}$ среднего времени полета МО до границы зоны возможного обнаружения:

$$k_{КА} = m(k_{КА}) = n_{КА} \cdot k_{1КА} \cdot \frac{m(t_{прМО})}{T}, \quad (16)$$

где, $m(k_{КА})$ – оценка математического ожидания количества пролетов КА за время полета МО.

Полученные значения оценок являются интервальными. Для дальнейшего решения задачи был использован метод Монте-Карло, который позволил определить точечные значения вероятности с учетом интервалов значений параметров: количества пролетов КА и количество участков излучения РВ [3].

Для получения оценки числа необходимых реализаций машинного эксперимента использована теорема Лапласа, согласно которой при больших значениях числа реализаций N биномиальное распределение достаточно хорошо согласуется с нормальным распределением. Зададимся абсолютной ошибкой $\varepsilon_{ош} = 0,001$ и достоверностью $\alpha = 0,95$, тогда число реализаций для наихудшего случая можно определить следующим образом [3].

$$N = \frac{t_a^2}{4\varepsilon_{ош}^2} = \frac{\left(\Phi^{-1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2}{4\varepsilon_{ош}^2} = \frac{\left(\Phi^{-1}\left(\frac{0,95}{2}\right)\right)^2}{4(0,001)^2}. \quad (17)$$

В результате решения уравнения $\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0.95$, корень $x = t_\alpha = 1.96$, следовательно:

$$N = \frac{1,96^2}{4(0,001)^2} = 960400.$$

В ходе моделирования проводилось $N = 960400$ итераций для каждой пары значений $n_{прКА}$ и $n_{кор}$. Данное значение N выбрано с целью обеспечения достаточной достоверности результатов моделирования.

В каждой j -й итерации создавался интервал пролета $t_{кр}$, на котором формировались значения начала момента первого пролета КА $t_{xКА}$ ($t_{xКА} < T_{КА}$) продолжительностью $t_{КА}$ в количестве $k_{КА}$. Последующие ($k_{КА}$ -ые) пролеты КА в интервале $t_{кр}$ осуществлялись через время $T_{КА}$ после $t_{xКА} + t_{КА}$:

$$t_{xКА+1} = t_{xКА} + t_{КА} + T_{КА}. \quad (18)$$

Таким образом, получены интервалы пролетов КА с учетом их группировки. Формируем значения моментов функционирования РВ $t_{yРВ}$ продолжительностью $t_{РВ}$ с количеством срабатываний k раз. При этом учитывалось, что каждое последующее значение момента i -го включения РВ $t_{yРВi+1}$ не попадало в интервал $t_{yРВi} + t_{РВ}$:

$$t_{yРВi} + t_{РВ} < t_{yРВi+1}. \quad (19)$$

Полученные интервалы пролета КА и функционирования РВ проверялись на условия наложения. При этом для каждой j -ой итерации считалось количество событий успешного наложения интервалов:

$$h_j = \begin{cases} 1, & \text{если } (t_{yРВi} + t_{РВ}) \cap (t_{xКАm} + t_{КА}) \neq \emptyset \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (20)$$

Полученные значения количества не нулевых итераций h_j моделирования складываются. Данные итерации характеризуются выполнением условия временного обнаружения. Полученное значение делим на общее число итераций. Результат деления будет характеризоваться оценкой вероятности наложения интервалов:

$$P_{\text{вробн}} = \frac{\sum_{j=1}^N h_j}{N}. \quad (21)$$

В ходе проведения моделирования оценивались точечные значения вероятности наложения интервалов времени пролета КА для различного количества КА в группировке и количества включений РВ.

3. Результаты моделирования

В результате моделирования получены значения вероятности наложения интервалов времени пролета КА и интервалов времени включения РВ (P_i) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения вероятностей наложения интервалов времени пролета КА и интервалов времени включения РВ.

$n_{КА} \backslash n_{вкРВ}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,069	0,131	0,192	0,253	0,314	0,375	0,436	0,497	0,558	0,619
2	0,134	0,244	0,347	0,442	0,529	0,609	0,682	0,747	0,805	0,855
3	0,194	0,343	0,472	0,583	0,677	0,756	0,821	0,873	0,914	0,945
4	0,25	0,429	0,573	0,688	0,778	0,847	0,899	0,936	0,962	0,979
5	0,302	0,503	0,655	0,767	0,833	0,905	0,943	0,968	0,983	0,992
6	0,351	0,568	0,721	0,826	0,896	0,94	0,968	0,984	0,993	0,997
7	0,396	0,624	0,775	0,87	0,928	0,963	0,982	0,992	0,997	0,999
8	0,438	0,673	0,818	0,903	0,951	0,977	0,99	0,996	0,999	1
9	0,477	0,716	0,853	0,927	0,966	0,985	0,994	0,998	0,999	1
10	0,513	0,753	0,881	0,946	0,977	0,991	0,997	0,999	1	1

По таблице 1 видно, что для группировки КА при 4 – 5 участках коррекции вероятность обнаружения МО равна 0.778 – 0.833.

Значения вероятностей наложения интервалов времени пролета КА и интервалов времени включения РВ в зависимости от количества включений РВ и количестве КА представлена в виде диаграммы на рисунке 7.

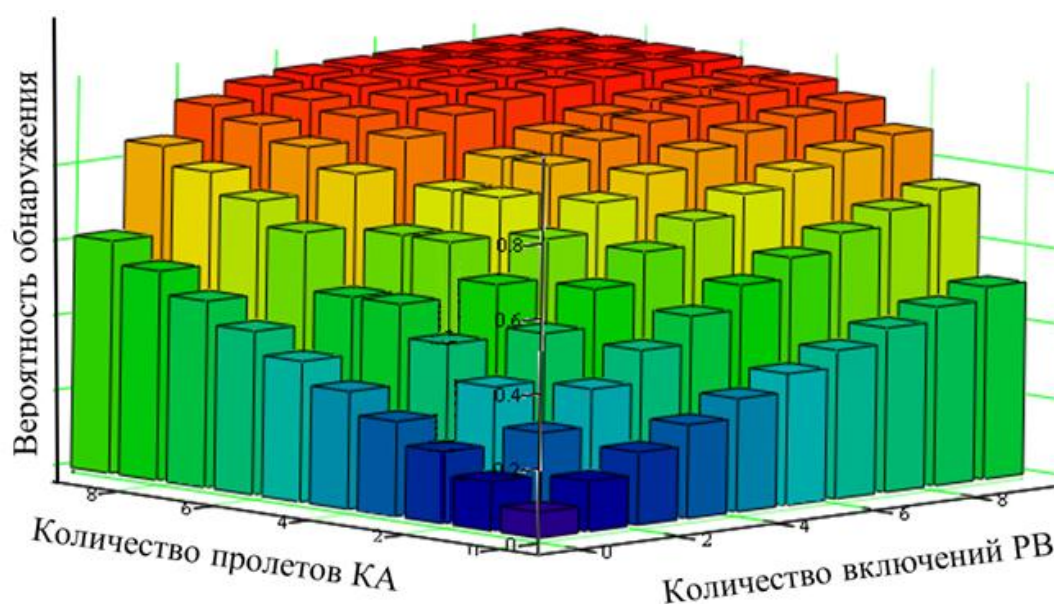


Рис. 7. Значения вероятностей наложения интервалов времени пролета КА и интервалов времени включения РВ.

Поскольку полученные результаты статистического моделирования являются точечными, появилась необходимость представить их в виде функциональной зависимости. Для этого получена аналитическая зависимость на основе регрессионного анализа в виде полинома:

$$P(x, y) = p_1 + p_2x + p_3y + p_4x^2 + p_5xy + p_6y^2 + p_7x^3 + p_8x^2y + p_9xy^2 + p_{10}y^3 + p_{11}x^4 + p_{12}x^3y + p_{13}x^2y^2 + p_{14}xy^3 + p_{15}y^4 + p_{16}x^5 + p_{17}x^4y + p_{18}x^3y^2 + p_{19}x^2y^3 + p_{20}xy^4 + p_{21}y^5, \quad (22)$$

при этом $y = n_{КА}$, $x = n_{уч\ коп}$.

Рассчитанные коэффициенты равны:

$$\begin{array}{lll} p_1 = 0.01861, & p_8 = -0.01759, & p_{15} = -0.0006161, \\ p_2 = -0.024, & p_9 = -0.01273, & p_{16} = 0.00003443, \\ p_3 = -0.01604, & p_{10} = 0.004191, & p_{17} = -0.00008579, \\ p_4 = -0.002949, & p_{11} = -0.000701, & p_{18} = 0.00002266, \\ p_5 = 0.1264, & p_{12} = 0.00198, & p_{19} = 0.00001866, \\ p_6 = -0.006713, & p_{13} = -0.0004307, & p_{20} = -0.00005491, \\ p_7 = 0.004105, & p_{14} = 0.00131, & p_{21} = 0.00002812. \end{array}$$

С помощью пакета Matlab получено выражение для определения оценок вероятности (P_t) от наложения интервалов времени пролета КА и интервалов включения РВ:

$$\begin{aligned} P_t = & 0.01861 - 0.024 \cdot n_{уч\ коп} - 0.01604 \cdot n_{КА} - 0.002949 \cdot n_{уч\ коп}^2 + 0.1264 \cdot n_{уч\ коп} \cdot n_{КА} - 0.006713 \cdot n_{КА}^2 + \\ & + 0.004105 \cdot n_{уч\ коп}^3 - 0.01759 \cdot n_{уч\ коп}^2 \cdot n_{КА} - 0.01273 \cdot n_{уч\ коп} \cdot n_{КА}^2 + 0.004191 \cdot n_{КА}^3 - 0.000701 \cdot n_{уч\ коп}^4 + \\ & + 0.00198 \cdot n_{уч\ коп}^3 \cdot n_{КА} - 0.0004307 \cdot n_{уч\ коп}^2 \cdot n_{КА}^2 + 0.00131 \cdot n_{уч\ коп} \cdot n_{КА}^3 - 0.0006161 \cdot n_{КА}^4 + 0.00003443 \cdot n_{уч\ коп}^5 - \\ & - 0.00008579 \cdot n_{уч\ коп}^4 \cdot n_{КА} + 0.00002266 \cdot n_{уч\ коп}^3 \cdot n_{КА}^2 + 0.00001866 \cdot n_{уч\ коп}^2 \cdot n_{КА}^3 - 0.00005491 \cdot n_{уч\ коп} \cdot n_{КА}^4 + \\ & + 0.00002812 \cdot n_{КА}^5 = 0,833 \end{aligned} \quad (23)$$

На рисунке 8 представлен графический результат расчетов в виде поверхности распределения временной вероятности обнаружения МО (P_t).

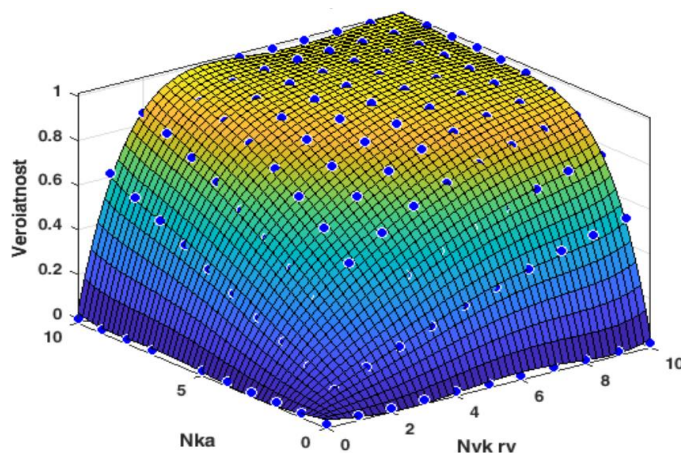


Рис. 8. Поверхность значений временной вероятности обнаружения МО (P_t).

Формирование данного полинома производилось с учетом требований к ошибке, значение которой не превышает $\Delta_s \leq 5\%$.

На основании представленных выше исходных данных и алгоритма расчета была получена оценка вероятности временного обнаружения $P_t = 0.833$.

Заключение

Таким образом, модель временного обнаружения переотраженного от поверхности сигнала РВ спутником позволяет определить вероятность наложения интервалов времени пролета КА и интервалов времени включения РВ (P_t).

В результате приведенных расчетов были получены точечные значения оценок вероятностей пространственного P_s и временного P_t обнаружений МО с РВ на борту. Значение $P_{км}$ представляет собой интервальное значение от 0.025 до 0.238 для указанных исходных данных.

Несмотря на то, что полученный интервал значений $P_{км}$ достаточно низок, необходимо отметить возможность его повышения за счет увеличения количества КА.

Финансирование: Публикация выполнена в рамках НИР ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0003

Литература

1. Сухов А.В., Пузийчук С.И. Информационный анализ эффективности радиопротиводействия беспилотным воздушным судам // Информационно экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2022. – С. 58.
2. Боков А.С., Важенин В.Г. Применение фацетной модели для имитации радиолокационного сигнала, отраженного от подстилающей поверхности // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2012. – №. 7. – С. 55-61.
3. Методы и алгоритмы обработки информации в АСУ при обнаружении и сопровождении малоразмерных объектов: монография. Часть 1. Методы и алгоритмы первичной обработки информации. / А.П. Виноградов, В.И. Филатов. – Балашиха: ВА РВСН имени Перта Великого, 2021. – 246 с.
4. Методы оценки эффективности образцов комплексов и систем оперативно-тактических вооружений в составе формирований видов ВС. / Под ред. В.А. Цимбала – Москва: МО, 1989. – 152с.
5. Пассивное противодействие системам наведения высокоточного оружия. – Москва: ЛЕНАНД, 2016. – 224 с.
6. Потюпкин А.Ю. Основы создания систем технической разведки: Учеб. пособ. / А.Ю. Потюпкин. – Балашиха: ВА РВСН им. Петра Великого, 2019. – 305 с.
7. Гуляев В.П. Анализ демаскирующих признаков объектов информатизации и технических каналов утечки информации: учебно-методический комплект / В.П. Гуляев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 164 с.

Для цитирования:

Сухов А.В., Филатов В.И., Савилкин С.Б. Комплексная математическая модель оценки возможностей поиска объектов за счет обнаружения переотраженных от поверхности сигналов бортового радиовысотомера космическими средствами // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.7>

