

УДК 621.372.8.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗОНАНСОВ ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Н. Г. Пархоменко*¹, *В. В. Земляков*², *В. Н. Шевченко*¹

¹ ФГУП «ГКБ «Связь»»;

² ГОУ ВПО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону, Россия

Проведено компьютерное моделирование наиболее типичного малоразмерного беспилотного летательного аппарата. Получены трёхмерные диаграммы вторичного излучения (диаграммы рассеяния) аппаратов. Построены зависимости уровней вторичного излучения от частоты в диапазоне от 50 МГц до 4 ГГц. Рассмотрены возможности упрощения модели аппарата. Исследованы поляризационные признаки обнаружения и оценена возможность распознавания аппарата на фоне птиц.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы проектирования и оценки эффективности современных систем активной и полуактивной, т. е. с «посторонним» подсветом, радиолокации практически невозможно решить без априорного знания характеристик рассеяния объектов локации. При этом особый интерес представляют системы многодиапазонного зондирования [1].

Существуют два основных способа получения информации об объектах локации: экспериментальные исследования, связанные с измерениями полей рассеяния реальных объектов на полигонах, в безэховых камерах и т. п., и теоретические исследования, основанные на строгом или приближённом решении задачи дифракции электромагнитных волн [2]. Поскольку первый метод предполагает наличие реального объекта рассеяния или его достаточно хорошего макета, то он, наряду со своими значительными экономическими, организационными и физическими затратами, практически неприменим на ранних стадиях проектирования как новых аэродинамических объектов, так и систем локации. Поэтому для получения информации об объектах локации всё большее применение находят методы математического моделирования [3].

Целью данной работы являются исследования многодиапазонных свойств вторичного излучения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов методами математического моделирования с использованием полноразмерной и упрощённой моделей и выработка рекомендаций по выбору признаков их обнаружения и распознавания.

1. МЕТОДИКА И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основой математических моделей взаимодействия объекта локации и электромагнитного поля является строгая математическая формулировка физического явления в виде системы уравнений Максвелла. Поскольку чисто аналитические, теоретически точные, решения удаётся получить лишь для сугубо ограниченного класса простейших объектов, поверхность которых можно достаточно просто описать в специально выбранной системе координат, то для анализа полей рассеяния на объектах сложной пространственной конфигурации необходимо применять либо различные упрощения и допущения при интегрировании системы уравнений, либо использовать численные методы в качестве основы построения расчётной методики оценки радиолокационных полей рассеяния.

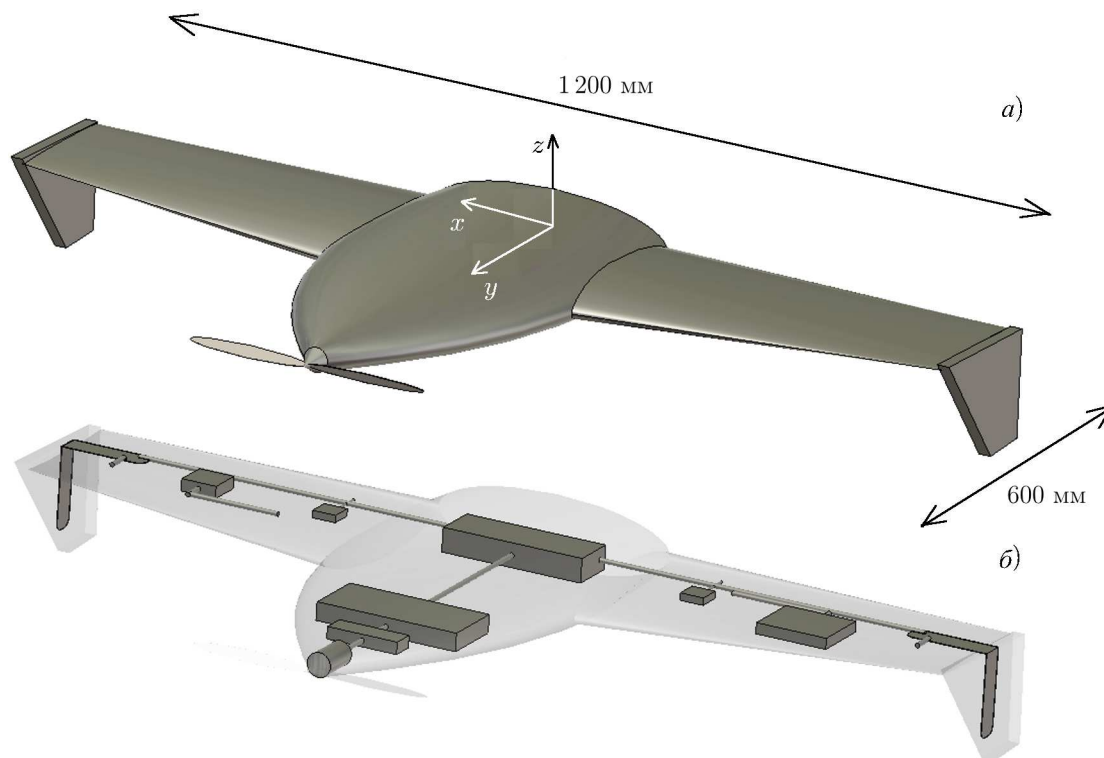


Рис. 1. Трёхмерные модели малоразмерного беспилотного летательного аппарата

Интенсивное развитие вычислительной техники всё более отодвигает на второй план основной недостаток численных методов — длительное время расчёта и значительный объём требуемой оперативной памяти компьютера, открывая тем самым большие перспективы их широкого применения в задачах электромагнитного моделирования [4]. В настоящее время создан ряд универсальных программных комплексов, основанных на двух способах решения уравнений Максвелла — в частотной и временной областях. К первому способу относятся метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод моментов, метод физической оптики. При втором способе обычно применяют метод конечных разностей во временной области и метод конечного интегрирования [5].

Метод конечного интегрирования основан на универсальной схеме пространственной дискретизации, применяемой для различных задач электродинамики в широком частотном диапазоне. В нём осуществляется дискретизация уравнений Максвелла, записанных в интегральной форме. Для численного решения этих уравнений задаётся расчётное пространство в соответствии с конкретной задачей. При этом в процессе дискретизации никаких дополнительных ошибок в уравнения не вносится. Этот важный факт обеспечивается за счёт того, что все операторы ротора и дивергенции выражаются в сеточном пространстве. Неизбежную численную ошибку из-за пространственной дискретизации вносят лишь материальные уравнения. Рассмотрим реализацию данного метода применительно к задаче компьютерного моделирования рассеяния электромагнитных волн на малоразмерных беспилотных летательных аппаратах.

В качестве примера рассмотрим трёхмерную модель такого аппарата (рис. 1а).

Поскольку обычно корпус аппарата выполнен из материала, обладающего высокой радиопрозрачностью, например стекловолокна, то в оценке рассеивающих свойств объекта существенную роль будет играть его наполнение. Таким образом, при построении трёхмерной модели необходимо максимально точное воспроизведение электронных и механических устройств, особенно

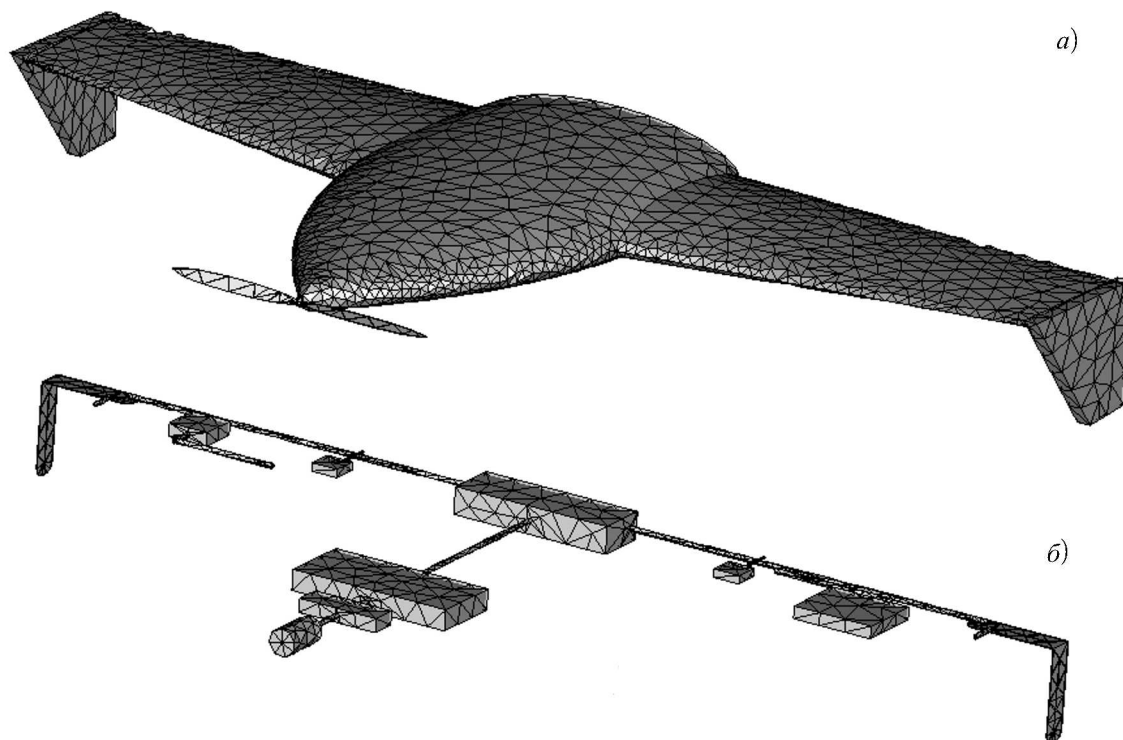


Рис. 2. Сеточные модели малоразмерного беспилотного летательного аппарата

содержащих металлические элементы, расположенные внутри корпуса аппарата. К ним относятся электродвигатель, аккумуляторная батарея, механизмы управления закрылками, электронные блоки управления и приёма-передачи сигналов, а также антенны и линии связи. Упрощённая трёхмерная модель беспилотного летательного аппарата, учитывающая только его внутреннюю структуру, показана на рис. 1б.

Для реализации метода конечного интегрирования, как впрочем любого численного электродинамического метода, необходима поверхностная и объёмная дискретизация объекта, т. е. разбиение его поверхности и объёма на элементарные ячейки. Для достижения удовлетворительной точности вычислений характерный размер ячеек выбирается не более, чем $1/20$ длины волны падающего излучения.

На рис. 2а представлена полномасштабная сеточная модель аппарата, а на рис. 2б показана его упрощённая сеточная модель, не учитывающая диэлектрические элементы корпуса.

Для численной оценки рассеивающих свойств аппарата будем использовать основную энергетическую радиолокационную характеристику — эффективную поверхность рассеяния. По определению она представляет собой коэффициент пропорциональности между плотностью потока мощности облучающей волны в точке расположения цели и полной мощностью рассеянного излучения в предположении, что цель является изотропным точечным рассеивателем. Это означает, что для эффективной поверхности рассеяния аппарата в дальней зоне справедлива формула [4]

$$\sigma = 4\pi R^2 |E_s|^2 / |E_i|^2,$$

где E_s — напряжённость электрического поля в точке приёма, E_i — напряжённость электрического поля возбуждения, R — расстояние от объекта до точки приёма.

Определим следующие основные задачи электродинамического моделирования в диапазоне частот от 50 МГц до 4 ГГц:

- исследование физических закономерностей рассеяния электромагнитных волн на металлическом цилиндре как основном структурообразующем элементе летательного аппарата;
- исследование трёхмерных диаграмм σ при многодиапазонном зондировании;
- исследование частотной зависимости максимального значения σ ;
- исследование частотной зависимости σ для полномасштабной и упрощённой моделей аппарата;
- исследование частотной зависимости σ от вида поляризации облучающего сигнала;
- исследование признаков распознавания аппарата на фоне птиц при многодиапазонном зондировании.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На первом этапе моделирования исследовались физические закономерности рассеяния электромагнитных волн на металлическом цилиндре. Длина цилиндра соответствовала поперечному размеру аппарата (рис. 1). На рис. 3 представлены трёхмерные диаграммы σ . Направление падения плоской волны с горизонтальной поляризацией электрического поля отмечено на нём стрелками. Частота падающего сигнала равна 0,15 ГГц (а), 0,5 ГГц (б), 1,0 ГГц (в) и 3,0 ГГц (г). Из рис. 3 видно, что на низких частотах диаграмма σ цилиндра имеет форму тора, ориентированного перпендикулярно цилиндру и характеризующегося параметрами, не зависящими от направления

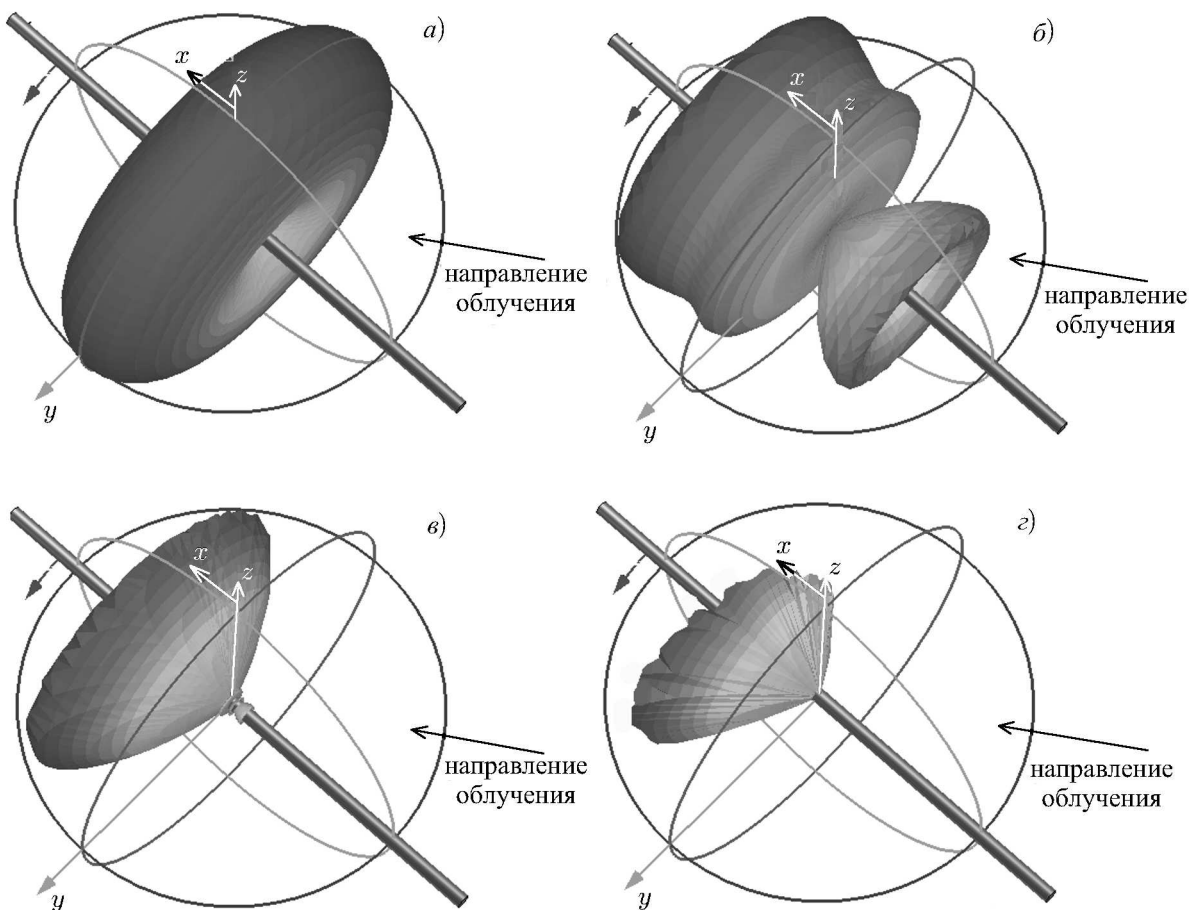


Рис. 3. Диаграммы σ металлического цилиндра

падения плоской волны. С ростом частоты происходят изменения трёхмерной диаграммы и она постепенно принимает форму конической поверхности с углом раскрыва, определяемым углом падения плоской волны. Данные закономерности характерны для дифракции электромагнитных волн и на других простейших металлических структурах, и они могут быть положены в основу формирования представления о рассеянии электромагнитных волн объектами более сложной конфигурации, например беспилотными летательными аппаратами.

На втором этапе моделирования исследовалась зависимость максимального значения σ беспилотного летательного аппарата по различным направлениям в трёхмерном пространстве от частоты (рис. 4). Из него видно, что значение σ_{\max} в среднем возрастает с увеличением частоты. При этом на кривой имеется серия максимумов, объясняемая собственными резонансами аппарата, а именно его металлическими элементами.

На третьем этапе моделирования исследовались трёхмерные диаграммы σ (см. рис. 5) беспилотного летательного аппарата, ориентированного в пространстве согласно рис. 1. На нём стрелками отмечены возможное направление падения плоской волны с горизонтальной поляризацией электрического поля и возможное направление приёма вторичного излучения аппарата. Частота падающего сигнала равна 0,15 ГГц (а), 0,5 ГГц (б), 1,0 ГГц (в) и 3,0 ГГц (г). Сравнение трёхмерных диаграмм σ летательного аппарата и металлического цилиндра показало их практически полное совпадение лишь на низких частотах. На высоких частотах за счёт конструктивных особенностей летательного аппарата его диаграммы σ приобретают существенную неравномерность по направлениям в пространстве.

Анализ трёхмерных диаграмм σ летательного аппарата показывает, что с ростом частоты с одной стороны наблюдается рост максимального значения вторичного излучения аппарата, а с другой — происходит увеличение пространственной направленности вторичного излучения.

Таким образом, за счёт увеличения пространственной направленности вторичного излучения с ростом частоты, при фиксированных направлениях облучения и приёма уменьшается вероятность обнаружения малоразмерных летательных аппаратов.

Для подтверждения вышесказанного проведён расчёт σ для отдельной точки приёма с координатами $(-1; 3; -1)$ км, при условии, что аппарат находится в начале координат и расположен относительно осей согласно рис. 1. На рис. 6 представлена зависимость σ от частоты в данной точке приёма. Из него видно, что σ имеет набор резонансных максимумов на частотах, примерно совпадающих с частотами, соответствующими максимумам σ_{\max} (см. рис. 4). Максимальное значение σ , равное $0,46 \text{ м}^2$, достигается на частоте 150 МГц. Однако существенным отличием является то, что с ростом частоты значение σ в заданном направлении уменьшается, поскольку данная точка приёма не лежит на линии максимального σ . Данная ситуация, как правило, и имеет место в реальных условиях обнаружения.

Отсюда вытекает важный для практики вывод — при обнаружении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов необходимо использовать диапазон частот от 100 МГц до 1 000 МГц.

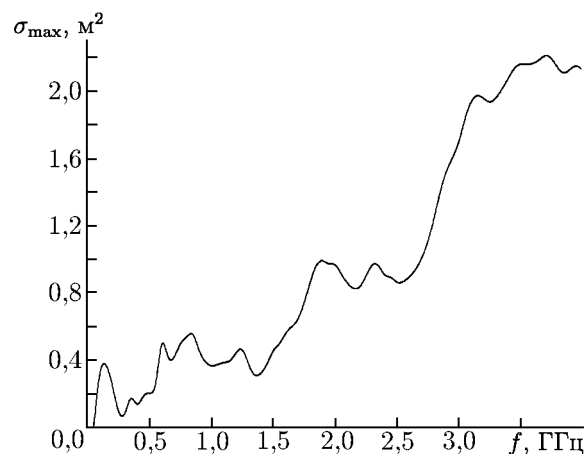


Рис. 4. Зависимость максимального значения σ_{\max} от частоты

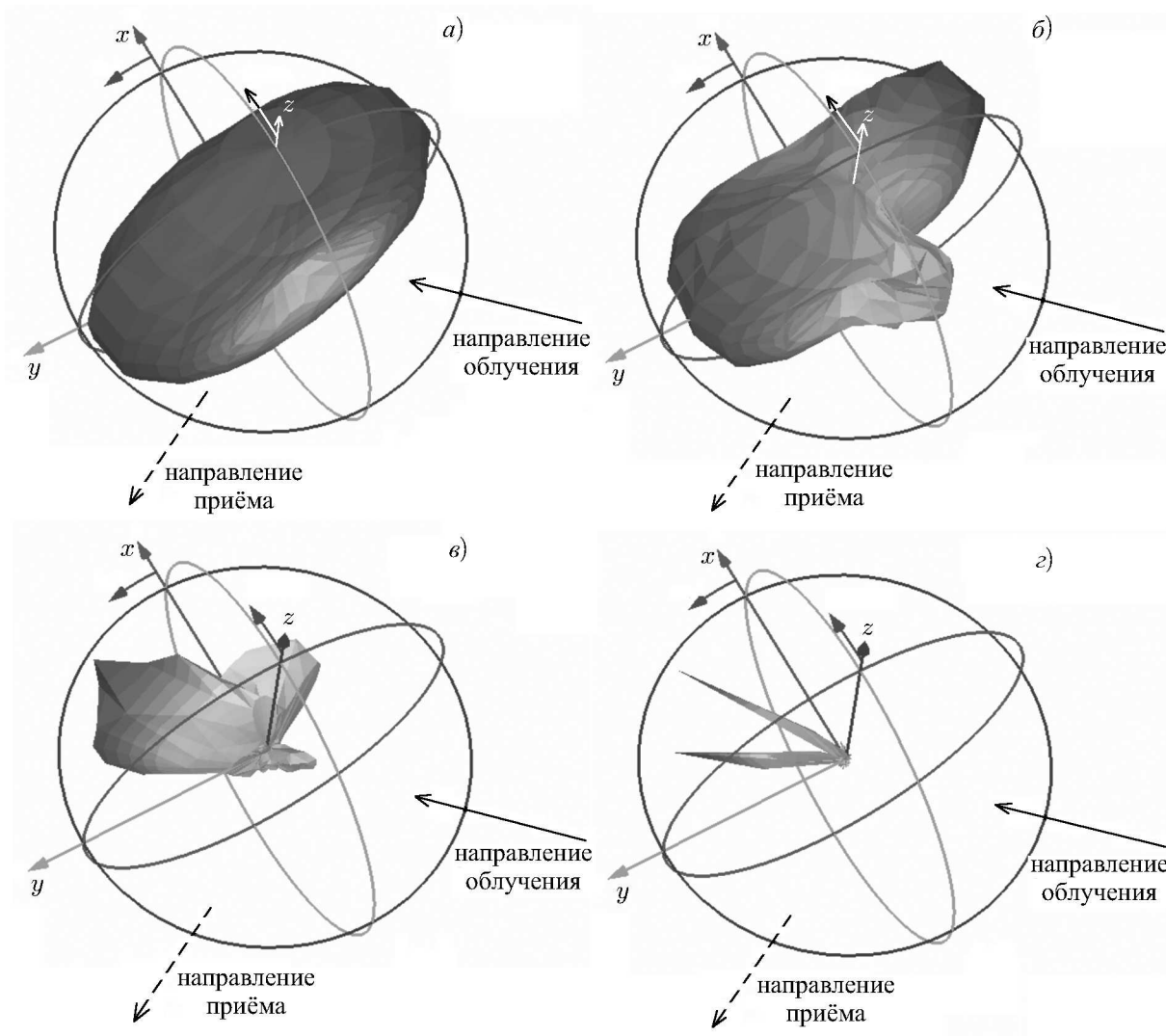


Рис. 5. Диаграммы σ летательного аппарата

3. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как было сказано выше, малая диэлектрическая проницаемость материала корпуса аппарата приводит к необходимости детального моделирования металлических элементов его наполнения. Однако этот факт может играть также и положительную роль с точки зрения упрощения компьютерной модели. Поскольку большинство металлических элементов можно представить в виде простейших геометрических фигур — параллелепипедов, цилиндров, сфер и т. д., то электродинамический расчёт характеристик отражённого от них излучения существенно упрощается и может осуществляться не только с помощью универсальных численных, но и с помощью аналитических методов, позволяющих построить более точные и быстродействующие алгоритмы. При этом корпус аппарата, имеющий диэлектрическую проницаемость $\epsilon \sim 1,5$, в силу его радиопрозрачности может быть вообще исключён из рассмотрения. Таким образом, задача компьютерного моделирования отражённого от аппарата сигнала может быть сведена к моделированию отраже-

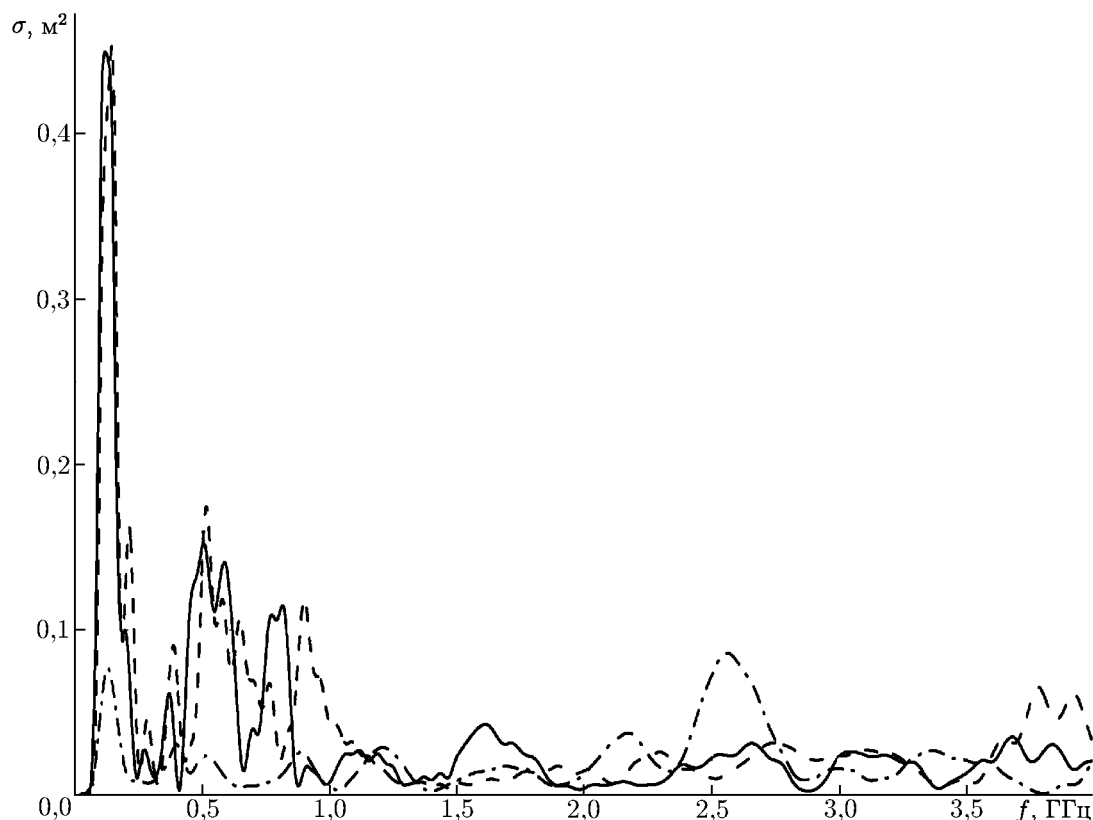


Рис. 6. Зависимость σ в точке приёма с координатами $(-1; 3; -1)$ км от частоты. Сплошная линия соответствует горизонтальной поляризации, полная модель; штриховая — горизонтальной поляризации, упрощённая модель; штрих-пунктирная — вертикальной поляризации, полная модель

ния простейшими металлическими фигурами, расположенными в пространстве определённым образом (см. рис. 1б). В этом случае количество неизвестных, вычисляемых при реализации численных методов, уменьшается минимум в два раза, а время расчёта сокращается в $1,5 \div 2,5$ раза. На рис. 6 пунктирной линией изображена зависимость σ от частоты для упрощённой модели, включающей в себя только металлические элементы конструкции аппарата. Из него видно, что она близка к частотной зависимости σ , полученной при использовании полномасштабной модели и, следовательно, может применяться при проведении оценочных расчётов.

4. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ И РАСПОЗНАВАНИИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Целесообразность использования зондирующих сигналов горизонтальной поляризации обусловлено тем, что большинство металлических элементов конструкции аппарата имеют горизонтальную ориентацию и поэтому максимально влияют на горизонтальную компоненту электрического поля. Для сравнения на рис. 6 также приведена зависимость σ от частоты для случая вертикальной поляризации падающей электромагнитной волны. Из него видно, что максимальное σ в этом случае составляет $0,085 \text{ м}^2$, а в среднем по частотному диапазону имеет значение $0,03 \text{ м}^2$.

Таким образом, значения σ существенно зависят от вида поляризации облучающего сигнала. Отношение максимальных значений σ при облучении сигналами горизонтальной и вертикальной

поляризации достигает пяти раз в диапазоне частот 100÷1 000 МГц.

5. ПРИЗНАКИ РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ФОНЕ ПТИЦ

Известно, что одной из проблем при радиолокационном обнаружении аппаратов малых и сверхмалых размеров является их распознавание на фоне птиц. Компьютерная модель птицы представляется трёхмерным диэлектрическим объектом с $\epsilon \sim 10 \div 40$ и размерами того же порядка, что и у летательного аппарата (см. рис. 1). На рис. 7 представлена зависимость σ модели птицы от частоты для двух поляризаций и условий облучения и приёма, использовавшихся при построении зависимостей, приведённых на рис. 6. Из него видно, что максимальное значение σ птицы не превышает $0,07 \text{ м}^2$ для горизонтальной поляризации и $0,085 \text{ м}^2$ для вертикальной, а среднее значение по частотному диапазону лежит на уровне $0,03 \text{ м}^2$ и $0,06 \text{ м}^2$ соответственно.

Таким образом, при горизонтальной и вертикальной поляризациях облучающего сигнала значения σ птицы сопоставимы. Однако при облучении птицы сигналом вертикальной поляризации наблюдается смещение резонансных максимумов в более высокочастотную область.

Из сравнения рис. 6 и 7 следует, что для горизонтальной поляризации облучающего сигнала в диапазоне до 1 000 МГц максимальное значение σ малоразмерного аппарата имеет в 5÷6 раз более высокий уровень, что делает возможным его распознавание на фоне птиц.

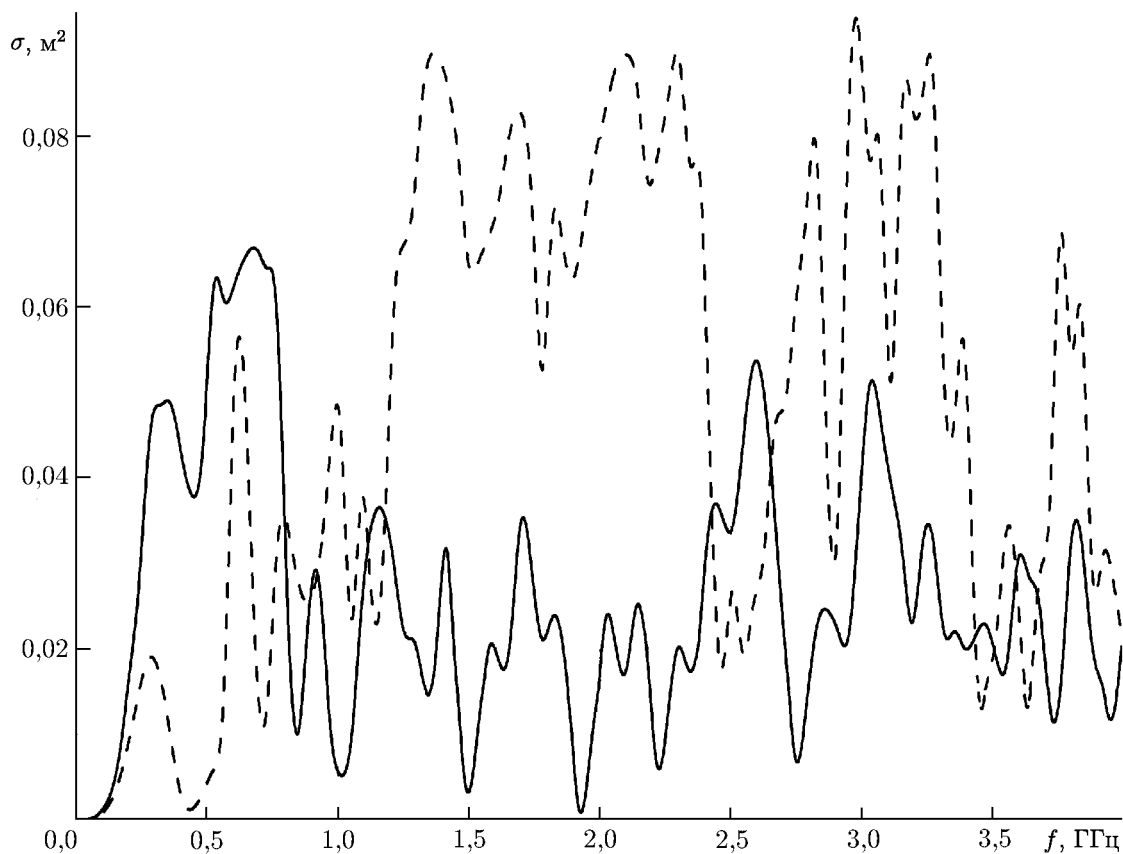


Рис. 7. Зависимость σ птицы от частоты для двух поляризаций: сплошная линия соответствует горизонтальной поляризации; штриховая — вертикальной поляризации

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования свойств вторичного излучения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов методом электродинамического моделирования в диапазоне от 50 МГц до 4 ГГц выявлен ряд закономерностей, влияющих на эффективность их обнаружения и распознавания. Установлено, что на низких частотах диаграмма рассеяния такого аппарата практически идентична диаграмме рассеяния металлического цилиндра соответствующего размера, однако с ростом частоты происходит значительное увеличение пространственной направленности его вторичного излучения. В результате, за счёт увеличения пространственной направленности вторичного излучения с ростом частоты, при фиксированных направлениях облучения и приёма вероятность обнаружения малоразмерных летательных аппаратов уменьшается. Поэтому для решения задачи их эффективного обнаружения рекомендовано использование частотного диапазона от 100 МГц до 1000 МГц с учётом всех резонансных максимумов вторичного излучения. Выявлено, что при облучении малоразмерного летательного аппарата электромагнитной волной с горизонтальной поляризацией в данном частотном диапазоне мощность его вторичного излучения в среднем в пять раз выше, чем в случае облучения волной вертикальной поляризации. Показано, что упрощение компьютерной модели аппарата путём исключения из рассмотрения диэлектрических элементов корпуса с малым значением диэлектрической проницаемости приводит к сокращению времени расчёта в 1,5÷2,5 раза. Подтверждено, что способ распознавания малоразмерных летательных аппаратов на фоне птиц заключается в сравнении амплитуд отражённых сигналов с разными частотами и поляризациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-технические серии. Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования. Вып. 3. Радиотехника, 2000.
2. Лерер А. М., Шевченко В. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. № 5. С. 21.
3. Антифеев В. Н., Борозов А. Б., Быстров Р. П. и др. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 10. С. 39.
4. Ашихмин А. В., Пастернак Ю. Г., Попов И. В., Рембовский Ю. А. // Антенны. 2007. № 3. С. 64.
5. Sadiku M. Numerical techniques in electromagnetics. Boca Raton: CRC Press, 2001. 750 p.

Поступила в редакцию 26 мая 2010 г.; принята в печать 29 августа 2010 г.

STUDY OF THE FREQUENCY DISTRIBUTION OF SECONDARY RADIATION RESONANCES OF SMALL-SIZED PILOTLESS VEHICLES

N. G. Parkhomenko, V. V. Zemlyakov, and V. N. Shevchenko

Computer simulation of a typical small-sized pilotless vehicle is carried out. Three-dimensional diagrams of the secondary radiation (scattering diagrams) of the vehicles are derived. Frequency dependences of the secondary radiation in the range 50 MHz–4 GHz are plotted. The possibilities of the object model simplification are discussed. The polarization features of object detection are studied. The possibility of object recognition against the bird's background is evaluated.