

# Сравнительное компьютерное проектирование умножителя частоты высокой кратности с использованием радиоэлектронного и радиофотонного подходов

М.Е. Белкин<sup>1</sup>, В.В. Головин<sup>2</sup>, Л.И. Жуков<sup>1</sup>, Ю.Н. Тыщук<sup>2</sup>, А.С. Сигов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет

<sup>2</sup>Севастопольский государственный университет

**Аннотация:** в работе выполнено совместное моделирование с помощью САПР Cadence AWRDE двух конкретных схем сверхвысокочастотного умножителя частоты высокой кратности от нижней границы С-диапазона до верхней границы W-диапазона с использованием радиоэлектронной и радиофотонной технологий. Сравнение обеих схем построения, реализованных на основе современной компонентной базы, показало преимущество радиофотонного подхода, как с точки зрения двукратного уменьшения числа последовательных ступеней умножения, так и улучшения спектральной чистоты выходного сигнала и амплитудной характеристики исследуемых устройств.

**Ключевые слова:** радиофотоника, миллиметровый диапазон, умножитель частоты, моделирование

## 1. Введение

Радиофотоника (англоязычный эквивалент: Microwave Photonics) в настоящее время считается одним из наиболее интенсивно развивающихся в мире междисциплинарным направлением науки и технологии, созданным на стыке сверхвысокочастотной (СВЧ) радиоэлектроники и фотоники. Его зарождение и формирование в мировой науке относится к концу 70-х годов прошлого столетия. Проведенные с тех пор за рубежом исследования и разработки убедительно показали, что реализация данного подхода в радиоэлектронных системах (РЭС) СВЧ диапазона, помимо значительного улучшения ключевых технико-экономических показателей, как например, мгновенной полосы пропускания, динамического диапазона, пропускной способности канала связи, массогабаритных и стоимостных характеристик, энергопотребления, надежности, дополнительно приведет к улучшению таких важных характеристик, как электромагнитная совместимость, стойкость к внешним воздействиям (в том числе, преднамеренным), экологичность. Уровень его научного развития подтверждается более, чем 20 тысячами публикаций в год только по базе данных IEEE Xplore, технологического – созданием на его основе нового поколения фотонных и радиофотонных интегральных схем [1], мировой объем продаж которых уже почти сравнялся с объемом волоконно-оптических компонентов и устройств.

Радиофотонная технология может быть применена практически во всех видах перспективной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) военного и гражданского назначений. Уровень ее современного развития подробно освещен в многостраничных обзорах в высокорейтинговых журналах и трудах крупных международных конференций. В частности, для телекоммуникации [2] (сотовые сети пятого и последующих поколений (5G, 6G) с распределением радиосигналов в миллиметровом диапазоне), радиолокации [3] (сверхширокополосные многодиапазонные РЛС с низкой вероятностью перехвата и с инверсным синтезом апертуры, радиопортретирование в реальном времени), радиоэлектронному противодействию [4]

(сверхширокополосный формирователь помеховых радиосигналов, блокиратор радиоуправляемых взрывных устройств), измерительной техники (параметры электромагнитного поля, фазовые шумы генераторов, направление прихода радиолуча) [5]. Ее скорейшее внедрение позволило бы не только решить ближайшие задачи отечественной радиоэлектронной промышленности и промышленности средств связи в области импортозамещения, но и существенно повысить обороноспособность страны, а также конкурентоспособность и экспортный потенциал российской техники в краткосрочной и долгосрочной перспективе за счет опережающих поставок радиоаппаратуры, еще не освоенной зарубежной промышленностью.

С целью наглядной демонстрации преимуществ радиофотонного подхода в работе выполнено совместное моделирование двух конкретных схем сверхвысокочастотного (СВЧ) умножителя частоты от нижней границы С-диапазона до верхней границы W-диапазона с использованием радиоэлектронного и радиофотонного подходов. В обоих случаях моделирование проведено с применением широко известной в СВЧ электронике системы автоматизированного проектирования (САПР) Cadence AWRDE, в использовании которой для моделирования радиофотонной компонентной базы и устройств у авторов статьи накоплен более, чем 10-летний опыт, обобщенный в [6-8].

## 2. Исходные данные и схемы для моделирования

Общие для обеих схем исходные данные приведены в табл. 1. Основное требование к реализации схем состоит в использовании только существующих на современном мировом рынке радиоэлектроники и фотоники компонентов.

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	Значение
Частота входного сигнала, ГГц	4,25
Частота выходного сигнала, ГГц	102
Кратность умножения	24
Входная мощность, дБм	$\geq 5$
Коэффициент передачи, дБ	$\geq -5$

Схема исследуемого радиоэлектронного умножителя частоты приведена на рис. 1. Как следует из рисунка, вследствие принципиальной невозможности создать в СВЧ диапазоне эффективный микроэлектронный умножитель высокой кратности заданное 24-кратное умножение достигается посредством разбиения схемы на 4 последовательных ступени. В первых трех реализуется умножение на 2, а в последней – умножение на 3. Каждая из ступеней содержит компенсирующий потери электронный усилитель, умножитель по второй гармонике и устраняющий высшие гармоники и другие продукты нелинейной операции полосно-пропускающий фильтр (ППФ). А именно, первые две ступени МР2-1 и МР2-2 (4,25-8,5 ГГц и 8,5-17 ГГц) построены на базе микросхем НМС573LC3 фирмы Analog Devices, каждая из которых содержит входной и выходной усилители и умножитель, а ППФ ВРФ1 и ВРФ2 реализованы соответственно на базе SCF-96222270, SCF-17304240 производства фирмы Eravant. Вследствие недостаточности усиления в первых двух ступенях для обеспечения оптимального режима работы последующих ступеней на выходе второй потребовалось ввести дополнительный усилитель RFA1 (Analog Devices, НМС1082LP4). Следующая за ним третья ступень (17-34 ГГц) выполнена на базе микросхемы МР2-3 (Analog Devices, НМС598) и ППФ ВРФ3 (Eravant, SCF-35310340). Ввиду отсутствия микросхем миллиметрового диапазона четвертая ступень (34-102 ГГц) выполнена на базе волноводных устройств, включая умножитель частоты МР3

коаксиально-волноводной конструкции (Virginia Diodes, WR8.0x3) и волноводные усилитель RFA2 (Eravant, SBL-6531243550) и ППФ BPF4 (Eravant, SWF-10404340-10).

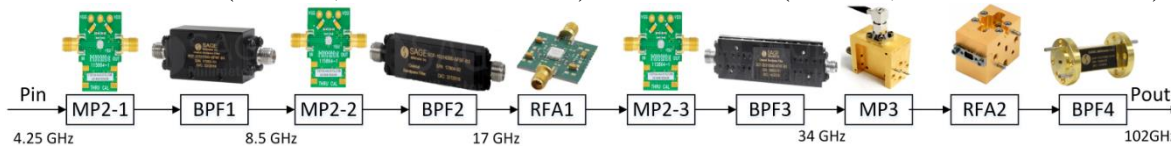


Рисунок 1. Схема радиоэлектронного умножителя частоты.

Применение радиофотонного подхода может обеспечить умножение частоты радиосигналов с более высокой кратностью, что принципиально позволяет упростить его общую схему, улучшив выходные характеристики. Схема исследуемого радиоэлектронного умножителя частоты приведена на рис. 2. Как следует из рисунка, заданное 24-кратное умножение достигается посредством разбиения схемы на 2 последовательных ступени. В первой реализуется умножение на 4, а во второй – умножение на 6. В обеих ступенях процесс умножения частоты радиосигнала реализуется с помощью электрооптического модулятора Маха-Цандера, работающего в режиме смещения, обеспечивающего максимальное пропускание, в первой ступени (MZM1, ThorLabs, LN05S-FG) и в режиме смещения, обеспечивающего минимальное пропускание, во второй ступени (MZM2, EOspace, Custom). Оптическая накачка обоих модуляторов осуществляется от одного и того же лазерного излучателя (SLS, Pure Photonics, PPCL300). Для формирования модулирующего радиосигнала на входе MZM2 в первой ступени дополнительно осуществляется оптико-электрическое преобразование с помощью фотодетектора (PD1, Finisar BPDV2150) с последующим усилением (EA, Analog Devices HMC1082LP4) и фильтрацией (RF BPF, Eravant SCF-17304240). Во второй ступени выходной оптический сигнал MZM2 фильтруется с помощью оптического полосно-запирающего фильтра (OBGF, Teraxion TNF), устраняющего остатки несущей и первые две гармоники, усиливается с помощью оптического усилителя (OA, Ericsson PGE 60830) и преобразуется в суб-терагерцевый диапазон с помощью еще одного фотодетектора (PD2, Finisar XPDV4121R).

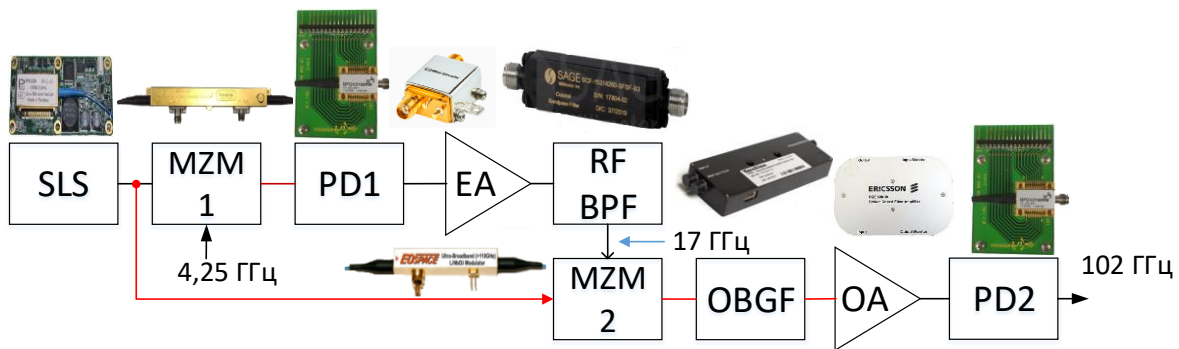


Рисунок 2. Схема радиофотонного умножителя частоты.

Простое сравнение двух дизайнов показывает преимущество радиофотонного подхода с точки зрения двукратного уменьшения числа последовательных ступеней умножения.

### 3. Моделирование радиоэлектронной схемы умножителя частоты

Выполненная в САПР AWRDE модель радиоэлектронного умножителя частоты, построенная на базе рис. 1, представлена на рис. 3. В модели использованы библиотечные модели генератора входного сигнала 4,25 ГГц (TONE), полосно-пропускающих фильтров (BPFD), а также узлов умножения частоты в виде подсхем

(SUBCKT). Данные для расчета выходных характеристик выбирались на сайтах соответствующих производителей.

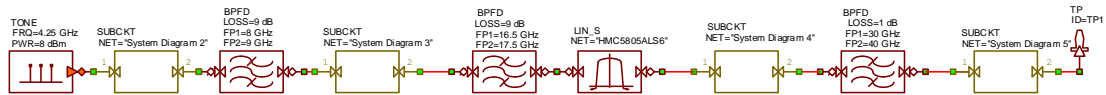


Рисунок 3. AWRDE модель радиоэлектронного умножителя частоты.

#### 4. Моделирование радиопотонной схемы умножителя частоты

Выполненная также в САПР AWRDE модель радиопотонного умножителя частоты, построенная на базе рис. 2, представлена на рис. 4. В модели использована библиотечная модель эквивалентного оптического разветвителя (SPLIT2). Остальные модели электронных и оптических узлов [6-8] схемы рис. 2 реализованы в виде подсхем (SUBCKT). Данные для расчета выходных характеристик выбирались на сайтах соответствующих производителей.

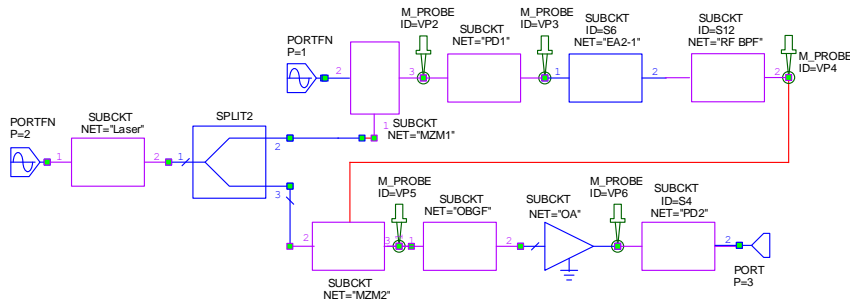


Рисунок 4. AWRDE модель радиопотонного умножителя частоты.

#### 5. Результаты модельных экспериментов

Рассчитанные по моделям рис. 3 и 4 спектры выходного сигнала исследуемых умножителей частоты представлены на рис. 6. Как следует из рисунка, выходные спектры обеих исследуемых схем имеют высокую степень подавления побочных мод. Тем не менее, из-за большей линейности характеристик используемых оптоэлектронных устройств его значение для радиопотонного подхода получилось на 13 дБ выше, чем для радиоэлектронного подхода.

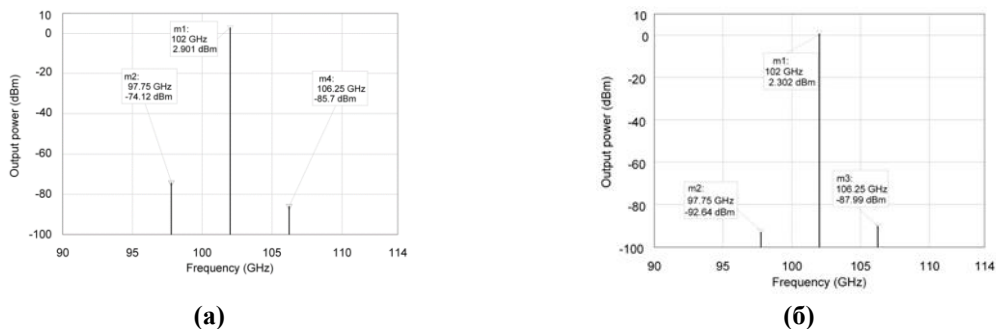
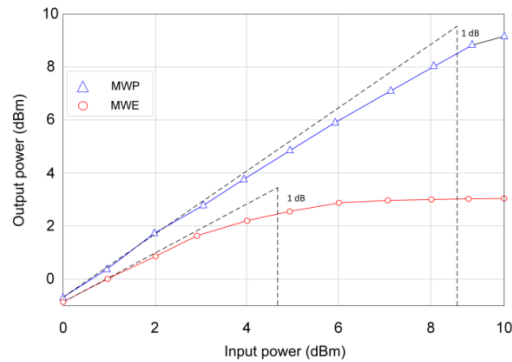


Рисунок 5. Спектры выходного сигнала радиоэлектронного (а) и радиопотонного (б) умножителей частоты.

Рассчитанные по моделям рис. 3 и 4 амплитудные характеристики исследуемых умножителей частоты представлены на рис. 6. Как следует из рисунка, линейный уровень входной мощности радиопотонной схемы по стандартному критерию отклонения на 1 дБ на 5 дБ выше, чем у радиоэлектронной схемы.



**Рисунок 6.** Амплитудные характеристики радиоэлектронного и радиофотонного умножителей частоты.

## 6. Заключение

В работе выполнено совместное моделирование с помощью САПР Cadence AWRDE двух конкретных схем сверхвысокочастотного умножителя частоты высокой кратности. Результаты моделирования обеих схем, реализованных на основе современной компонентной базы, показали преимущество радиофотонного подхода с точки зрения уменьшения числа последовательных ступеней умножения и улучшения спектральной чистоты выходного сигнала и амплитудной характеристики исследуемых устройств. Очевидным путем реализации остальных изложенных во Введении преимуществ является развитие в России технологии фотонных интегральных схем.

Работа поддержана **грантом Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-20083).**

### Список литературы

1. Jianping Yao. Photonic Integrated Circuits for Microwave Photonics. 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR).
2. Waterhouse R. and Novak D. 'Realizing 5G', IEEE Microwave Magazine, 2015, Vol. 16, No 8, p. 84-92.
3. Shilong Pan, Yamei Zhang. Microwave Photonic Radars. Journal of Lightwave Technology 2020, V. 38, № 19, p. 5450 – 5484.
4. Paolo Ghelfi, Filippo Scotti, Daniel Onori, and Antonella Bogoni. Photonics for Ultrawideband RF Spectral Analysis in Electronic Warfare Applications. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 25, No. 4, 2019, 8900209
5. Shilong Pan, Jianping Yao. Photonics-Based Broadband Microwave Measurement. Journal of Lightwave Technology 2017, V. 35, № 16, p. 3498 – 3513
6. М.Е. Белкин, С.А. Кудж, А.С. Сигов. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона с использованием радиофотонной технологии. Российский технологический журнал, 2016, № 1 (10), с. 4-20.
7. М.Е. Belkin, V. Golovin, Y. Tyschuk, M. Vasil'ev, and A.S. Sigov, "Computer-Aided Design of Microwave-Photonics-based RF Circuits and Systems," Chapter in book IntechOpen "RF Systems, Circuits and Components". Chapter 4, pp. 61-81 (2018)
8. М.Е. Belkin, T. N. Bakhvalova, V. Golovin, Y.N. Tyschuk, and A.S. Sigov, *Modeling and Simulation in Microwave-Photonics Applications*, In INTECH book "Modeling and Simulation in Engineering - Selected Problems", 2020, 22 pp.