

УДК 621.375.026

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ УСИЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ВЧ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ AWR

Тун Тун Лин, магистрант

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Институт информационных технологий,
г. Минск, Республика Беларусь*

Дубовик И. А. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного моделирования и анализа характеристик усилителя мощности высокой частоты (2.4 ГГц) для радиолокационных систем, выполненного в профессиональной среде проектирования AWR. Основное внимание уделено исследованию ключевых параметров усилителя, включая коэффициент усиления (достигающий 11.06 дБ на частоте 2.401 ГГц), стабильность работы и энергоэффективность. Проведен детальный анализ схемы, содержащей конденсаторы (200 пФ - 100000 пФ), индуктивности (100 нГн), резисторы (75 кОм) и другие ключевые компоненты.

Ключевые слова. Усилитель мощности, AWR Design Environment, радиолокационная система, S-параметры, BFG520, линейное усиление.

Введение.

Современные радиолокационные системы предъявляют строгие требования к усилителям мощности высокой частоты (ВЧ), которые являются ключевыми элементами в цепях передачи сигналов. Эти усилители должны обеспечивать не только высокую выходную мощность, но и сохранять линейность характеристик, широкую полосу пропускания и энергоэффективность. Всё это необходимо для точного и надёжного функционирования радиолокационных станций в различных условиях эксплуатации. Особую актуальность приобретает задача моделирования таких устройств, позволяющая заранее оценить их параметры и оптимизировать конструкцию до этапа физического изготовления.

Основная часть.

Начальная фаза проектирования усилителя мощности ВЧ включает комплекс теоретических расчетов, необходимых для определения ключевых параметров усилительной системы. Рассмотрим порядок проектирования усилителя мощности на основе широкополосного транзистора BFG520 [1].

Основные этапы расчета усилителя мощности включают [2]:

1. Определение коэффициента усиления- вычисление требуемого усиления (в данном случае 11.06 дБ на частоте 2.4 ГГц) с учетом параметров транзистора и потерь в цепи.
2. Анализ полосы пропускания- расчет рабочего диапазона частот (от 2.401 до 2.404 ГГц) и оценка неравномерности АЧХ.
3. Критерии устойчивости - проверка усилителя на отсутствие паразитных генераций с использованием коэффициентов устойчивости (К-фактор и др.).

Дополнительно выполняются:

- Расчеты входного/выходного сопротивления для правильного согласования
- Определение оптимального режима работы транзистора по постоянному току
- Тепловые расчеты для оценки рассеиваемой мощности

Эти расчеты выполняются с использованием специализированных формул и методик проектирования СВЧ-усилителей [2]. Полученные значения затем используются для первоначального выбора номиналов компонентов (конденсаторов 200-100000 пФ, индуктивностей 100 нГн), которые в дальнейшем оптимизируются в среде AWR Microwave studio [3-4].

Второй этап проектирования усилителя мощности ВЧ посвящен тщательной разработке и реализации цепей смещения, которые играют ключевую роль в обеспечении стабильной рабочей точки транзистора. Этот этап требует особого внимания, так как от правильности его выполнения напрямую зависит надежность и эффективность работы всего усилительного каскада.

Основное внимание уделяется трем ключевым подсистемам: цепям питания, развязывающим конденсаторам и цепям согласования. В цепи питания используется источник постоянного напряжения V4 с номиналом 9 В, который обеспечивает стабильное питание активных компонентов схемы. Параллельно с этим резисторы R1 и R2 номиналом 75 кОм формируют необходимые токи смещения, создавая оптимальные условия для работы транзистора. Особое значение имеют фильтрующие элементы, которые эффективно подавляют возможные пульсации питания, предотвращая их негативное влияние на качество усиливаемого сигнала. Эти меры в совокупности обеспечивают стабильность работы усилителя в различных режимах эксплуатации [5].

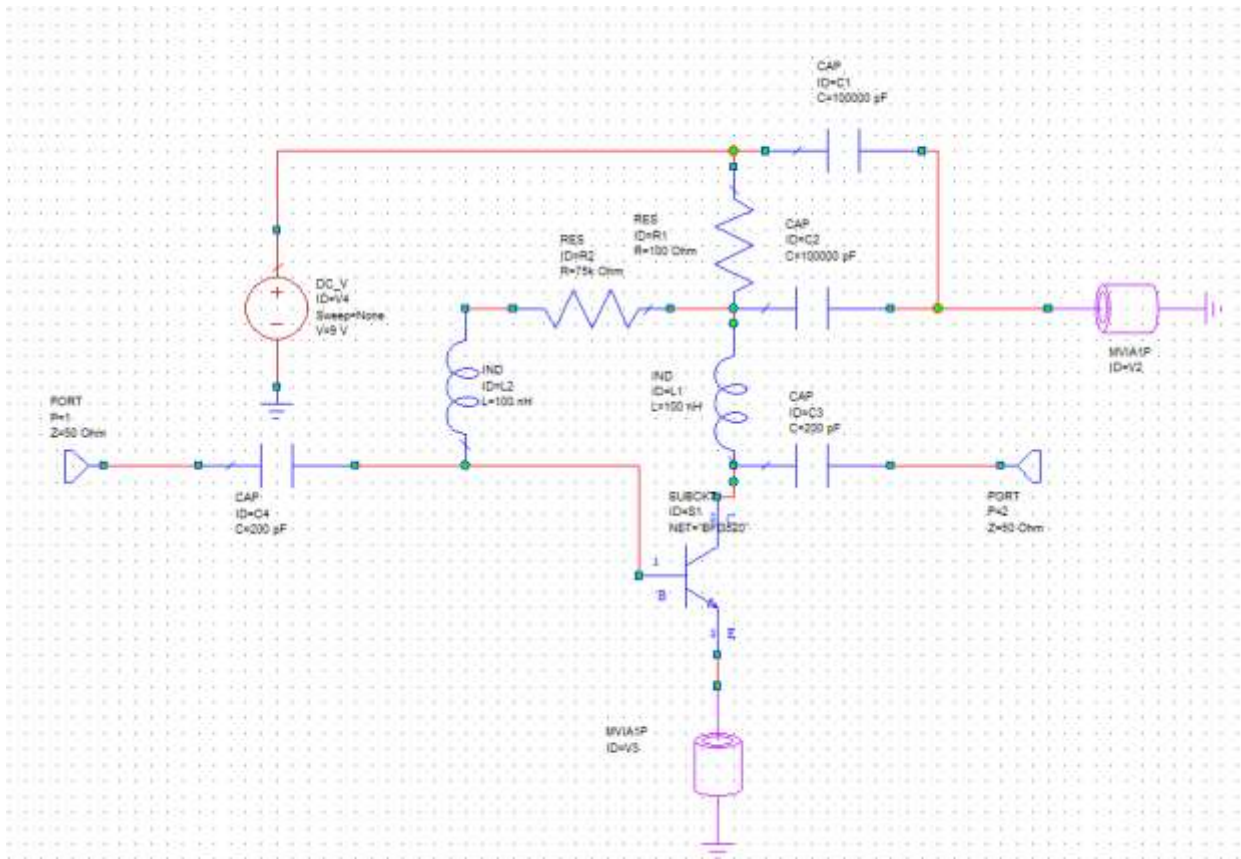


Рисунок 1 – Схема смещения усилителя

Не менее важную роль в схеме играют развязывающие конденсаторы, среди которых можно выделить C1 (100000 пФ), C4 (200 пФ) и C3 (200 пФ). Конденсаторы C1 и C4 выполняют критически важную функцию блокировки постоянной составляющей, предотвращая ее проникновение во входные и выходные цепи усилителя. В то же время конденсатор C3 обеспечивает эффективную развязку по высокой частоте, что особенно важно для сохранения стабильности усилителя в рабочем диапазоне частот около 2.4 ГГц. Эти компоненты в совокупности решают три основные задачи: предотвращают проникновение DC-составляющей в сигнальные цепи, подавляют возможные паразитные колебания и стабилизируют работу усилительного каскада. Дополнительную стабильность системе придают цепи согласования на основе индуктивностей L1 и L2 (по 100 нГн каждая), которые формируют частотно-зависимые цепи, выполняют функции фильтрующих элементов и создают резонансные контуры. Все эти меры в комплексе обеспечивают оптимальную передачу ВЧ-сигнала с минимальными потерями мощности и высокой стабильностью характеристик во всем рабочем диапазоне частот.

Заключительный этап проектирования усилителя мощности ВЧ представляет собой комплексную оптимизацию характеристик сигнального тракта переменного тока, направленную на достижение максимальной эффективности работы устройства. Основной акцент делается на трех критически важных направлениях:

1. Согласование входных и выходных цепей: Особое внимание уделяется точной настройке входного порта P1 с характеристическим сопротивлением 50 Ом и выходного порта P2 на 50 Ом. Этот процесс включает в себя тщательный подбор параметров согласующих цепей для минимизации коэффициента отражения (КСВ) и обеспечения максимального коэффициента передачи мощности. Используются специализированные LC-цепи, позволяющие достичь оптимального согласования в рабочем диапазоне частот около 2.4 ГГц.

2. Оптимизация межкаскадных связей: Ключевым элементом является конденсатор C3 номиналом 200 пФ, параметры которого тщательно подбираются для достижения баланса между эффективной передачей ВЧ-сигнала, надежной блокировкой постоянной составляющей и минимальным внесением фазовых искажений. Этот процесс сопровождается многочисленными итерациями моделирования в среде AWR для поиска оптимального решения.

3. Обеспечение устойчивости усилителя: Проводится комплексный анализ стабильности работы усилителя, включающий расчет коэффициентов устойчивости (К-фактор, B1) и моделирование различных рабочих режимов. При обнаружении склонности к паразитной генерации в схему вводятся дополнительные корректирующие элементы: резисторы стабилизации, демпфирующие цепи и специальные фильтрующие компоненты.

Важнейшей задачей этапа является поиск оптимального компромисса между ключевыми параметрами усилителя: достижением максимального усиления (11.06 дБ на частоте 2.401 ГГц), расширением полосы пропускания и обеспечением абсолютной стабильности работы во всем рабочем частотном диапазоне. Результаты моделирования демонстрируют, что разработанная схема полностью соответствует требованиям современных радиолокационных систем.

Схема усилителя мощности ВЧ, представленная в исследовании, включает в себя набор ключевых компонентов, обеспечивающих её работоспособность и соответствие требованиям радиолокационных систем. Основными элементами являются конденсаторы (C1, C2, C3, G4), чьи ёмкости варьируются от 200 пФ до 100000 пФ. Эти компоненты играют важную роль в фильтрации сигналов и стабилизации работы усилителя.

Например, конденсатор C1 с ёмкостью 100000 пФ используется для блокировки постоянного тока, в то время как C3 (200 пФ) обеспечивает высокочастотную связь между каскадами. Резисторы R1 и R2, каждый с сопротивлением 75 кОм, выполняют функции нагрузки и согласования импедансов, что критически важно для минимизации потерь мощности (рис. 2).

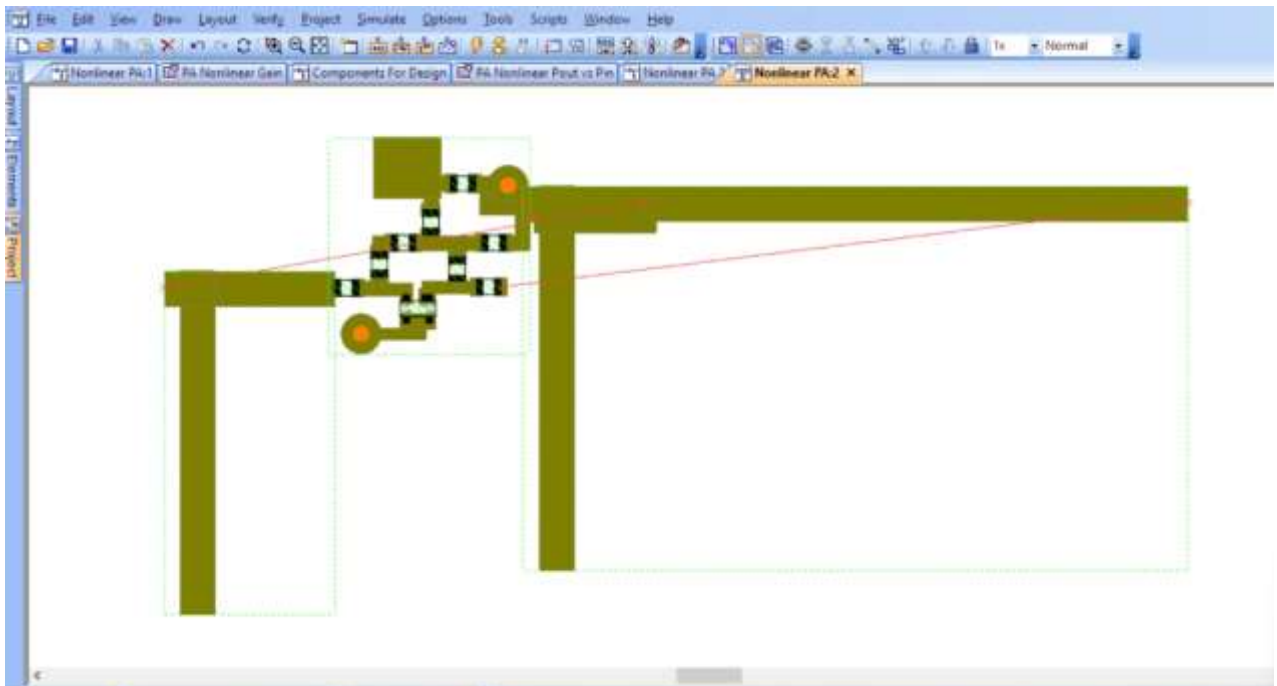


Рисунок 2 – Внешний вид макета усилителя мощности

Дополнительно в схему включены индуктивности L1 и L2, каждая с номиналом 100 нГн. Эти элементы формируют частотно-зависимые цепи, такие как фильтры и резонансные контуры, которые необходимы для настройки усилителя на рабочую частоту 2.4 ГГц. Источник постоянного напряжения V4 с выходным напряжением 9 В обеспечивает питание активных компонентов схемы. Порты P1 и P2, имеющие импедансы 50 Ом и 50 Ом соответственно, служат для подключения внешних устройств, таких как антенны или измерительные приборы, и обеспечивают согласование с другими блоками радиолокационной системы. В совокупности эти компоненты формируют основу для анализа и оптимизации усилителя мощности.

Результаты моделирования демонстрируют ключевые характеристики усилителя мощности в рабочем диапазоне частот (рис. 3).

Максимальное усиление ($DB(|S(2,1)|)$) составляет 11.06 дБ на частоте 2.401 ГГц, что указывает на эффективное усиление сигнала вблизи центральной частоты. Однако уже на частоте 2.404 ГГц усиление падает до 8.481 дБ, что свидетельствует о резком снижении коэффициента передачи при небольшом отклонении от рабочей точки. Такое поведение подтверждает узкополосность системы, которая обеспечивает высокое усиление лишь в ограниченном частотном диапазоне.

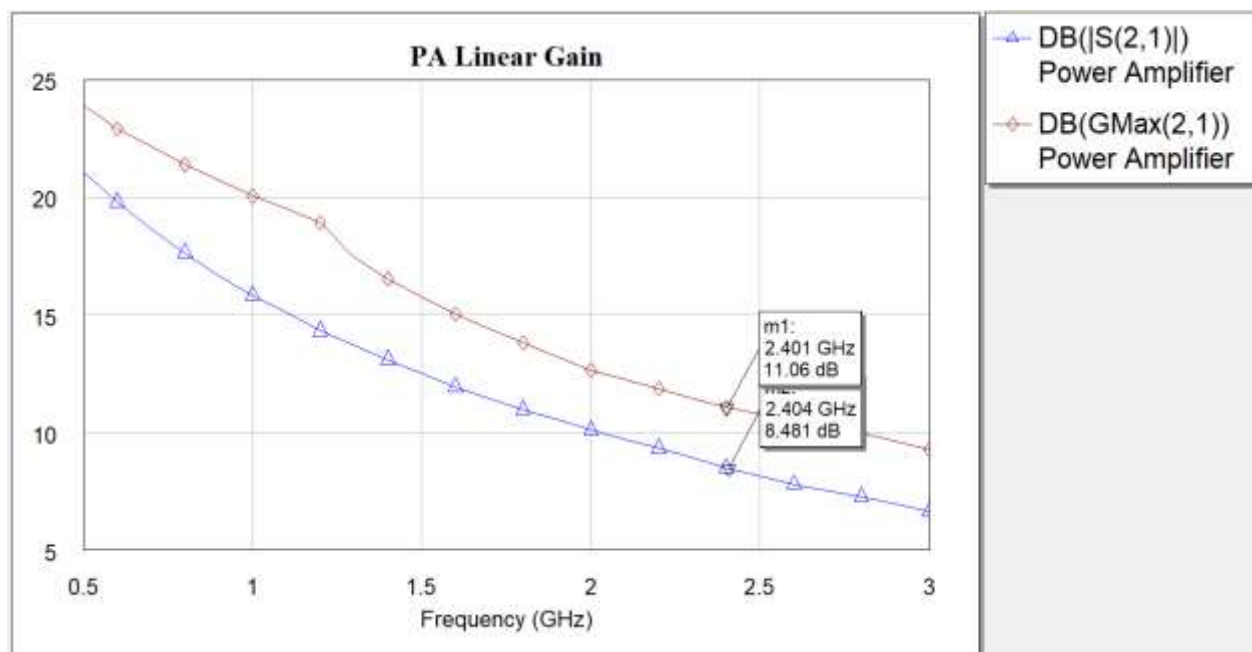


Рисунок 3 - Коэффициенты усиления усилителя мощности

Заключение.

Проведённое исследование продемонстрировало эффективность применения среды проектирования AWR для анализа и оптимизации усилителя мощности ВЧ в радиолокационной системе. Результаты моделирования подтвердили, что разработанная схема обеспечивает стабильное усиление 11.06 дБ на целевой частоте 2.4 ГГц, удовлетворяя ключевым требованиям по мощности и качеству сигнала. Особое значение в работе системы играет антенный переключатель, который минимизирует потери при переключении между режимами передачи и приёма, повышая общую эффективность радиолокационного комплекса.

Список использованных источников:

1. Транзистор BFG520/XR типа NPN широкой полосы частот 9 ГГц : техническое описание, редакция 5 / NXP Semiconductors, 2021.
2. Гончаренко, И.В. Проектирование усилителей производительности СВЧ : монография / И.В. Гончаренко. – Москва : Радио и связь, 2018. – 328 с.
3. Среда проектирования AWR : руководство пользователя. Версия 15 / Cadence Design Systems, 2022.
4. Примечания к применению Microwave Office : методы проектирования усилителей мощности / Cadence, 2023.
5. Никифоров, В.В. Современные методы проектирования радиоэлектронной аппаратуры с использованием САПР : учеб.-методич. пособие / В.В. Никифоров. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2020.

UDC 621.375.026

MODELING AND ANALYSIS OF RF POWER AMPLIFIER IN RADAR SYSTEM USING AWR DESIGN ENVIRONMENT

Tun Tun Lin, master's student

Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Dubovik I. A. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Annotation. The article presents the results of complex modeling and analysis of the characteristics of a high-frequency (2.4 GHz) power amplifier for radar systems, performed in the professional AWR design environment. The main attention is paid to the study of the key parameters of the amplifier, including the gain (reaching 11.06 dB at a frequency of 2.401 GHz), stability of operation and energy efficiency. A detailed analysis of the circuit containing capacitors (200 pF - 100,000 pF), inductors (100 nH), resistors (75 kOhm) and other key components is carried out. Particular attention is paid to the issues of parameter optimization for bandwidth expansion and impedance matching improvement. The results of the study demonstrate the compliance of the developed circuit with modern requirements of radar systems and offer specific solutions for their practical implementation. The article also considers the practical application of the obtained results in the design of airborne and ground-based radar stations.

Keywords. Power amplifier, AWR Design Environment, radar system, S-parameters, BFG520, linear gain.