

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМИ
ИМПУЛЬСНЫМИ СИГНАЛАМИ***

**А. М. Бобрешов¹, А. В. Киселев^{1,2},
М. Ю. Селин², Г. К. Усков¹, М. П. Ряполов¹**

¹ – Воронежский государственный университет;

² – Акционерное общество “Концерн “Созвездие”

Поступила в редакцию 21.08.2021 г.

Аннотация. В работе проведено электродинамическое моделирование облучения модели беспилотного летательного аппарата (БПЛА) сверхкороткими импульсами (СКИ). Полученные данные в виде распределения электромагнитных полей в пространстве и времени использовались для обнаружения БПЛА. Для построения радиоизображения цели использовался предложенный алгоритм. Проведено исследование влияния параметров метода на эффективность обнаружения БПЛА (точность построения радиоизображения) и адаптация значений этих параметров для поставленной в работе задачи.

Ключевые слова: радиолокация; сверхширокополосный сигнал, радиоизображение, беспилотные летающие аппараты, обработка сигналов.

**MODEL OF UNMANNED AIRCRAFT VEHICLES IMAGING
USING ULTRA-WIDEBAND PULSE SIGNALS**

A. M. Bobreshov, A. V. Kiselev, M. Y. Selin, G. K. Uskov, M. P. Riapolov

Abstract. In this work, an electrodynamic simulation of the irradiation of a model of an unmanned aerial vehicle (UAV) with ultrashort pulses (USP) has been carried out. The data obtained in the form of the distribution of electromagnetic fields in space and time was used to detect the UAV. The proposed algorithm was used to construct the radio image of the target. The study of the influence of the method parameters on the UAV detection efficiency (the accuracy of constructing the radio image) and the adaptation of the values of these parameters for the task set in the work was carried out.

Keywords: radar, ultra-wideband signal, radio image, unmanned aerial vehicle, digital signal processing.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент малые беспилотные летательные аппараты (БПЛА) представляют серьезную угрозу для безопасности полетов. Важность угрозы растет с каждым днем в связи с увеличением числа БПЛА для предоставления услуг по доставке грузов и ведения фото

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №21-19-00323, <https://rscf.ru/project/21-19-00323/>.

© Бобрешов А. М., Киселев А. В., Селин М. Ю., Усков Г. К., Ряполов М. П., 2021

и видеосъемки. Быстрый рост спроса на подобные решения вызвал интенсивное развитие технологий, связанных с миниатюризацией и удешевлением компонентов БПЛА, а также широкому распространению в свободном доступе программного обеспечения для их управления. Такая тенденция привела к значительному упрощению производства “кустарных” БПЛА, эксплуатация которых никак не регламентируется. Кроме того, существенно возросло количество летательных аппаратов гражданского, военного, а также террористического назначения [1]. Организации, обеспечивающие общественную безопасность, всерьез обеспокоены этой угрозой и интенсивно ищут решение данной проблемы. Безопасность аэропортов входит в длинный перечень проблем, ставших актуальными с увеличением числа различных БПЛА. Критически важным является обнаружение и противодействие БПЛА для предотвращения террористических атак, шпионажу, а также выведению из строя материальной части особо важных промышленных объектов [2]. Из-за слабой радиолокационной сигнатуры затрудняется применение радиолокационных технологий для решения задач обнаружения малогабаритных летательных аппаратов [3]. Особо стоит отметить, что детектирование таких целей представляет собой комплексную задачу по синтезу, излучению, приему и обработке СШП сигнала, решением которой является моделирование планарного или объемного изображения искомой цели с дальнейшим ее распознаванием. В предыдущей работе [4] мы использовали модифицированный метод ISAR (Inversed Synthesized Aperture Radar — метод обратной антенны с синтезированной апертурой), а также СШП радиоимпульс с заранее заданными параметрами для решения такой задачи. В данной работе было проведено моделирование для определения параметров системы для оптимального обнаружения цели и построения ее радиоизображения.

2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Задачей данной работы являлось исследование алгоритма построения радиоизображения малогабаритной цели с использованием сверхкоротких импульсов. Для работы алгоритма рассчитывалась равномерная пространственная сетка, которая использовалась для вычисления яркости точек радиоизображения. Яркость точек определялась по формуле:

$$\begin{aligned}
 I(i, j) &= \\
 &= \iint_{i \cdot dr, j \cdot dr}^{(i+1) \cdot dr, (j+1) \cdot dr} S_1 \left(\frac{\sqrt{(x - a_1)^2 + y^2} + \sqrt{x^2 + y^2}}{c} \right) \cdot S_2 \left(\frac{\sqrt{(x - a_2)^2 + y^2} + \sqrt{x^2 + y^2}}{c} \right) dx dy,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где dr — шаг сетки, a_1, a_2 — расстояния от передающей антенны до приемных, c — скорость света, x, y — координаты, соответствующие ячейке с индексами (i, j) .

Входные данные для работы алгоритма были получены в результате моделирования в симуляторе электромагнитных полей, который использует для расчета метод конечных элементов (FEM — finite element method). В качестве облучаемого объекта была построена 3D модель БПЛА, представляющего собой гексакоптер. Большинство его конструктивных деталей выполнено из углеволокна, алюминия и ABS пластика. Среди них выделяются 6 металлических электродвигателей в исполнении из алюминия. Размеры цели составили 800x800x270 мм. Модель исследуемого БПЛА представлена на рисунке 1.

В качестве излучателя в модели использовался источник электромагнитной волны заданной формы с плоским фронтом. В качестве сканирующего сигнала был выбран биполярный гауссовский импульс длительностью 0,3 нс. Вид сгенерированного сигнала и сигнала, полученного с пробника поля, расположенного в точке расположения передающей антенны, показан на рисунке 2. Приемные антенны моделировались пробниками поля, расположенными на

кратных расстояниях, симметрично относительно передающей антенны. Спектр излученного сигнала показан на рис. 3. Полоса сигнала по уровню -3 дБ составляет 11 ГГц.

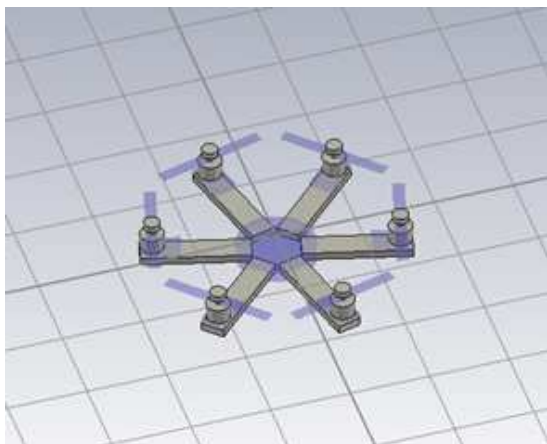


Рис. 1. Модель БПЛА.

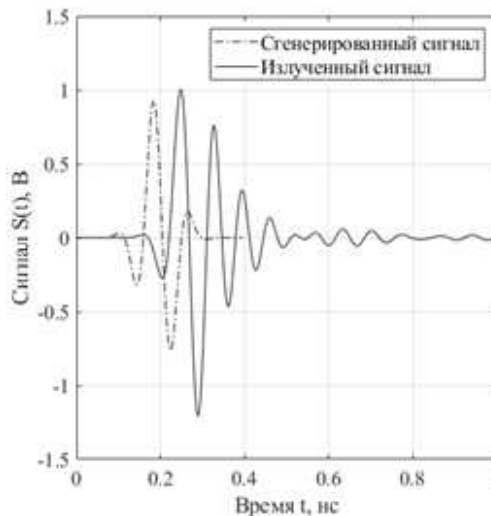


Рис. 2. Вид сгенерированного и излученного сигналов.

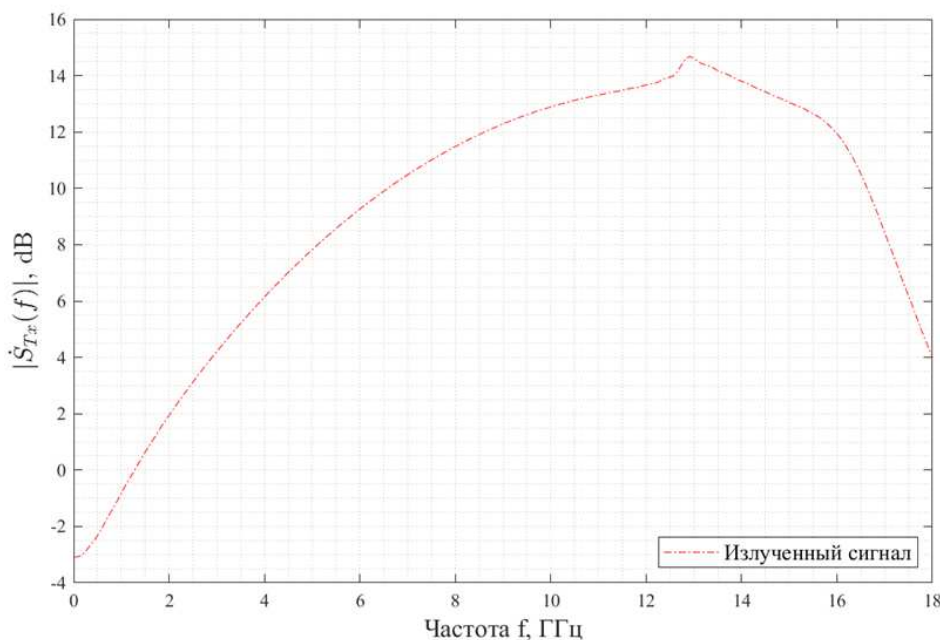


Рис. 3. Спектр излученного сигнала.

Таким образом, импульс, излученный центральной СШП антенной, распространялся в направлении исследуемого объекта и, отражаясь от него, принимался симметрично расположенными приемными антеннами. Моделирование проводилось для различных углов поворота объекта, размеров счетной области, расстояния между антеннами. Стоит отметить, что в виду особенностей метода численного моделирования, свободное пространство моделируется как объем со сложным распределением диэлектрической проницаемости, что приводит к возникновению отражений от объема, имитирующего свободное пространство. Для уменьше-

ния влияния искажений необходимо увеличивать размеры счетной области, что приведет к увеличению времени расчета модели. Следовательно, необходимо искать компромисс между объемом и временем вычислений модели и их точностью.

3. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЯ

В результате моделирования были получены реализации отраженных от объекта сигналов. Полученные данные использовались для построения радиоизображения согласно формуле (1). Каждой точке радиоизображения соответствуют времена задержки прохождения импульса от передающей антенны до приемных. Далее, на каждом участке сетки производилось вычисление усредненной энергии отраженных сверхкоротких импульсов (СКИ) и формировалась яркость пикселя, соответствующего конкретной ячейке. При обработке полученных сигналов были выполнены следующие операции:

- вычисление разностного сигнала между опорным и принятым;
- разбиение исследуемого пространства на равномерную сетку;
- вычисление энергии сигналов, полученных из приемных каналов, в каждой точке сетки;
- пороговая фильтрация;
- построение радиолокационного изображения на координатной плоскости.

На рисунках 4 и 5 показаны формы принятых сигналов и их спектров.

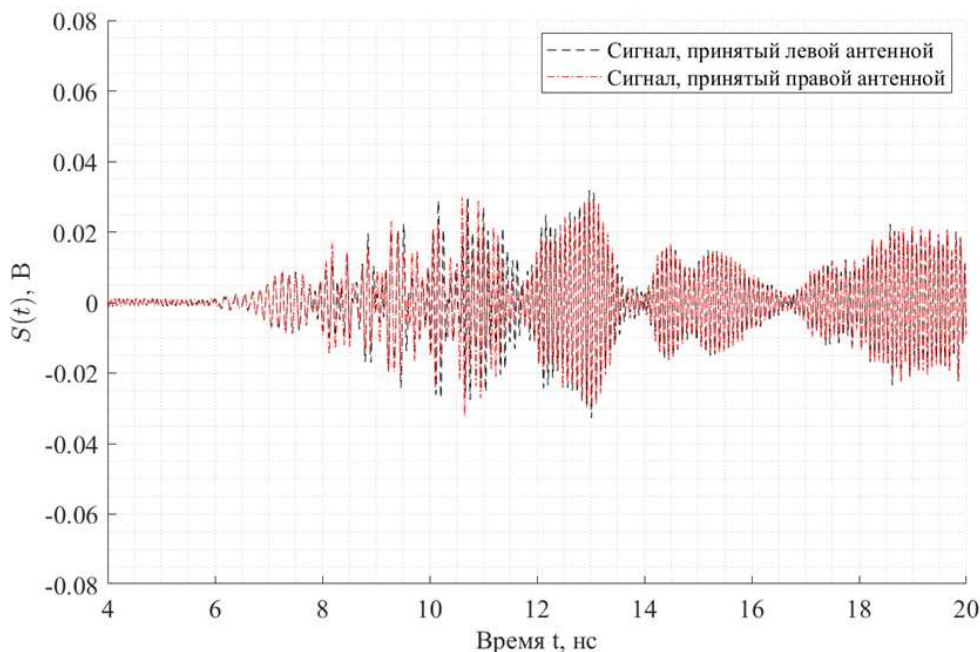


Рис. 4. Временные реализации принятых сигналов.

Для исследования отражающих свойств БПЛА было вычислено отношение спектров принятого и излученного сигналов. Как видно из рис. 6, максимум отражения находится в диапазонах 7-8 ГГц, 9-10 ГГц и 11-12 ГГц.

В работе был рассмотрен вопрос влияния различных параметров системы радиолокационной системы на качество получаемого радиоизображения. Моделирование было произведено для различных двух и четырех приемных антенн. Кроме того, варьировалось расстояние между приемными антеннами. Полученные в результате работы метода радиоизображения для разного количества приемных антенн показаны на рисунке 7. Как видно из рисунка,

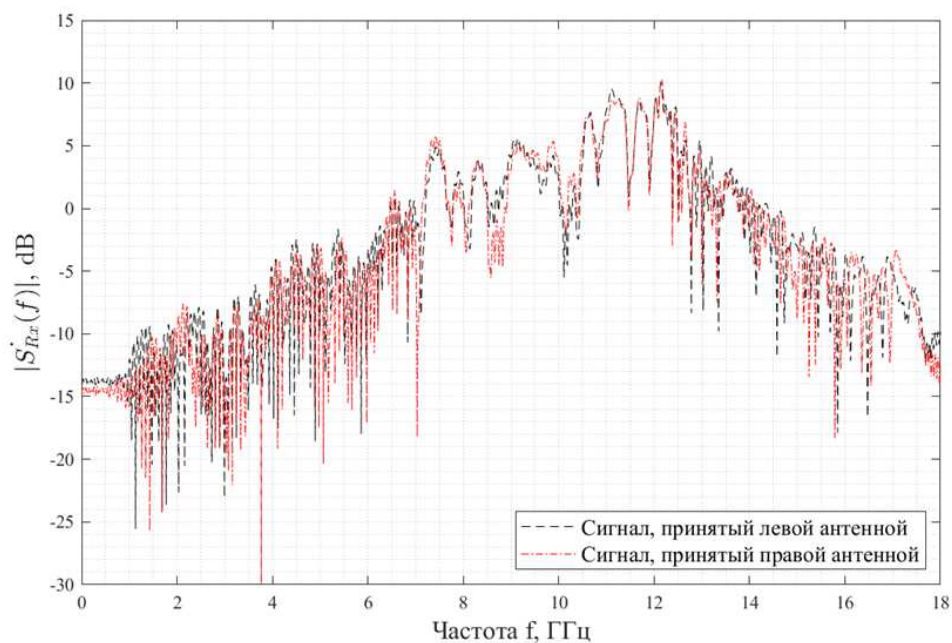


Рис. 5. Спектральная плотность мощности принятых сигналов.

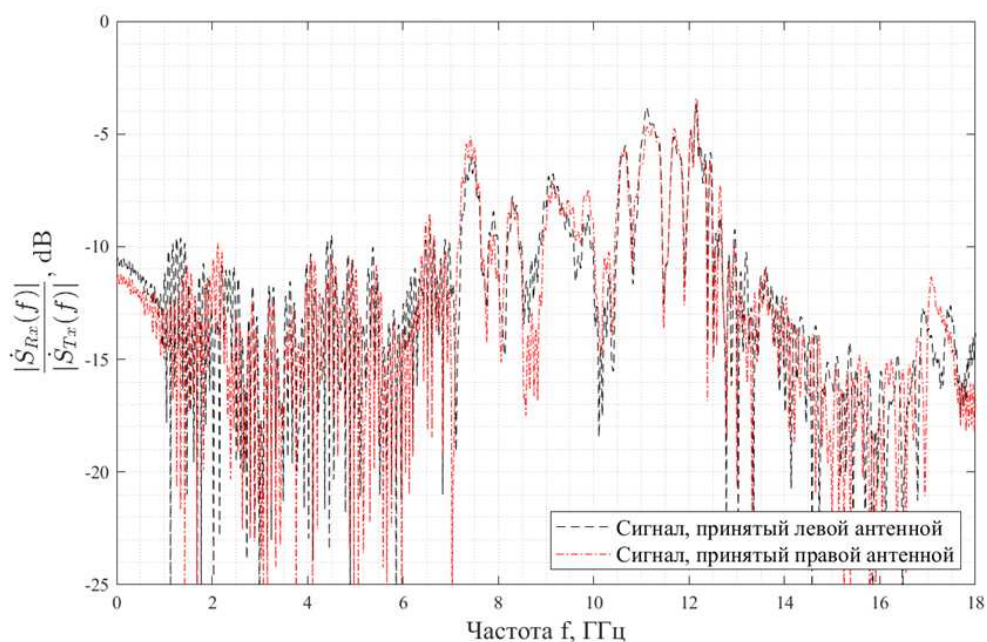


Рис. 6. Отношение Фурье-образов принятого и переданного сигналов.

размеры объекта совпадают с размерами модели БПЛА. Для случая четырех антенн, яркость точек, соответствующих двигателям гексакоптера и его центральной части, выше, чем в случае двух приемных антенн.

Изображения целей для разного расстояния между приемными антеннами показаны на рис. 8. Как видно из рисунка, увеличение базы между приемными антеннами улучшает качество полученного изображения. Такой эффект возникает вследствие особенностей метода синтеза изображения.

Увеличение базы между антеннами приводит к увеличению разрешающей способности алгоритма по азимуту.

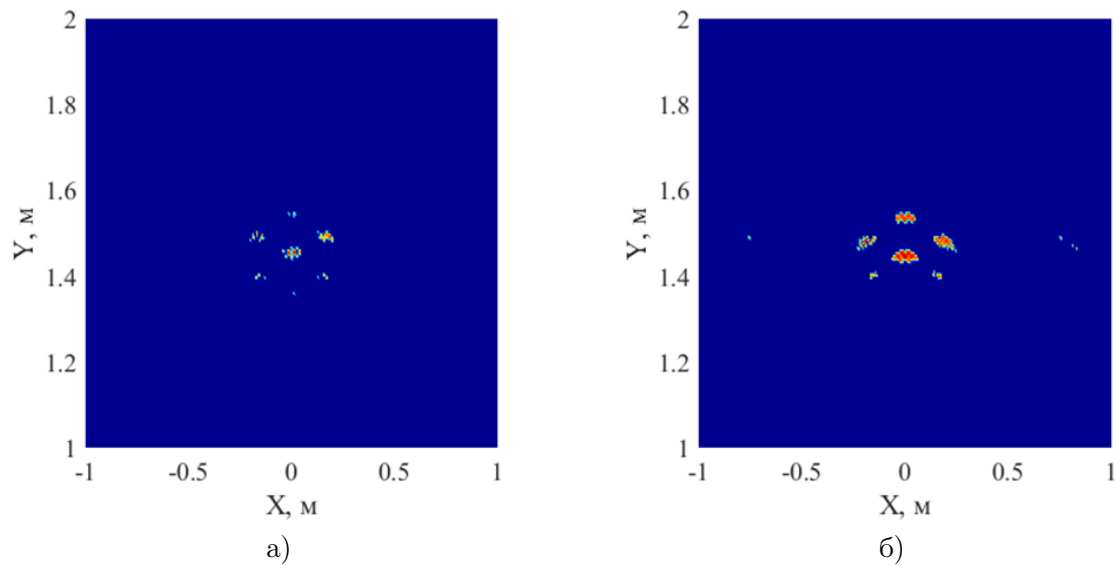


Рис. 7. Изображение цели в случае а) 2х приемных антенн, б) 4х приемных антенн.

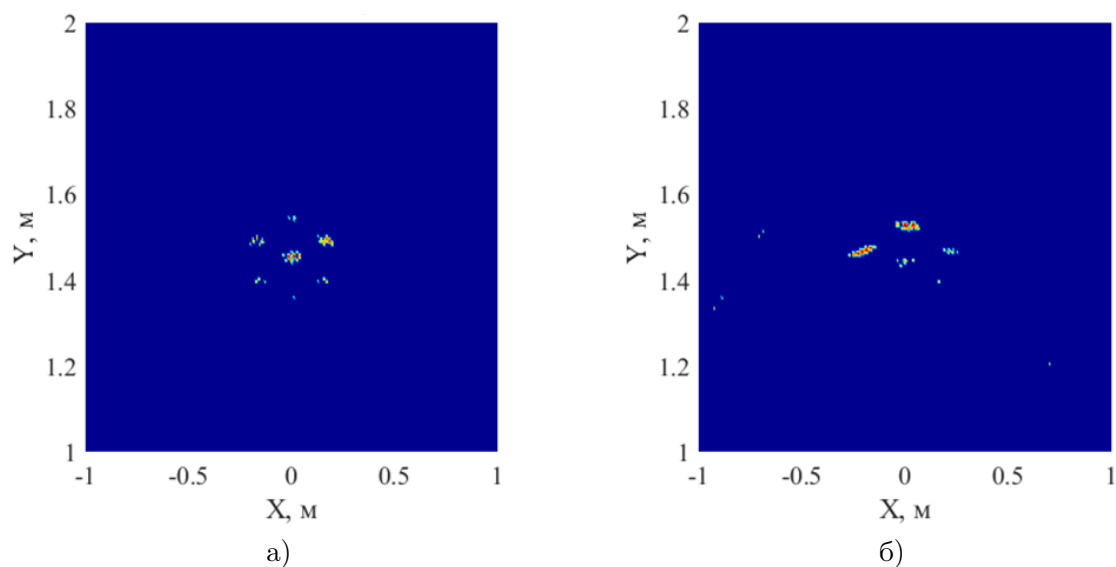


Рис. 8. Изображение цели для расстояния между антеннами, равного а) 1,8 м, б) 1,2 м.

Вследствие особенностей методов моделирования свободного пространства, на изображении могут возникнуть искажения, вызванные отражениями от границ счетной области. При-

мер таких искажений можно видеть на рис. 9. Задние двигатели БПЛА сильно размыты из-за переотражений от задней границы счетной области. Устранить такие искажения можно уменьшением коэффициента отражения границы раздела сред и увеличением объема счетной области.

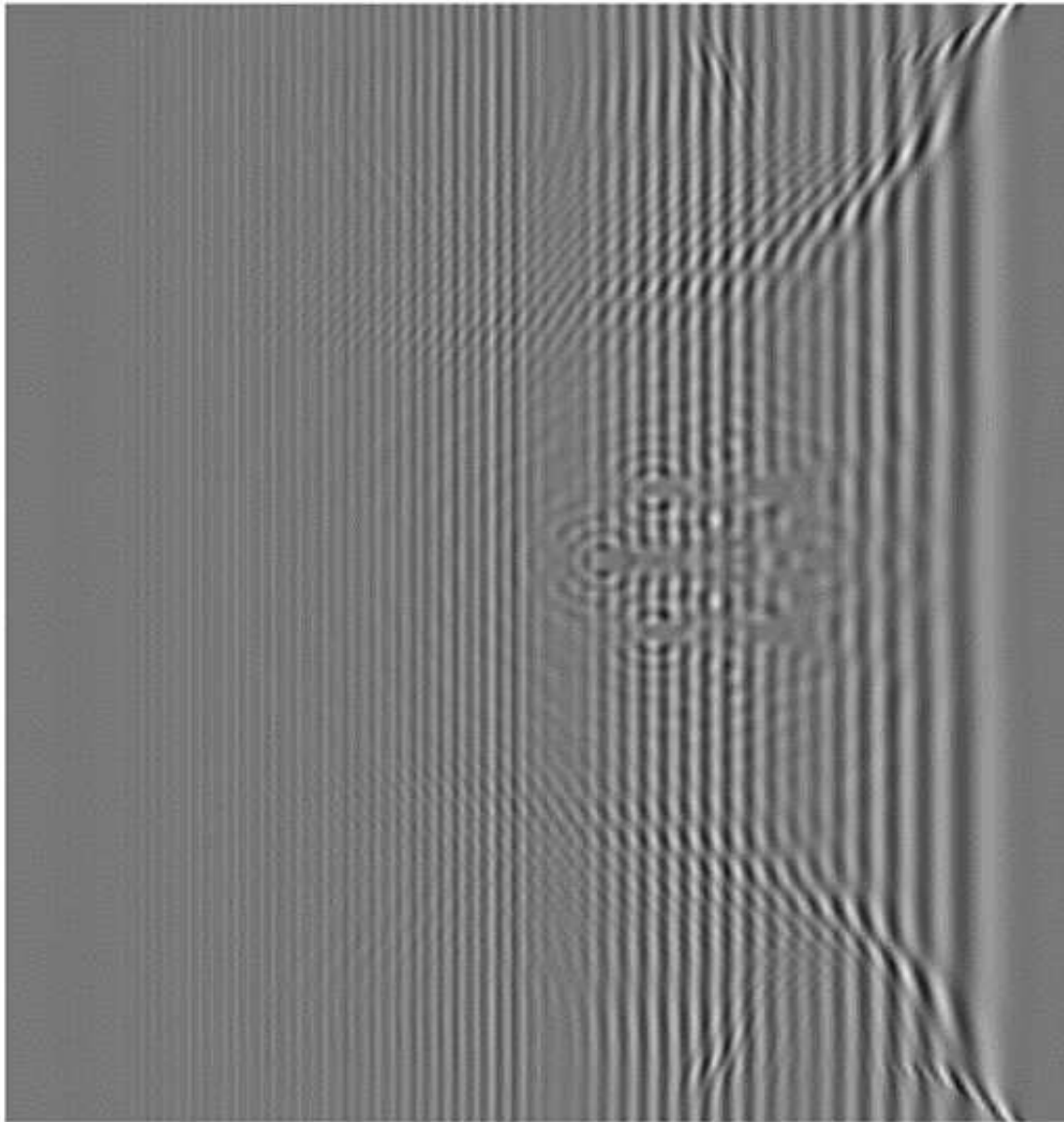


Рис. 9. *Картина электромагнитного поля в исследуемом пространстве.*

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была реализована модель сверхширокополосного радиолокатора. На результирующем изображении, полученном для БПЛА, отчетливо видно присутствие шести металлических двигателей и системы электронного управления в его центре. Геометрические размеры объекта, определенные исследуемым радиолокационным методом, соответствуют заданным с погрешностью менее 5%.

В работе предложен алгоритм для построения радиоизображения малоразмерных целей, таких как БПЛА. Входные данные для алгоритма были получены в результате моделирова-

ния позволили получить изображение цели, размеры которой совпадают с размерами модели БПЛА с погрешность менее 5%. При этом были учтены особенности используемого метода моделирования, такие как наличие отражения электромагнитных волн от границ счетной области и не идеальность плоского фронта излученной электромагнитной волны. Стоит отметить что увеличение базы между приемными антеннами приводит к увеличению разрешающей способности алгоритма по азимуту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. To, L. Radar cross section measurements of small unmanned air vehicle systems in non-cooperative field environments / L. To, A. Bati, D. Hilliard // In Proceedings of the IEEE. 3rd European Conference on Antennas and Propagation. — 2009. — P. 3637–3641.
2. Altin, N. The calculation of back scattering field of unmanned air vehicle / N. Altin, E. Yazgan // In Proceedings of PIERS, Beijing, China. — 2009. — P. 1460–1463.
3. Mensa, D. L. High Resolution Radar Cross-Section Imaging / D. L. Mensa. — Artech House, 1991.
4. Skolnik, M. I. Radar Handbook / M. I. Skolnik. — McGraw-Hill, 2008.
5. Построение радиоизображения малоразмерной цели с помощью сверхширокополосных импульсных сигналов / А. М. Бобрешов, А. В. Киселев, М. Ю. Селин, Г. К. Усков // XXIV международная научно-техническая конференция “Радиолокация. Навигация.Связь” (RLNC-2018). — 2018. — Т. 3. — С. 55–59.
6. Swerling, P. Probability of detection for some additional fluctuating target cases. Aerospace Corp., Los Angeles, CA, Rep. TOR-669 (9099), Mar. 14, 1966. Reprinted in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 33, 2 (1997), 698–709.

REFERENCES

1. To L., Bati A., Hilliard D. Radar cross section measurements of small unmanned air vehicle systems in non-cooperative field environments. In Proceedings of the IEEE. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009, pp. 3637–3641.
2. Altin N., Yazgan E. The calculation of back scattering field of unmanned air vehicle. In Proceedings of PIERS, Beijing, China, 2009, pp. 1460–1463.
3. Mensa D.L. High Resolution Radar Cross-Section Imaging. Artech House, 1991.
4. Skolnik M.I. Radar Handbook. McGraw-Hill, 2008.
5. Bobreshov A.M., Kiselev A.V., Selin M.Y., Uskov G.K. Building small-sized targets radio-images using ultra-wideband pulse signals. [Bobreshov A.M., Kiselev A.V., Selin M.Y., Uskov G.K. Postroenie radioizobrazheniya malorazmernoyj celi s pomoshh'yu sverxshirokopolosnyx impul'snyx signalov]. The 24th International Scientific and Technical Conference «Radiolocation. Navigation. Communication», (RLNC-2018), 2018, vol. 3, pp. 55–59.
6. Swerling, P. Probability of detection for some additional fluctuating target cases. Aerospace Corp., Los Angeles, CA, Rep. TOR-669 (9099), Mar. 14, 1966. Reprinted in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 33, 2 (1997), 698–709.

Бобрешов Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра электроники ВГУ, заведующий, Воронеж, Россия
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru
Тел.: +7(473)220-82-84

Bobreshov Anatoly Mikhailovich, doctor of physics and mathematics, professor of electronics chair in VSU, chairman of department of electronics, Voronezh, Russia
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru
Tel.: +7(473)220-82-84

*Киселев Антон Валерьевич, аспирант кафедры электроники физического факультета ВГУ, Воронеж, Россия
E-mail: a.v.kiselev@sozvezdie.su*

*Kiselev Anton Valerievich, postgraduate student of electronics chair of physics faculty in VSU, Voronezh, Russia
E-mail: a.v.kiselev@sozvezdie.su*

*Селин Михаил Юрьевич, аспирант АО "Концерн "Созвездие", Воронеж, Россия
E-mail: oberstmajer@gmail.com*

*Selin Mikhail Urievich, postgraduate student at JSC concern «Sozvezdie», Voronezh, Russia
E-mail: oberstmajer@gmail.com*

*Усков Григорий Константинович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры электроники ВГУ, Воронеж, Россия
E-mail: uskov@phys.vsu.ru
Тел.: +7(473)220-82-84*

*Uskov Grigoriy Konsaninovich, doctor of physics and mathematics, docent of electronics chair in VSU, Voronezh, Russia
E-mail: uskov@phys.vsu.ru
Tel.: +7(473)220-82-84*

*Ряполов Михаил Павлович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники ВГУ, Воронеж, Россия
E-mail: ryapolov@phys.vsu.ru
Тел.: +7(473)228-11-60 доб. 1942*

*Riapolov Mikhail Pavlovich, Ph.D. in physics and mathematics docent of electronics chair in VSU, Voronezh, Russia
E-mail: ryapolov@phys.vsu.ru
Tel.: +7(473)228-11-60 доб. 1942*