

Дёмочкин Андрей Игоревич,
инженер-конструктор 3 категории

Зикий Анатолий Николаевич,
с.н.с., к.т.н.

Кочубей Алексей Сергеевич,
инженер-конструктор 1 категории

Щепетьева Ольга Сергеевна,
инженер

УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ В РЕЖИМЕ УМНОЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование усилителя мощности диапазона частот 1-1500 МГц в режиме умножения частоты. Даны описания функциональной и принципиальной схемы, а также фото и описание конструкции. В качестве результатов эксперимента представлены:

– амплитудно-частотная характеристика в полосе 1-1300 МГц в режиме усиления слабого сигнала (-40 дБВт);

– спектр гармоник при $P_{вх} = 0$ дБм; $f_{вх} = 690$ МГц;

– спектр гармоник при $P_{вх} = 0$ дБм; $f_{вх} = 444$ МГц.

Достигнуты следующие результаты:

– диапазон входных частот 444 – 690 МГц;

– диапазон выходных частот 444 – 1776 МГц;

– коэффициент передачи при $P_{вх} = 0$ дБм не менее 1,83 дБ в режиме удвоения частоты;

– входное сопротивление 50 Ом;

– сопротивление нагрузки 50 Ом;

– питание ± 12 В;

– токи не более 120 мА.

Ключевые слова: Умножитель частоты, усилитель мощности; спектр гармоник; моделирование фильтра нижних частот; эксперимент.

Введение

Умножители частоты нашли широкое применение в трактах формирования радиопередающей аппаратуры, в гетеродинных трактах радиоприёмной аппаратуры и измерительной техники. Описанию умножителей частоты посвящены многочисленные публикации, в том числе монографии [1,2], учебные пособия [3,4], статьи [5-7], диссертации [8], патенты [9], однако многообразие требований к ним заставляют разработчиков искать новые схемотехнические и конструктивно-технологические решения.

Объектом исследований в данной работе является усилитель мощности 1-1500 МГц из комплекта прибора Х1-55 [10], используемый в режиме умножения частоты. Ранее в он таком режиме не исследован.

Целью данной работы является измерение основных параметров усилителя мощности в режиме умножения частоты. К нему предъявляются следующие требования:

– диапазон входных частот от 444 до 690 МГц;

– диапазон выходных частот от 444 до 1776 МГц;

– входное сопротивление 50 Ом;



- сопротивление нагрузки 50 Ом;
- коэффициент передачи в режиме удвоения частоты не менее 1,83 дБ;
- напряжение питания ± 12 В.

Схема и конструкция [10,11].

На рисунке 1 приведена функциональная схема исследуемого усилителя. Усилитель состоит из аттенюатора на рпн – диодах, двух усилителей и одного фильтра нижних частот. Аттенюатор в данном исследовании не используется. При подаче на вход "упр" нулевого напряжения аттенюатор имеет минимальное затухание около 1 дБ.

Усилитель предварительный 0,1-1,5 ГГц (рисунок 2) состоит из четырех однотипных каскадов. Каскады построены по схеме с общим эмиттером. Для выравнивания АЧХ в эмиттерной цепи (R8, R9, C5, C8) и в коллекторной цепи (C4, R6) введена частотно-зависимая обратная связь. Питание первых двух каскадов осуществляется от источника плюс 12 В, а последние два от плюс 12 и минус 12 В.

Усилитель окончательный 0,1-1,5 ГГц (рисунок 3) для повышения выходной мощности собран на двух транзисторах 2Т642А-2 [12] (v_1 ; v_2), соединенных параллельно. Базы транзисторов соединены непосредственно, коллекторы – через определенный отрезок микрополосковой линии. В цепях эмиттера для выравнивания АЧХ введена частотно-зависимая обратная связь, состоящая из конденсаторов C4, C6, C8 (C5, C7, C9) и резисторов R2, R4, (R3, R6). Для улучшения КСВН введена обратная связь в цепи коллектор – база (R7). Питание осуществляется от источников плюс 12 В и минус 12 В.

ФНЧ микрополосковый (фильтр нижних частот) типа Кауэра.

Усилитель предварительный размещается на печатной плате из керамики 22ХС размером 64x24x1 мм. Усилитель окончательный расположен на печатной плате из керамики 22ХС размером 30x24x1 мм. Фильтр нижних частот расположен также на плате из керамики 22ХС размером 30x24x1 мм. Все три платы закреплены на носителях и вставлены в корпус чашечного типа с внутренним размером 34,5x121x9,4 мм. После регулировки корпус закрывается герметичной крышкой. Корпус и крышки изготовлены из лёгкого алюминиевого сплава и имеют покрытие олово-висмут. Для облегчения теплового режима усилителя нижняя сторона корпуса имеет оребрение, а боковые стенки корпуса имеют толщину около 7 мм.

На рисунке 4 можно видеть фото усилителя со снятой крышкой, а на рисунке 5 – фильтр нижних частот крупным планом. Его геометрические и электрические параметры приведены в таблице 1.

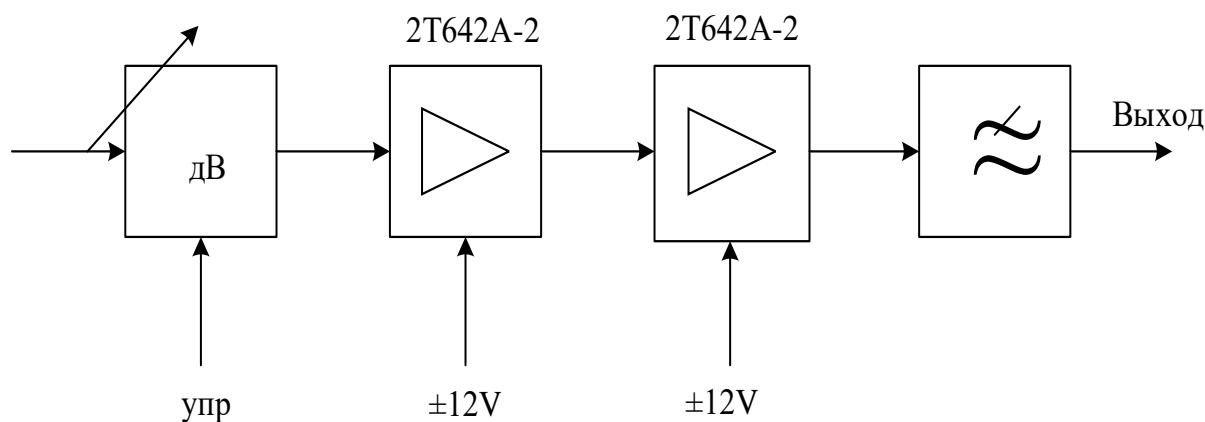


Рисунок 1. Функциональная схема усилителя



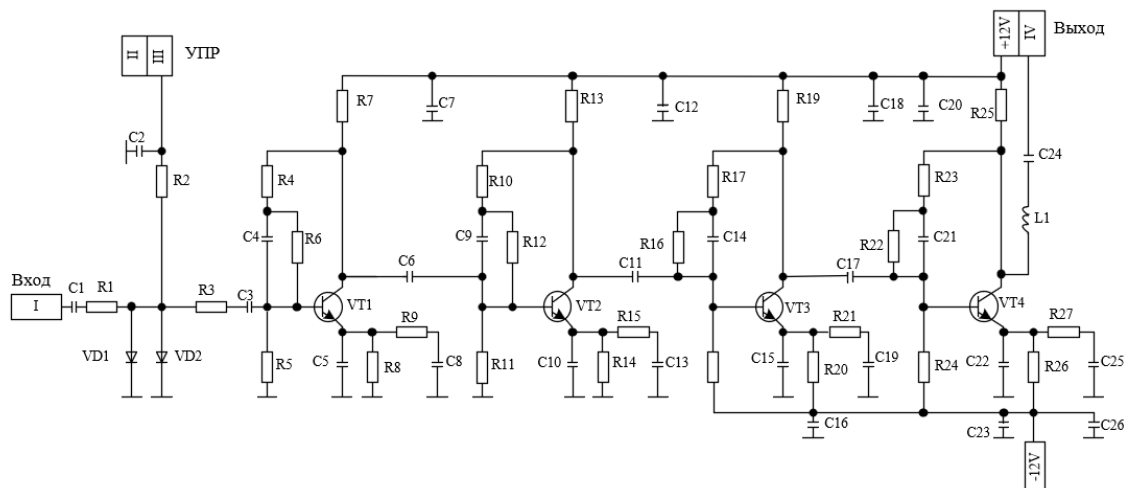


Рисунок 2. Принципиальная схема предварительного усилителя

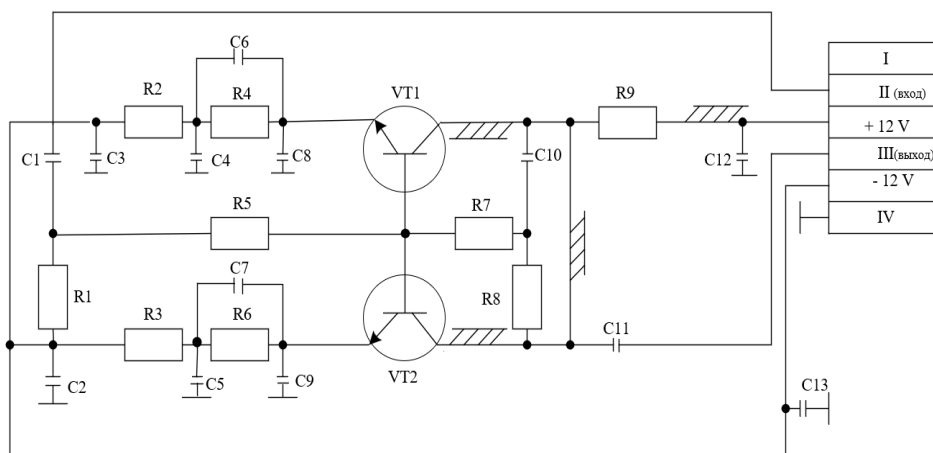


Рисунок 3. Принципиальная схема оконечного каскада

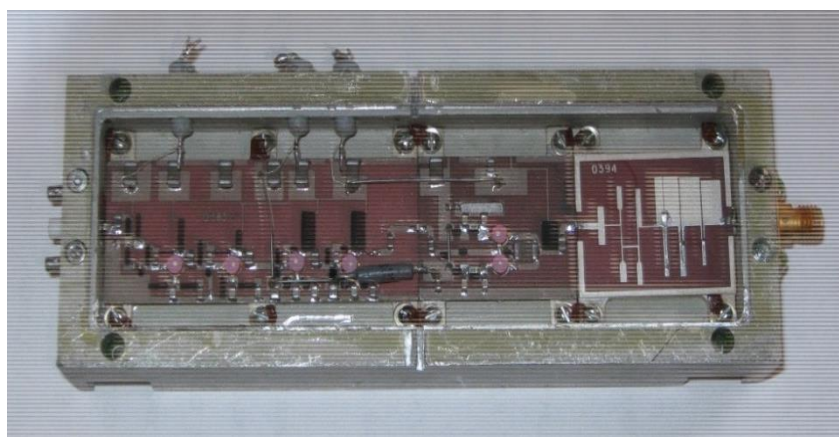


Рисунок 4. Фото усилителя со снятой крышкой

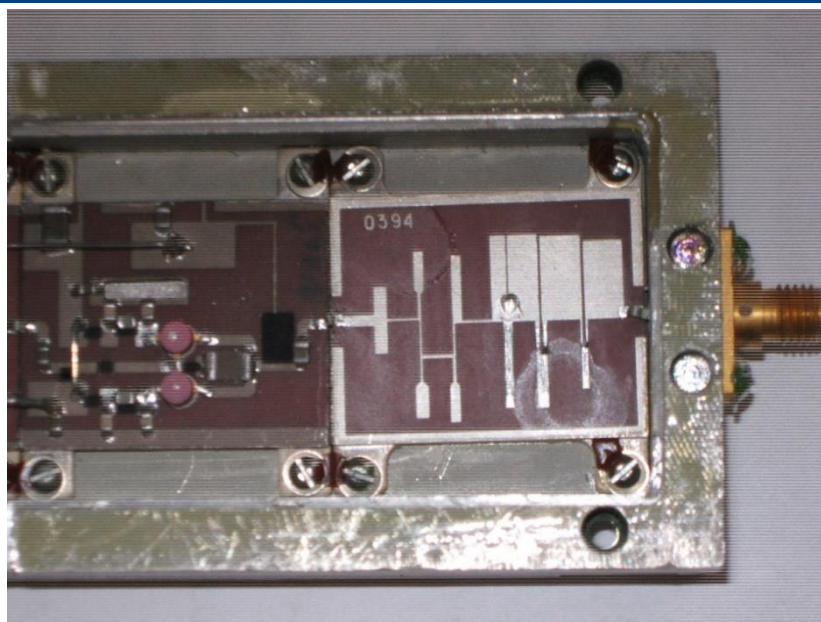


Рисунок 5. Фильтр нижних частот крупным планом

Таблица 1

Геометрические размеры ФНЧ

Позиц. обозн.	Длина, мм	Ширина, мм	Наименование
W1	3,3	0,5	Регулярная линия 50 Ом
W2, W3	3,5	1,2	Шлейф XX
W4	2,8	0,2	Высокоомная МПЛ
W5, W9	3,8	1,2	Шлейф XX
W6	3	0,3	Высокоомная МПЛ
W7	2,8	0,2	Высокоомная МПЛ
W8	2,8	0,1	Высокоомная МПЛ
W10	3,2	0,3	Высокоомная МПЛ
W11	6,5	1	Шлейф XX
W12	3,1	0,2	Высокоомная МПЛ
W13	2,8	0,1	Высокоомная МПЛ
W14	1,8	0,6	Шлейф XX
W15	9	1,8	Высокоомная МПЛ
W16	1,7	1,8	Низкоомная МПЛ
W17	7	1,8	Связанная низкоомная МПЛ
W18, W21	8,2	0,1	Связанная высокоомная МПЛ
W19	1,7	2,5	Низкоомная МПЛ
W20	7	2,5	Связанная низкоомная МПЛ
W22, W25	8,2	0,3	Связанная высокоомная МПЛ
W23	1	1	Низкоомная МПЛ
W24	7	1	Связанная низкоомная МПЛ



W26, W29	6,7	0,5	Связанная высокоомная МПЛ
W27	0,5	1,2	Низкоомная МПЛ
W28	7	1,2	Связанная низкоомная МПЛ
S1, S2	0,1		Зазор, мм
S3, S4	0,2		Зазор, мм
S5, S6	0,1		Зазор, мм
a × b × c	24 × 30 × 1		Размер подложки, мм
ϵ_r	9,3		Относительная диэлектрическая проницаемость
$\tan \delta$	$15 \cdot 10^{-4}$		Тангенс угла диэлектрических потерь

Моделирование ФНЧ

Моделирование фильтра нижних частот проводилось в среде Microwave Office (MWO). Модель ФНЧ из MWO представлена на рисунке 6. Она составлена в соответствии с таблицей 1. На рисунке 7 можно видеть АЧХ ФНЧ в полосе от 0 до 5 ГГц.

При этом затухание на удвоенной частоте среза соответствует 27,5 дБ, а на утроенной частоте среза затухание более 80 дБ.

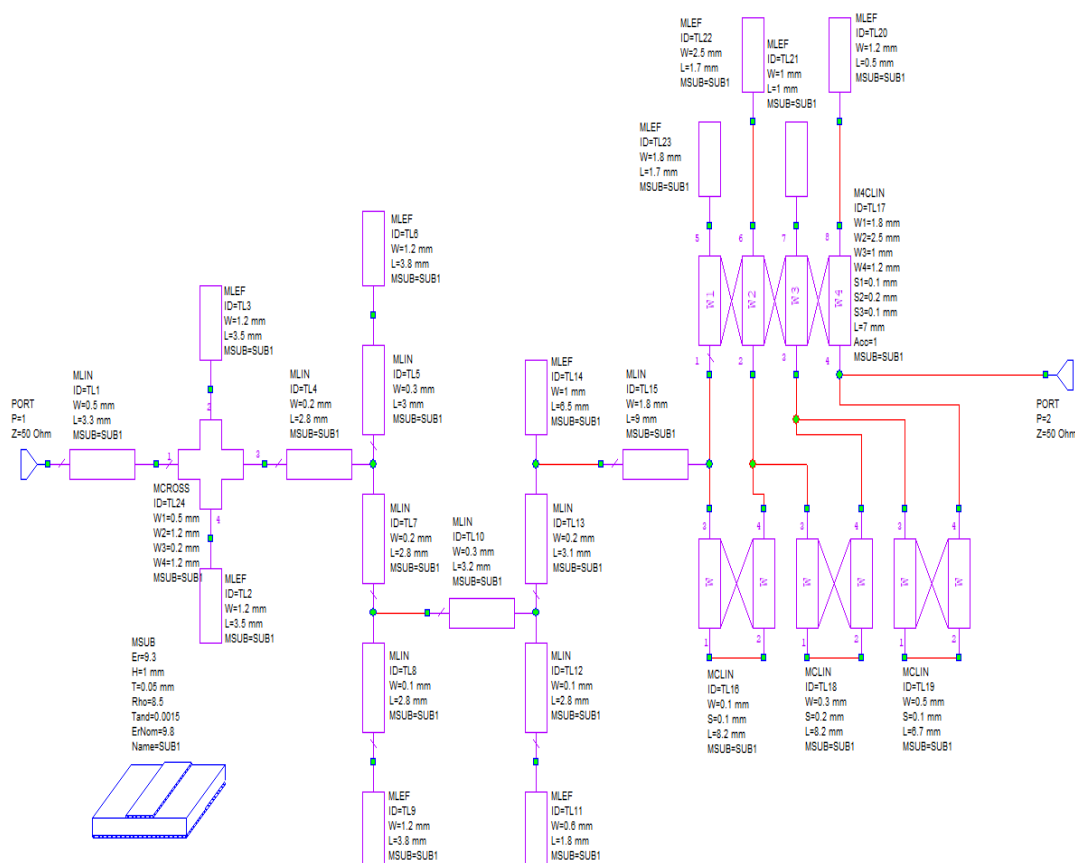


Рисунок 6. Модель ФНЧ из MWO



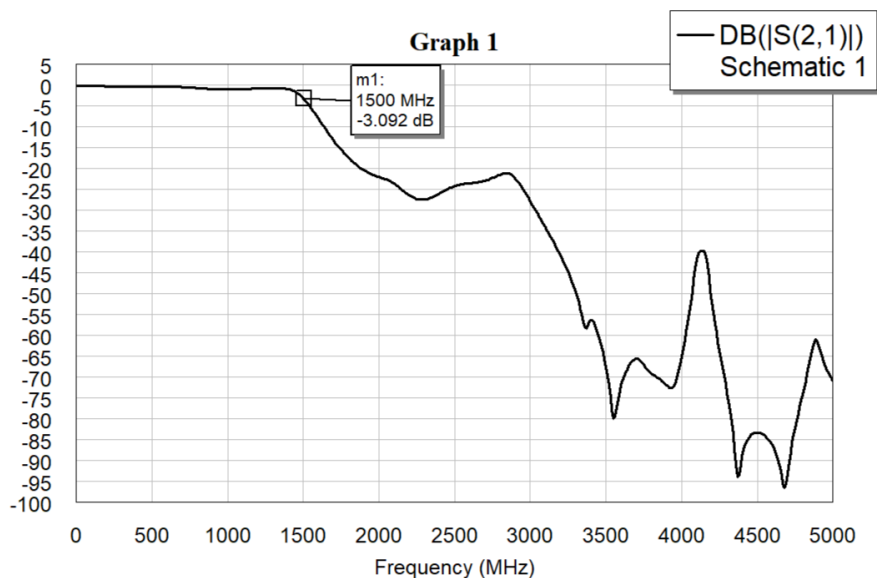


Рисунок 7. АЧХ ФНЧ из MWO

Из рисунка 7 видно, что ФНЧ имеет частоты режекции около $fr_1 = 3,6$ ГГц, $fr_2 = 4,3$ ГГц, $fr_3 = 4,7$ ГГц, что характерно для фильтров Кауэра.

Эксперимент

Основная часть экспериментов проводилась на установке, структурная схема которой показана на рисунке 8.

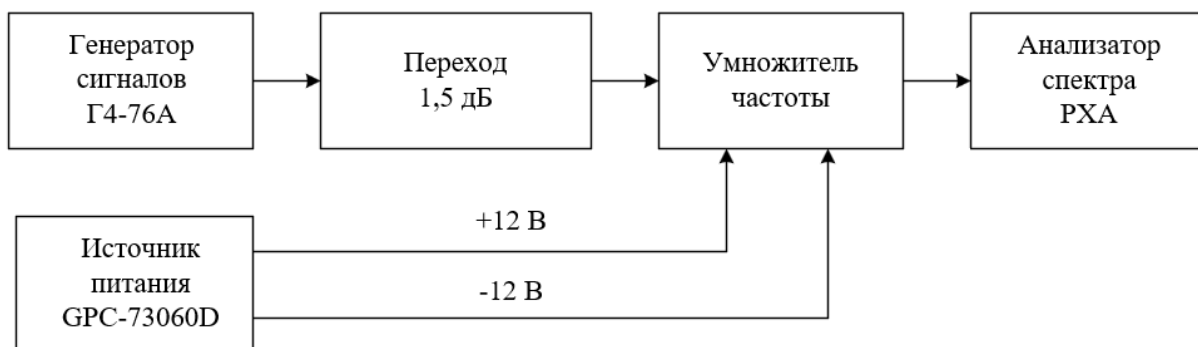


Рисунок 8. Структурная схема измерительной установки

В качестве источника входного сигнала использован генератор типа Г4-76А в режиме непрерывной генерации (некалиброванный выход). В качестве индикатора частоты и мощности выходного сигнала использован анализатор спектра типа РХА. Источником двухполярного питания служил прибор GPC-73060D.

Первый эксперимент проводился на другой измерительной установке, содержащей векторный анализатор цепей типа «Обзор -103», источник питания GPC-73060D, набор кабелей и переходов. На ней снята амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя 1-1500 МГц в режиме усилителя. Эта АЧХ показана на рисунке 9. Из неё видно, что минимальный коэффициент усиления в полосе 0,3-1300 МГц равен 18 дБ.

Второй эксперимент проводился на установке рисунок 8. На вход подавался сигнал частотой около 690 МГц и мощностью 0 дБм. На выходе зафиксированы частоты 690 и 1380 МГц с мощностью 8 дБм и 1,86 дБм (рисунок 10).



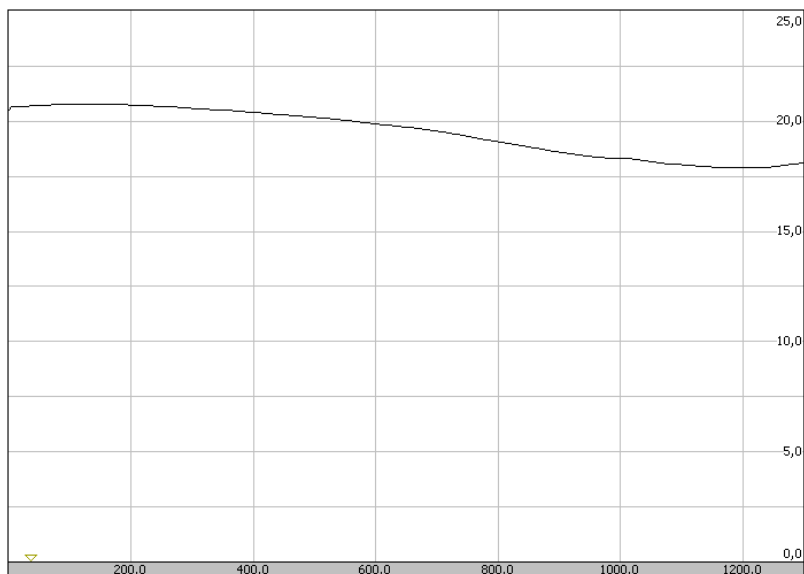


Рисунок 9. АХЧ усилителя 1-1500 МГц в полосе до 1300 МГц

Третий эксперимент проводили на установке по рисунку 8. На вход умножителя подавался сигнал частотой 444 МГц и мощностью 0 дБм. На рисунке 11 можно видеть спектр четырёх гармоник (с первой по четвёртую).

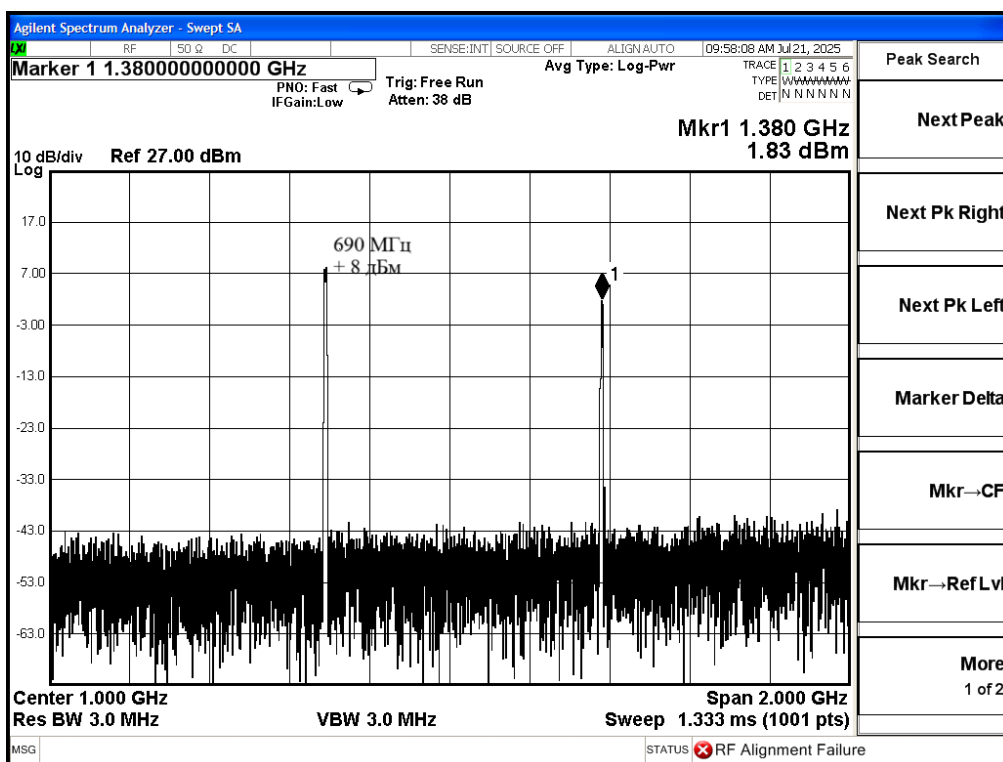


Рисунок 10. Спектр первой и второй гармоники на выходе умножителя частоты при входной частоте 690 МГц



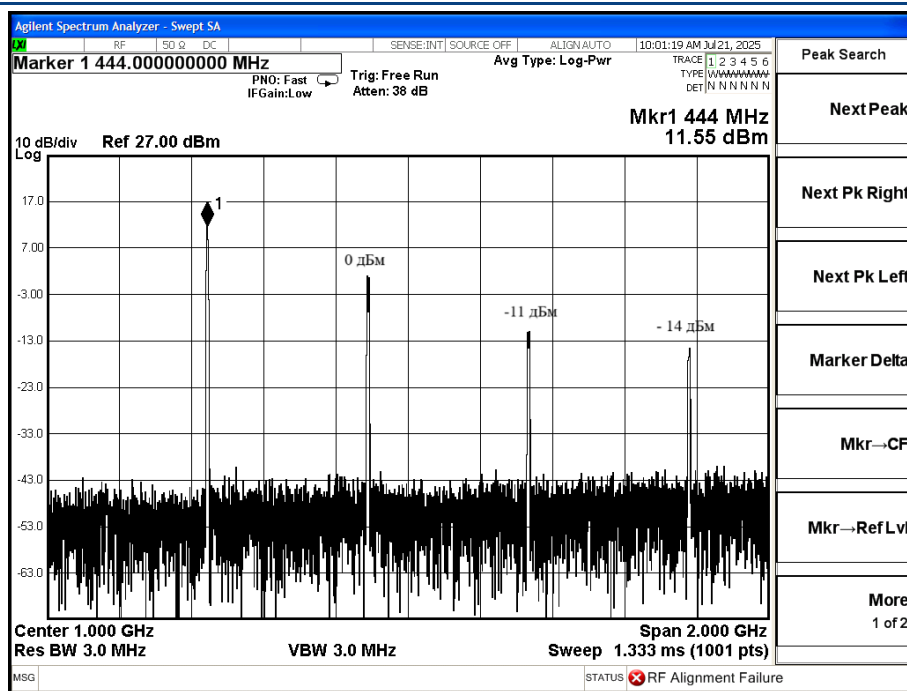


Рисунок 11. Спектр гармоник на выходе умножителя частоты при частоте $f_{вх} = 444$ МГц

Выводы

Ниже в таблице 2 проводится сравнение заданных и достигнутых параметров умножителя частоты.

Таблица 2

Основные параметры умножителя частоты

Наименование параметра, размерность	Задано	Модель ФНЧ	Измерение
Диапазон входных частот, МГц	444-690	-	444-690
Диапазон выходных частот, МГц	444-1776	1-1500	444-1776
Входная мощность, дБм	0	-	0
Выходная мощность, дБм (для 2 ^й гармоники)	0	-	1,83
Коэффициент передачи в режиме усилителя, дБ	≥ 18	-	18
Коэффициент передачи в режиме удвоителя, дБ	0	-	1,5
Входное сопротивление, Ом	50	50	50
Сопротивление нагрузки, Ом	50	50	50
Напряжения питания, В	± 12	-	± 12
Напряжения управления, В	0	0	0
Ток потребления по цепи + 12 В; мА	-	-	112
Ток потребления по цепи - 12 В; мА	-	-	85

Из этой таблицы видно, что все требования к умножителю частоты выполняются. Умножитель частоты рекомендуется использовать в тракте формирования.

Список литературы:

1. Красноголовый Б.Н., Плавский Л.Г. Варакторные умножители частоты. Минск: Издательство БГУ им. В. И. Ленина, 1979. – 286 с.



2. Дингес С. И., Кочемасов В.Н. Радиочастотные компоненты. Устройства преобразования частот. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 432с.
3. Зикий А.Н., Помазанов А.В., Плёткин А.П. Преобразование частоты радиосигналов в телекоммуникационных системах. Учебное пособие. Ростов-на-Дону – Таганрог, Издательство ЮФУ, 2022. – 195с.
4. Алексеев Ю.И. Генераторы эквидистантных частотных спектров. Учебное пособие. Таганрог, Издательство ЮФУ, 2007. – 64с.
5. Зикий А.Н., Зламан П.Н. Варакторный умножитель частоты 400 МГц. Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018, №3, т. 14, с. 98-102
6. Зламан П.Н., Андрианов А.В., Зикий А.Н., Экспериментальное исследование микросхемы LTC5553 в режиме умножения частоты с направленным ответвителем. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020, т. 16, №1, с.106-111
7. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Ронис В.Н. Умножитель частоты высокой кратности. // Сборник статей II международной научно-практической конференции. – 2020. Петрозаводск, МЦНП «Новая наука»
8. Березин В.В. Моделирование и проектирование широкополосных диодных умножителей частоты КВЧ – диапазона: автореферат дис. кандидата технических наук. – Нижний Новгород: ННГУ, 2018. – 20 с.
9. Патент РФ № 2.628.993. Умножитель частоты высокой кратности. М.кл. H03B 19/00., опубликовано 23.08.2019.
10. Прибор для исследования АЧХ – X1-55. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 1.400.293 ТО. – 134 с.
11. Прибор для исследования АЧХ – X1-55. Альбом схем. 1.400.293 ТО1. – 134 с.
12. Петухов В. М. Биполярные транзисторы средней и большой мощности сверхвысокочастотные и их зарубежные аналоги. Справочник. Том 4. Каталогное издание. – М.: «КУБК-а» Москва, 1997. – 544 с.

