

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.1>

УДК: 621.385.69

ПОВЫШЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ FPV – 5.8G ДИАПАЗОНА

О. А. Демин, С. М. Печенкин

МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78

Статья поступила в редакцию 3 июня 2023 г.

Аннотация. Целью данной работы является рассмотрение одного из методов улучшения энергетических характеристик связи First Person View системы с оператором в диапазоне частот от 5,6 ГГц до 6 ГГц. Для выполнения поставленной цели были проведен анализ существующих решений, обобщение материала, моделирование СВЧ-сумматора, эксперимент по повышению мощности, измерение параметров разработанного устройства, сравнение результатов моделирования и эксперимента. В работе представлены математические и программные методики расчета СВЧ устройств, примененные для получения характеристик устройства. Получены результаты моделирования в виде трех графиков и результаты эксперимента в виде трех графиков. В результате обработки полученных данных сделаны выводы о целесообразности использования описанного в работе метода увеличения энергетических характеристик на практике.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, улучшение энергетических характеристик, СВЧ-моделирование, микрополосковые линии передачи, векторный анализ цепей.

Автор для переписки: Демин Олег Александрович, coin12@mail.ru

Введение

С развитием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) не прекращаются научно-практические исследования возможности их применения для решения задач в различных сферах деятельности человека. Выделяют несколько типов летательных аппаратов: самолётный и вертолётный. Каждый из них обладает определенными преимуществами перед другими типами аппаратов. Однако отдельного упоминания заслуживают малогабаритные БПЛА типа “микро-мини”, получившие большую популярность в военной и гражданской областях [1].

Помимо очевидных преимуществ в малозаметности и удобстве использования, данный класс беспилотников имеет и характерные недостатки: малое время полета и дальность связи, особенно в условиях высокой зашумленности частотного спектра. Существует несколько способов решения указанных недостатков:

- 1) применение БПЛА-ретрансляторов сигнала;
- 2) реализация усложненной цифровой обработки сигнала, позволяющей выделить его из совокупности помех;
- 3) усложнение антенной системы приемо-передающего устройства БПЛА или пункта управления.

Применение ретрансляторов обусловлено необходимостью использования отдельного устройства ретрансляции. Дополнительный приемо-передатчик затрудняет управление системой и повышает задержки принимаемого сигнала, что может быть критичным для работы FPV систем. Усложнение цифровой обработки сигнала также характеризуется дополнительными задержками и необходимостью установки дополнительного модуля обработчика, вызывая удорожание аппарата. Указанных недостатков лишен третий способ, который будет рассматриваться в ходе данной статьи, а именно – применение четырех приемных антенн, для образования более узкой диаграммы направленности.

В продаже присутствует большое число стандартных FPV антенн, однако отсутствует возможность приобрести совместимое суммирующее

устройство. Это приводит к следующей задаче, рассматриваемой в данной статье – разработка малогабаритного сумматора мощности 5,8G диапазона на основе микрополосковых линий.

В настоящее время существуют проблемы со свободной продажей специализированных СВЧ-материалов (повышение цен, а также времени поставки). В связи с этим, в качестве материала для разработки устройства рассматривались доступные в наличии: ФАФ-4Д и Fr4. Их некоторые типовые характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики материалов печатных плат.

	Fr4	ФАФ-4Д
Диэлектрическая постоянная ϵ_r	4,6	2,7
Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan\delta$	0,022	0,0018
Водопоглощение	0,1	0,005

В соответствии с [2] известно – увеличение диэлектрической постоянной ведет к тому, что для достижения требуемого сопротивления необходима меньшая ширина проводника (рис. 1). В связи с этим, для уменьшения физических размеров устройства и потерь в сигнале на излучение выбираем материал с большей диэлектрической постоянной – Fr4. Типовая ширина отрезка микрополосковой линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом (для этого материала толщиной 1 мм) составляет 1,84 мм.

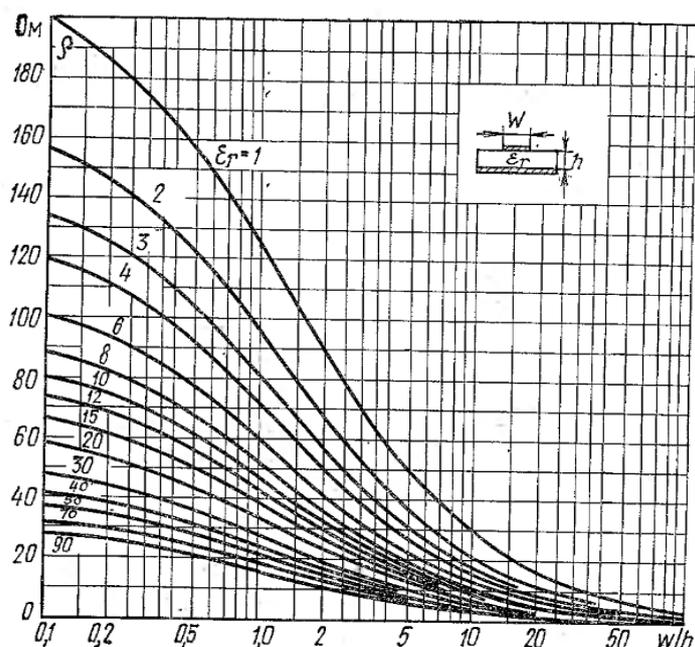


Рис. 1. Кривые зависимости сопротивления от параметров линии для различных диэлектрических постоянных.

После того, как известны параметры используемого материала, требуется выбрать структуру устройства, которая будет обеспечивать суммирование поступающих сигналов. Так как целью суммирования является повышение принимаемой энергетических характеристик, один из критериев выбора структуры сумматора – обеспечение минимальных потерь. Среди производителей определенную популярность имеют резистивные делители мощности. Однако подобная структура характеризуется двумя критическими недостатками: малая развязка между выходами и высокие потери при прохождении – порядка единиц децибел на канал [3]. В суммирующем антенном устройстве малая развязка каналов неприемлема, так как в этом случае сигналы, принимаемые на одну антенну, будут влиять на прием сигналов остальными антеннами.

Указанных недостатков лишен делитель Вилкинсона или же идентичный ему кольцевой делитель, представляющий собой структуру, представленную на рисунке 2. Его преимуществом над мостовым делителем является сравнительная простота структуры. Исходя из электрической симметрии видно, что волны, поступающие в плечи 1 и 2 складываются в плече 3 синфазно.

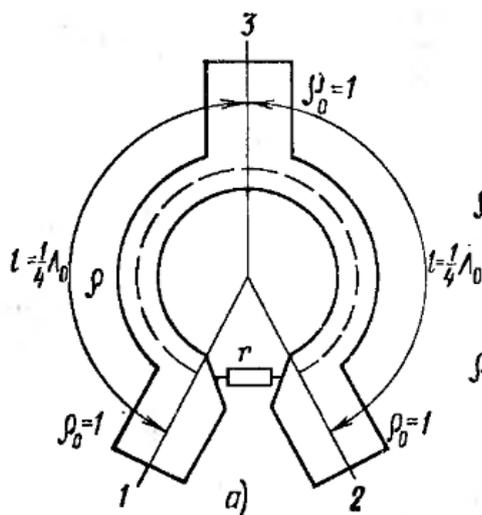


Рис. 2. Кольцевой делитель мощности.

По своей структуре делитель представляет шестиполусное устройство, состоящее из двух несвязанных четвертьволновых трансформаторов, соединенных на одном конце и имеющих на втором согласующий резистор. Руководствуясь справочником [2] оценим требуемые параметры делителя.

Полоса пропускания определяется количеством ступеней. Для расчета зададимся следующими требованиями:

- коэффициент стоячей волны (КСВ) по каждому из выходов не должен превышать 1,5;
- коэффициент перекрытия диапазона представляет собой отношение полосы пропускания к центральной частоте и составляет:

$$W_{\Pi} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{6 \cdot 10^9}{5,6 \cdot 10^9} = 1,071.$$

Указанным требованиям удовлетворяет одноступенчатый делитель, у которого разъемы будут иметь волновое сопротивление $W = 50$ Ом, а волновое сопротивление четвертьволновых отрезков линий передачи $W_1 = W \cdot \sqrt{2}$ Ом. Для расчета параметров линий воспользуемся прикладным калькулятором Txline. По полученным параметрам построим первую итерацию модели фильтра, состоящую из пяти блоков: трехдецибелльных делителей и двух соединяющих линий, представленную на рисунке 3. Соответствующая ему результирующая топология представлена на рисунке 4. В описанной модели

в роли балансных резисторов выступает математически внесенное параллельное сопротивление.

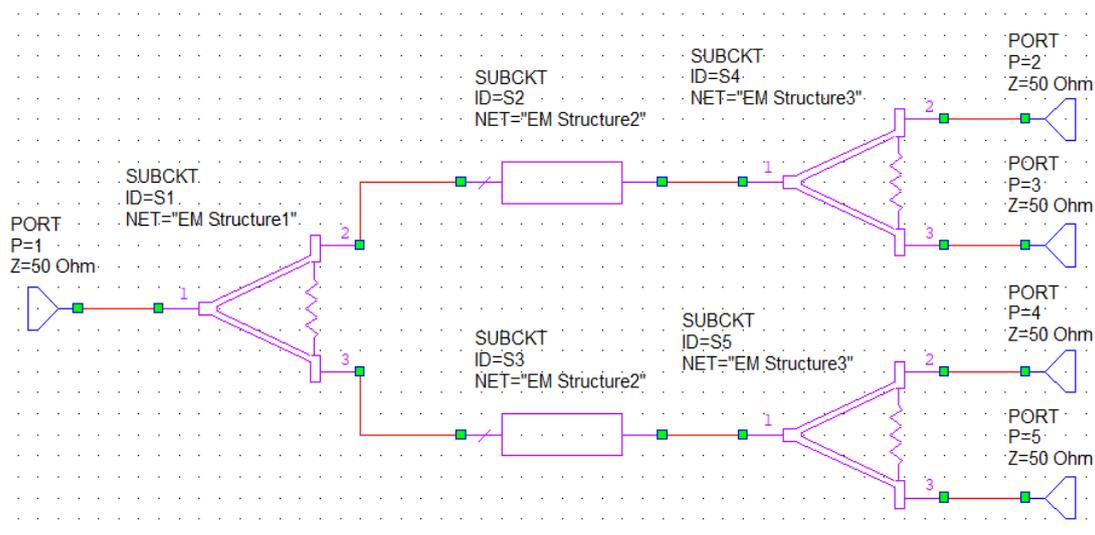


Рис. 3. Схема соединения блоков.

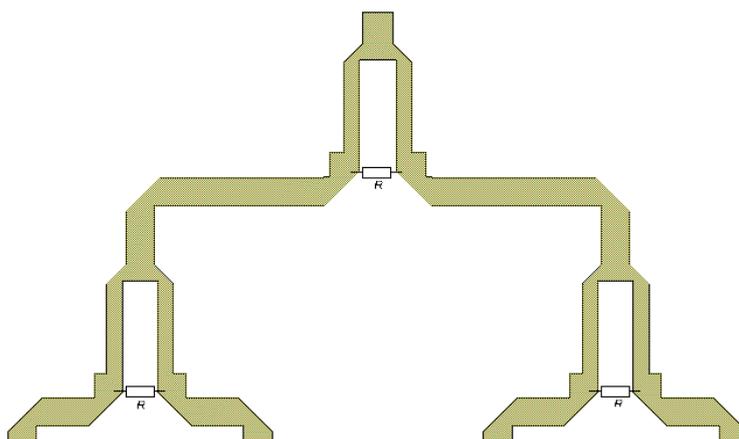


Рис. 4. Топология математической модели.

В результате моделирования схемы с использованием математических моделей ее элементов, были получены характеристики, представленные на рисунке 5. Графики коэффициентов передачи и коэффициентов отражения расположены крайне близко и фактически накладываются друг на друга, что обуславливается симметрией устройства. Также, при анализе графиков необходимо отметить, что центральная частота делителя уменьшилась из-за каскадирования элементов. Таким образом полученная схема требует внесения ряда доработок.

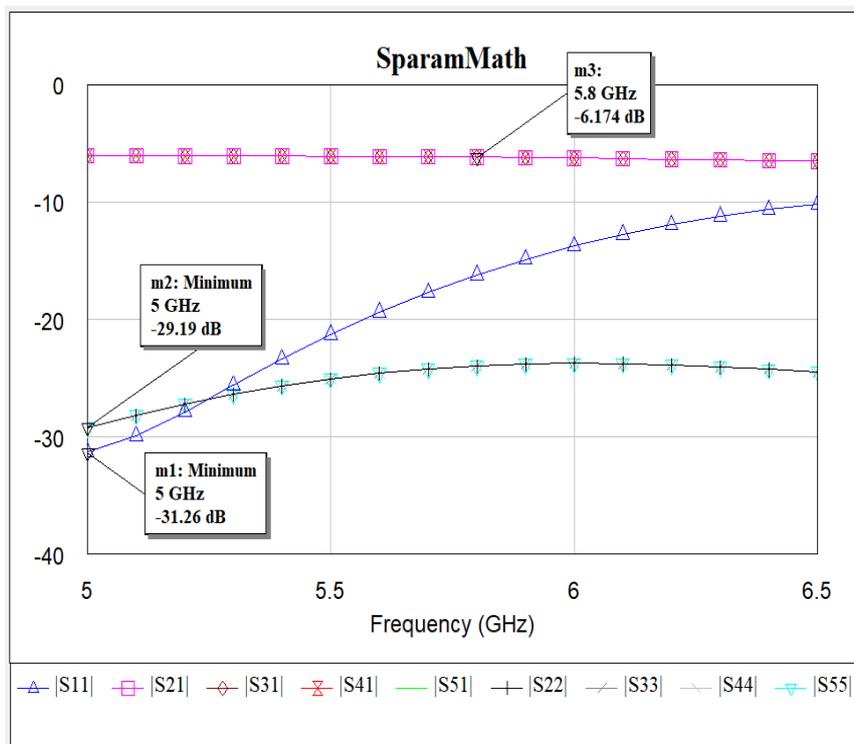


Рис. 5. Характеристики матрицы рассеяния.

Для соответствия требуемой полосе пропускания, в полученную топологию были внесены изменения, такие как укорочение линий в плечах делителя, внесение согласующих вырезов в область разветвления сигналов, уменьшение скачка сопротивлений в области включения балансного резистора. Также модели балансных резисторов преобразованы в эквивалентные печатные резисторы, для осуществления электромагнитного моделирования (рисунок 6). Электромагнитное моделирование с использованием метода моментов позволяет получить более точные результаты, так как производится оценка всей топологии. Результаты моделирования представлены на рисунке 7. Величины параметров отражения откладываются по правой оси, а параметров передачи по левой.

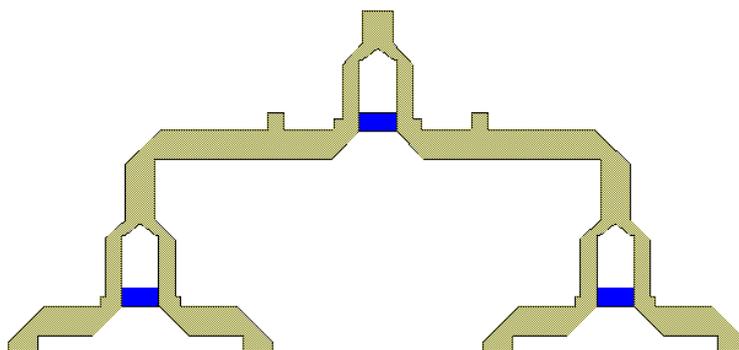


Рис. 6. Топология делителя для электромагнитной модели.

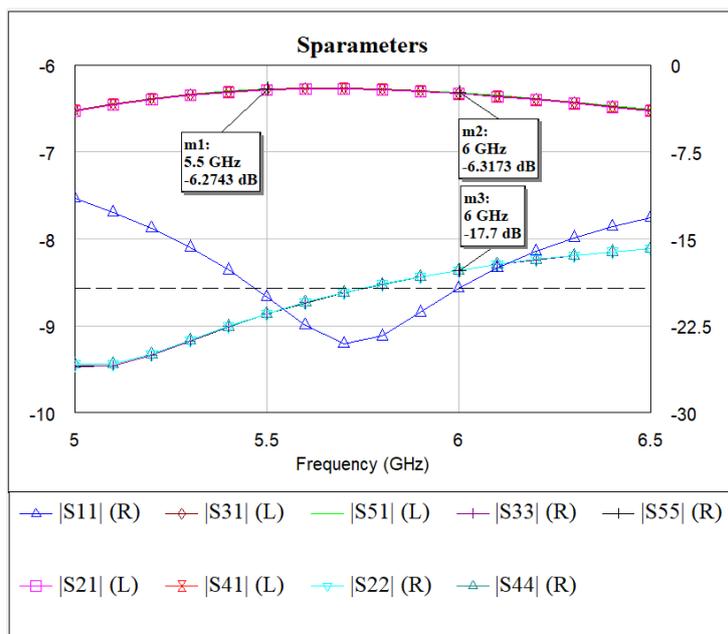


Рис. 7. S-параметры, полученные в результате электромагнитного моделирования.

В результате применения метода моментов характеристики ухудшились. Коэффициент передачи уменьшился в среднем на 0,2 дБ, а полоса согласования (график коэффициента отражения) стала уже. При этом достоверность графика выше за счет применения метода моментов. Полученный коэффициент передачи составляет -6,32 дБ. Так как потери из-за разделения мощности входного сигнала на 4 канала составляют 6 дБ, потери сигнала при прохождении устройства - 0,32 дБ. Коэффициент стоячей волны всех разъемов представлен на рисунке 8. КСВ не превышает 1,3 в рабочей полосе частот.

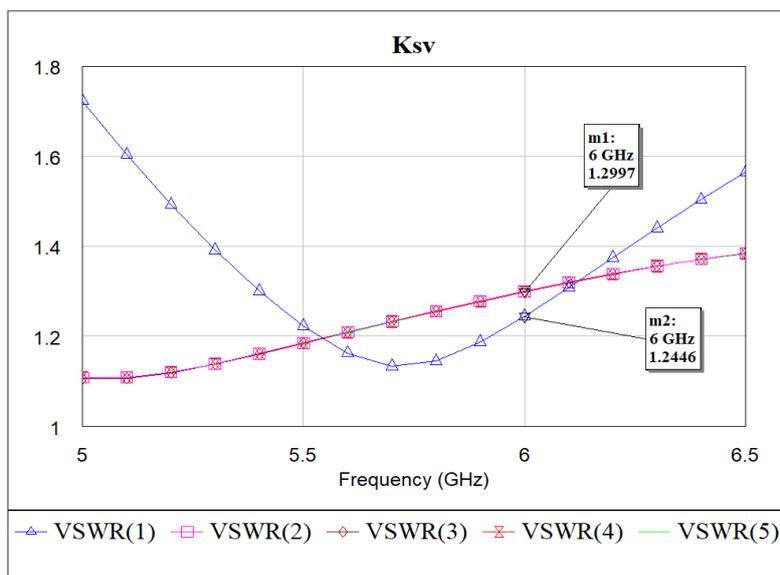


Рис. 8. Коэффициент стоячей волны делителя.

С использованием травления была изготовлена печатная плата делителя, рисунок 9.

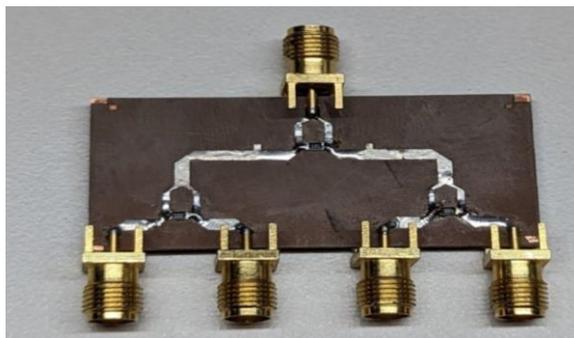


Рис. 9. Внешний вид платы делителя без корпуса.

Для подтверждения результатов, были проведены измерения платы. Так как на используемом векторном анализаторе разъемы N-типа, а на плате – разъемы SMA, потребовалась установка переходников, которые вносят дополнительные потери. Также некоторые потери вносятся за счет неидеальности имеющихся кабелей. Сумма вносимых потерь составляет около 2,5 дБ. Полученные результаты приведены на рисунке 10. Видно ухудшение характеристик согласования за счет неидеальности соединений. КСВ по входу составило 1,34, а КСВ по одному из выходов 2,215.



17:24:32 02.06.2023

Рис. 10. S-параметры одного из каналов делителя.

Проведем энергетический расчет усиления принимаемого антенной сигнала вследствие применения разработанного устройства. Применение описанного устройства усилит сигнал, принимаемый антенной системой. Как видно из рисунков 11-12, использование сумматора позволило повысить мощность принимаемого сигнала на 1,5 дБ, что соответствует повышению принимаемой мощности в 1,41 раз. Используя формулу передачи Фрииса [4], можем оценить, что полученное увеличение по мощности равноценно увеличению расстояния в 1,19 раз.

Стоит отметить, что для измерений использовался соединительный кабель с ослаблением 0,5 дБ. Улучшение характеристик соединительного кабеля позволит увеличить дальность приема.

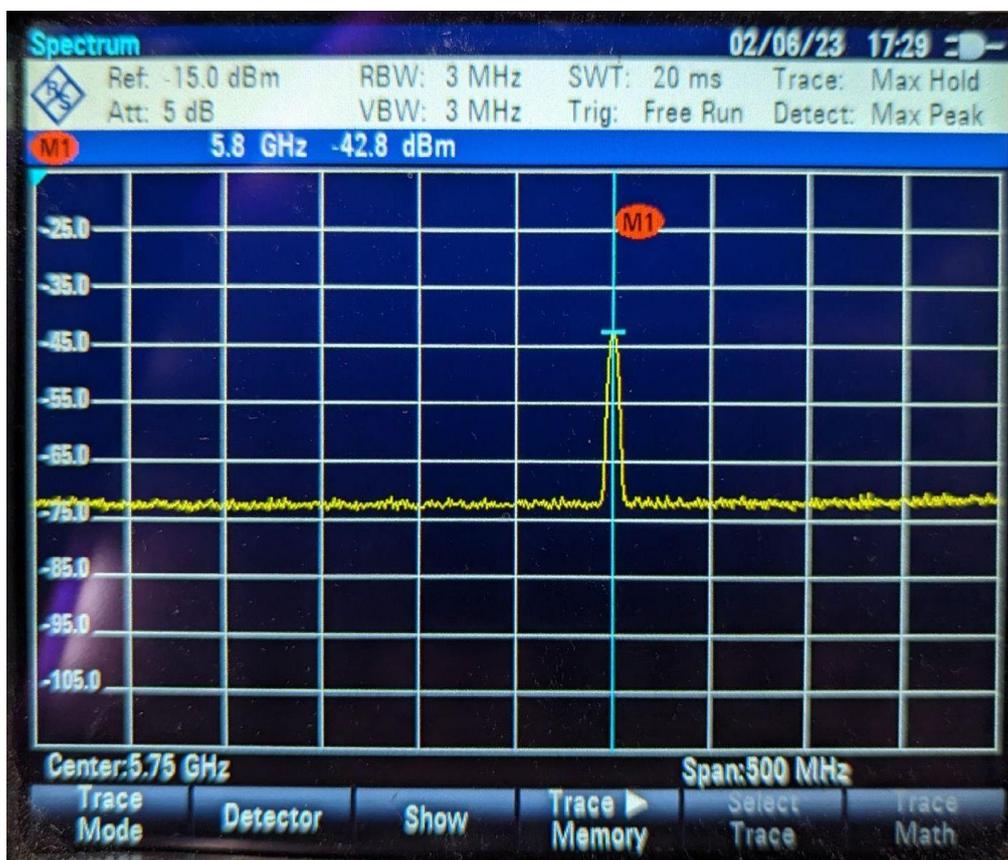


Рис. 11. Спектр сигнала, принимаемого антенной системой без сумматора.

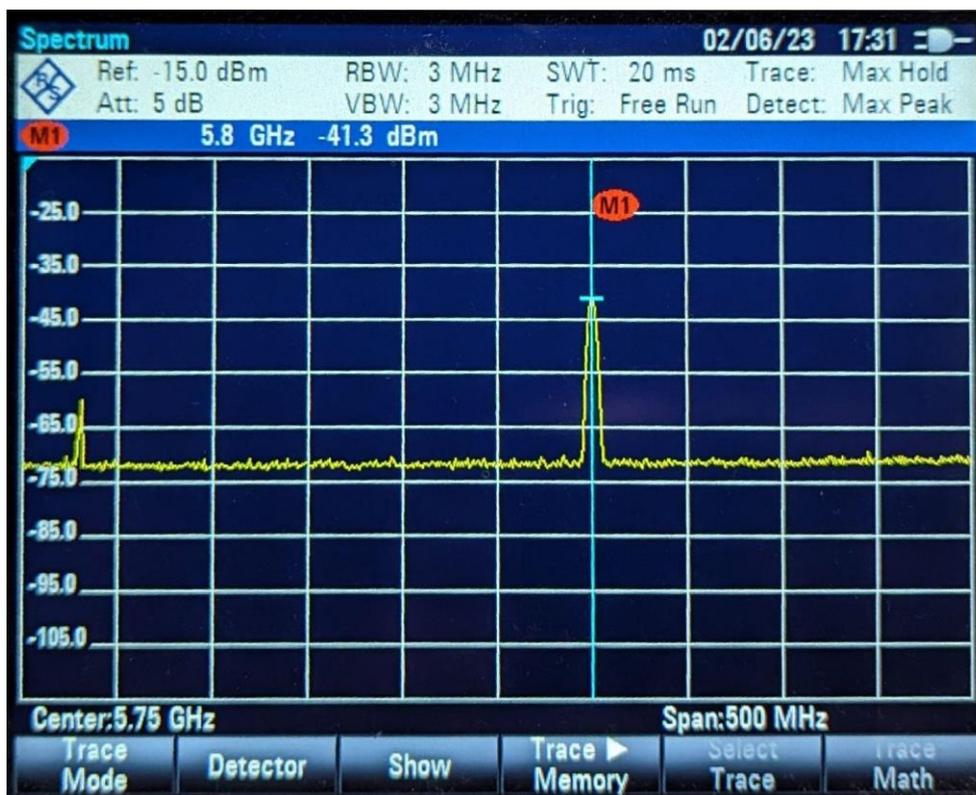


Рис. 12. Спектр сигнала, принимаемого антенной системой с сумматором.

Заключение

В результате проделанной работы была подтверждена возможность повышения дальности приема сигнала FPV устройства посредством использования усложненной антенной системы. Для этого был разработан делитель BOSCAM диапазона и использованы совместимые антенны. В лабораторных условиях были проведены измерения разработанного устройства. Вследствие проведения экспериментальных исследований установлено, что за счет применения сумматора мощности удается добиться усиления принимаемого сигнала на 41%. Потери на кабелях и рассогласование, вносимое разъемами, могут уменьшить полученный результат вплоть до отсутствия увеличения принимаемого сигнала. Описанная методика требует высокого качества материала и компонентов и нуждается в дополнительном исследовании.

Литература

1. Когтин А.В., Шайдуров Г.Я. Перспективы развития малых беспилотных летательных аппаратов и проблема их обнаружения. *Военная мысль*. 2023 г. №1. с. 61-65.
2. Мазепова О.И. и др. Справочник по элементам полосковой техники. Москва, Связь. 1979. 336 с.
3. RF ONE. PDR-06-S4 4 Way SMA Resistive Power Divider [web] Дата обращения: 16.05.2023
URL: <https://www.rfone.cn/uploadfiles/pdf/PDR-06-S4.pdf>
4. Рутледж Д. Энциклопедия практической электроники: Пер. с англ. Москва, ДМК Пресс, 2002. 528 с.

Для цитирования:

Демин О.А., Печенкин С.М., Повышение дальности приема сигналов FPV - 5.8G диапазона. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №.10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.1>