

Проектирование и технологическая оптимизация антенного элемента фазированной антенной решетки для малых БВС

И.М. Караванов, А.С. Шипунов, В.С. Витушкин, Н.С. Медвехв

ООО НПП «ПРИМА»

Аннотация: в статье изложен процесс разработки антенного элемента фазированной антенной решетки для БВС от технических требований до модели, подготовленной к производству. Произведен выбор типа антенны, топологии, материалов, конструкции. Учтены аспекты улучшения направленности, массогабаритных характеристик, технологичности и стоимости производства. Приведены рисунки моделей и результаты расчетов.

Ключевые слова: Беспилотное воздушное средство, спиральная антенна, бифилярная антенна, диаграмма направленности, поляризация, технологическая оптимизация

Введение

Беспилотная авиация на текущий момент является одной из самых активно развивающихся отраслей и требует более новых решений и технологий. Одним из критических элементов функционирования беспилотной авиации является связь, которая обеспечивает как управление, так и взаимодействие между беспилотными воздушными средствами (БВС). В беспроводной радиосвязи ключевым узлом является антенна, обеспечивающая прием и передачу радиосигналов между различными абонентами в пространстве [1]. От качества исполнения антенны зависит надежность и дальность связи.

Зарубежные решения являются достаточно простыми. Так, антенна системы связи O3 Air Unit от DJI, показанная на рисунке комплектуется сдвоенной всенаправленной линейной антенной (вероятно с вертикальной/горизонтальной поляризациями) под углом 45 градусов друг к другу внутри одного корпуса. O3 Air Unit с данной антенной позволяет достичь максимального радиуса действия системы до 10 км.



Рисунок 1. Антенна DJI O3 Air Unit

Решение рационально с точки зрения коммерциализации, но в сложной помеховой обстановке (большое количество БВС, воздействие от иных источников излучения) широкая диаграмма направленности антенны будет скорее отрицательным фактором – надежность связи будет обеспечиваться возможностями цифровой обработки, что явно негативно скажется на возможностях системы в целом.

В работе рассматривается вариант создания антенного элемента (АЭ), потенциально улучшающего характеристики системы связи за счет направленности (пространственной селекции), технологичного для серийного производства, и массогабаритными характеристиками, позволяющими применять на борту малых

БВС, в том числе в составе антенной решетки с электронным изменением направления луча [2].

Технические требования к АЭ и выбор варианта реализации

Общие технические требования, предъявляемые к АЭ, были сформированы как для удовлетворения потребностей рынка, так и для использования в проектируемой антенной решетке собственной системы связи для малого БВС. Предварительные расчеты показали, что для антенной решетки из 7 элементов с углом обзора в пределах 90 градусов и шагом в 30 градусов коэффициент усиления одного АЭ должен составлять не менее 7 дБ, ширина главного луча 80-90 градусов. Учитывая необходимость компактности и изучив основные размеры целевых БВС, примем, что антенная решетка должна представлять собой круг диаметром 85 мм – получаем размер АЭ не более 22 мм, при расстоянии между соседними элементами в 0,56 длины волн. Таким образом, сформированы следующие технические требования к АЭ:

- Диапазон рабочих частот на прием и передачу: 5600...5800 МГц;
- Ширина главного луча по азимуту и углу места: ± 45 градусов;
- Минимальный коэффициент усиления: не менее 7 дБ на прием и передачу;
- Коэффициент стоячей волны (КСВ) не более: 2;
- Габаритные размеры, не более: диаметр 22 мм, высота 20 мм.

Для обеспечения совместимости с другими системами связи и минимизации потерь от приема сигнала с антенн различной поляризации целесообразно использовать поляризацию круговую или эллиптическую с коэффициентом близким к 1 [3].

Для удовлетворения заданных технических требований необходимо выбрать тип антенны и технологию изготовления. Анализ существующих вариантов реализации АЭ показал, что подходящими являются два варианта: круглая микрополосковая патч-антенна и спиральная антенна.

Микрополосковая патч-антенна, с одной стороны, является топологически простой, быстроработаемой и легкодоступной с точки зрения существующих технологий. С другой стороны, в базовом варианте, узкополосность и необходимость нестандартной фидерной линии для формирования определенного типа поляризации делают данный вариант весьма трудоемким и сложно модифицируемым [4].

Для спиральной антенны требуемый диапазон частот и поляризация обеспечиваются без затруднений, с опцией дальнейшего расширения полосы. Недостатками спиральной антенны являются большие осевые размеры и сложность изготовления, но это решается доступными способами. Уменьшение осевых размеров и улучшение качества осевого излучения можно достичь за счет добавления еще одной спирали, получив бифилярную антенну. А повысить технологичность – за счет перехода к технологии изготовления многослойных печатных плат. Таким образом данный вариант оказывается наиболее предпочтительным для заданных требований.

Проектирование АЭ

Начальная модель бифилярного АЭ, показанная на рисунке 2, состоит из нескольких симметричных металлических дуг, расположенных на разных уровнях и соединяемых между собой переходными отверстиями, заполненными проводником. Под АЭ располагается отражатель диаметром 50 мм. Для уменьшения размеров использован материал с диэлектрической проницаемостью 6,15.

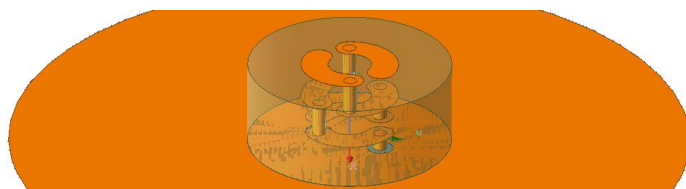


Рисунок 2. Начальная модель АЭ, материал с диэлектрической проницаемостью 6,15.

Расчет характеристик АЭ был произведен со следующими параметрами: высота 6,2 мм, диаметр 15 мм, диаметр отражателя 50 мм. Возбуждение осуществляется снизу с помощью дифференциального порта [5].

Результаты моделирования (рисунки 3 – 5) свидетельствуют, что модель удовлетворяет требованиям по КСВ в рабочем диапазоне, ширина основного лепестка диаграммы направленности составляет 76 градусов, максимальный коэффициент усиления равен 7,6 дБ. Поляризация в пределах основного лепестка – эллиптическая.

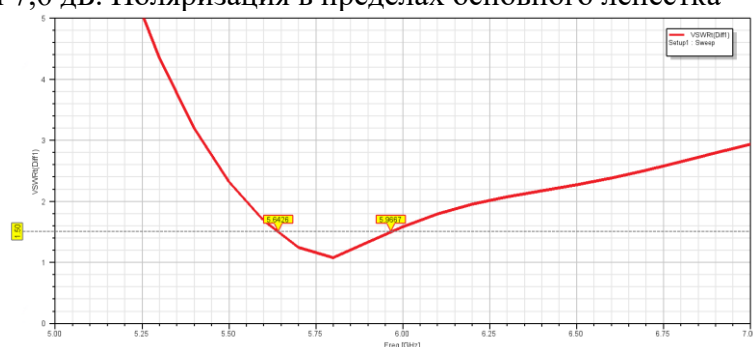


Рисунок 3. Зависимость КСВ по входу от частоты. Маркером показан уровень 1.5.

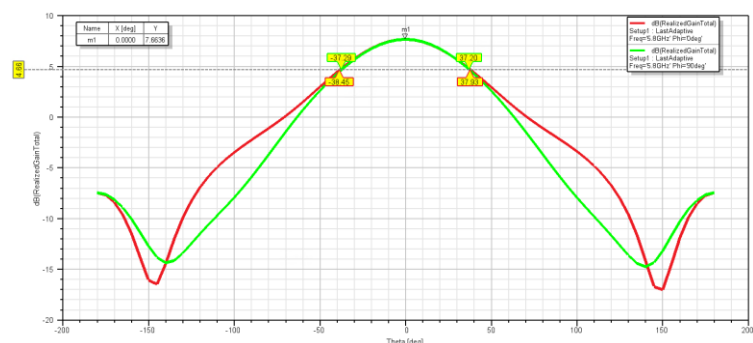


Рисунок 4. Коэффициент усиления в главных плоскостях. Маркером показан уровень -3 дБ.

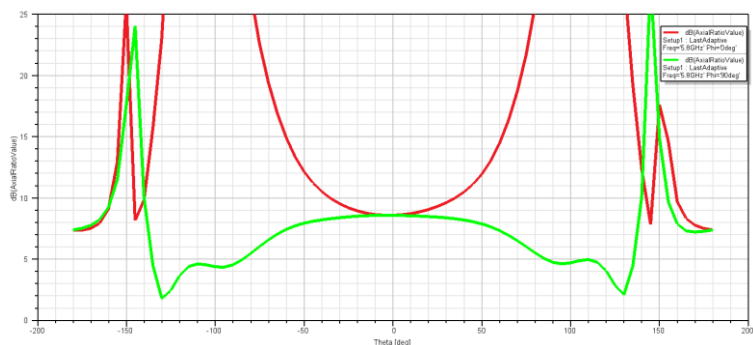


Рисунок 5. Угловая зависимость осевого отношения поляризации в главных плоскостях.

Поскольку внешние габариты АЭ получились компактными, а использованный в начальной модели диэлектрик обладает высокой стоимостью, ограничивающей возможности по массовому выпуску, было решено использовать более

распространенный материал с диэлектрической проницаемостью 3,55. При замене материала уменьшился коэффициент укорочения, что потребовало увеличить длину спирали, добавить еще один слой с дугами и уменьшить переходные отверстия между уровнями для сохранения высоты.

Модель АЭ была перестроена и приведена к виду многослойной печатной платы из 12 слоев с диаметром 15 мм и общей толщиной 7,5 мм. Однако, по результатам проработки с предприятиями-изготовителями, данная конструкция была признана не технологичной и избыточной стоимости. В связи с этим конструкцию разделили на две одинаковых части, соединяемые токопроводящим клеем или припоем. Результат доработки модели представлен на рисунке 6.

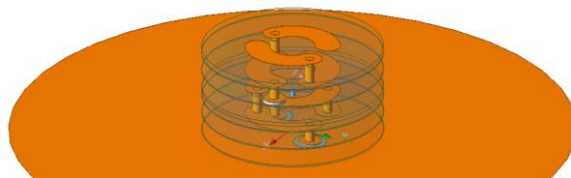


Рисунок 6. Модифицированная модель АЭ, материал с диэлектрической проницаемостью 3,55.

Результаты моделирования модифицированного АЭ продемонстрировали отсутствие существенных изменений от характеристик начальной модели. Уменьшилась ширина основного лепестка диаграммы направленности до 72 градусов, увеличился максимальный коэффициент усиления до 8,1 дБ.

Технологическая оптимизация

Модифицированная модель антенны имеет недостаточный запас по КСВ и поляризации с точки зрения технологического разброса. Также, в модели присутствует ряд конструктивных недостатков:

- Внешние слои соединяются с внутренним слоем с применением глухих отверстий, что в свою очередь удорожает производство;
- При сборке частей антенны требуются меры по обеспечению высокой точности позиционирования;
- Соединение частей антенны только через небольшие контактные площадки недостаточно для обеспечения механической прочности.

Электрические характеристики были улучшены с помощью добавления пассивных излучателей на разных слоях в виде дуг с разной длиной. Пассивные излучатели на внешних слоях, расположенные с угловым сдвигом на 90 градусов, уменьшили осевое отношение.

Конструктивные недостатки предполагается устранить следующим образом:

- Вместо глухих отверстий применить технологию сквозных металлизированных отверстий с последующим обратным высверливанием;
- Точность позиционирования при сборке обеспечить с помощью направляющих, для чего в модели добавить сквозные неметаллизированные отверстия;
- Улучшить механическую прочность с помощью латунного винта, проходящего через центр АЭ. Также пассивные излучатели могут служить дополнительными точками склейки или пайки.

По результатам оптимизации высота АЭ составила 7,9 мм, диаметр 16,5 мм. Итоговый вид АЭ приведен на рисунке 7.

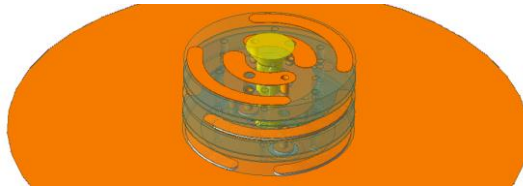


Рисунок 7. Оптимизированная модель АЭ, материал с диэлектрической проницаемостью 3,55.

Результаты проектирования

Результаты моделирования (рисунки 8 – 10) оптимизированного АЭ показали, что диапазон рабочих частот по уровню КСВ, равному 1,5 составляет от 5,48 ГГц до 6,26 ГГц, ширина основного лепестка диаграммы направленности равна 70 градусам, а максимальный коэффициент усиления равен 8,4 дБ. Уровень заднего лепестка составляет минус 15,5 дБ, боковые лепестки отсутствуют. Поляризация в пределах основного лепестка приближена к круговой. Расчетный коэффициент полезного действия без учета фидерной части составляет 98%.

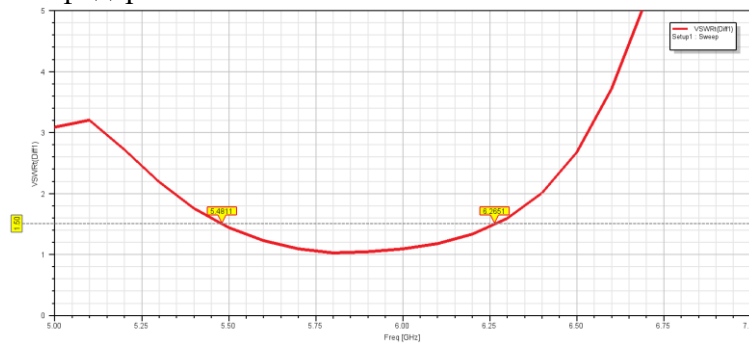


Рисунок 8. Зависимость КСВ от частоты. Маркером показан уровень 1.5.

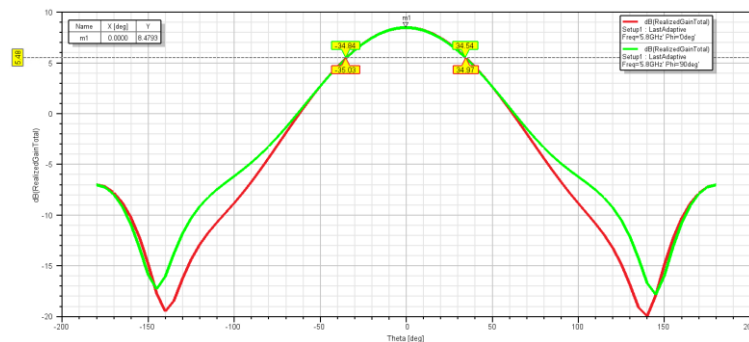


Рисунок 9. Коэффициент усиления в главных плоскостях. Маркером показан уровень -3 дБ.

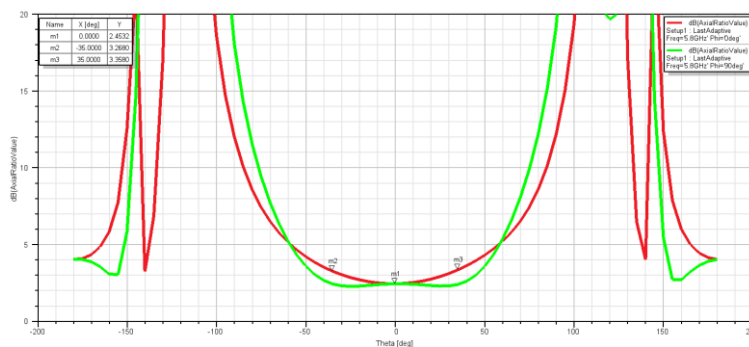


Рисунок 10. Угловая зависимость осевого отношения поляризации в главных плоскостях.

Также, в результате проведения оптимизации конструктива АЭ удалось снизить стоимость изготовления партии из 100 шт. (что соответствует 50 собранным антеннам) более, чем в 40 раз.

Спроектированный антенный элемент полностью удовлетворяет заданным требованиям, имеет габариты, позволяющие разместить АЭ на малых БВС, низкую стоимость изготовления, и в дальнейшем послужит основой для построения фазированной антенной решетки.

Список литературы

1. Белоцерковский, Г. Б. Основы радиотехники и антенны. В 2-х ч. Ч.2. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : «Радио и связь», 1983. – 296 с.
2. Лавров А. С., Резников Г. Б. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие – М. : Сов. радио, 1974. – 367 с.
3. Hisamatsu N., Haruo T., Yorihiro K., Hiroaki M., Junji Y. Low-Profile Helical Array Antenna Fed from a Radial Waveguide // IEEE Transactions on antennas and propagation, march 1992, Vol.40, No.3, pp. 279-284.
4. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. – М.: «Радио и связь», 1986. – 143 с.
5. Банков, С. Е., Гутцайт Э. М., Курушин А. А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS – М. : Оркада, 2012. – 239 с.