

Исследование характеристик согласующей системы УКВ антенны на основе отрезков коаксиальных кабелей

Н.А. Гилев, О.И. Бирюков, Ю.О. Филимонова, К.А. Лайко

Новосибирский государственный технический университет «НЭТИ»

Аннотация: в работе представлены результаты исследования согласующей системы на основе комбинаций отрезков коаксиального кабеля с различными волновыми сопротивлениями. Выполнено численное моделирование и натурные испытания штыревой антенны с данными вариантами согласующих систем. Оптимизация параметров в программе CST Microwave Studio проведена по критерию максимальной полосы рабочих частот по уровню $K_{CB} \leq 2$. Сравнительный анализ полученных данных позволил сделать выводы о применимости различных комбинаций отрезков кабелей в согласующей системе в зависимости от условий эксплуатации. Установлено, что комбинация кабелей 50/50 Ом обеспечивает наибольшую полосу (1,89%), а вариант 75/75 Ом - минимальные габариты.

Ключевые слова: согласующая система, коаксиальный кабель, численное моделирование, эксперимент

1. Введение

В современных радиотехнических системах особую значимость приобретает задача эффективного согласования антенн с фидерными трактами. Согласование непосредственно влияет на качество передачи сигнала и энергетические характеристики системы. Оптимальное согласование позволяет минимизировать потери мощности, а также расширить рабочую полосу частот антенного устройства [2]. Одним из методов согласования является использование комбинации трансформирующих и компенсирующих отрезков коаксиального кабеля [1–2]. Такой метод позволяет провести трансформацию активной составляющей сопротивления и компенсировать реактивную составляющую входного сопротивления антенны. Длина отрезков кабеля может меняться в зависимости от поставленных задач. Так, для уменьшения потерь стремятся к минимизации их длин. Однако бывают случаи, когда требуется увеличить длину фидерного тракта, например, для соблюдения норм техники безопасности или требований электромагнитной совместимости.

В настоящей работе проведено исследование и оптимизация согласующей системы на основе комбинаций отрезков стандартных коаксиальных кабелей 50 и 75 Ом по критерию максимальной полосы частот для заданного уровня коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВ).

2. Описание и расчёт согласующей системы

В работе рассмотрена согласующая система на основе трансформирующего отрезка коаксиального кабеля и подключаемого к нему параллельно короткозамкнутого шлейфа (КЗ) из коаксиального кабеля (рисунок 1 а). Длина излучающей части штыревой антенны на частоте 37,5 МГц составляет $0,125\lambda - 1$ м, где: λ – длина волны 8 м. В качестве экрана использовалась система из 4 противовесов длиной $0,25\lambda - 2$ м каждый. На рисунке 1б приведен график входного сопротивления штыревой антенны. Исследовались четыре комбинации стандартных волновых сопротивлений 50 и 75 Ом.

Для согласования антенны необходимо преобразовать активную часть сопротивления R_A к волновому сопротивлению подключаемого устройства R_B . Так как КЗ шлейф подключается параллельно расчёт произведён в проводимостях. Для этого по формуле проводимости $Y(1)$, где: X_A – реактивная часть сопротивления антенны, Z_A – комплексное сопротивление антенны, β – волновое число, R_B^{mp} – волновое сопротивление трансформирующего отрезка, определяется точка подключения реактивного шлейфа l_{mp} .

$$Y(l_{mp}) = \frac{1}{R_B^{mp}} \cdot \frac{R_B^{mp} + j \cdot Z_A \cdot \operatorname{tg}(\beta \cdot l_{mp})}{Z_A + j \cdot R_B^{mp} \cdot \operatorname{tg}(\beta \cdot l_{mp})}. \quad (1)$$

Для компенсации паразитной реактивной составляющей в точке подключения, используется короткозамкнутый шлейф с волновым сопротивлением $R_B^{ш}$, длина $l_{ш}$ которого находится по формуле (2). Реактивная часть проводимости КЗ шлейфа должна быть противоположной по знаку в точке его подключения.

$$Y_{ш} = \frac{-j}{R_B^{ш} \cdot \operatorname{tg}(\beta \cdot l_{ш})}. \quad (2)$$

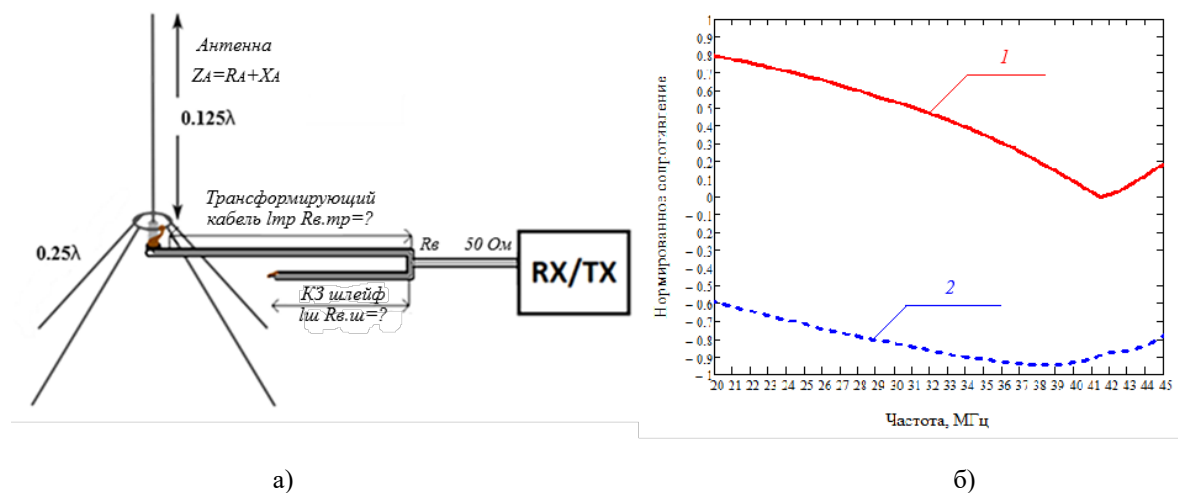


Рисунок 1. а) Схема подключения согласующей системы к антенне и фидеру приёмного/передающего устройства; б) График нормированного к 50 Ом входного сопротивления штыревой антенны: 1 – активное сопротивление; 2 – реактивное сопротивление.

В таблице 1 приведены значения длин элементов согласующей системы, рассчитанные с помощью формул (1) и (2).

Таблица 1. Длина рассчитанных согласующих элементов

Сопротивление трансформирующего элемента, Ом	Длина трансформирующего элемента, см	Сопротивление короткозамкнутого элемента, Ом	Длина короткозамкнутого элемента, см
50	89,46	50	12,88
50	89,46	75	8,74
75	79,38	50	13,34
75	79,38	75	9,54

3. Численное моделирование

Для проведения численного анализа в программном пакете CST Microwave Studio разработана электродинамическая модель штыревой антенны (рисунок 2а).

Далее, согласно технической документации [3–4], построены модели коаксиальных кабелей РК 50-2-11 и РК 75-4-11. Отдельные проекты объединены с помощью CST Schematic (рисунок 2б). Начальные приближения взяты из таблицы 1, после чего проведена оптимизация с помощью «Симплексного алгоритма Нелдера-Мида», по критерию минимального коэффициента стоячей волны (КСВ) на центральной частоте 37,5 МГц, и максимальной ширине полосы рабочих частот по уровню КСВ=2. Полученные данные приведены в таблице 2. Диаграмма направленности согласованной антенны представлена на рисунке 3.

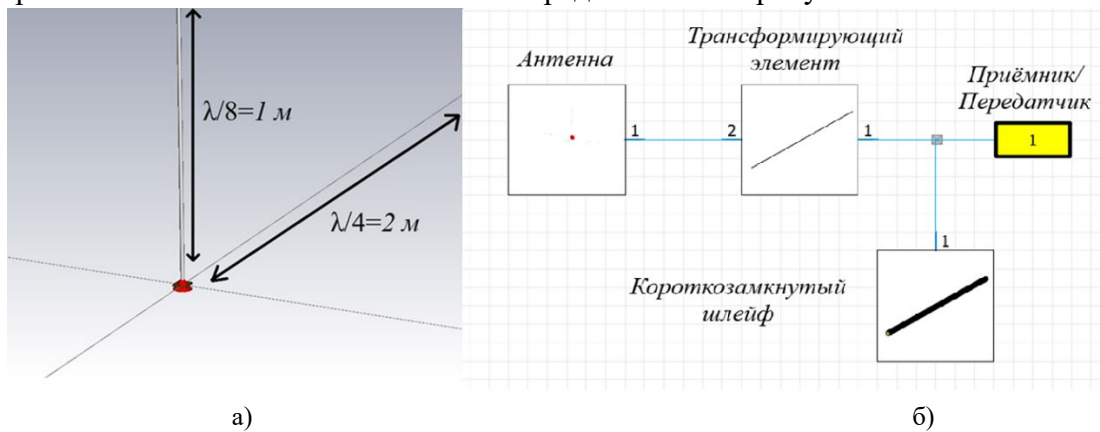


Рисунок 2. а) Модель антенны, построенная в программе CST Microwave Studio; б) Соединение моделей в программе CST Schematic.

Таблица 2. Длина согласующих элементов по результатам моделирования

Сопротивление трансформирующего элемента, Ом	Длина трансформирующего элемента, см	Сопротивление короткозамкнутого элемента, Ом	Длина короткозамкнутого элемента, см
50	91,0	50	13,1
50	91,3	75	8,5
75	82,4	50	14,7
75	82,7	75	9,6

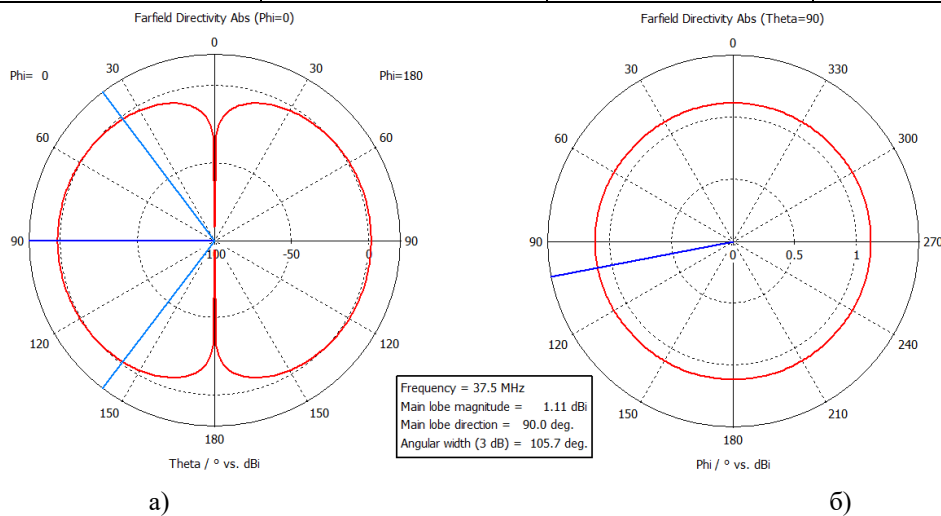


Рисунок 3. Диаграмма направленности модели согласованной антенны, полученная в программе CST Studio: а) В плоскости вектора Е; б) В плоскости вектора Н.

4. Эксперимент

Для подтверждения результатов численного моделирования изготовлен экспериментальный образец антенной системы. Конструкция антенны включала излучающий элемент из алюминиевой трубки, с внешним диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм, систему из четырех противовесов из оцинкованного стального троса диаметром 1 мм. Излучающая и заземляющая части отделены друг от друга стеклотекстолитом, который обеспечивает необходимую механическую прочность и электрическую изоляцию. Также изготовлены четыре варианта согласующих систем.

Измерения параметров экспериментального образца производились с помощью векторного анализатора цепей OBZOR Planar TR 1300/1, предварительно откалиброванного в рабочем диапазоне частот. На точность измерений влияет разброс параметров коаксиального кабеля, а также точность изготовления образцов антенны и согласующей системы.

По результатам испытаний проведён сравнительный анализ с результатами численного моделирования. Графики частотной зависимости КСВ, полученные в ходе эксперимента и численного моделирования, представлены на рисунке 4 - 5, данные об относительной полосе рабочих частот по уровню $K_{CB} = 2$ представлены в таблице 2.

Таблица 3. Сравнительный анализ согласующих систем по полосе частот

Сопротивление трансформирующего элемента, Ом	Сопротивление короткозамкнутого элемента, Ом	Полоса рабочих частот при моделировании, %	Полоса рабочих частот при измерении, %
50	50	1,97	1,89
50	75	1,84	1,83
75	50	1,60	1,62
75	75	1,51	1,43

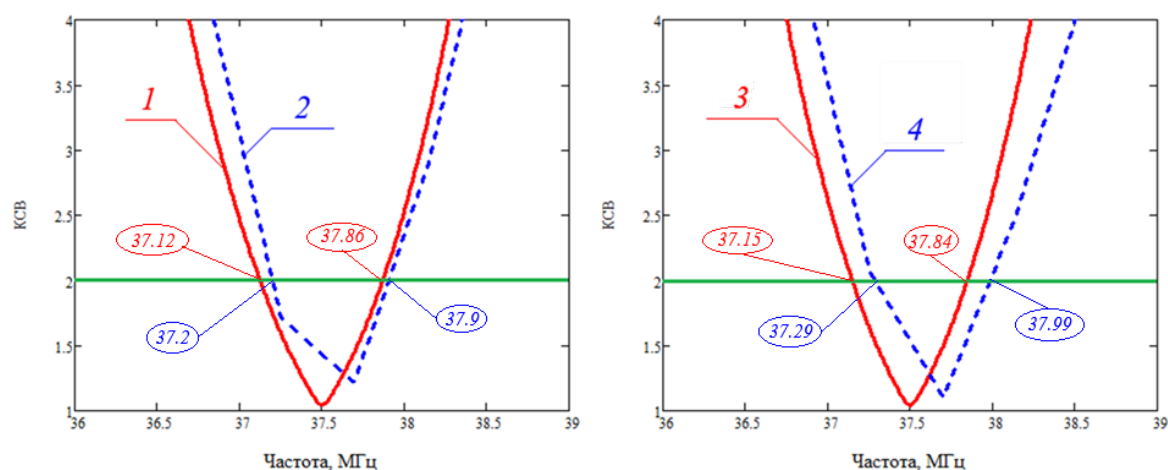


Рисунок 4. Сравнение графиков КСВ с трансформирующим элементом - 50 Ом: 1 – Моделирование в CST Microwave Studio, короткозамкнутый шлейф - 50 Ом; 2 – Натурный эксперимент, короткозамкнутый шлейф - 50 Ом; 3 - Моделирование в CST Microwave Studio, короткозамкнутый шлейф - 75 Ом; 4 - Натурный эксперимент, короткозамкнутый шлейф - 75 Ом.

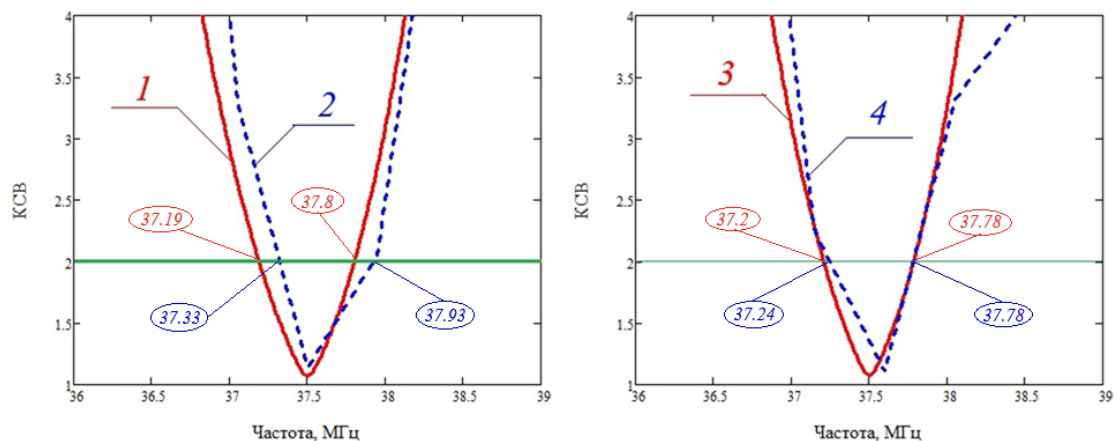


Рисунок 5. Сравнение графиков КСВ с трансформирующим элементом - 75 Ом: 1 – Моделирование в CST Microwave Studio, короткозамкнутый шлейф - 50 Ом; 2 – Натурный эксперимент, короткозамкнутый шлейф - 50 Ом; 3 – Моделирование в CST Microwave Studio, короткозамкнутый шлейф - 75 Ом; 4 – Натурный эксперимент, короткозамкнутый шлейф - 75 Ом.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что наибольшая ширина полосы (1.89%) достигается при сочетании трансформирующего кабеля 50 Ом и короткозамкнутого кабеля 50 Ом, однако этот вариант требует максимальной длины кабелей (104.1 см). Наименьшая ширина полосы (1.43%) наблюдается при комбинации 75 Ом кабелей, при этом длина кабелей минимальна (92.3 см).

5. Заключение

В работе проведено исследование согласующих систем штыревой антенны на основе комбинации отрезков коаксиальных кабелей 50 и 75 Ом. Решена задача оптимизации длин отрезков коаксиальных кабелей по критерию максимальной полосы рабочих частот и минимальных длин отрезков кабеля. Проведена оценка полосы рабочих частот для рассмотренных вариантов. Установлено, что комбинация кабелей 50 Ом обеспечивает наилучшие характеристики по полосе пропускания, тогда как вариант 75 Ом предпочтителен при ограничениях по габаритам системы.

Полученные результаты имеют практическое значение для проектирования антенно-фидерных устройств УКВ-диапазона, позволяя выбирать оптимальную конфигурацию согласующей системы в зависимости от требований к полосе пропускания или габаритам.

Список литературы

1. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ : учебник для вузов по специальности "Радиотехника" / Д. М. Сазонов. - М. : Высшая школа, 1988. - 430, [2] с.: ил.
2. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Со-ветское радио, 1974. 536 с.
3. ГОСТ 11326.1-79. Кабель радиочастотный марки РК 50-2-11. Технические условия. — введен 01.01.81. - Москва : ИПК Изд-во стандартов, 2003. - 4 с.
4. ГОСТ 11326.8-79. Кабель радиочастотный марки РК 75-4-11. Технические условия. — введен 01.01.81. - Москва : ИПК Изд-во стандартов, 2003. - 4 с.