

## К ПРОБЛЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА

**А. И. Мельничук<sup>1</sup>, Н. В. Горячев<sup>2</sup>, Н. К. Юрков<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Учебная авиационная база Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков МО РФ,  
Ртищево, Россия

<sup>2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup> pelmenio@mail.ru, <sup>2</sup> ra4foc@yandex.ru, <sup>3</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Проблеме подавления и/или поражения электронных систем управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) посвящено множество работ, в числе которых недостаточное внимание уделяется системам подавления сверхмалых БПЛА, не имеющих дополнительных средств защиты бортовой электронной аппаратуры. Однако, подобные аппараты особенно опасны при полете в «стае». Одним из основных методов подавления является облучение сверхкороткими электромагнитными импульсами. Созданию излучателя подобных сверхширокополосных электромагнитных импульсов и оценке их эффективности посвящена настоящая работа. *Материалы и методы.* Неустраняемое повреждение на полупроводниковых переходах возникает под действием электромагнитного перенапряжения, что становится возможным при наличии эффективной антенной системы, способной без потерь передать мощность сверхкоротких СВЧ импульсов. Предложен излучатель в виде антенны Вивальди, который обладает необходимыми техническими характеристиками. Предложена методика расчета подобной антенны в системе многофункционального подавления БПЛА. *Результаты.* Проведены приближительный расчет и оптимизация в системе автоматизированного проектирования; проверка полученных результатов при моделировании антенны; а также проверка полученных результатов при моделировании антенны. *Выводы.* Методом конечных элементов проведен расчет антенны Вивальди, предложен генетический алгоритм оптимизации полученной антенны, с помощью которого удалось добиться приемлемых характеристик излучателя. Сделан вывод об актуальности использования фазированной антенной решетки на основе антенны Вивальди.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, электромагнитное излучение, бортовая электронная аппаратура, средства подавления или поражения, СВЧ излучение, антенны, моделирование.

**Для цитирования:** Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме автоматизированного проектирования антенны Вивальди для излучения сверхширокополосного электромагнитного импульса // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 87–101. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-9

## ON THE PROBLEM OF COMPUTER-AIDED DESIGN OF THE VIVALDI ANTENNA FOR THE EMISSION OF AN ULTRA-WIDEBAND ELECTROMAGNETIC PULSE

**A.I. Mel'nichuk<sup>1</sup>, N.V. Goryachev<sup>2</sup>, N.K. Yurkov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Aviation Base of the Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots of Russian Ministry of Defense,  
Rtishchevo, Russia

<sup>2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup> pelmenio@mail.ru, <sup>2</sup> ra4foc@yandex.ru, <sup>3</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The problem of suppression and / or destruction of electronic control systems of unmanned aerial vehicles (UAVs) is devoted to many works, including insufficient attention to suppression systems for ultra-small UAVs that do not have additional means of protection of onboard electronic equipment. However, such devices are especially dangerous when flying in a "flock". One of the main suppression methods is ultrashort electromagnetic pulse irradiation. The present work is devoted to the creation of an emitter of such UWPS and the assessment of their efficiency. *Materials and methods.* Fatal damage on semiconductor junctions arises under the influence of electromagnetic overvoltage, which becomes possible in the presence of an effective antenna system capable of

transmitting the power of ultrashort microwave pulses without loss. A radiator in the form of a Vivaldi antenna, which has the necessary technical characteristics, is proposed. A method is proposed for calculating such an antenna in a multifunctional UAV suppression system. *Results.* Approximate calculation and optimization in the computer-aided design system have been carried out; verification of the results obtained when simulating the antenna; as well as verification of the results obtained when simulating the antenna. *Conclusions.* The finite element method was used to calculate the Vivaldi antenna, a genetic algorithm for optimizing the resulting antenna was proposed, with the help of which it was possible to achieve acceptable characteristics of the emitter. A conclusion is made about the relevance of using a phased antenna array based on a Vivaldi antenna.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, electromagnetic radiation, onboard electronic equipment, means of suppression or destruction, microwave radiation, antennas, modeling

**For citation:** Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of computer-aided design of the vivaldi antenna for the emission of an ultra-wideband electromagnetic pulse. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:87–101. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-9

### Введение

Технология функционального подавления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предусматривает использование электромагнитного излучения (ЭМИ) малой длительности (от долей до десятков наносекунд). Возможны два варианта воздействия таких ЭМИ на электронную аппаратуру: внутрисполосное или внеполосное [1, 2].

Внеполосное функциональное подавление предусматривает воздействие на приемные устройства радиоэлектронных средств (РЭС) на любых частотах вне их полос пропускания и не требует исходных данных по рабочему диапазону частот [3, 4].

Внутрисполосные способы функционального подавления предусматривают потери энергии воздействующего ЭМИ при прохождении через входные цепи приемника РЭС, зависящие от соотношения между полосой пропускания приемного тракта и шириной спектра, воздействующего ЭМИ. Внутрисполосные способы являются энергетически наиболее выгодными, но требуют исходных данных о технических характеристиках функционирования СВЧ излучения на БПЛА, поражаемых или подавляемых РЭС, например, о рабочей частоте и полосе пропускания приемных устройств, тактовой частоте управляющих спецвычислителей и компьютеров, резонансной частоте конструкций крепежа радиоэлектронных элементов на платах и т.д. [5, 6].

Известны три принципиально отличающихся направления реализации средств функционального подавления с малой длительностью мощных ЭМИ:

- 1) искровые и полупроводниковые генераторы видеоимпульсов;
- 2) релятивистские генераторы СВЧ радиоимпульсов;
- 3) передающие многопозиционные системы излучения (МСИ) и фазированные антенные решетки с управляемой фокусировкой ЭМИ в СВЧ диапазоне.

Наибольшее распространение получило третье направление реализации, основанное на фазированных антенных решетках.

Результатом воздействия сверхкоротких СВЧ радиоимпульсов являются [7, 8]:

- помехи: источник излучения создает напряженность электромагнитного поля в диапазоне рабочих частот приемного устройства цели; эта напряженность такая же по величине или больше полезного сигнала – приемное устройство не может выделить полезный сигнал;
- ложная информация: наведенный электромагнитный сигнал создает ложную информацию на приемном устройстве;
- переходная дестабилизация: наведенное напряжение воздействует на логическое состояние электронного компонента;
- неустраняемое повреждение: полупроводниковые переходы подвергаются воздействию перенапряжения, что выводит их из строя. Однако это становится возможным при наличии эффективной антенной системы, способной без потерь передать мощность сверхкоротких СВЧ импульсов.

Учитывая, что с проектированием устройства связана проблема СВЧ излучения в сверхшироком диапазоне, целесообразно рассмотреть антенну, работающую в широкой полосе частот. Для создания антенно-фидерного устройства предлагается рассмотреть антенну TSA (от английского *Tapered Slot Antenna* – антенна, обладающая расширяющейся щелью), которая отвечает требованиям по созданию устройства функционального подавления систем беспилотного летательного аппарата путем излучения сверхширокого сверхкороткого электромагнитного импульса.

Антенны Вивальди (излучатели на основе симметричных щелевых линий, далее – антенны Вивальди) обладают необходимыми техническими характеристиками: 1) малые габаритные размеры; 2) малый вес излучателя; 3) необходимая диаграмма направленности, создаваемая на всем диапазоне рабочих частот; 4) способность излучать сверхкороткие импульсы [9, 10].

Кроме заявленных требований, необходимо отметить и простоту конструкции данного типа излучателей, а также возможность работы в широком диапазоне частот. Суммируя данные достоинства, целесообразно рассчитать и рассмотреть излучатель подобного типа для дальнейшего моделирования и возможной апробации.

Рабочая полоса при расчете больше всего зависит от выбранной частоты. Как правило, она ухудшает согласование на выходе. Также рабочая полоса зависит от изменения максимума диаграммы направленности, расширения луча и других параметров [11, 12].

Широкополосными антеннами принято считать такие антенны, рабочая полоса которых должна составлять от 10–50 % номинальной частоты. Антенна Вивальди считается широкополосной антенной и рассматривается как излучатель сверхкоротких импульсов в ряде работ. Учитывая вышесказанное, нужно учесть, что выбранная рабочая частота – 8 ГГц (а действующий неблагоприятно на электронные радиоэлементы частотный диапазон от 5 до 8 ГГц) для дальнейших расчетов.

Первоначально уместно рассматривать излучатель такого рода как нерегулярную линию передачи, согласующую регулярную линию со свободным пространством. Коэффициент отражения на входе устройства согласования необходимо минимизировать (вместе с ним изменяются волновое сопротивление и длина перехода). Таким образом достигаются удовлетворительные частотные характеристики (в щелевых линиях могут распространяться Т-волны и квази Т-волны).

Для более точного определения характеристик применяются другие методы расчета электромагнитного поля вдоль всей щелевой антенны [13, 14]. Применяется ступенчатая аппроксимация секциями, отрезками щели постоянной ширины, к расширяющейся щели по экспоненциальному закону, это дает также приближенный, но более точный метод расчета. Для подобных секций уже известно распределение поля, полученное методом Галеркина в спектральной области. Таким образом, поле всей щелевой антенны может быть определено как сумма поля каждой секции.

Согласно второй части метода определяется поле щелевой антенны с амплитудным распределением поля в щели, полученным ранее в первой части, исходя из этого можно учесть диэлектрическую подложку в вычислениях (в случае исполнения антенны на слое печатной платы), также дифракцию волны на ребрах излучателя бесконечной высоты.

Приведенные методы громоздки, неудобны. Для приближенного инженерного расчета, электродинамического моделирования вполне пригодны программные комплексы для расчета различных видов антенн. Для приближенного расчета и моделирования антенны целесообразно воспользоваться системами автоматизированного проектирования CST Microwave Studio и HFSS Microwave Office ввиду того, что теория антенн Вивальди довольно сложна в области электродинамики (данная антенна является антенной бегущей волны). Как правило, параметры антенны подбираются эмпирически.

Для дальнейшего моделирования антенны Вивальди уместно воспользоваться HFSS.

### Приближенный расчет и оптимизация в системе автоматизированного проектирования

Расчет фактической длины антенны проводим согласно

$$L = L_{eff} - 2\Delta L,$$

$$W_{Total} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}},$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{W} \right)}} \right],$$

$$L_{Total} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0,824 \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3)\left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258)\left(\frac{W}{h} + 0,8\right)}$$

Геометрия раскрытия рассчитана по формулам:

$$W_{max} = \frac{c}{2f_{min}\sqrt{\epsilon_r}},$$

$$W_{min} = \frac{c}{2f_{max}\sqrt{\epsilon_r}},$$

где  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме;  $f_{min}$  – минимальная рабочая частота;  $f_{max}$  – максимальная рабочая частота;  $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость.

Ширина щели антенны определяется

$$W(x) = W_0 \exp \left[ \ln(W_L) \left( \frac{x}{L} \right)^\alpha \right] - (W_0 + b),$$

где  $W_0$  – длина антенны;  $W_L$  – общая ширина антенны;  $b$  – минимальное значение раскрытия конуса;  $\alpha = 0,7$ .

Скрин-шот экрана представлен на рис. 1.

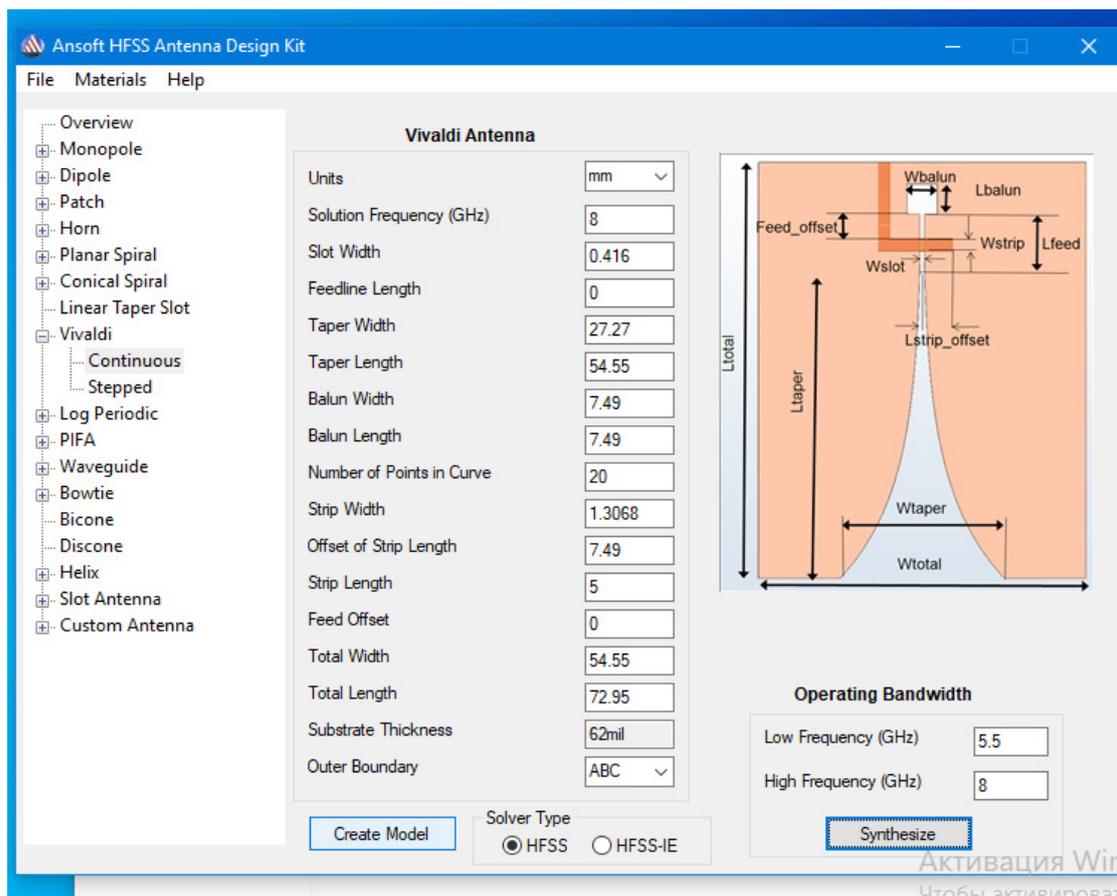


Рис. 1. Скриншот программы расчета. Геометрические размеры, полученные при приближенном расчете

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента отражения от частоты.

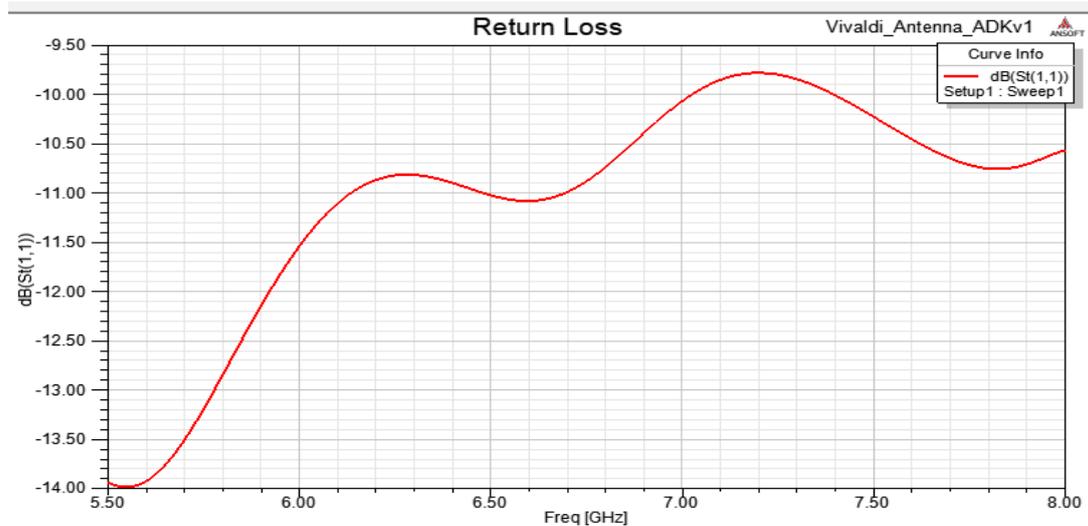


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от частоты

Как видно из графика (рис. 2), коэффициент отражения на частоте 8 ГГц равен  $-10,5$  дБ, что довольно мало, хороший результат начинается от  $-20$  дБ. Более того, начиная с 6 ГГц, он растёт.

Для дальнейшего рассмотрения данного вида антенны необходимо выполнить оптимизацию антенны.

Целесообразно оптимизировать длину антенны, ее ширину, размер первоначального раскрыва. Но также необходимо учесть, что массо-габаритные показатели не должны выходить за пределы желаемых результатов.

Первоначально возможно рассмотреть влияние  $W_{slot}$  (размер первоначального раскрыва) на коэффициент отражения (рис. 3).

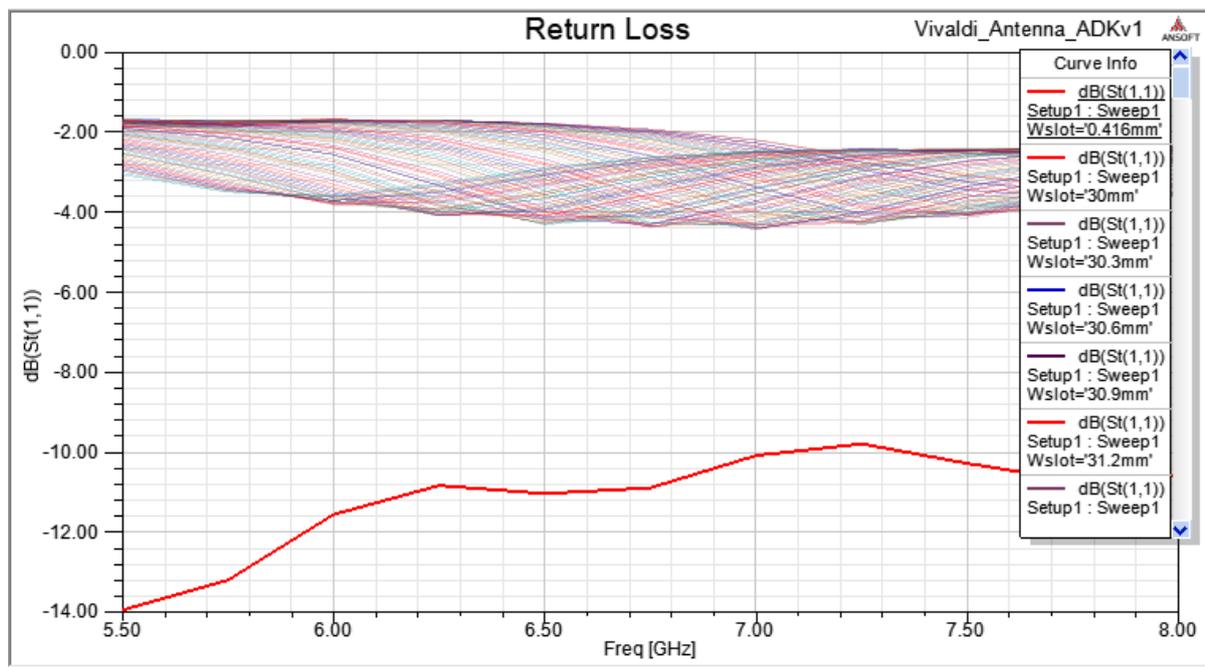


Рис. 3. Оптимизация коэффициента отражения путем изменения размера первоначального раскрыва антенны

Как видно из построенного графика оптимизации, при увеличении показателя увеличивается коэффициент отражения, что является нежелательным.

После неудачной оптимизации предыдущего параметра проведена оптимизация  $L_{total}$  (длина антенны) (рис. 4).

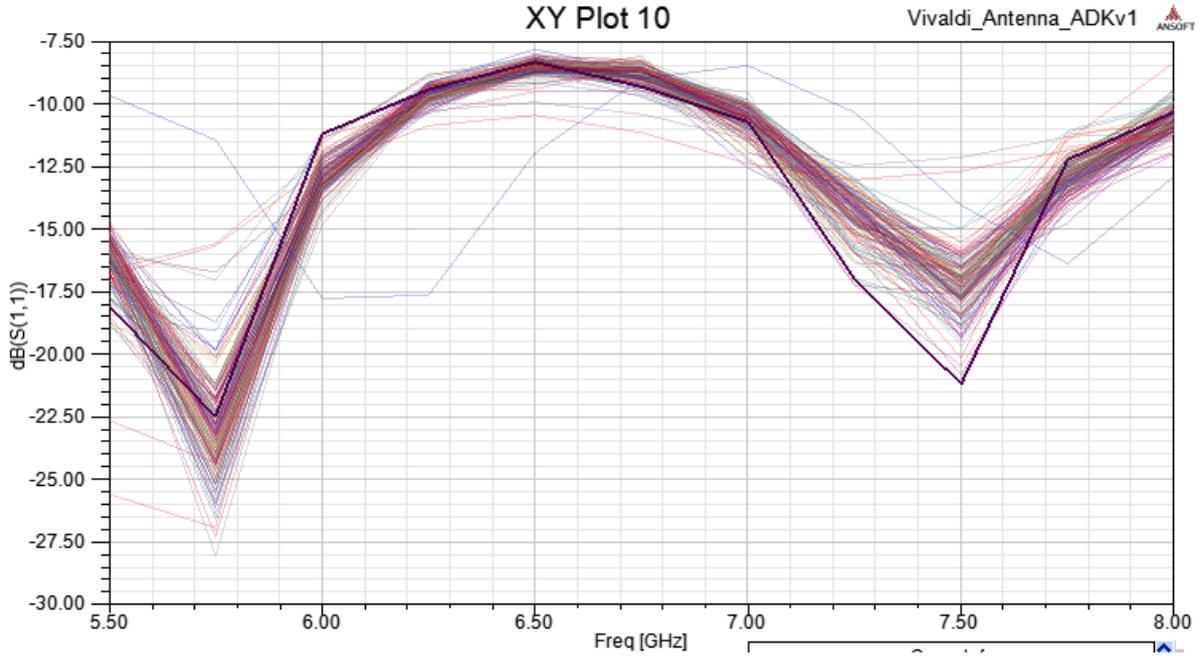


Рис. 4. Оптимизация коэффициента отражения путем изменения длины антенны

На приведенном графике можно выделить ломанную, удовлетворяющую минимальным требованиям коэффициента отражения. При первоначальной оптимизации был выбран «генетический» алгоритм.

Было установлено, что при оптимальном коэффициенте отражения длина антенны стала 228,5 мм, что, в принципе, удовлетворяет предстоящим условиям эксплуатации. График приведен на рис. 5.

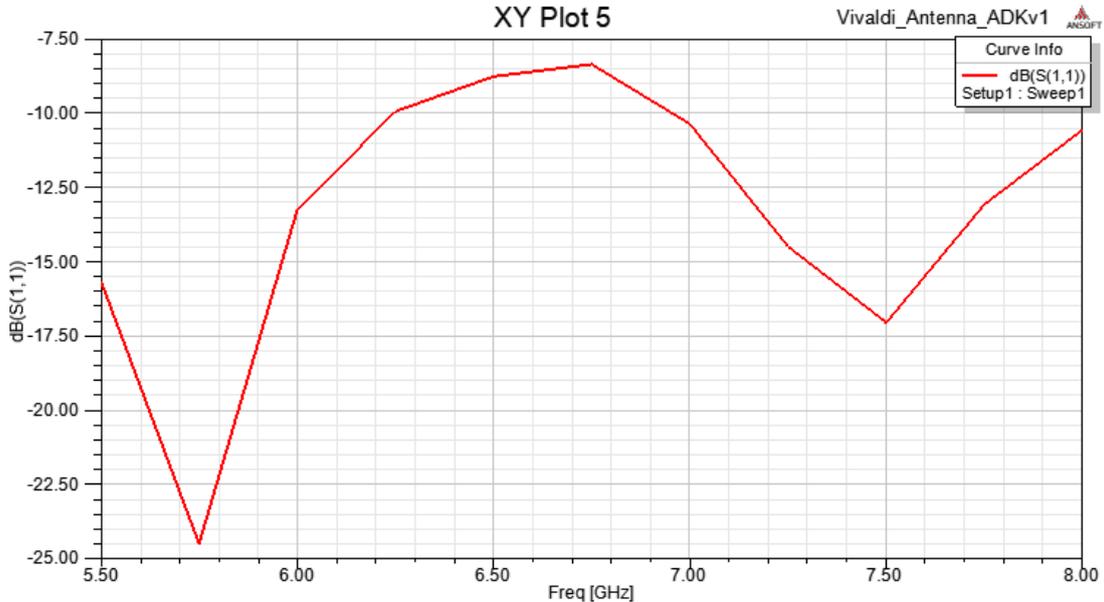


Рис. 5. Результаты «грубой» оптимизации в системе автоматизированного проектирования

Таким образом, при грубой оптимизации удалось уменьшить коэффициент отражения до приемлемого на частоте 5,7 ГГц, но так как антенна предполагается сверхширокополосная, следовательно, целесообразно провести дальнейшую оптимизацию, чтобы коэффициент отражения стал приемлем и на других частотах.

Как видно из графиков оптимизации, с уменьшением размера ширины антенны уменьшается коэффициент отражения. Учитывая это, была выбрана ломаная, с размерами, соответствующими значениям 39,5 мм (на графике представлен и более удачный размер в области 5,6 ГГц, но в области 7,5 ГГц он не удовлетворяет заданным характеристикам) (рис. 6).

Таким образом, геометрические размеры изменились после оптимизации.

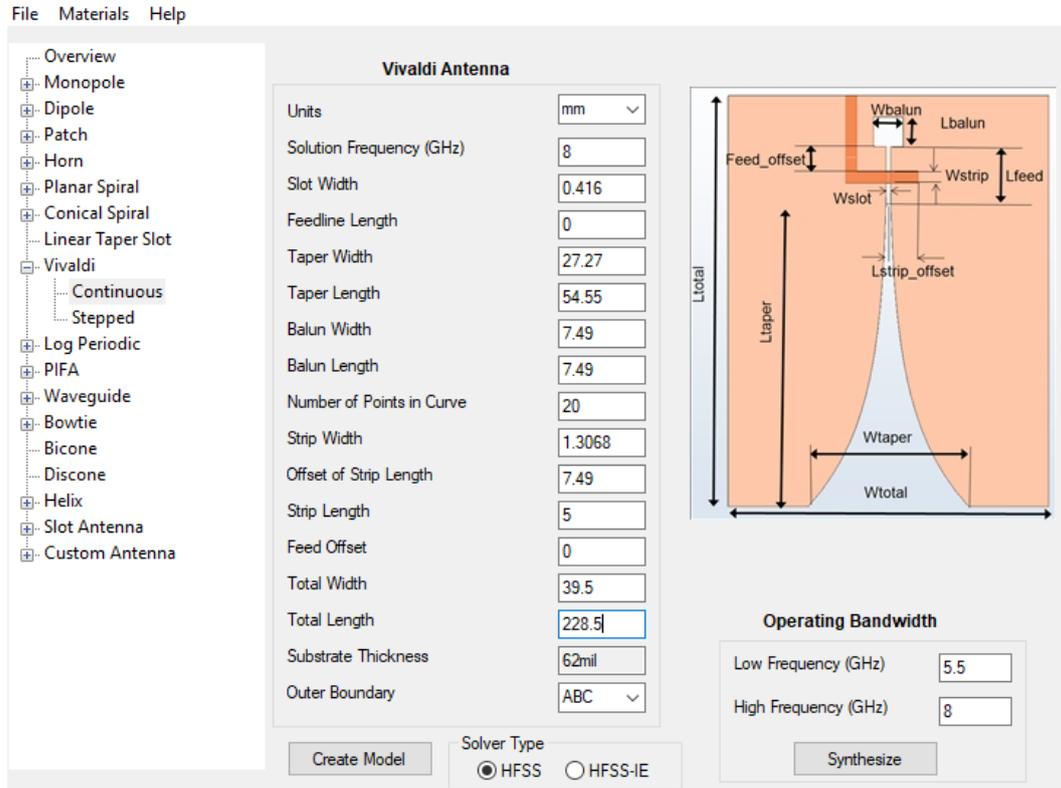


Рис. 6. Полученные геометрические размеры антенны после оптимизации

### Проверка полученных результатов при моделировании антенны

Для проверки полученной геометрии антенны рассмотрим график изменения коэффициента отражения, полученного в ходе моделирования антенной системы после ее оптимизации (рис. 7).

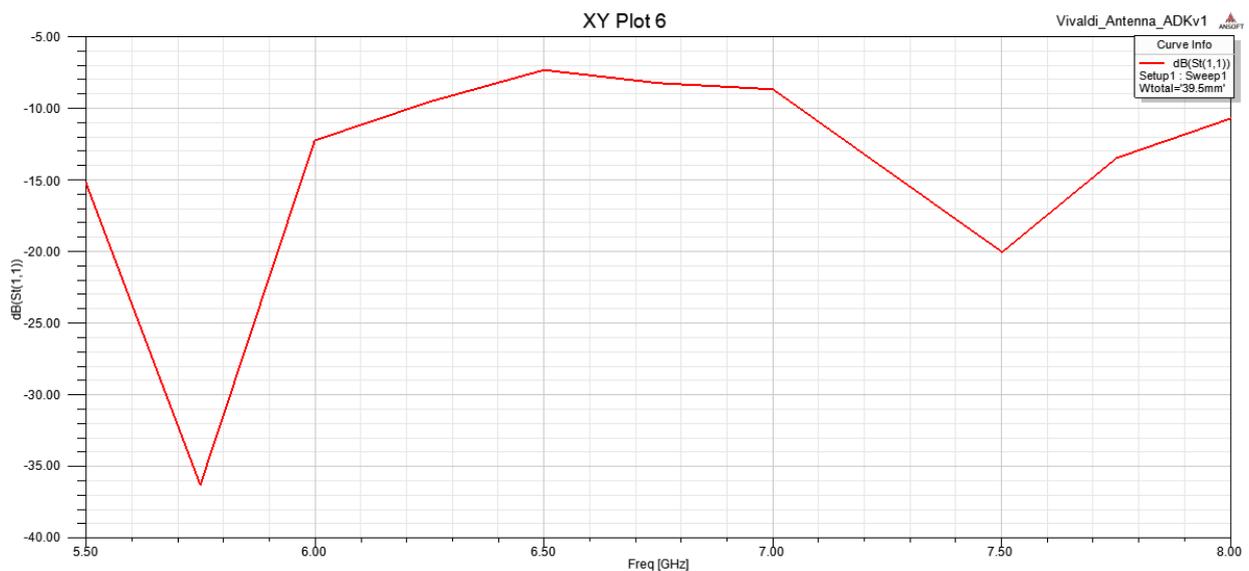


Рис. 7. График коэффициента отражения в результате моделирования оптимизированной антенны

Различия в графиках рис. 5 и 7 вызваны изменением активного и реактивного сопротивлений, вызванных изменением геометрических размеров антенны.

Как следует из анализа графика изменения коэффициента отражения, минимумы значений достигаются в двух точках на частотах в 5,6; 7,5 ГГц. Указанные частоты лежат в области желаемых, так как действуют отрицательно на БРЭА подавляемых БПЛА.

Для построения диаграммы направленности используются формулы:

– в плоскости  $H$  ( $\varphi = 0$ ):

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \operatorname{ctg} \xi k_0 d)^2}} \cdot \left( \frac{\sin(0,5 k_0 a \sin \theta)}{0,5 k_0 a \sin \theta} \right);$$

– в плоскости  $E$  ( $\varphi = \pi/2$ ):

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \xi \cos \theta \cos(0,5 k_0 b \sin \theta)}{\sqrt{\xi^2 + (\epsilon \mu \cos \theta \operatorname{ctg} \xi k_0 d)^2} \left( 1 - \left( k_0 \frac{b}{\pi} \sin \theta \right)^2 \right)},$$

где  $d$  – толщина;  $a$  – ширина;  $b$  – длина антенны;  $k = \beta/\epsilon\mu$ ;  $\beta$  – постоянная распространения;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\mu$  – магнитная проницаемость;

$$\xi = \sqrt{\epsilon\mu - \sin^2 \theta}.$$

Коэффициент направленного действия определен выражением

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}},$$

где  $U$  – интенсивность излучения;  $P_{rad}$  – мощность излучения.

Мощность интенсивного излучения

$$U(\theta, \varphi) = \frac{|E|^2}{\eta_0} r^2,$$

где  $|E|$  – модуль  $E$ -поля;  $r$  – расстояние от антенны;  $\eta$  – импеданс свободного пространства, равный 376,7 дБ.

В ходе проведения моделирования диаграмм направленности получена 3D-визуализация диаграммы направленности (рис. 8), а также 2D-визуализация (рис. 9).

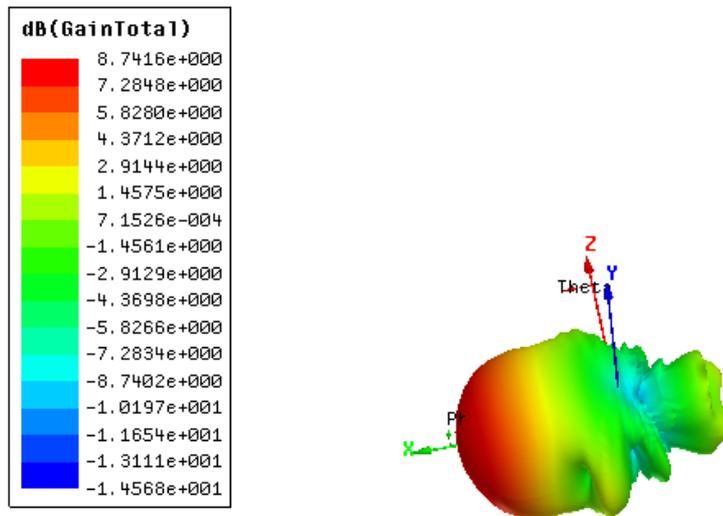


Рис. 8. Диаграмма направленности в трехмерном пространстве

Согласно приведенным результатам ширина диаграммы направленности достаточна для поставленной цели, максимальное значение усиления в области, помеченной красным цветом, составляет 8,7 дБ.

2D-диаграмма направленности выглядит следующим образом (рис. 9).

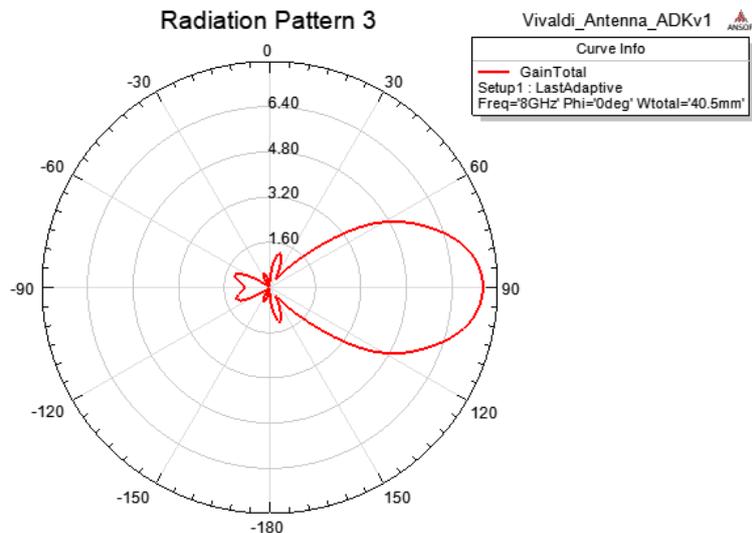


Рис. 9. Диаграмма направленности в двумерном пространстве

Из графика полярных координат следует, что ширина диаграммы направленности на уровне половины мощности соответствует  $60^\circ$ , достаточно широкая. Уровень боковых лепестков очень низкий, не более 13 % [15, 16].

Рассмотрим график поляризации в  $E$  и  $H$  области (рис. 10).

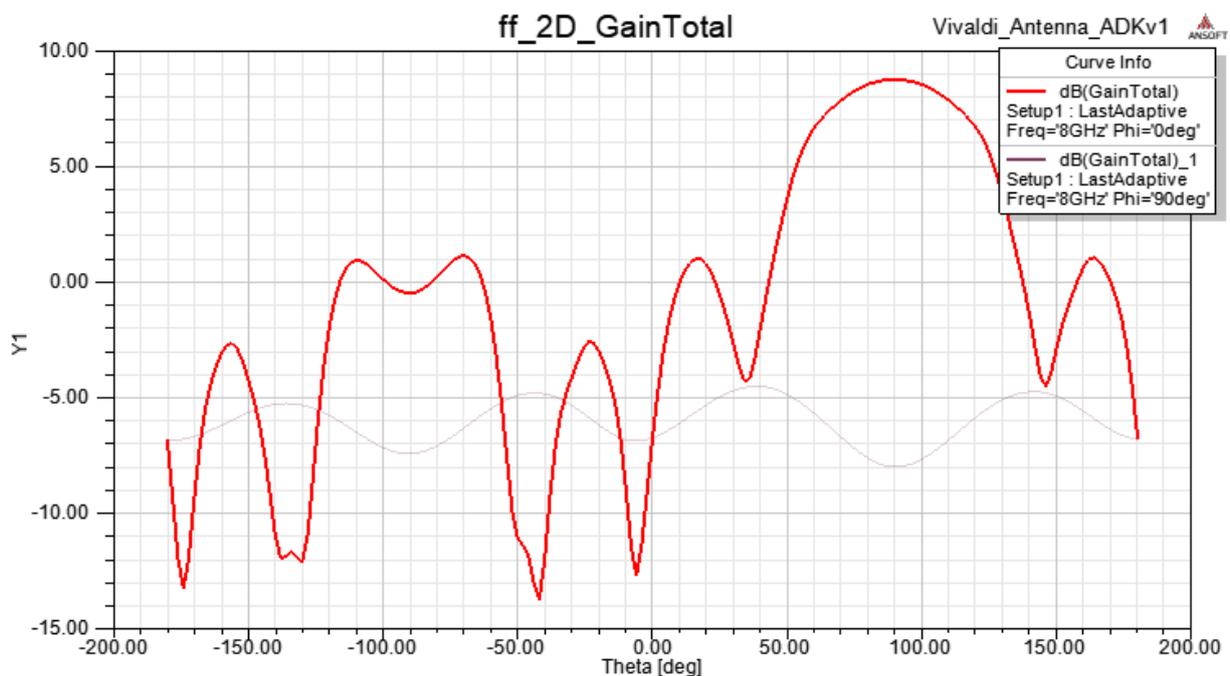


Рис. 10. График поляризации в  $E$  области

График повторяет диаграмму направленности в полярной системе координат, но для удобства представлен в прямоугольной. Коэффициент усиления главного лепестка – 8,7 дБ.

Подобный график поляризации в  $H$ -области дан на рис. 11. Анализ графика рис. 11 указывает на удовлетворительные характеристики проектируемой антенны.

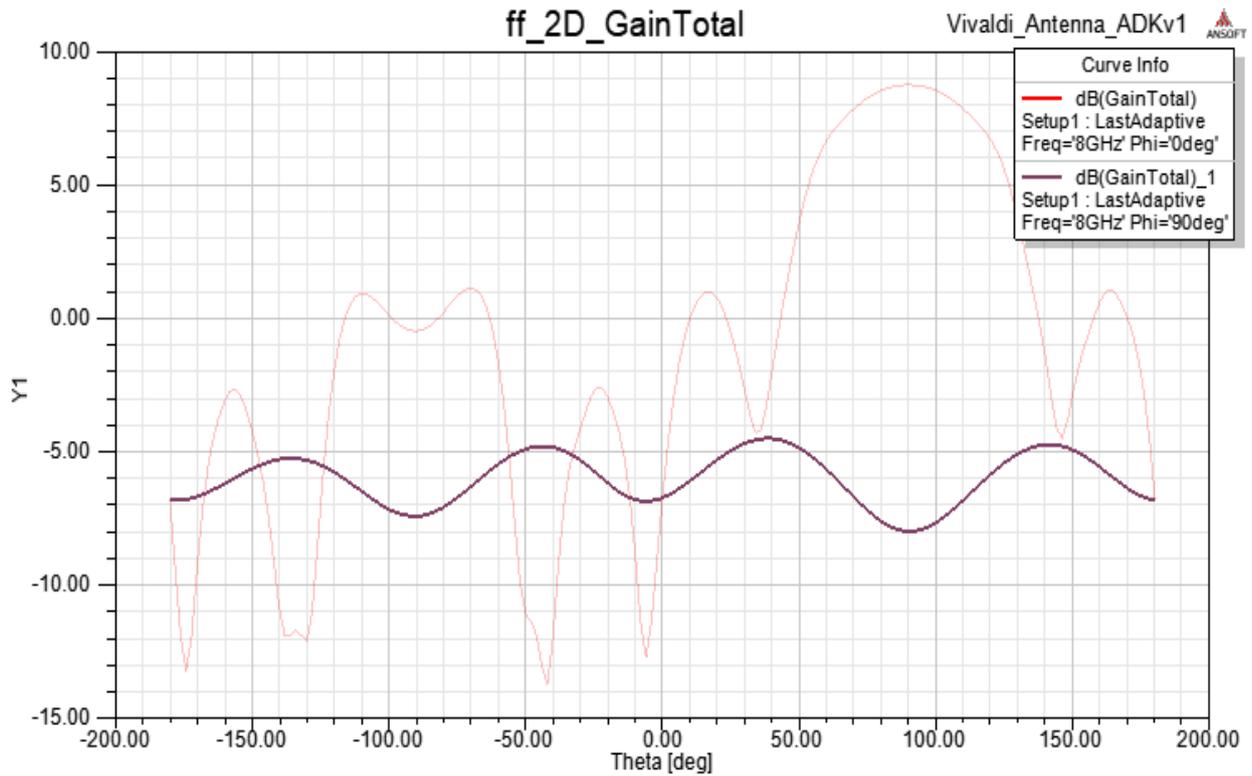


Рис. 11. График поляризации в  $H$ -области

В ходе моделирования антенной системы получена диаграмма Смита (рис. 12).

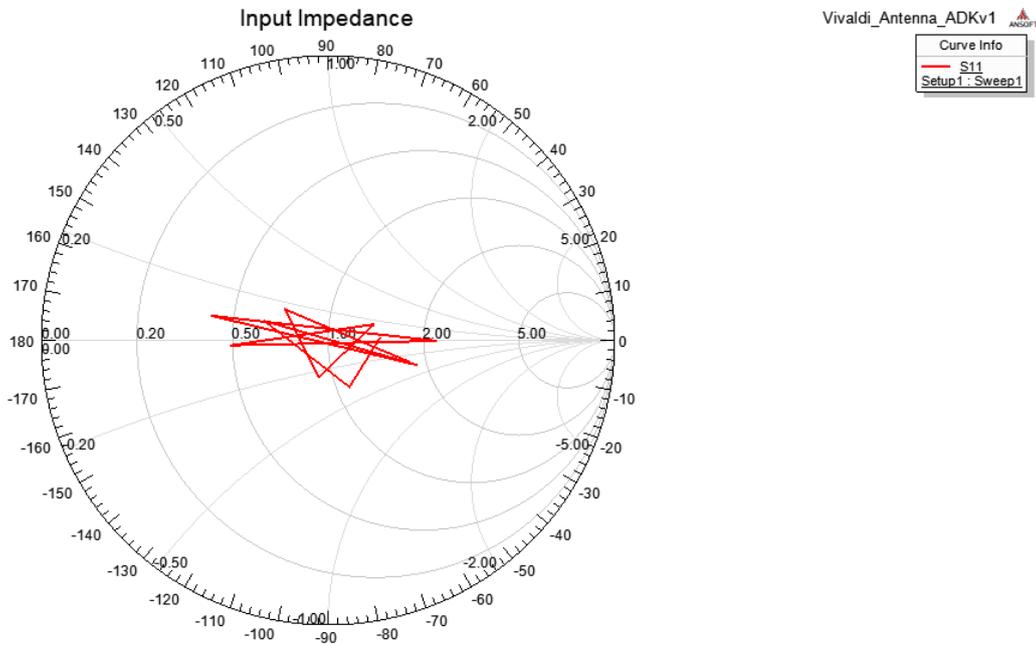


Рис. 12. Диаграмма Смита

Анализ диаграммы Смита подтверждает успешность проведенного исследования.

Далее проведем моделирование излучения антенны как в  $E$ -поле (рис. 13), так и в  $A$ -составляющей (рис. 14).

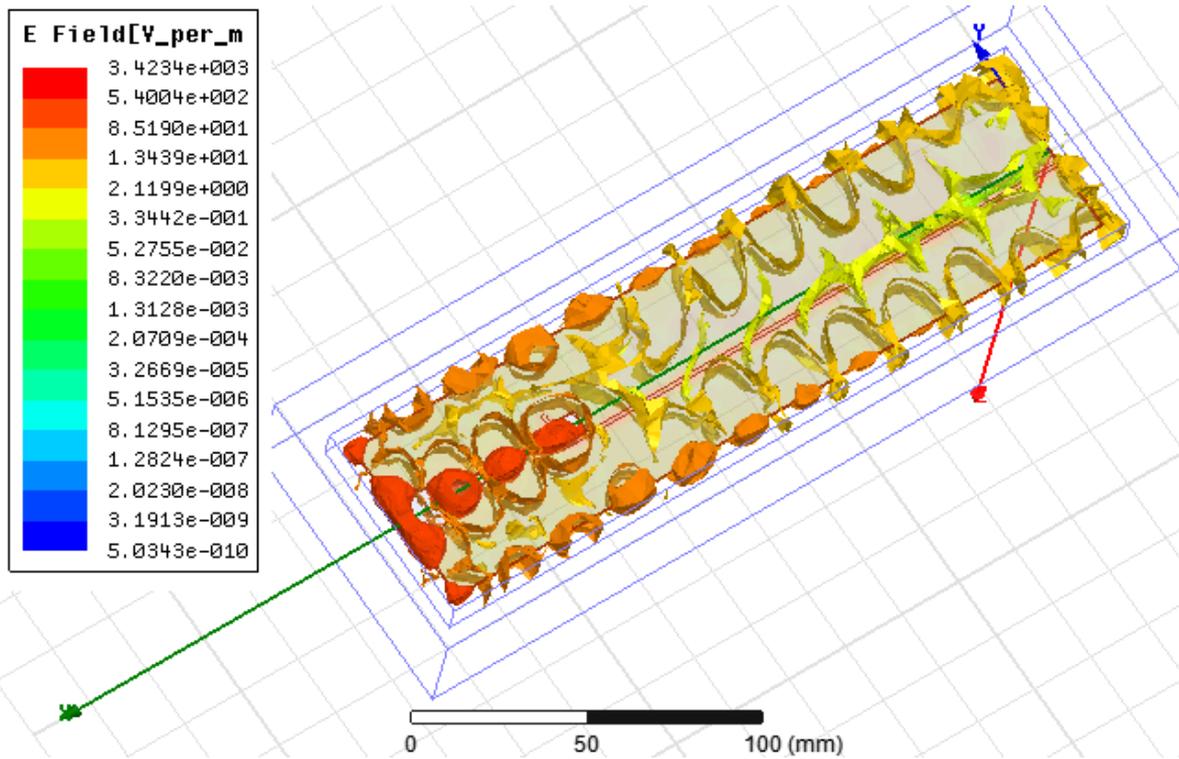


Рис. 13. Излучение  $E$ -поля антенны

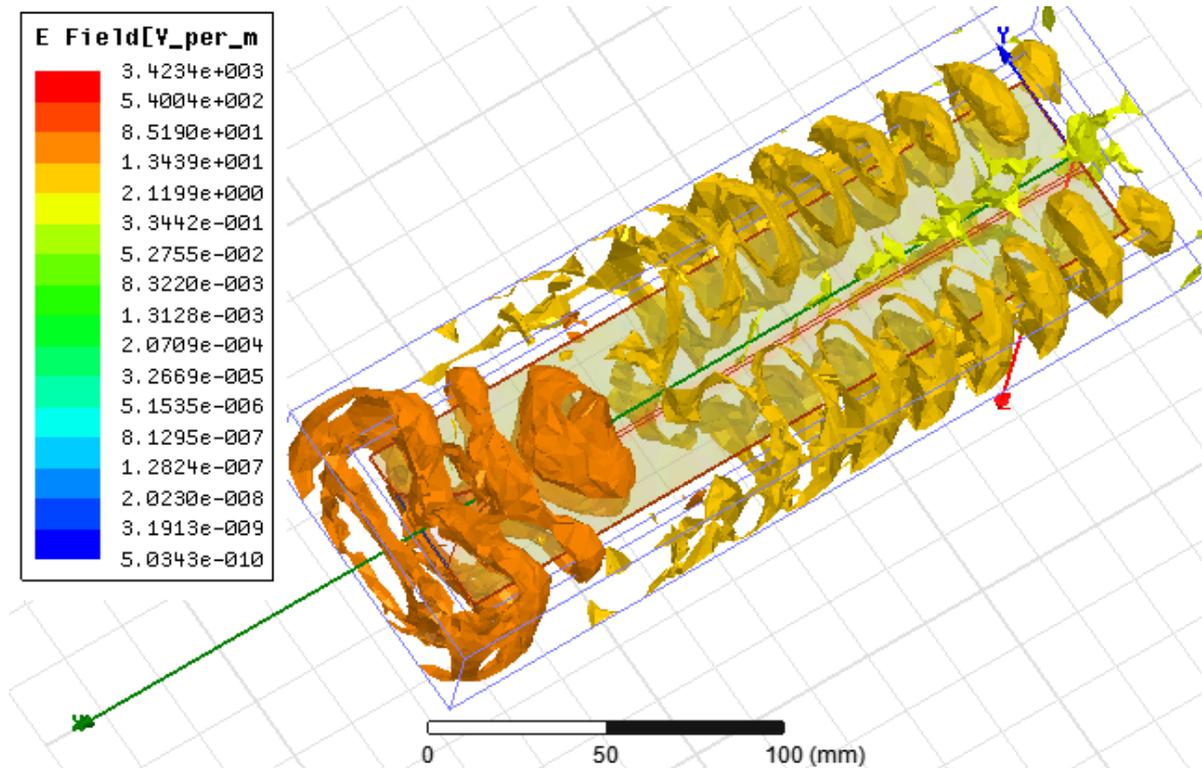
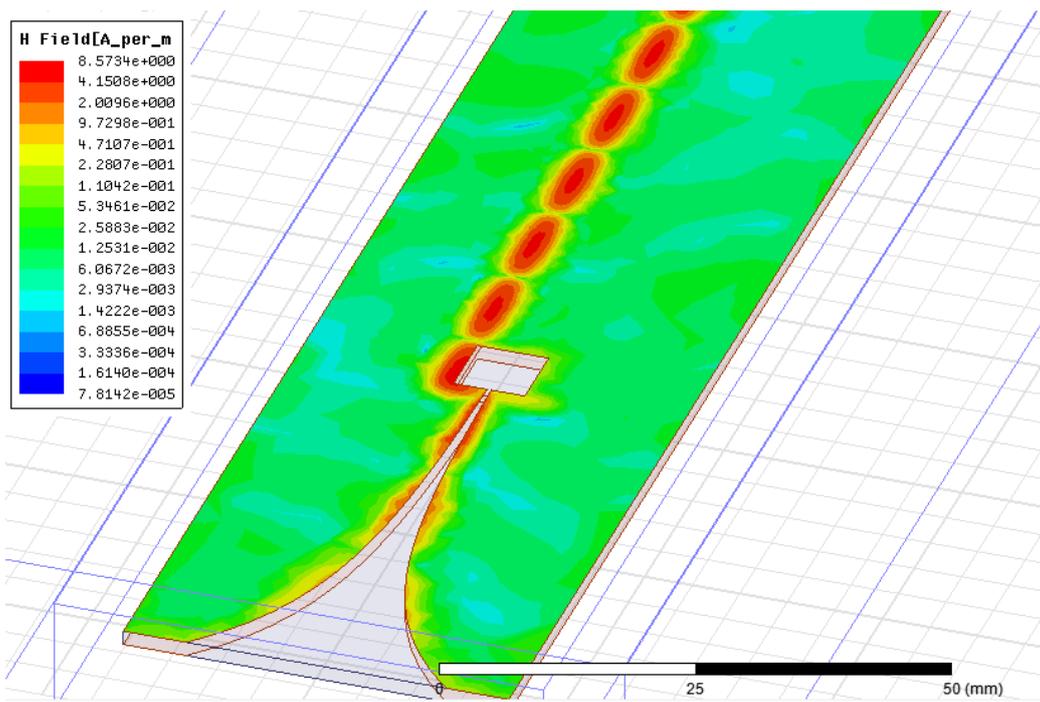


Рис. 14. Излучение  $H$ -поля антенны

Как показано на представленном моделировании излучения  $E$ -поля, видно сильное излучение электромагнитного поля, отмеченного на приведенном скриншоте оранжевым и желтым цветами.

В излучении  $H$ -поля наблюдается похожая картина (рис. 14).

Рис. 14. Излучение  $H$ -поля антенны

Анализ рис. 14 дает подтверждение сделанным выводам.

### Заключение

Используя метод конечных элементов, удалось произвести анализ результатов, расчетов и моделирования антенны Вивальди, генетический алгоритм оптимизации полученной антенны Вивальди (за счет изменения геометрических размеров), добиться приемлемых характеристик излучателя. Исходя из практического опыта, как правило, достаточно упрощенной идеализированной модели, учитывающей взаимное влияние электронных радиоэлементов, характеристик фильтров и катушек.

На основании полученных результатов можно судить об актуальности использования подобных типов антенн в излучении сверхширокополосных систем. С инженерной точки зрения также вызывает интерес построение на основе антенны Вивальди фазированной антенной решетки, излучающей в указанном диапазоне [17–19].

### Список литературы

1. Патент 2700206 Российская Федерация, В64С 99/00(2019.09) Н04К 3/00(2019.09) F41Н 13/00(2019.09). Способ двухфакторного функционального подавления беспилотного летательного аппарата / Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. № 2018114720 ; заявл. 20.04.2018 ; опубл. 13.09.2019, Бюл. № 26.
2. Патент 2700207 Российская Федерация, МПК В64С 99/00(2019.09) Н04К 3/00(2019.09) F41Н 13/00(2019.09) F42В 12/36(2019.09). Способ функционального подавления беспилотного летательного аппарата / Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. № 2018142886 ; заявл. 05.12.2018 ; опубл. 13.09.2019, Бюл. № 26.
3. Gross F. G. *Frontiers in Antennas : Next Generation Design & Engineering*. The McGraw-Hill Companies, 2011. 526 p.
4. Бобрешов А. М., Мещеряков И. И., Усков Г. К. Моделирование генератора сверхкоротких импульсов совместно с антенной Вивальди // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Системный анализ и информационные технологии*. 2014. № 3. С. 81–85.
5. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / ред. Д. И. Воскресенский. М. : Радиотехника, 2012. 744 с.
6. Мительман Ю. Е. *Проектирование антенных систем в ansoft hfss*. Екатеринбург, 2012.
7. Чернышев С. Л., Виленский А. Р. Разработка излучателей для сверхкороткоимпульсных антенных решеток // *Радиолокация. Навигация. Связь : докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2011*. С. 2159–2170.

8. Согомоян К. Э. Воздействие ультракоротких импульсов электромагнитного излучения на беспилотные летательные аппараты // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 2. С. 315–317.
9. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Способы и средства противодействия БПЛА // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 131–138.
10. Гришко А. К. Оптимальное управление частотным ресурсом радиотехнических систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 57. С. 21–28. doi: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28.
11. Гришко А. К., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа // Инженерный вестник Дона. 2015. Т. 35, № 2–1. С. 16.
12. Andreev P. G., Yakimov A. N., Yurkov N. K. [et al.]. Methods of Calculating the Strength of Electric Component of Electromagnetic Field in Difficult Conditions // 2016 12th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016) (Saratov, Russia, September 22–23, 2016). Saratov, 2016. Vol. 1. P. 1–7. doi: 10.1109/APEDE.2016.7878895.
13. Гришко А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2015. № 3. С. 85–90.
14. Гришко А. К., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Управление электромагнитной устойчивостью радиоэлектронных систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 4. С. 49–58.
15. Grishko A. K. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict. 2016 13th International Scientifictechnical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2016) (Novosibirsk, Russia, October 03–06, 2016). Novosibirsk, 2016. P. 107–111. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
16. Grishko A., Goryachev N., Kocheharov I. [et al.]. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model // 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET) (Lviv–Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2016). Lviv–Slavsko, 2016. P. 214–218. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
17. Grishko A., Goryachev N., Kocheharov I., Yurkov N. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). Moscow, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
18. Grigor'ev A., Grishko A., Goryachev N. [et al.]. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). Moscow, 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.
19. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, № 23. P. 43842–43845.

### References

1. Patent 2700206 Russian Federation, B64C 99/00(2019.09) H04K 3/00(2019.09) F41H 13/00(2019.09). *Sposob dvukhfaktornogo funktsional'nogo podavleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata = Method of two-factor functional suppression of an unmanned aerial vehicle*. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kuzina E.A. No. 2018114720; appl. 20.04.2018; publ. 13.09.2019, bull. No. 26. (In Russ.)
2. Patent 2700207 Russian Federation, MPK B64C 99/00(2019.09) H04K 3/00(2019.09) F41H 13/00(2019.09) F42B 12/36(2019.09). *Sposob funktsional'nogo podavleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata = Method of functional suppression of an unmanned aerial vehicle*. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kuzina E.A. No. 2018142886; appl. 05.12.2018; publ. 13.09.2019, bull. No. 26. (In Russ.)
3. Gross F.G. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*. The McGraw-Hill Companies, 2011:526.
4. Bobreshov A.M., Meshcheryakov I.I., Uskov G.K. Simulation of an ultrashort pulse generator in conjunction with a Vivaldi antenna. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University. Ser.: System Analysis and Information technologies*. 2014;3:81–85. (In Russ.)
5. Voskresenskiy D. I. (ed.) *Ustroystva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok = Microwave devices and antennas. Design of phased array antennas*. Moscow: Radiotekhnika, 2012:744. (In Russ.)
6. Mitel'man Yu.E. *Proektirovanie antennykh sistem v ansoft hfss = Design of antenna systems in ansoft hfss*. Ekaterinburg, 2012. (In Russ.)

7. Chernyshev S.L., Vilenskiy A.R. Development of emitters for ultrashort pulse antenna arrays. *Radiolokatsiya. Navigatsiya. Svyaz': dokl. XVII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* = Radar location. Navigation. Connection: reports of XVII International Scientific and Technical Conference. Voronezh, 2011:2159–2170. (In Russ.)
8. Sogomonyan K.E. Impact of ultrashort electromagnetic radiation pulses on unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;2:315–317. (In Russ.)
9. Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Methods and means of countering UAVs. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;4:131–138. (In Russ.)
10. Grishko A.K. Optimal management of the frequency resource of radio engineering systems based on the probabilistic analysis of the dynamics of the information conflict. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2016;57:21–28. (In Russ.). doi: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28.
11. Grishko A.K., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Analysis of mathematical models for calculating electroacoustic fields and the range of radar systems by sequential analysis. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2015;35(2–1):16. (In Russ.)
12. Andreev P.G., Yakimov A.N., Yurkov N.K. [et al.]. Methods of Calculating the Strength of Electric Component of Electromagnetic Field in Difficult Conditions. *2016 12th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016) (Saratov, Russia, September 22–23, 2016)*. Saratov, 2016;1:1–7. doi: 10.1109/APEDE.2016.7878895.
13. Grishko A.K. Optimization of the placement of RES elements based on a multi-level geoinformation model. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Samara State Technical University. Ser.: Technical sciences*. 2015;3:85–90. (In Russ.)
14. Grishko A.K., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. Control of electromagnetic stability of radio-electronic systems based on probabilistic analysis of information conflict dynamics. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2016;4:49–58. (In Russ.)
15. Grishko A.K. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict. *2016 13th International Scientifictechnical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2016) (Novosibirsk, Russia, October 03–06, 2016)*. Novosibirsk, 2016:107–111. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
16. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I. [et al.]. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model. *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET) (Lviv–Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2016)*. Lviv–Slavsko, 2016:214–218. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
17. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I., Yurkov N. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016)*. Moscow, 2016:1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
18. Grigor'ev A., Grishko A., Goryachev N. [et al.]. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016)*. Moscow, 2016:1–5. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.
19. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10(23):43842–43845.

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Антон Иванович Мельничук

инженер группы обслуживания и ремонта  
бортовой контрольно-записывающей аппаратуры,  
Учебная авиационная база  
Краснодарского высшего военного  
авиационного училища летчиков МО РФ  
(Россия, Саратовская область,  
г. Ртищево, ул. Котовского, 1/1)  
E-mail: pelmenio@mail.ru

#### Anton I. Mel'nichuk

Engineer of the service and repair group  
of on-board recording equipment training,  
Aviation Base of the Krasnodar Higher Military  
Aviation School of Pilots  
of Russian Ministry of Defense  
(1/1 Kotovsky street, Rtishchevo,  
Saratov Region, Russia)

**Николай Владимирович Горячев**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ra4foc@yandex.ru

**Николай Кондратьевич Юрков**

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
заведующий кафедрой конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

**Nikolay V. Goryachev**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of sub-department  
of radio equipment design  
and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Nikolay K. Yurkov**

Doctor of technical sciences, professor,  
the honoured worker of science  
of the Russian Federation,  
head of sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)