

ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ МАТРИЧНЫМИ РАДИОМЕТРИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

В.Н. БЫКОВ, Д.Д. ИВАНЧЕНКО, Н.Н. КОЛЧИГИН, Т.Д. БЕРЕЖНАЯ

На основании выражений для вероятности правильного обнаружения и радиояркостного контраста произведена оценка вероятности и дальности обнаружения с помощью пассивной матричной радиометрической системы миллиметрового диапазона объемного малоразмерного наземного объекта на фоне земной поверхности. Показано, что наибольшие дальности обнаружения имеют место для боковой поверхности объекта при углах визирования 0° – 40° от надира. Осуществлены количественные оценки влияния маскировочного покрытия на максимальную дальность обнаружения малоразмерного наземного объекта. Установлено, что маскировочное покрытие с ослаблением радиояркостного контраста на 10 дБ уменьшает дальность обнаружения наземного объекта не менее, чем в 3 раза.

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

ВВЕДЕНИЕ

Радиометрические системы миллиметрового диапазона (РМС ММД) радиоволн позволяют решать широкий круг народнохозяйственных, научных и военных задач [1–3]. РМС, размещаемые на летательных аппаратах (ЛА) различного назначения, применяются для обнаружения и идентификации площадных, протяженных и малоразмерных наземных, в том числе подвижных, объектов. В качестве подвижных наземных объектов рассматриваются отдельные автомобили, колонны автотракторной техники, подвижные объекты-реперы.

На основании полученных в предыдущих работах [1–3] выражений для вероятности правильного обнаружения и суммарного радиояркостного контраста малоразмерных наземных объектов на фоне земной поверхности произведены оценки дальности обнаружения объектов матричными РМС ММД. Особый интерес вызывает применение «подсветки» объекта независимым источником широкополосного шумового сигнала, что позволяет увеличить дальность радиометрического обнаружения малоразмерного наземного объекта в полтора – два раза [1–3]. Следует отметить, что в указанных работах оценка дальности обнаружения наземных объектов произведена для случая наблюдения объекта с верхней полушеры при угле визирования антенны РМС $\theta=0$ от вертикали. При этом объект представляется в виде плоской фигуры с определенной площадью. Оценке подвергался малоразмерный наземный объект, площадь верхней части которого (кузова, кабины) составляет $S=25\text{ м}^2$.

В данной статье представляется целесообразным оценить возможность обнаружения объемного объекта с размерами, обеспечивающими площадь верхней части (крыши) $S_{\text{в}}=25\text{ м}^2$, площадь боковой поверхности $S_{\text{б}}=17\text{ м}^2$, площадь лобовой (или задней) проекции $S_{\text{л(з)}}=9\text{ м}^2$. При этом обнаружение объекта производится пассивной РМС в миллиметровом диапазоне волн.

Целью данной статьи является вероятностная оценка дальности обнаружения подвижного

малоразмерного наземного объекта при различных углах визирования пассивной радиометрической системы миллиметрового диапазона. Оценка дальности обнаружения производится в присутствии мешающих факторов в виде принудительной маскировки объекта, затрудняющей оптическую визуализацию и ослабляющей естественное излучение объекта в миллиметровом диапазоне волн.

1. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

В качестве средств принудительной маскировки наземного объекта рассматривается применение маскировочного покрытия (МП), характеристики которого приведены в работе [4]. МП в виде радиопоглощающего материала на сетевой основе обеспечивает поглощение электромагнитных волн видимого, сантиметрового и миллиметрового диапазонов. При этом применение однослойного покрытия приводит к снижению коэффициента излучения объекта в миллиметровом диапазоне ($\lambda \approx 8\text{ мм}$) в 3,47 раз, т. е. на 5,4 дБ [2]. Применение двухслойного МП, как показали экспериментальные исследования [3, 5], снижает коэффициент излучения не менее, чем в 10 раз.

Применение такого покрытия, по мнению авторов работ [3, 4], препятствует созданию цельного изображения наземных объектов информационными датчиками матричных РМС.

Как и в предыдущих работах [1–3], постановка задачи сводится к следующему. Летательный аппарат, носитель РМС, движется, в общем случае, по наклонной траектории, в диапазоне высот $H=(0,5-10)$ км. Матричная РМС ММД размерностью, например, $N \geq N_1 \times N_2 = 8 \times 8$ элементов (N_1, N_2 – количество строк и столбцов в изображении, соответственно), формирует кадр изображения визируемой земной поверхности с расположенным на ней объектом (объектами). В качестве рабочей длины волны РМС могут быть выбраны длины волн $\lambda=8,6\text{ мм}$, $\lambda=3,2\text{ мм}$, являющиеся «окнами прозрачности» атмосферы в

миллиметровом диапазоне. Минимальное время формирования изображения выбирается из условия реализации требуемой чувствительности РМ датчика, максимальное время – из условия отсутствия «смаза» изображения вследствие высокой скорости полета ЛА ($V \geq 300 \text{ м/с}$). Исходя из этих условий и технических характеристик современных РМ датчиков [3] время формирования изображения должно быть равно времени интегрирования сигнала в одном РМ канале $\tau \approx (0,1 - 0,01) \text{ с}$. Для простоты представим, что матричная РМС комплектуется радиометрами компенсационного типа.

В работах [1–3] приведены аналитические выражения для вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения малоразмерных наземных объектов матричной РМС при двухальтернативном обнаружении по критерию Неймана-Пирсона:

$$F' = \int_{T_0 - T_n}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{T^2}{2\sigma^2}} dT = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{T_0 - T_n}{\sigma} \right) \right], \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{T_n + \Delta T - T_0}{\sigma} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(q - \Phi^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot F}{N} \right) \right) \right]. \quad (2)$$

В выражениях (1), (2) приняты следующие обозначения: $\Delta T \approx (T_s - T_n)$ – радиояркостный контраст «объект – фон», K , T_s – радиояркая температура объекта, K , T_n – радиояркая температура фона, $K \cdot T_0 = T_n + \sigma \Phi^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot F}{N} \right)$ – пороговое значение, при котором определяется вероятность правильного обнаружения, $\Phi^{-1}(x)$ – функция, обратная интегралу вероятностей $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$. Отношение сигнал-шум на выходе РМ приемника $q = \frac{\Delta T}{\sigma}$, $\sigma = \frac{T_r}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}}$ – среднее квадратическое отклонение (СКО) шума РМ приемника, T_r – шумовая температура РМ приемника, K , Δf – ширина полосы пропускания РМ приемника, Гц. F' – вероятность ложной тревоги для одного элемента изображения. Вероятность хотя бы одной ложной тревоги для совокупности из N элементов в РМ матрице $F = 1 - (1 - F')^N$, при $N = 8 \times 8 \gg 1$, $F \approx N \cdot F'$.

На рис. 1 приведены зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал-шум на выходе РМ приемника, параметром служит величина вероятности ложной тревоги F .

Так, величина вероятности ложной тревоги для всех элементов изображения (например, при размерности изображения $N = 10 \times 10$ элементов) $F = 10^{-2}$ (штрихпунктирная кривая на рис. 1) соответствует величине ложной тревоги в одном элементе $F' \approx 10^{-4}$. Сплошная кривая на рис. 1 соответствует величине вероятности ложной тревоги

для всех элементов изображения $F = 10^{-4}$ (при достаточно малой величине вероятности ложной тревоги $F' = 10^{-6}$ в одном элементе изображения).

На рис. 1 показана граница, выше которой величина вероятности правильного обнаружения наземных объектов $D \geq 0,9$. Для достижения этой величины необходимо обеспечить требуемое отношение сигнал-шум на выходе каждого РМ канала матричной РМС. Так, при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-2}$ ($F' = 10^{-4}$ в одном элементе изображения) необходимо обеспечить величину отношения сигнал-шум $q \geq 3,51$. Ужесточение требования по величине вероятности ложной тревоги до величины $F = 10^{-4}$ ($F' = 10^{-6}$ в одном элементе изображения) приводит к увеличению требуемого отношения сигнал-шум до величины $q \geq 5,91$.

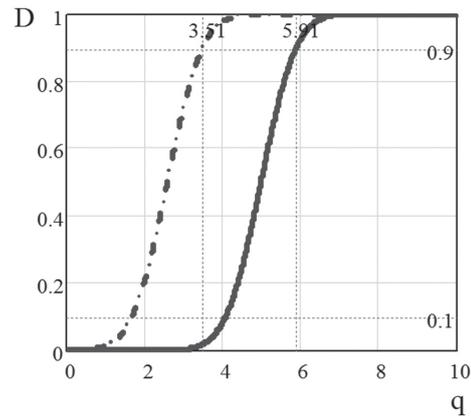


Рис. 1. Зависимость $D = f(q)$

На рис. 1 показана также граница устойчивого не обнаружения объекта радиометрической системой ММД ($D \leq 0,1$). При этом величина требуемого отношения сигнал-шум (для случая $F = 10^{-4}$, $F' = 10^{-6}$ в одном элементе изображения) составляет $q \leq 4$.

В работах [1–3] приведено аналитическое выражение для суммарного радиояркого контраста «объект – фон», формируемого как естественным излучением объекта (T_1), так и отраженным от объекта сигналом источника подсветки (T_2):

$$T = T_1 + T_2 = \Delta \chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R) + \frac{P_i \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \Delta \sigma \cdot \cos^4 \theta \cdot K(2R)}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot \Delta f \cdot R^4}, \quad (3)$$

где P_i – мощность источника подсветки; G_t, G_r – коэффициент направленного действия антенн источника подсветки и РМ датчика, соответственно; $\Delta \sigma$ – разность значений эффективной поверхности рассеяния объекта и фона.

Выражение (3) получено для случая однопозиционной подсветки наземного объекта. В случае двухпозиционной подсветки необходимо заменить дальность R на дальность источника подсветки R_i и дальность до РМ датчика РМС R_r . В случае вертикального визирования, что характерно для радиометрических систем, дальность до объекта необходимо заменить на высоту

визирования источника подсветки и высоту приёма сигнала РМ датчиком РМС H_i, H_r .

В случае использования только пассивного режима работы РМС, без применения принудительной искусственной подсветки, выражение для радиояркостного контраста «объект – фон» имеет вид:

$$T = \Delta\chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R). \quad (4)$$

Составляющими выражения (4) являются: $\Delta\chi$ – разность излучательной способности объекта и фона; T_{12} – контрастообразующая, т.е. разность радиояркостных температур объекта и фона земной поверхности (в случае металлизированных объектов используется излучение «холодного» неба, отраженного от объекта); $K(R) = \exp(-0,23 \cdot \alpha \cdot R)$ – множитель ослабления радиоволн при распространении в атмосфере; α – погонный коэффициент ослабления, дБ/км; $R = H \cdot \sec\theta$ – наклонная дальность до визируемого объекта; θ – угол наклона линии визирования объекта, отсчитывается от надира. Коэффициент заполнения луча диаграммы направленности антенны (ДНА) Q – параметр, характеризующий объект как «малоразмерный». Для малоразмерного объекта $Q \leq 1$, для протяженного или площадного объекта $Q = 1$:

$$Q = \frac{4 \cdot S}{\pi \cdot L^2}, \quad Q = 0 \dots 1, \quad (5)$$

где S – площадь визируемого объекта; $L = \frac{\lambda \cdot H}{d}$ – сечение ДНА плоскостью земли; при конусной аппроксимации луча ДНА и вертикальном визировании объекта сечение представляет собой диаметр окружности; d – диаметр бортовой антенны. В ходе дальнейших расчетов выбрано соотношение $\frac{d}{\lambda}$, обеспечивающее в ММД коэффициент направленного действия антенны не менее 40 дБ. Это может быть практически реализуемо на длине волны $\lambda = 3,2$ мм при диаметре зеркальной параболической антенны $d = 200$ мм, либо на длине волны $\lambda = 8,6$ мм при диаметре антенны $d = 500$ мм. Коэффициент направленного действия антенны $G_r = 3,855 \cdot 10^4$. При этом ширина ДНА РМС составляет $2\theta_{0,5}^0 \approx 1,1^0 - 1,2^0$.

При наклонном визировании объекта вместо высоты H в выражение для сечения L следует подставлять наклонную дальность R .

Следует заметить, что в выражении (4) хотя отсутствует эффект принудительной подсветки от искусственного источника электромагнитных волн (детерминированного или широкополосного шумового излучения), однако имеет место естественная подсветка объекта (с металлическим покрытием) излучением «холодного» неба.

Для упрощения расчетов принято, что обнаружение объекта осуществляется в условиях «чистой» безоблачной атмосферы $K(R) = K(2R) \approx 1$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ

На рис. 2 представлена геометрия визирования малоразмерного наземного объекта РМС обнаружения.

Площадь объекта при изменении угла визирования радиометрической системы обнаружения от надира (θ) для плоскости «надир – боковая проекция» и угла (φ) в плоскости «надир – лобовая (задняя) проекция» вычисляется по формулам:

$$S(\theta) = S_B(\theta) + S_G(\theta) = S_B \cdot \cos\theta + S_G \cdot \sin\theta = 25 \cdot \cos\theta + 17 \cdot \sin\theta, \quad (6)$$

$$S(\varphi) = S_B(\varphi) + S_{л(з)}(\varphi) = S_B \cdot \cos\varphi + S_{л(з)} \cdot \sin\varphi = 25 \cdot \cos\varphi + 9 \cdot \sin\varphi. \quad (7)$$

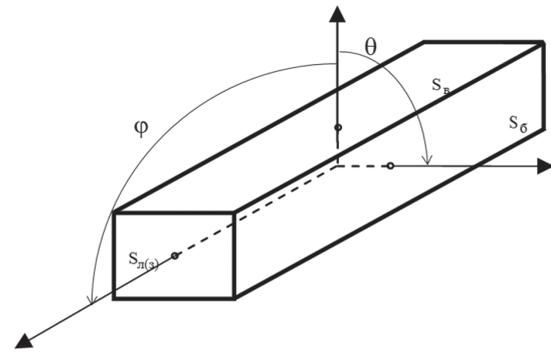


Рис. 2. Геометрия визирования малоразмерного наземного объекта

На рис. 2 и в формулах (6), (7) обозначено: $S_B, S_G, S_{л(з)}$ – площадь верхней, боковой и лобовой (задней) проекции объекта, θ, φ – углы визирования объекта в плоскости «надир – боковая проекция» и «надир – лобовая (задняя) проекция» объекта, соответственно.

В табл. 1, 2 приведены результаты расчетов по формулам (6), (7) величины площади объекта от угла визирования. В табл. 3, 4 приведены результаты расчета дальности обнаружения РМС ММД наземного объекта в плоскости «надир – боковая проекция» и «надир – лобовая (задняя) проекция», соответственно, произведенные по формуле (4), для случая $D \geq 0,9$, $q \geq 5,91$.

Таблица 1

Площадь объекта в плоскости «надир – боковая проекция»

Угол визирования θ , град	Площадь объекта $S(\theta)$, м ²
0	25
10	27,572
20	29,307
30	30,151
40	30,079
50	29,092
60	27,222
70	24,525
80	21,083
89	17,434
90	17

Таблица 2

Площадь объекта в плоскости «надир – лобовая проекция»

Угол визирования φ , град	Площадь объекта $S(\varphi)$, м ²
0	25
10	26,183
20	26,57
30	26,151
40	24,936
50	22,964
60	20,294
70	17,008
80	13,204
89	9,435
90	9

Расчеты проведены для следующих условий. Величина разности излучательной способности объекта и фона для металла на фоне травы (леса) составляет $\Delta\chi = -0,9$, величина радиояростной контрастообразующей температуры выбрана равной $T_{12} = 200\text{ K}$, что соответствует справочным данным для разности температур излучения металла на фоне земной поверхности (травы, песка, глинозема, леса) [3]. Указанные величины $\Delta\chi$ и T_{12} соответствуют также величине контраста «объект – лес, трава» $T \approx 177\text{ K}$, полученной экспериментально [5].

Расчеты (табл. 3, 4) проведены для объекта, не защищенного маскировочным покрытием ($\Delta T = 200\text{ K}$) и для объекта под МП, снижающим коэффициент излучения в 10 раз ($\Delta T = 20\text{ K}$).

Таблица 3

Дальность обнаружения объекта в плоскости «надир – боковая проекция»

Угол визирования θ , град	Дальность обнаружения R , м	
	$\Delta T = 200\text{ K}$	МП (10 дБ) $\Delta T = 20\text{ K}$
0	1945	615
10	2013	637
20	1980	626
30	1850	585
40	1635	517
50	1349	426
60	1015	321
70	659	208
80	310	98
89	28	8

На рис. 3 приведены зависимости вероятности правильного обнаружения от угла визирования для двух проекций объекта.

Верхняя пара кривых соответствует объекту без маскировочного покрытия, нижняя пара – объекту под маскировочным покрытием, снижающим излучательную способность объекта на 10 дБ. В каждой паре верхняя кривая характеризует объект в плоскости «надир – боковая проекция», нижняя кривая – объект в плоскости «надир – лобовая (задняя) проекция».

Таблица 4

Дальность обнаружения объекта в плоскости «надир – лобовая проекция»

Угол визирования θ , град	Дальность обнаружения R , м	
	$\Delta T = 200\text{ K}$	МП (10 дБ) $\Delta T = 20\text{ K}$
0	1945	615
10	1962	620
20	1885	596
30	1723	545
40	1489	471
50	1198	379
60	876	277
70	548	173
80	245	77
89	20	6

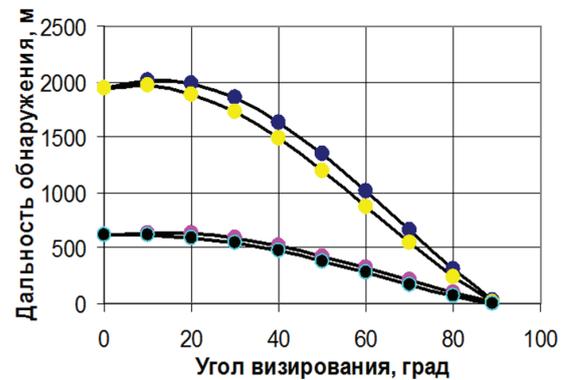


Рис. 3. Зависимость $D = f(\theta, \varphi)$ для пассивной РМС

ВЫВОДЫ

Проанализировано выражение для вероятности правильного обнаружения малоразмерных наземных объектов матричными радиометрическими системами миллиметрового диапазона волн. Получено выражение для суммарного радиояростного контраста «объект – фон», формируемого за счет естественного излучения объекта, а также за счет искусственной подсветки объекта независимым источником широкополосного шумового сигнала. Показано (в предыдущих работах), что применение подсветки, позволяет увеличить дальность радиометрического обнаружения малоразмерного наземного объекта не менее, чем в полтора – два раза.

На основании выражения для радиояростного контраста проанализирована вероятность и дальность обнаружения с помощью пассивной РМС ММД объемного малоразмерного наземного объекта на фоне земной поверхности. Наилучшие условия для обнаружения объектов с помощью РМС обнаружения находятся в пределах углов $\theta = \varphi = 0^{\circ} - 40^{\circ}$ от надира. Наибольшие дальности обнаружения имеют место для боковой поверхности объекта, как обладающей большей площадью.

Объект, обладающий осевой симметрией по соответствующей оси, обладает также симметрией по дальности обнаружения в отношении рассматриваемой оси объекта.

Осуществлены количественные оценки влияния маскировочного покрытия на вероятность правильного обнаружения и максимальную дальность обнаружения наземных объектов. Применение маскировочного покрытия с ослаблением контраста на 10 дБ уменьшает дальность обнаружения наземного объекта в 3,16 раз.

Результаты данной статьи могут явиться основой для создания метода (методики) оценки возможности обнаружения наземных объектов с помощью систем радиовидения, применяемых на летательных аппаратах различного назначения.

Литература

- [1] *Быков В.Н.* Обнаружение малоразмерных объектов радиометрическими информационными системами миллиметрового диапазона с шумовой подсветкой / В.Н. Быков // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. Наук.-техн. журнал. — Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». — Вип. 2(10), 2005. — С. 5–10.
- [2] *Антюфеев В.И.* Обнаружение малоразмерных наземных объектов матричными радиометрическими системами с шумовой подсветкой / В.И. Антюфеев, В.Н. Быков, Д.Д. Иванченко, Н.Н. Колчигин, Т.Д. Бережная // *Харків: Радоелектронні і комп'ютерні системи, науково-технічний журнал, ХАІ, 2013.* — № 2(61). — С. 7–13.
- [3] Матричные радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов: Монография / В.И. Антюфеев, В.Н. Быков, А.М. Гричанюк, Д.Д. Иванченко, Н.Н. Колчигин, В.А. Краюшкин, А.М. Сотников. — Х.: Изд-во ООО «Щедрая усадьба плюс», 2014. — 372 с.
- [4] *Ткаліч М.В., Топчев М.Д., Комаров В.О., Глебов В.В., Ващенко В.П.* Під українським маскувальним покриттям — танка не видно... // *Винахідник і раціоналізатор*. — 2002. — № 2–3. — С. 5–6.
- [5] *Быков В.Н.* Экспериментальная оценка радиометрической заметности малоразмерных объектов в условиях неопределенности / В.Н. Быков // *Системы обработки информации*. — Х.: ХВУ, 2004. — Вип. 3. — С. 11–17.

Поступила в редколлегию 20.02.2015

Быков Виктор Николаевич, доктор технических наук, с. н. с., ведущий научный сотрудник кафедры теоретической радиофизики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина. Научные интересы: радиотеплолокация, системы навигации летательных аппаратов, дистанционное зондирование Земли, цифровая обработка изображений.

Иванченко Дмитрий Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник кафедры теоретической радиофизики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина. Научные интересы: антенны СВЧ, экспериментальное исследование рассеяния электромагнитных волн.



Колчигин Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической радиофизики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина. Научные интересы: исследование характеристик рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы, взаимодействие сверхкоротких импульсов со сложными объектами, разработка и моделирование антенн для импульсных и широкополосных сигналов.



Бережная Татьяна Дмитриевна, инженер кафедры теоретической радиофизики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина. Научные интересы: радиотеплолокация, системы навигации летательных аппаратов, дистанционное зондирование Земли.



УДК 621.396.96

Виявлення малорозмірних наземних об'єктів матричними радіометричними системами / В.М. Быков, Д.Д. Иванченко, М.М. Колчигин, Т.Д. Бережная // *Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал.* — 2015. — Том 14. — № 1. — С. 36–40.

На основі виразів для ймовірності правильного виявлення і контрасту радіояскравості зроблено оцінку ймовірності і дальності виявлення за допомогою пасивної матричної радіометричної системи міліметрового діапазону об'ємного малорозмірного наземного об'єкта на фоні земної поверхні. Показано, що найбільші дальності виявлення мають місце для бокової поверхні об'єкта при кутах візування 0^0-40^0 від надіру. Здійснено кількісні оцінки впливу маскувального покриття на максимальну дальність виявлення малорозмірного наземного об'єкта. Встановлено, що маскувальне покриття з ослабленням контрасту радіояскравості контрасту на 10 дБ зменшує дальність виявлення наземного об'єкта не менш, ніж у 3 рази.

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

Табл.: 04. Іл.: 03. Бібліогр.: 05 найм.

UDC 621.396.96

Detection of small ground objects by matrix radiometric systems / V.M. Bykov, D.D. Ivanchenko, N.N. Kolchigin, T.D. Berezhnaya // *Applied Radio Electronics: Sci. Journ.* — 2015. — Vol. 14. — № 1. — P. 36–40.

Based on the expressions for the probability of correct detection and radio brightness contrast the paper estimates the probability and range of detecting a volumetric ground small-sized object against the background of the earth's surface by a passive matrix radiometric system of millimeter range. It is shown that maximum detection ranges occur for the side surface of the object at viewing angles of 0^0-40^0 from a nadir. The quantitative estimations of influencing camouflage cover on the maximum range of detecting a small-sized ground object have been performed. It was found that the camouflage cover with a 10 dB radio brightness contrast reduction decreases the detection range of the ground object by a factor of not less than 3.

Keywords: aircraft, ground small-sized object, matrix radiometric system, millimeter range, noise lighting, camouflage cover.

Tab.: 04. Fig.: 03. Ref.: 05 items.