

УДК 621.396.96

В.Н. БЫКОВ

Объединенный научный исследовательский институт Вооруженных Сил, Украина

ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИОМЕТРИЧЕСКИМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ШУМОВОЙ ПОДСВЕТКОЙ

Получены количественные оценки величины отношения сигнал-шум на выходе отдельного радиометрического канала и мощности источника шумовой подсветки, позволяющие обеспечить требуемое значение вероятности правильного обнаружения малоразмерных объектов матричными радиометрическими информационными системами миллиметрового диапазона.

малоразмерные объекты, шумовая подсветка, радиометрические информационные системы, миллиметровый диапазон радиоволн

Введение

Радиометрические информационные системы миллиметрового диапазона волн (РМИС ММД) находят широкое применение в решении задач дистанционного зондирования земной и водной поверхности в целях локализации зон лесных пожаров, обнаружения и идентификации разливов нефтепродуктов в речных и морских акваториях, ледовой разведки. РМИС используются для навигации различных типов летательных аппаратов (ЛА) по наземным ориентирам. В качестве таких ориентиров выступают, как правило, площадные и протяженные объекты (природные образования и искусственные сооружения). Навигация по таким объектам осуществляется путем анализа двумерных изображений объектов, формируемых информационными датчиками РМИС.

Важной задачей является обнаружение с последующей идентификацией малоразмерных, в том числе подвижных, объектов. Сложность решения данной задачи состоит в том, что в случае размещения РМИС на высокоскоростном ЛА процесс обнаружения осуществляется за малое время наблюдения объекта. Вследствие ограничений, накладываемых на размеры бортовых антенных устройств,

РМИС ММД обладают сравнительно низкой разрешающей способностью. Уровень естественного излучения малоразмерных объектов усредняется по ширине «пятна» диаграммы направленности антенны (ДНА) на земной поверхности, и является низким по сравнению с окружающим фоном. Наличие в зоне обзора РМИС нескольких малоразмерных объектов предполагает решение наряду с задачей обнаружения также задачи селекции объектов, относящихся к различным классам. При этом мгновенная зона обзора системы может быть достаточно большой. Применение в данном случае сканирующих РМИС малоэффективно, так как при этом не реализуется высокая флуктуационная чувствительность РМ информационных датчиков. Неопределенность решения задачи усиливается еще и тем, что объект может изменять местоположение, использовать средства маскировки и т.д.

В известных работах [1 – 4] приведен анализ возможности применения матричных РМИС ММД для решения навигационных задач, оценивается точность определения координат площадных и протяженных объектов матричными системами [4]. Применение матричных систем позволяет формировать двумерное изображение за малое время, сравнимое со временем накопления сигнала в одном его элементе.

При этом реализуется максимальная чувствительность РМИС. Преимуществом матричных систем является также то, что снижаются требования к эволюциям ЛА по углу крена. Указанные эволюции не приводят к потере объекта из поля зрения системы.

В работах [5 – 11] показана возможность применения широкополосной шумовой подсветки для повышения информативности радиометрических изображений малоразмерных объектов, предпринята попытка оптимизации ширины спектра зондирующего шумового сигнала [11]. В указанных литературных источниках [9, 10] показано, что пассивный радиометрический (РМ) канал, хотя и является опорным, как более стабильный, однако его энергетики недостаточно для обнаружения малоразмерных объектов при малых углах визирования на дальностях, превышающих сотни метров. В этой связи применение активной шумовой подсветки расширяет возможности радиометрических систем по обнаружению малоразмерных объектов.

В настоящее время в известной литературе отсутствует решение вопроса обнаружения и идентификации таких малоразмерных объектов, как отдельные автомобили, колонны автотранспорта, бронетехники с больших высот.

Цель работы заключается в количественной оценке возможности обнаружения малоразмерных объектов матричными РМИС ММД с широкополосной шумовой подсветкой на большой дальности.

Результаты исследований

Летательный аппарат движется, в общем случае, по наклонной траектории, в диапазоне высот $H=(0,1-1)$ км. Матричная РМИС ММД размерностью, например, $N=N_1 \times N_2=8 \times 8$ 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 РМИС могут быть выбраны длины

волн $\lambda=8,6$ мм, $\lambda=3,2$ 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 ($V \approx 300$ м/с). Исходя из этих условий и технических характеристик современных РМ датчиков [2] время формирования изображения должно быть равно времени интегрирования сигнала в одном РМ канале $\tau \approx 0,1 \dots 0,01$ с.

Для простоты рассмотрим случай компоновки матричной РМИС РМ приемниками компенсационного типа. Выражения для радиояркого контраста «объект – фон» (ΔT), среднеквадратического значения шума (σ) и для отношения сигнал-шум на выходе РМ приемника имеют соответственно вид:

$$\Delta T \approx T_s - T_n; \quad \sigma = \frac{T_r}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}}; \quad q = \frac{\Delta T}{\sigma}, \quad (1)$$

где T_s – радиояркая температура объекта, К; T_n – радиояркая температура фона, К; T_r – шумовая температура РМ приемника, К; Δf – ширина полосы пропускания РМ приемника, Гц.

Необходимо учесть, что в шумовую температуру РМ приемника (T_r) добавляется температура фона. Ослабление величины сигнала от объекта и фона при распространении в атмосфере, а также степень заполнения луча ДНА объектом будут учтены при выводе последующих соотношений.

Представляется целесообразным проанализировать статистический характер обнаружения малоразмерных объектов. В данном случае имеет место двухальтернативное, в общем случае, многоцелевое обнаружение (обнаружение одного или нескольких объектов) [12, 13]. При этом существуют четыре ситуации, связанные с наличием и отсутствием сигнала. Наличие сигнала характеризует наличие объекта, отсутствие сигнала – наличие только фона.

Принимается условие, что априорные вероятности отсутствия или наличия сигнала неизвестны (наиболее характерный случай для радиолокации [12]). Для РМ приемника характерна ситуация, когда необходимо установить фиксированный порог, превышение которого свидетельствует о наличии сигнала (объекта). Воспользуемся критерием Неймана-Пирсона, который позволяет выбрать порог по заданному (фиксированному) уровню вероятности ложной тревоги [12].

Вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения сигнала являются функционалами от плотностей распределения сигнала и фона (отсутствия сигнала). Отличие плотностей распределения для двух случаев состоит в наличии контраста «объект – фон».

Соотношение для вероятности ложной тревоги для одного элемента изображения F' , при условии нормального закона плотности распределения помехи (сигнала от фона), в результате ряда преобразований имеет вид

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

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$ – интеграл вероятностей;

T_0 – порог, превышение которого свидетельствует о наличии сигнала (наличие объекта на визируемом фоне).

Вероятность хотя бы одной ложной тревоги для совокупности из N элементов в радиометрической матрице равна [12]:

$$F = 1 - (1 - F')^N, \quad (3)$$

а при $N \gg 1$:

$$F \approx N \cdot F'. \quad (4)$$

В соответствии с соотношениями (2), (4) пороговое значение T_0 имеет вид

$$T_0 = T_n + \sigma \Phi^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot F}{N} \right), \quad (5)$$

где Φ^{-1} – функция, обратная интегралу вероятностей.

В соответствии с [12] и выражением (5) вероятность правильного обнаружения для матричной РМИС определяется соотношением

$$D = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{T_n + \Delta T - T_0}{\sigma} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(q - \Phi^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot F}{N} \right) \right) \right]. \quad (6)$$

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 $F = 10^{-4}$ соответствует достаточно малой величине ложной тревоги в одном элементе $F' \approx 10^{-6}$.

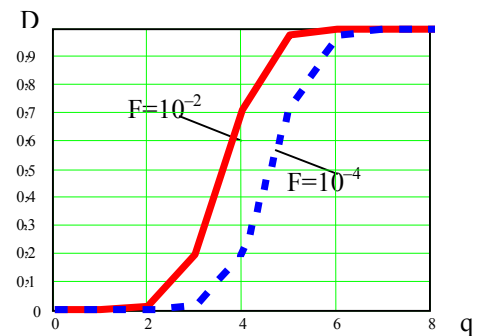


Рис. 1. Зависимость $D = \varphi(q)$

Данные графики позволяют определить минимально необходимое отношение сигнал-шум на выходе каждого канала РМ датчика для уверенного обнаружения малоразмерного объекта ($D \geq 0,9$). Величина данного отношения лежит в пределах значений $q \approx 5 \dots 6$.

Представляется возможным получить выражения для радиояркого контраста и для мощности источника подсветки. Известно, что РМ приемник принимает как естественное радиояркое излучение объекта, так и отраженный от объекта сигнал источника подсветки. В случае визирования малоразмерных объектов условия формирования суммарного контраста имеют следующие особенности.

Уровень составляющей за счет естественного радиояркого излучения определяется в соответствии со значениями коэффициента заполнения луча ДНА Q :

$$T_1 = \Delta\chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R), \quad (7)$$

где $\Delta\chi$ – разность излучательной способности объекта и фона; T_{12} – контрастообразующая, т.е. разность радиоярких 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;

$$Q = \frac{4 \cdot S}{\pi \cdot L^2}, \quad Q \in [0, 1];$$

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.

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

Уровень составляющей за счет отраженного излучения подсветки определяется разностью мощностей отраженного излучения от объекта P_s и фона P_n :

$$T_2 = \frac{1}{k \cdot \Delta f} \cdot (P_s - P_n), \quad (8)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·К) – постоянная Больцмана.

В соответствии с уравнением радиолокации и с учетом специфики формирования радиометрического сигнала [7, 14, 15] можно получить расширенное соотношение для контраста ΔT_2 . В результате окончательное выражение для суммарного радиояркого контраста с учетом сигнала подсветки имеет вид

$$T = T_1 + T_2 = \Delta\chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R) + \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \Delta\sigma \cdot \cos^4 \theta \cdot K(2R)}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot \Delta f \cdot H^4}, \quad (9)$$

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

Соотношение (9) получено для случая однопозиционной подсветки, т.е. для случая размещения источника подсветки совместно с радиометрической системой на одном ЛА.

Из уравнения (9) может быть получено выражение для мощности излучения источника однопозиционной подсветки

$$P_t = \frac{(4\pi)^3 [\Delta T - \Delta\chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R)] \cdot k \cdot \Delta f \cdot H^4}{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \Delta\sigma \cdot \cos^4 \theta \cdot K(2R)}. \quad (10)$$

Соотношение (10) для двухпозиционной подсветки можно переписать следующим образом:

$$P_t = \frac{(4\pi)^3 [\Delta T - \Delta\chi \cdot T_{12} \cdot Q \cdot K(R_R)] \cdot k \cdot \Delta f \cdot H_t^2 \cdot H_R^2}{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \Delta\sigma \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \varphi \cdot K(R_t + R_R)}. \quad (11)$$

Величины H_t, H_R, R_t, R_R обозначают высоты и дальности расположения источника подсветки и приемника РМИС при двухпозиционной подсветке; θ, φ – углы визирования наземного объекта источником подсветки и РМИС.

На рис. 2 представлена диаграмма зависимости радиометрического контраста T от высоты (дальности) визирования малоразмерного объекта. Расчеты проведены по формуле (7) при следующих значениях входящих в формулу величин: $\lambda = 3,2$ мм; $\theta = 0^\circ$; $K(R) \approx 1$ («чистая» атмосфера); $\Delta\chi = -0,9$ (металл на фоне травы); $T_{12} \approx 200$ К, визируемый объект – малоразмерный, $S = 25$ м². Верхняя кривая получена для величины бортовой антенны $d = 150$ мм, нижняя кривая – для антенны $d = 200$ мм.

На рис. 3 приведена диаграмма зависимости требуемой мощности подсветки при однопозиционном

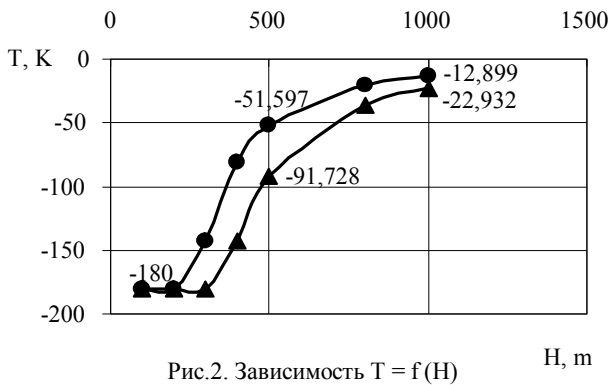


Рис.2. Зависимость $T = f(H)$

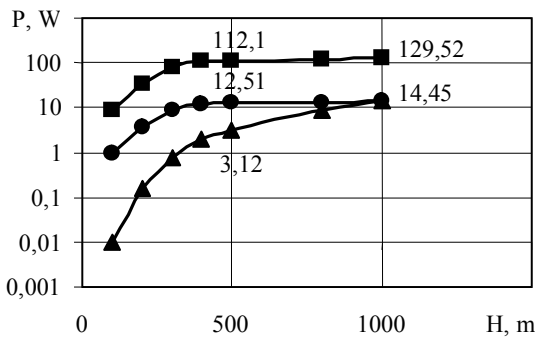


Рис.3. Зависимость $P = f(H)$

способе (нижняя кривая, соотношение (10)) и двухпозиционном способе (средняя кривая, соотношение (11)), при высоте расположения источника подсветки 1000 м. Значения других, входящих в соотношения (10), (11), величин: $d=150$ мм; $G_r=1,73 \cdot 10^4$ Гц; $\theta=\varphi=0^\circ$; объект малоразмерный; $\Delta\sigma=1$ м². Минимальный контраст металлизированного объекта на фоне травы (песка) принят равным $T=5$ К. Данное значение контраста соответствует отношению сигнал-шум $q=5$ (при величине шумовой температуры неохлаждаемого РМ приемника $T_r \approx (1000 \dots 3000)$ К и соответственно $\sigma \approx 1$). Ширина спектра источника шумовой подсветки принята равной $\Delta f=10^9$ Гц. КНД антенны источника подсветки $G_t=173$ соответствует ширине ДНА (например, рупорной антенны) 15 градусов. При этом ширина зоны обзора на земной поверхности с высоты $H=1000$ м равна 260 м. Увеличение зоны обзора, например, до $800 \div 1000$ м, что позволяет осуществлять одновременное визирование колонны малоразмерных (в том числе подвижных) объектов, предполагает увеличение мощности источ-

ника подсветки примерно на порядок (верхняя кривая на рис. 3). При этом подсветка осуществляется в угле обзора до 50 градусов (КНД антенны источника подсветки $G_t \approx 19$).

Выводы

На основе анализа выражения для вероятности ложной тревоги получено соотношение для порога обнаружения малоразмерного объекта с помощью матричной РМИС ММД, которое позволяет оценить вероятность правильного обнаружения объекта и предъявить требования к минимально необходимому уровню отношения сигнал-шум РМ канала. Получено аналитическое выражение (9) для величины радиояркостного контраста пары «объект – фон», в котором учтены вклад естественного излучения объекта и переотраженного излучения источника шумовой подсветки. Данное выражение позволяет оценить величину мощности шумовой подсветки, необходимой для обнаружения малоразмерного объекта с разных высот визирования. С высот менее 1 км, в благоприятных погодных условиях, малоразмерные объекты могут быть устойчиво обнаружены (с вероятностью не хуже $D \geq 0,9$) пассивными РМИС ММД. При увеличении дальности визирования объектов до (1,5 – 2) км радиометрический контраст становится меньше минимально обнаруживаемого ($T \leq 5$ К), что снижает вероятность обнаружения малоразмерных объектов. Устойчивое обнаружение объектов на указанной дальности возможно благодаря применению широкополосной шумовой подсветки. При этом требуется мощность источника подсветки $P=20 \div 30$ Вт, что технически реализуемо.

В ходе количественной оценки мощности подсветки была принята (пользуясь справочными данными) заведомо малая величина эффективной поверхности рассеяния малоразмерных объектов $\Delta\sigma=1$ м². Считалось, что объект представляет гладкую металлическую поверхность, лишенную неровностей. Реальные объекты, как правило, являются сложными конструкциями и поэтому при их облу-

чении имеет место угловой эффект отражения сигнала [9]. В связи с этим можно сделать вывод: реальные объекты имеют большую поверхность рассеяния. Учет этого явления и дополнительные экспериментальные исследования по измерению величин отраженного конкретными малоразмерными объектами сигнала подсветки позволит уточнить требования к мощности источника подсветки.

Таким образом, применение пассивных РМИС ММД с активной шумовой подсветкой позволяет осуществлять устойчивое обнаружение объектов на дальности несколько километров. Дальнейшее сопровождение объектов на малых высотах возможно за счет матричного построения РМИС ММД. При этом на высотах $200 \div 100$ м объекты становятся распределенными, а их РМ изображения – многопиксельными, что позволяет осуществлять идентификацию объектов и классифицировать их по степени важности.

Литература

1. Голдмис П.Ф. и др. Системы формирования изображений в фокальной плоскости в миллиметровом диапазоне длин волн // ТИИЭР. – 1993. – Т. 41, № 10. – С. 1 – 24.
2. Gorishniak V.P., Denisov A.G. and oth. Passive multichannels millimeter-waves imaging system // The 5th Int. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, millimeter and SubMillimeter Waves. Symp. Proc. – Kharkov. – 2004. – V. 1. – P. 202 – 204.
3. Антюфеев В.И., Быков В.Н., Макаренко Б.И. Применение принципов радиометрии в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов по наземным ориентирам // Арсенал XXI сторіччя. – 2002. – № 1. – С. 37 – 41.
4. Антюфеев В.И., Быков В.Н., Макаренко Б.И. Потенциальная точность местоопределения матричными системами землеобзора // Электромагнитные волны и электромагнитные системы. – 2001. – Т. 6., № 2 – 3. – С. 101 – 106.
5. Мур Р., Уайт В., Роуз Дж. Панхроматический и полипанхроматический радиолокаторы // ТИИЭР. – 1969. – № 57. – С. 590 – 593.
6. Seashore C.R., Milley J.E., Kearns B.A. MM-wave Radar and radiometric sensors for guidance systems // Microwave J. – 1979. – V. 22, № 8. – P. 47 – 51.
7. Справочник по радиолокации. Т.1. Основы радиолокации / Под ред. М. Скольника.. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.
8. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 262 с.
9. Быков В.Н., Ивашов С.И. и др. Повышение информативности радиометрических изображений благодаря применению шумовой подсветки // Радиотехника. – 1997. – Вып. 101. – С. 33 – 39.
10. Быков В.Н., Задонский А.И., Мусиенко В.Ю. и др. Обнаружение малоразмерных объектов на радиометрическом изображении // Радиотехника. – 1997. – Вып. 101. – С. 28 – 33.
11. Быков В.Н., Султанов А.С., Черных А.А. Оптимизация ширины спектра зондирующего сигнала скатерометра миллиметрового диапазона // Тр. 4-й Всес. шк. по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере. – Нижний Новгород. – 3-10 сентября 1991. – С. 187 – 188.
12. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Ширман Я.Д., Лосев Ю.И., Минервин Н.Н. и др. Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
13. Локационная системотехника / Под ред. В.Б. Алмазова. – Х.: МО Украины, 1993. – 618 с.
14. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1978. – 607 с.
15. Николаев А.Г., Перцов С.В. Радиотеплолокация. – М.: Сов. радио, 1964. – 132 с.

Поступила в редакцию 14.04.05

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковський університет Воздушних Сил.