

УДК 621.396.96

РАСПОЗНАВАНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ МАТРИЧНОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Г. Г. Осиновый*Государственное предприятие «КБ «Южное», Днепр, Украина
Поступила в редакцию 29 мая 2018 г.*

Анализируется возможность распознавания малоразмерных наземных объектов пассивной матричной радиометрической системой миллиметрового диапазона. В процессе распознавания решаются две задачи: обнаружение объекта в заданной области пространства и, при условии его обнаружения системой, решается задача идентификации объекта, то есть отнесение объекта к тому или иному типу объектов с соответствующими характеристиками. Произведена оценка вероятности и дальности обнаружения наземных малоразмерных объектов как пассивной радиометрической системой, так и пассивно-активной системой, то есть радиометрической системой с подсветкой объекта на фоне земной поверхности независимым источником широкополосного шумового излучения. Произведена оценка дальности обнаружения наземных малоразмерных объектов, защищенных маскировочным покрытием, экранирующим излучение и переотражение объектом сигнала подсветки. Сделан вывод о том, что снижение уровня излучения объекта с помощью маскировочного покрытия на 10дБ уменьшает дальность обнаружения объекта радиометрической системой не менее чем в три раза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: летательный аппарат, объект навигации, радиометрическая система, миллиметровый диапазон

Аналізується можливість розпізнавання малорозмірних наземних об'єктів пасивною матричною радіометричною системою міліметрового діапазону. В процесі розпізнавання вирішуються дві задачі: виявлення об'єкта в заданій області простору і, при умові його виявлення системою, вирішується задача ідентифікації об'єкта, тобто віднесення об'єкта до того чи іншого типу об'єктів з відповідними характеристиками. Приведена оцінка ймовірності і дальності виявлення наземних малорозмірних об'єктів як пасивною радіометричною системою, так і пасивно-активною системою, тобто радіометричною системою з підсвічуванням об'єкта на фоні земної поверхні незалежним джерелом широкопоздовжого шумового випромінювання. Приведена оцінка дальності виявлення наземних малорозмірних об'єктів, захищених маскувальним покриттям, яке екранує випромінювання і пере відбиття об'єктом сигналу підсвічування. Зроблений висновок, що зниження рівня випромінювання об'єкта за допомогою маскувального покриття на 10дБ зменшує дальність виявлення об'єкта радіометричною системою не менш ніж у три рази.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: літальний апарат, об'єкт навігації, радіометрична система, міліметровий діапазон

The possibility of recognizing small-sized ground objects of the passive matrix radio-metric system of the millimeter range is analyzed. In the recognition process, two tasks are solved: the detection of an object in a given area of space and, if it is detected by the system, the problem of identifying an object is solved, that is, the assignment of an object to a particular type of objects with the corresponding characteristics. An assessment was made of the probability and range of detection of ground-based small-sized objects both by a passive radiometric system and by a passive-active system, that is, a radiometric system with object illumination against the background of the earth's surface by an independent source of broadband noise illumination. An assessment of the detection range of ground-based small-sized objects protected by a camouflage coating shielding the radiation and the object re-reflection of the backlight signal was made. It was concluded that a decrease in the level of radiation by an object using a masking coating of 10dB reduces the detection range of an object by the radiometric system by no less than three times.

KEYWORDS: aircraft, navigation object, radiometric system, millimeter band

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается вопрос распознавания наземных объектов в процессе навигации летательных аппаратов (ЛА) по наземным объектам-ориентирам. Ориентирами навигации являются отдельно стоящие городские здания (группы зданий, окраины городов), мосты, переправы, автомобильные магистрали, специально создаваемые излучающие объекты-реперы. Ориентирами могут также служить подвижные объекты: колонны автотранспорта, отдельные излучающие подвижные объекты [1].

В процессе распознавания решается задача обнаружения объектов, то есть системой принимается решение о нахождении (либо отсутствии) объекта в заданной области пространства, и решается задача идентификации объекта, то есть принимается решение об отнесении объекта к определенному классу объектов, в том случае, если априори объект обнаружен.

В случае неподвижных наземных объектов, координаты которых известны с высокой точностью, нет необходимости решать задачу обнаружения, и решается только задача идентификации (грубой, точной).

Неопределенность решения задачи обнаружения подвижных объектов состоит в том, что объект может изменять местоположение, излучать радиосигналы, которые могут быть восприняты системами обнаружения как радиопомехи, на трассе распространения радиоволн возможно наличие неблагоприятной погодной обстановки, пылевых образований, дымов и т.д.

На неподвижных и подвижных наземных объектах могут быть использованы средства маскировки, которые обладая экранирующим свойством, ухудшают оптическую видимость объектов и снижают заметность объектов в радиодиапазоне.

Для навигации летательных аппаратов (самолетов, баллистических ракет, беспилотных летательных аппаратов) применяются инерциальные навигационные системы (ИНС) с использованием командных приборов (гироскопов, акселерометров). Приборы инерциальной навигации являются автономными, не подвержены внешним воздействиям (радиопомехам). Недостатком таких систем является то, что ИНС накапливают ошибки в определении пространственных координат и высоты в зависимости от дальности и времени полета [1]. Данные системы требуют периодической корректировки указанных ошибок.

В качестве корректирующих могут служить системы и средства активной и пассивной локации земной поверхности, работающие в видимом, инфракрасном и радио диапазонах волн, использующие в качестве информационного параметра вторичное отражение и излучение наземных объектов-ориентиров.

Корректирующие системы видимого и радио диапазонов как раз и решают задачи обнаружения и идентификации наземных объектов-ориентиров по переизлучению и вторичному отражению сигналов от объектов.

К корректирующим навигационным системам предъявляются требования по точности местоопределения летательного аппарата и наземного объекта-ориентира, всепогодности функционирования, быстродействию работы системы.

Точность определения координат ЛА зависит от размеров объекта и зоны обзора системы, от отношения сигнал/шум на входе приемника системы, а также от пространственной разрешающей способности и разрешения по информативному параметру визируемого объекта. Наилучшим пространственным разрешением обладают системы видимого и инфракрасного диапазонов электромагнитных волн.

Системы радиодиапазона проигрывают оптическим системам по разрешению, однако обладают повышенной всепогодностью функционирования, то есть работают в любое время суток (днем и ночью), в неблагоприятных погодных условиях (туман, облака, дожди), в пылевых образованиях и дымах. Наиболее пригодным диапазоном радиоволн, обеспечивающим сравнительно высокое пространственное разрешение наземных объектов при малых габаритах бортовой аппаратуры ЛА, является миллиметровый диапазон (ММД) волн. Наиболее освоенными промышленностью являются поддиапазоны миллиметрового диапазона с длинами волн $\lambda=8,6$ мм и $\lambda=3,2$ мм, которые являются «окнами прозрачности» атмосферы, то есть обладают наименьшим ослаблением в «чистой» безоблачной атмосфере.

Перспективным для применения в системах навигации ЛА по наземным объектам-ориентирам является применение, наряду с системами активной радиолокации, пассивных радиометрических систем (РМС) ММД. Пассивные РМС обладают таким преимуществом перед активными радиолокационными системами, как скрытность функционирования, вследствие работы только «на прием» сигнала [2–4].

Недостатком пассивных систем является ограниченный энергетический потенциал систем, так как РМ системы принимают естественное излучение (переотражение) от наземных объектов и не используют зондирующее излучение в сторону визируемого объекта. В связи с этим РМС должны обладать повышенной чувствительностью.

В настоящее время появились технологические возможности создания РМ приемников прямого усиления высокой чувствительности. Преимуществом данных приемников является их конструктивно удобное построение, то есть это приемники «карандашного» типа, из которых можно достаточно легко создать обойму, т.е. матрицу радиометров. Матричный РМ приемник, в качестве многоканального приемника-облучателя антенны (зеркальной, линзовой) позволяет реализовать матричную РМС формирования РМ изображений визируемых объектов, что существенно повышает быстродействие работы системы. Достоинством матричной системы является также то, что снижаются требования к эволюциям ЛА по углу крена. Указанные эволюции не приводят к потере наземного объекта из «поля зрения» системы [5].

В работах [2–5] приведен анализ возможности применения матричных РМС ММД для решения задач обнаружения, оценивается точность определения координат площадных и протяженных объектов матричными системами [5]. Матричные системы формируют двумерное изображение за малое время, сравнимое с временем накопления сигнала в одном его элементе. При этом реализуется максимальная чувствительность радиометрических приемников РМС.

В работах [6–9] показана возможность применения широкополосной шумовой подсветки для повышения информативности радиометрических изображений малоразмерных объектов, предпринята попытка оптимизации ширины спектра зондирующего шумового сигнала. В работе [8] показано, что пассивный 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 – целей [10].

В настоящее время в известной литературе мало внимания уделяется вопросу моделирования процесса обнаружения и идентификации наземных объектов для решения задач навигации РМС. Это в первую очередь касается малоразмерных (подвижных) объектов таких, как отдельные автомобили, колонны автотранспорта, бронетехники с высот порядка нескольких километров.

Оценить возможность создания и эффективность распознающих РМС ММД можно благодаря моделированию процесса обнаружения и идентификации малоразмерных наземных объектов, как это показано в статье [11], с учетом большого количества разнородных факторов, влияющих на работу РМС.

Целью работы является моделирование процесса обнаружения малоразмерных наземных объектов в процессе навигации летательных аппаратов благодаря применению матричных радиометрических систем миллиметрового диапазона.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве навигационного летательного аппарата, осуществляющего распознавание наземных объектов, рассматривается беспилотный летательный аппарат (БЛА).

В качестве ориентира навигации рассматривается групповой наземный объект, состоящий из отдельных малоразмерных элементов – колонна автомобилей.

Модель навигации ЛА по групповому наземному объекту должна учитывать следующие факторы:

1. Порядок построения, скорость передвижения группового объекта.
2. Траекторию движения ЛА по маршруту полета.
3. Характеристики применяемых систем навигации ЛА.

1. Порядок построения группового объекта (колонны автомобилей) предполагает:

- учет количества элементов объекта (количества отдельных автомобилей в группе);
- рассмотрение геометрии расположения группового объекта в процессе передвижения;
- оценка (ориентировочная) типов (видов) отдельных объектов в группе, оценка технических характеристик объектов;

- учет скорости передвижения элементов группового объекта в различных условиях обстановки.

2. Под траекторией движения БЛА подразумевается:

- старт беспилотного летательного аппарата;
- полет БЛА по сложной траектории при обнаружении и идентификации наземных объектов;
- посадка БЛА.

3. Оценка характеристик применяемых систем навигации ЛА осуществляется с целью определения требуемого набора систем навигации для высокоточного, всепогодного местоопределения ЛА.

Формализованное описание процесса навигации БЛА в случае обнаружения и идентификации элементов группового объекта представлено схемой на рис.1.

1. В качестве группового объекта рассматривается колонна автомобилей из определенного количества единиц, движущаяся по автостраде. Колонна расположена в линию, общая протяженность колонны (500–1000) м. Скорость передвижения на марше $V \leq 60 \text{ км/ч}$.

2. Определение местонахождения группового объекта осуществляется с помощью беспилотного летательного аппарата.

На малых высотах $H_1 = 200 \text{ м}$ БЛА осуществляет обнаружение и грубую идентификацию элементов группового объекта. Требование по пространственному разрешению $\Delta r_{\text{гр}} = 1,5 \text{ м}$ и $\Delta r_{\text{гр}} = 0,6 \text{ м}$, соответственно [12]. Затем БЛА снижается и на высоте $H_2 = 100 \text{ м}$ производится точная идентификация элементов объекта (требование по пространственному разрешению $\Delta r_{\text{гр}} = 0,3 \text{ м}$).

3. После идентификации группового объекта БЛА может быть поднят на высоту $H_3 = (500–1000) \text{ м}$, откуда осуществляется сопровождение элементов группового объекта.

В качестве метода повышения дальности действия пассивных РМС навигации ММД рассмотрим применение активной «подсветки» объектов шумовым либо детерминированным сигналом [5–9]. Известны однопозиционная, двухпозиционная и многопозиционная подсветка [5]. В случае однопозиционной подсветки источник подсветки располагается на одном носителе (БЛА) с информационным датчиком системы навигации. Однопозиционная подсветка является автономной, не требующей использования дополнительных носителей для источников подсветки.

Двухпозиционная подсветка является частным случаем многопозиционной подсветки. Она осуществляется с другого носителя – другого ЛА, может быть спущена («зависеть») на тормозных парашютах и т.д.

Преимуществами применения на БЛА подсветки широкополосным шумовым сигналом являются следующие положения [5]. Широкополосный шумовой сигнал представляет собой реализации ограниченного по спектру «белого шума», со случайными амплитудой и фазой, и по своей природе идентичен сигналу, принимаемому и обрабатываемому РМ приемником от визируемых объектов.

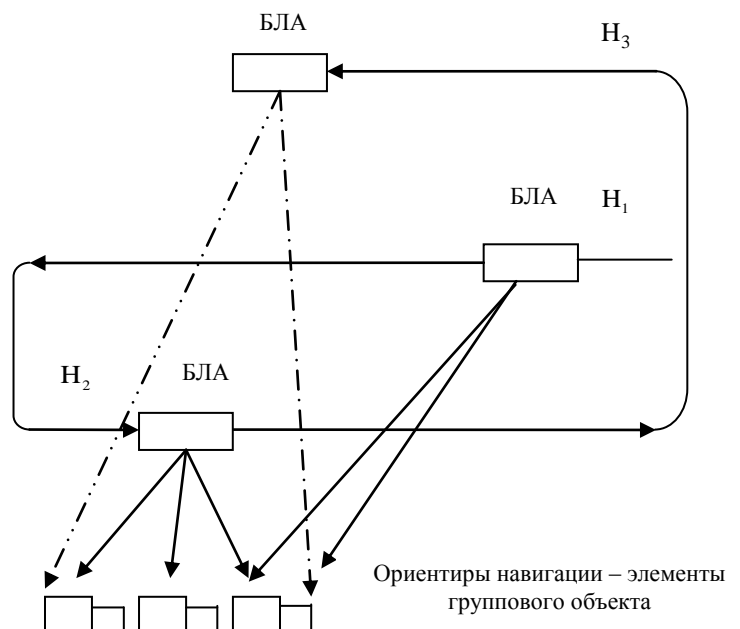


Рис.1. Схема навигации ЛА по наземным объектам-ориентирам

Возможна также многопозиционная подсветка объектов с разных направлений, что позволяет создавать изотропное «шумовое» поле вокруг объекта и уменьшить интенсивность излучения отдельных источников подсветки.

Возможна подсветка элементов объекта узкополосным детерминированным сигналом [5]. При этом в приемнике информационного датчика системы навигации используется одна из гармоник сигнала подсветки, излучаемого с другого носителя, например, с другого БЛА. Так, объект облучается источником 3см диапазона, а РМ приемник РМС принимает отраженный от объекта сигнал на третьей гармонике в 8мм диапазоне.

Технические характеристики аппаратуры, располагаемой на БЛА:

- видеокамера с шириной зоны обзора порядка $L=1000$ м с высоты $H=(500-1000)$ м;
- фокусное расстояние может изменяться с высотой для обеспечения требуемой детальности получаемых изображений визируемого объекта;
- РМ информационный датчик 3мм диапазона волн – матричный датчик с решеткой (16 элементов), либо матрицей облучателей большой размерности $N_1 \times N_2 = 16 \times 16$ элементов, N_1, N_2 – количество строк и столбцов в матрице;
- бортовая антенна параболическая или линзовая большого диаметра $d=1$ м;
- ширина зоны обзора $L=(800-1000)$ м с высоты $H=1000$ м;
- линейный размер элемента пространственного разрешения на земной поверхности $\Delta r=0,8$ м с высоты $H=200$ м, $\Delta r=0,4$ м с высоты $H=100$ м [12];
- источник шумовой подсветки 3мм диапазона с рупорной антенной;
- возможно два режима подсветки объекта: в первом ширина диаграммы направленности рупорной антенны $\theta_{0,5}^0=15^0$, что соответствует полосе подсветки 260м, во втором $\theta_{0,5}^0=50^0$ обеспечивает подсветку одновременно всех элементов группового объекта на протяжении (800–1000)м, что соответствует геометрии расположения автоколонны на марше.

Результаты расчетов [5,10], проведенных по указанным исходным данным, позволяют сделать следующие выводы.

На основе анализа выражения для вероятности ложной тревоги получено соотношение для порога обнаружения малоразмерного объекта с помощью матричной РМС ММД [5,10], которое позволяет оценить вероятность правильного обнаружения объекта и предъявить требования к минимально необходимому уровню отношения сигнал-шум РМ канала. В работе [10] также получено аналитическое выражение для величины радиояркого 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 1000 м, в благоприятных погодных условиях, малоразмерные объекты могут быть устойчиво обнаружены (с вероятностью не хуже $D \geq 0,9$) пассивными РМС ММД. При увеличении дальности визирования объектов до (1,5–2) км радиометрический контраст становится меньше минимально обнаруживаемого ($T \leq 5K$), что снижает вероятность обнаружения малоразмерных объектов.

Применение, так называемой двухпозиционной подсветки объекта (источник шумовой подсветки и приемник РМС на БЛА разнесены в пространстве), позволяет обеспечить требуемую (1,5–2) км дальность обнаружения малоразмерных объектов.

При этом требуемая мощность источника подсветки на БЛА в случае $\theta_{0,5}^0 = 15^0$ с высоты $H=1000$ м и антенной РМС диаметром $d=200$ мм составляет величину $P_t \leq 15$ Вт.

Мощность источника подсветки в случае $\theta_{0,5}^0 = 50^0$ с высоты $H=1000$ м (бортовая антенна на БЛА диаметром $d=200$ мм) составляет величину $P_t \leq 130$ Вт, что технически реализуемо.

В работах [5,10] произведена оценка дальности обнаружения наземных малоразмерных объектов, защищенных маскировочным покрытием, экранирующим излучение и переотражение объектом сигнала подсветки.

Результаты оценки дальности обнаружения позволили сделать вывод о том, что снижение уровня излучения объекта с помощью маскировочного покрытия на 10 дБ уменьшает дальность обнаружения объекта радиометрической системой не менее чем в три раза. Этот вывод распространяется на оба случая: обнаружение малоразмерного наземного объекта пассивной РМС ММД, так и обнаружение пассивно-активной РМС с подсветкой широкополосным шумовым излучением.

ВЫВОДЫ

Таким образом, применение на ЛА пассивных РМС ММД с шумовой подсветкой позволяет осуществлять устойчивое обнаружение наземных, в том числе малоразмерных подвижных, объектов на дальности несколько километров. Автосопровождение объектов на малых высотах (менее 1000 м) возможно в пассивном режиме матричными РМС ММД. При этом на высотах (200–100) м объекты становятся распределенными, а их РМ изображения многопиксельными, что позволяет осуществлять идентификацию объектов и классифицировать их по степени важности.

Так, РМС БЛА, обладая пространственным разрешением 4 м на высоте $H=200$ м при размерах бортовой антенны $d=200$ мм, обеспечивает на изображении 6 пикселей, на высоте $H=100$ м обеспечивает 10 пикселей. Учитывая характерные особенности автомобиля (размеры, конфигурацию), изображение указанной размерности позволяет идентифицировать элементы группового объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разоренов Г. Н. Системы управления летательными аппаратами / Г. Н. Разоренов, Э. А. Бахрамов, Ю. Ф. Титов // - М.: Машиностроение, 2003. – 582 с.
2. Голдмис П. Ф. и др. Системы формирования изображений в фокальной плоскости в миллиметровом диапазоне длин волн // ТИИЭР, 1993. – Т. 41.– № 10.– С. 1–24.
3. Passive multichannel millimeter-waves imaging system / V. P. Gorishniak, A. G. Denisov, S. E. Kuzmin, V. N. Radzikhovsry, B. M. Shevchuk // The Fifth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, millimeter and Submillimeter Waves. Symposium Proceedings. – V.1. Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2004. – P.202–204.
4. Многоэлементная приемная матричная система 8 мм диапазона для задач пассивного радиовидения / В. Б. Хайкин, А. А. Стороженко, М. К. Лебедев, В. Н. Радзиховский, С. Е. Кузьмин, С. В. Шлензин // Журнал радиоэлектроники, 2014. – № 2. – С.1–9.

5. 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.: Щедрая усадьба плюс, 2014. – 372 с.
6. Мур Р., Уайт В., Роуз Дж. Панхроматический и полипанхроматический радиолокаторы // ТИИЭР, 1969. – № 57. – С. 590–593.
7. Seashore C. R., Milley J. E., Kearns B. A. MM-wave Radar and radiometric sensors for guidance systems // Microwave J., 1979. – V. 22, N 8. – P. 47–51.
8. Повышение информативности радиометрических изображений благодаря применению шумовой подсветки / В. Н. Быков, С. И. Ивашов, Ю. В. Овсянников и др. // Радиотехника, 1997. – Вып. 101. – С. 33–39.
9. Быков В. Н. Обнаружение малоразмерных объектов радиометрическими информационными системами миллиметрового диапазона с шумовой подсветкой / В. Н. Быков // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Вип. 2(10), 2005. – С. 5–10.
10. Assessing the effectiveness of the protection of small ground objects from passive-active radiometric detection systems / V. N. Bykov, N. N. Kolchigin, G. G. Osinovy, T. D. Berezhnaya // Applied Radio Electronics, Scientific and Technical Journal, 2016. – Volume 15. – № 1. – P.P. 45 – 50.
11. Осинский Г. Г. Модель защиты малоразмерных наземных объектов от радиометрических пассивно-активных систем обнаружения / Г. Г. Осинский, В. Н. Быков // Харків: «Радіоелектронні і комп'ютерні системи», науково-технічний журнал, ХАІ, 2017. – № 1(81). – С.107–112.
12. L. Nardon. The Dilemma of Satellite Imagery Control / Military Technology. – Vol. 26. – Issue 7, 2002. – P. 37 – 45.