

УДК 621.317.729.2:629.7.066

DOI: 10.53297/18293336-2025.2-117

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕННЫ CLOVERLEAF ДЛЯ FPV-ДРОНОВ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Л.Х. Хачатрян, В.А. Восканян

Национальный политехнический университет Армении

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся все более распространенными благодаря их широкому спектру применения. Первоначально разработанные для военных нужд, они постепенно нашли свое место и в гражданских сферах, таких как аэрофотосъемка, видеосъемка, доставка товаров, сельское хозяйство и мониторинг окружающей среды. БПЛА обладают высокой эффективностью при выполнении разведывательных задач и обеспечении наблюдения.

Разработана антенна Cloverleaf. Антенна моделирована, и расчеты ее характеристик проведены с помощью одной из самых мощных современных программ электродинамического моделирования - FEKO, которая представляет собой новый подход к проектированию трехмерных сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств. Приведены визуализированные результаты Cloverleaf, которые выведены в виде графиков.

Предложенная методика дает возможность варьировать входными данными, производить расчет и проектирование антенн на заданной частоте. Результаты расчетов выведены в виде графиков. Представлены диаграммы направленности (ДН) указанной антенны в полярной системе координат в плоскостях E и H . Вычислена величина главного лепестка ДН по половинной мощности. Приведены зависимости коэффициента стоячей волны и коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот $1,2...1,6$ ГГц.

Показана конструкция реальной антенны. Представлены результаты сравнения значений зависимости коэффициента стоячей волны от частоты и диаграммы направленности реальной и моделированной антенн. Параметры реальной антенны измерены с помощью векторного анализатора цепей NI PXIe-1062Q и СВЧ анализатора сигналов Keysight N9918A. Результаты экспериментальных исследований показали их соответствие с результатами моделирования. Разработанная антенна работает в рабочем диапазоне частот $1,2...1,6$ ГГц.

Ключевые слова: антенна Cloverleaf, диаграмма направленности, коэффициент стоячей волны, коэффициент усиления, векторный анализатор цепей NI PXIe-1062Q, СВЧ анализатор сигналов Keysight N9918A, программный пакет FEKO.

Введение. Современные технологии стремительно развиваются, расширяя функциональные возможности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Благодаря этому они становятся все более востребованными, находя применение в различных отраслях и выполняя широкий спектр задач, которые раньше казались технически невозможными.

В последние годы БПЛА, особенно FPV (First Person View) - дроны, обрели широкую популярность благодаря своим возможностям в областях научных исследований, видеонаблюдения и аэрофотосъемки [1]. Для реализации этих возможностей необходима надёжная система передачи данных, в которой антенны играют ключевую роль. Они обеспечивают стабильную связь между дроном и управляющей системой. Среди множества антенн, используемых в FPV-дронах, антенна Cloverleaf является одной из наиболее широко применяемых. Это всенаправленная антенна с круговой поляризацией, обладающая высокой устойчивостью к многолучевым помехам и способная обеспечить стабильную передачу сигнала даже в условиях сложного рельефа и наличия препятствий [2,3].

Цель работы и методы реализации. Целью работы является: спроектировать в программной среде FEKO антенну Cloverleaf, предназначенную для использования в FPV-дроне в диапазоне частот 1,2...1,6 ГГц; произвести экспериментальные измерения и сравнить основные параметры спроектированной и реальной антенн.

Антенна Cloverleaf — это антенна с круговой поляризацией. Круговая поляризация играет важную роль в FPV-дронах. Их конструкция обеспечивает устойчивость к многолучевым помехам и стабильную связь даже при изменении ориентации дрона в полёте. Антенна Cloverleaf широко используется в системах видеопередачи и приема. Эта антенна имеет простую конструкцию: состоит из трех лепестков, каждый из которых имеет длину четверти волны. Такая геометрия обеспечивает эффективную работу антенны даже при изменении ориентации дрона в полёте, способствуя устойчивой и надёжной связи.

Антенна Cloverleaf была спроектирована с использованием программного обеспечения Feко [4,5]. Она предназначена для работы в диапазоне частот 1,2...1,6 ГГц. Для моделирования антенны в разделе **Construction** программы Feко вводятся данные, которые служат основой для создания модели: длина отрезков: $a = b = \lambda/4$, длина дуги: $\ell = \lambda/2$, расстояние от точки питания до каждой точки дуги: $d = \lambda/4$, угол подъема лепестка: $\delta = 45^\circ$, скорость света: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, длина волны: $\lambda = c/f$, диэлектрическая проницаемость:

$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ и магнитная проницаемость: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ в вакууме (рис. 1).

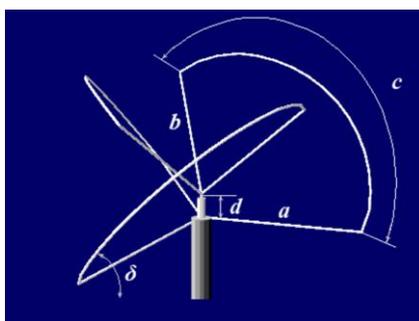


Рис. 1. Вид антенны Cloverleaf

Расчеты параметров антенны производятся с использованием команды **Feko Solver**, а проверка корректности проектирования антенны выполняется с помощью команды **Cem Validate**. Результаты моделирования отображаются в окне **PostFeko**.

Результаты исследования. На основе расчетов моделированной в программной среде **Feko** антенны Cloverleaf для FPV-дрона (рис. 2) построена диаграмма направленности (ДН) антенны, произведен расчет коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и выбран тип поляризации.

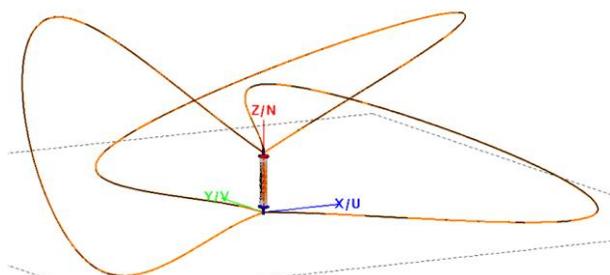


Рис.2. Вид моделированной антенны в программной среде FEKO

На рис. 3 и 4 представлены результаты расчёта моделированной антенны в виде графиков для диапазона частот 1,2...1,6 ГГц: нормированная диаграмма направленности в плоскости Е (в плоскости Н – ДН антенны имеет вид окружности), (рис. 3), коэффициент стоячей волны по напряжению от частоты (рис. 4).

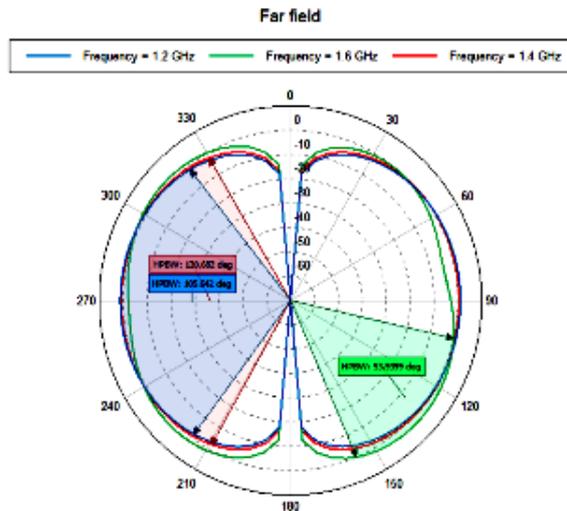


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны в плоскости E

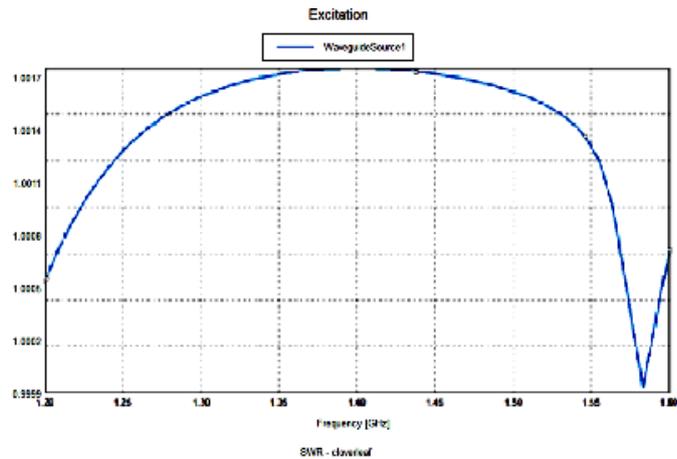


Рис.4. Коэффициент стоячей волны (КСВ) в диапазоне частот $f = 1,2 \dots 1,6$ ГГц

Величина главного лепестка ДН по половинной мощности в плоскости E для частоты $f = 1,2$ ГГц равна $2\theta_{0,5} = 105.642^\circ$, для частоты $f = 1,4$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 120.682^\circ$, для частоты $f = 1,6$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 53.9399^\circ$. Коэффициент стоячей волны в диапазоне частот $f = 1,2 \dots 1,6$ ГГц не превышает 2 ($КСВ < 2$).

На рис. 5 и 6 приведён тип поляризации антенны. Из представленных изображений можно сделать вывод, то антенна обладает большей LHC-поляризацией по сравнению с RHC-поляризацией.

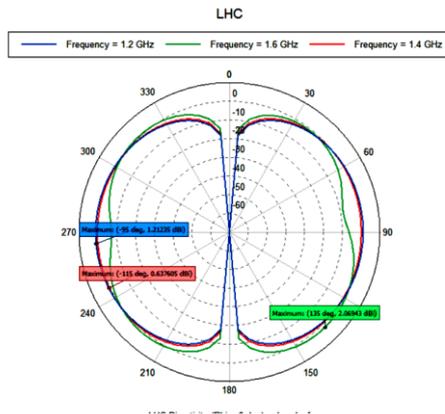


Рис. 5. График поляризации антенны против часовой стрелки (LHC)

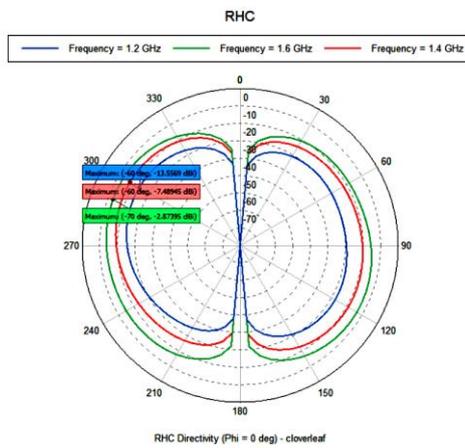


Рис. 6. График поляризации антенны по направлению часовой стрелки (RHC)

Измерение параметров реальной антенны Cloverleaf с использованием векторного анализатора цепей NI PXIe-1062Q [6]. На основе сопоставления реальной модели антенны с результатами моделирования в Feeko были проведены измерения её параметров с использованием векторного анализатора цепей NI PXIe-1062Q.

Реальная модель антенны Cloverleaf приведена на рис.7.



Рис.7. Реальная модель антенны

Измерения ДН антенны приводились в лаборатории "Систем связи" Национальных инженерных лабораторий Армении (ANEL) Национального политехнического университета Армении в зоне безэховой камеры. Эксперимент проводился на частоте 1,2 ГГц. Измеряемая антенна была установлена на треноге, а в дальней зоне размещена направленная передающая антенна. Система измерения ДН в дальней зоне представлена на рис.8.

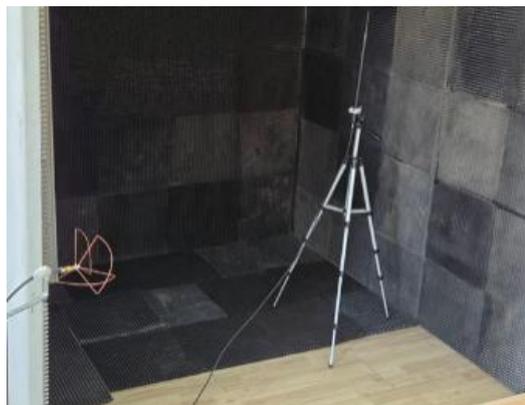


Рис.8. Система измерения ДН

Измерения ДН антенны были проведены в двух плоскостях: Н и Е (рис.9 и 10).

Диаграммы направленности, полученные в результате измерений реальной модели антенны, представлены на рис.9.

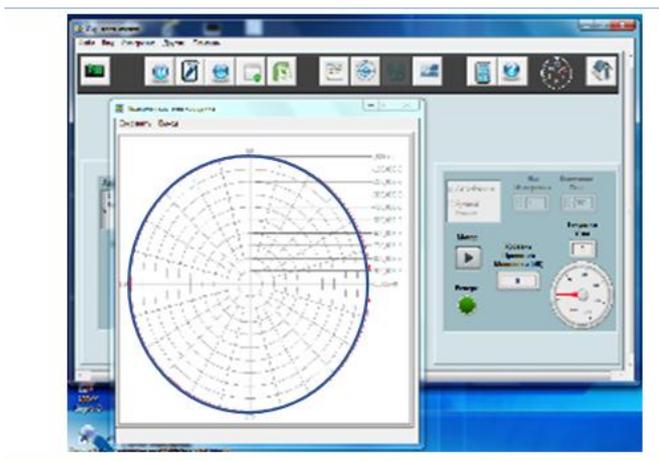


Рис.9. Диаграмма направленности антенны в плоскости Н

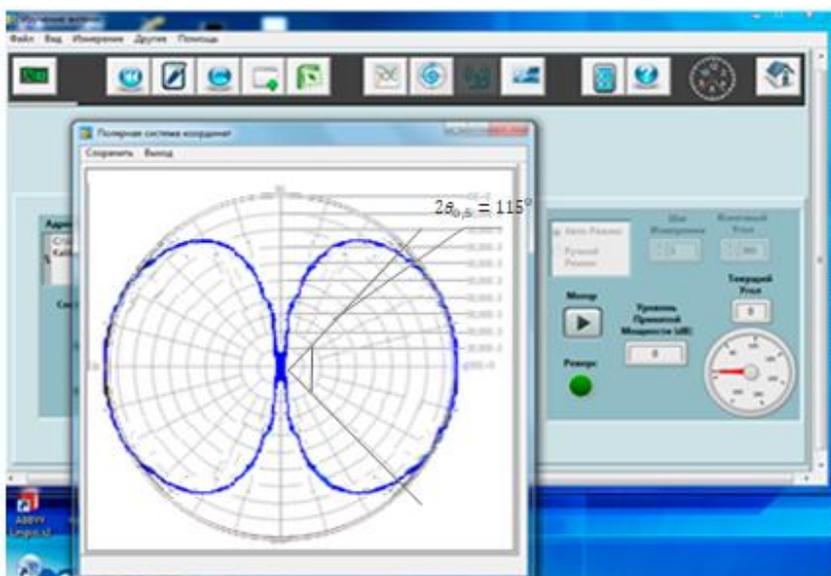


Рис.10. Диаграмма направленности антенны в плоскости Е

Измерение коэффициента стоячей волны. Для измерения коэффициента стоячей волны антенны был использован СВЧ анализатор сигналов Keysight N9918A [7].

Зависимость КСВ от частоты реальной антенны представлена на рис.11. В рабочем диапазоне частот от $f = 1,18 \dots 1,33$ ГГц КСВ составляет менее 2, что свидетельствует о согласовании антенны с системой передачи.



Рис. 11. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты реальной антенны

Заключение

1. Моделирована антенна Cloverleaf в программной среде Feko в диапазоне частот $f = 1,2 \dots 1,6$ ГГц.
2. Для моделированной антенны получены следующие параметры: в плоскости E для частоты $f = 1,2$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 105,642^\circ$, для частоты $f = 1,4$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 120,682^\circ$, для частоты $f = 1,6$ ГГц - $2\theta_{0,5} = 53,9399^\circ$.
3. Коэффициент усиления (КУ) антенны для частоты $f = 1,2$ ГГц – $KU = 1,28991$ дБ, для $f = 1,4$ ГГц - $KU = 0,852359$ дБ, для $f = 1,6$ ГГц - $KU = 3,047$ дБ.
4. Коэффициент стоячей волны в диапазоне частот $f = 1,2 \dots 1,6$ ГГц не превышает 2 ($KCV < 2$).
5. В лаборатории «Систем связи» Национальных инженерных лабораторий Армении «ANEL» Национального политехнического университета Армении было проведено измерение диаграммы направленности реальной антенны с помощью векторного анализатора цепей NI PXIe-1062Q.
6. Измерение стоячей волны реальной антенны было выполнено с использованием СВЧ анализатора сигналов Keysight N9918A.
7. Полученные результаты величины главного лепестка ДН по половинной мощности ($2\theta_{0,5}$), коэффициента стоячей волны антенны, спроектированной в программной среде Feko, и реальной модели совпадают.
8. Разработанная антенна может быть использована в системах связи гражданских и военных беспилотных летательных аппаратов, а также в рам-

ках лабораторных и научно-исследовательских работ по дисциплине "Антенны" в учебном процессе Национального политехнического университета Армении.

Литература

1. <https://www.ixbt.com/live/drones/fpv-drony-cto-eto-takoe-i-kak-oni-izmenyayut-mir-videosemki-iz-vozduha.html>
2. <https://oscarliang.com/best-fpv-antenna/>
3. <https://www.antenna-theory.com/antennas/cloverleaf.php>
4. **Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А.** Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. – М.: СОЛОН-Пресс, 2018.- 412с.
5. https://help.altair.com/feko/pdf/Altair_Feko_User_Guide.pdf
6. <https://www.ni.com/docs/enUS/bundle/pxie1062qseri/resource/371843d.pdf?srsId=AfmBOorm-yZuj-8Mo30XQVmxUbiexJlfCkbjpwkfooQdWHPOhiVaCMVk>
7. <https://ntc-spektr.ru/product/analizatory/analizatory-spektra/Keysight-n9918a-analizator-spektra/>

*Поступила в редакцию 25.09.2025.
Принята к опубликованию 29.01.2026.*

ԿԱՊԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ FPV ԴՐՈՆՆԵՐԻ CLOVERLEAF ԱՆՏԵՆԱՅԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ

Լ. Խ. Խաչատրյան, Վ.Ա. Ոսկանյան

Անօդաչու թռչող սարքերը (ԱԹՍ) մեծ տարածում են ստանում՝ իրենց լայն կիրառման շնորհիվ: Սկզբում մշակված լինելով ռազմական նպատակներով՝ դրանք աստիճանաբար իրենց տեղն են գտել քաղաքացիական ոլորտներում, ինչպիսիք են օդային լուսանկարչությունը, տեսագրությունը, ապրանքների մատակարարումը, գյուղատնտեսությունը և շրջակա միջավայրի մոնիթորինգը: ԱԹՍ-ները բարձր արդյունավետություն ունեն հետախուզական առաջադրանքներ կատարելու և հսկողություն ապահովելու դեպքերում:

Մշակվել է Cloverleaf անտենա: Անտենան մոդելավորվել է, և դրա բնութագրերը հաշվարկվել են ժամանակակից ամենահզոր էլեկտրադինամիկայի մոդելավորման ծրագրերից մեկի՝ FEKO-ի միջոցով, որը եռաչափ միկրոալիքային սարքերի նախագծման նոր մոտեցում է: Ներկայացվում են CLOVERLEAF անտենաների ակնադիտարկման արդյունքները, որոնք ներկայացված են գրաֆիկների տեսքով:

Առաջարկված մեթոդը հնարավորություն է տալիս փոփոխել մուտքային տվյալները, հաշվարկել և նախագծել անտենաները տվյալ հաճախականությամբ: Հաշվարկման արդյունքները ներկայացված են գրաֆիկների տեսքով: Նշված անտենայի ուղղվածության դիագրամները (ՈՒԴ) ներկայացված են բևեռային կորդինատային համակարգում՝ E և H հարթություններում: Հաշվարկվել է ՈՒԴ-ի գլխավոր թերթիկի լայնությունը ըստ կես հզորության: Բերված են կանգնած ալիքի և ուժեղացման

գործակցի կախվածությունները 1,2...1,6 ԳՀg աշխատանքային հաճախականության տիրույթում:

Ներկայացված է իրական անտենայի կառուցվածքը: Բերված են իրական և մոդելավորված անտենաների ուղղվածության դիագրամների և կանգուն ալիքի գործակցի հաճախականային կախվածության համեմատական արդյունքները: Իրական անտենայի պարամետրերը չափվել են NI PXIe-1062Q վեկտորային շղթայի անալիզատորի և ԳԲՀ ազդանշանների Keysight N9918A անալիզատորի միջոցով: Ներկայացված են փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները և դրանց համապատասխանության հաստատումը մոդելավորման արդյունքներին: Նախագծված անտենան աշխատում է 1,2...1,6 ԳՀg հաճախականային տիրույթում:

Առանցքային բաներ. Cloverleaf անտենա, ուղղվածության դիագրամ, կանգուն ալիքի գործակց, NI PXIe-1062Q շղթաների վեկտորային անալիզատոր, ԳԲՀ ազդանշանների Keysight N9918A անալիզատոր, FEKO ծրագրային փաթեթ:

DESIGNING A CLOVERLEAF ANTENNA FOR A FPV DRONE COMMUNICATION SYSTEMS

L.Kh. Khachatryan, V.A. Voskanyan

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are becoming increasingly widespread due to their broad range of applications. Initially developed for military purposes, they have gradually found their place in civilian sectors such as aerial photography, videography, goods delivery, agriculture, and environmental monitoring. UAVs demonstrate high efficiency in performing reconnaissance tasks and providing surveillance.

A Cloverleaf antenna has been developed. The antenna is designed, and its characteristics are calculated using one of the most modern software for electromagnetic modeling, **FEKO**, which represents a new approach to the design of three-dimensional microwave (MW) devices. The visualized results of the Cloverleaf antenna are presented in the form of graphs.

The proposed method allows varying the input data, calculating and designing the antennae at a given frequency. The calculation results are displayed in the form of graphs. For the developed antenna, the radiation patterns in the polar system in E and H planes are presented. The value of the main lobe of the pattern at half-power is calculated. The dependencies of the voltage standing wave ratio (VSWR) and the gain in the frequency range of 1.2..1.6 GHz are provided.

The construction of the real antenna is shown. The results of comparisons between the values of dependency VSWR on the frequency and radiation patterns of the real and the designed antennae are introduced. The parameters of the developed antenna are measured using the NI PXIe-1062Q vector network analyzer and the Keysight N9918A microwave signal analyzer. The results of experimental studies have shown their compliance with the results of modeling. The developed antenna operates in the 1.2 ... 1.6 GHz frequency range.

Keywords: Cloverleaf antenna, pattern, voltage standing wave ratio, gain, vector network analyzer NI PXIe-1062Q, microwave signal analyzer Keysight N9918A, FEKO software package.