

## Несимметричный антенный модуль на основе двух 1/8 SIW-резонаторов для ММО-применений

А. Г. Алтынников, Р. А. Платонов, А. А. Цымбалюк, А. Е. Комлев<sup>✉</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup> [aekomlev@etu.ru](mailto:aekomlev@etu.ru)

### Аннотация

**Введение.** Постоянно растущие требования к скорости передачи информации приводят ко все более широкому внедрению ММО-систем в телекоммуникационные сети. Существует целый ряд работ, посвященных возможности использования антенных модулей ММО, выполненных на основе SIW-резонаторов. Одно из перспективных направлений в этой области – использование 1/4- и 1/8-модовых SIW-резонаторов, которые позволяют существенно снизить массогабаритные характеристики устройства. Основные недостатки подобных ММО-антенн – узкая полоса частот и относительно низкая изоляция излучателей. В связи с этим разработка технических решений в области конструирования ММО-модулей, способствующих улучшению указанных характеристик, является актуальной задачей.

**Цель работы.** Разработка технических решений в области конструирования антенного модуля на основе 1/8-модовых SIW-резонаторов, позволяющих повысить его излучательные характеристики и взаимную изоляцию излучателей.

**Материалы и методы.** Моделирование характеристик антенного модуля осуществлялось с помощью программных пакетов на основе метода конечных элементов. Прототип антенного модуля изготовлен из фольгированного армированного композитного материала на основе политетрафторэтилена. Параметры модуля измерялись на стенде, собранном на основе векторного анализатора цепей Ceyear 3272C (Ceyear Technologies, Китай).

**Результаты.** Разработана конструкция ММО-модуля на основе двух 1/8-модовых SIW-резонаторов, позволяющая существенно повысить коэффициент усиления излучателей и их взаимную изоляцию. Приведены результаты исследования влияния толщины подложки на характеристики модуля. Продемонстрирована возможность эффективной работы модуля в двухдиапазонных системах за счет использования не только основной, но и старшей резонансной моды SIW-резонаторов. Предложена конструкция ММО-антенны, состоящей из 8 излучателей.

**Заключение.** Показано, что конструкцию ММО-модуля на основе двух 1/8-модовых SIW-резонаторов, разделенных щелью, можно использовать в двухдиапазонных системах. Продемонстрировано одновременное увеличение КУ излучателей модуля и ухудшение их взаимной изоляции с ростом толщины подложки. Разработан вариант конструкции антенного модуля на основе двух 1/8-модовых SIW-резонаторов, позволяющий увеличить изоляцию между излучателями модуля (до –30 дБ).

**Ключевые слова:** ММО, SIW-резонатор, антенна, композитный материал, антенный модуль

**Для цитирования:** Несимметричный антенный модуль на основе двух 1/8 SIW-резонаторов для ММО-применений / А. Г. Алтынников, Р. А. Платонов, А. А. Цымбалюк, А. Е. Комлев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 4. С. 25–35  
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-25-35

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено в рамках Государственного задания № 075-01438-22-07 от 28.10.2022 г. (FSEE-2022-0019).

Статья поступила в редакцию 03.01.2025; принята к публикации после рецензирования 18.03.2025; опубликована онлайн 29.09.2025



## Asymmetry Antenna Module Based on Two Eighth-Mode SIW Resonators for MIMO Applications

Andrey G. Altynnikov, Roman A. Platonov,  
Andrey A. Tsymbalyuk, Andrey E. Komlev<sup>✉</sup>

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ aekomlev@etu.ru

### Abstract

**Introduction.** The ever-increasing demands on the speed of information transmission lead to an increasing adoption of MIMO systems in telecommunication networks. There are a number of works devoted to the possibility of using MIMO antenna modules based on SIW resonators. One of the promising directions in this field is the use of 1/4 and 1/8 mode SIW resonators, which can significantly reduce the weight and size characteristics of the device. The main disadvantages of such MIMO antennas are the narrow frequency band and a relatively low isolation of the radiators. Therefore, the advancement of engineering approaches to designing MIMO modules that boost these attributes is a relevant research task.

**Aim.** Development of innovative engineering approaches to designing antenna modules utilizing 1/8 mode SIW resonators for application in MIMO, which enhance their radiation properties and improve the isolation between the radiators.

**Materials and methods.** The characteristics of the antenna module were simulated in software packages using the finite element method. The prototype antenna module was manufactured using a metallized composite polytetrafluoroethylene material. The network analyzer Ceyear 3272C was used to measure the characteristics of the antenna module prototype.

**Results.** The MIMO module based on two 1/8-mode SAW resonators with notable improvement in both the gain of the radiation elements and their isolation was developed. The results of a study into the relationship between substrate thickness and the features of the module are presented. The possibility of using the developed module in dual-band systems by operating not only on the main, but also on the higher resonant mode of SIW resonators is demonstrated. The design of a MIMO module consisting of eight radiation elements is proposed.

**Conclusion.** The MIMO module design based on two 1/8-mode SIW resonators separated by a gap can be used in dual-band systems operated in several modes. An increase in the substrate thickness was shown to lead to both an improvement in the module's antenna gain and a reduction in their insulation effectiveness. An antenna module design based on a pair of 1/8-mode SAW resonators, which enables improved insulation between the radiators (up to –30 dB), is proposed.

**Keywords:** MIMO, SIW resonator, antenna, composite material, antenna module

**For citation:** Altynnikov A. G., Platonov R. A., Tsymbalyuk A. A., Komlev A. E. Asymmetry Antenna Module Based on Two Eighth-Mode SIW Resonators for MIMO Applications. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 4, pp. 25–35.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-25-35

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Source of funding.** The study was carried out within the framework of the state assignment No. 075-01438-22-07 of 28.10.2022 (FSEE-2022-0019).

Submitted 03.01.2025; accepted 18.03.2025; published online 29.09.2025

**Введение.** Активное развитие телекоммуникационных сетей четвертого и пятого поколений, характеризующихся высокой скоростью передачи информации, неразрывно связано с необходимостью повышения емкости каналов связи. Очевидным решением является увеличение рабочей полосы частот каналов, однако загруженность спектра (особенно в нижней части СВЧ-диапазона) делает это затруднительным. В связи с этим актуальным направлением СВЧ

антенной техники является разработка МИМО (multi-in-multi-out)-систем, в которых прием и передача данных осуществляются несколькими антеннами одновременно [1–3]. К антеннам для МИМО-систем предъявляется ряд требований, основные из которых – компактность, планарность, простота конструкции, а также высокая степень изоляции излучающих элементов между собой [4]. Самый простой способ снижения связи между элементами МИМО-антенн – увеличе-

ние расстояния между ними. Однако такой способ ведет к увеличению массогабаритных характеристик ММО-антенны. Для антенн планарного типа существует способ уменьшения связи соседних излучателей за счет расположения между ними отражательных/полоснозаграждающих структур, разработанных, как правило, на основе метаматериалов [5–7], что ведет к значительному усложнению конструкции и процесса разработки устройств. С точки зрения компромисса между массогабаритными характеристиками и развязкой излучателей перспективной основой для разработки ММО-антенн можно считать интегрированный в подложку волновод (Substrate Integrated Waveguide, SIW) [8–10]. В диэлектрической подложке формируется SIW-резонатор, а на его поверхности – топология излучающего элемента, например щелевой антенны. Использование подобных антенных устройств крайне перспективно в ММО-системах, так как исключается взаимосвязь между излучателями в объеме подложки, т. е. развязка излучателей будет определяться только излучательными свойствами элементов антенны. Использование 1/2-, 1/4- и 1/8-модовых SIW-резонаторов позволяет кратно уменьшить площадь излучателей для ММО-систем [11, 12]. На рис. 1 приводится сравнение размеров таких SIW-резонаторов с полномоновым. В частности, в [13] представ-

лена конструкция ММО-антенны, состоящей из двух излучателей, выполненных на одном 1/4-модовом SIW-резонаторе. Данная конструкция отличается компактностью, однако форма диаграммы направленности, узкая полоса частот и невысокая взаимная изоляция излучателей являются существенными недостатками. На основе данной конструкции был предложен ряд ее модификаций. В частности, в [14] предложено использование Т-образных щелей для повышения изоляции между излучателями. В [15] авторы описывают конструкцию ММО-антенны из четырех излучателей, разнесенных друг от друга по подложке, с взаимной ориентацией, позволяющей снизить их взаимное влияние. Однако данная конструкция ММО-антенны демонстрирует достаточно низкий коэффициент усиления (КУ).

В рамках данной статьи рассматривается конструкция антенного модуля (АМ), состоящего из двух 1/8-модовых SIW-резонаторов, разделенных с помощью щели, каждый из которых является излучателем. Исследованы характеристики АМ в зависимости от параметров щели. Показано, что увеличение ширины щели в сторону одного из излучателей, приводящее к изменению его резонансной частоты, позволяет повысить взаимную изоляцию излучателей АМ. Предложена модификация топологии излучателей АМ для увеличения их КУ. Исследована зависимость КУ антенны от толщины подложки, а также рассмотрена возможность использования более высоких мод для применения в двухдиапазонных системах. Приведены результаты численного моделирования и экспериментального исследования характеристик изготовленного прототипа.

**Материалы и методы.** В данной статье приводятся результаты как теоретических исследований в области конструирования излучательных элементов для ММО-систем в виде 1/8-модовых SIW-резонаторов, так и экспериментальные характеристики разработанного АМ. При проведении теоретических исследований использовались программные пакеты, предназначенные для полноволнового анализа трехмерных электродинамических структур методом конечных элементов.

При изготовлении прототипа АМ использовался композитный материал на основе поли-

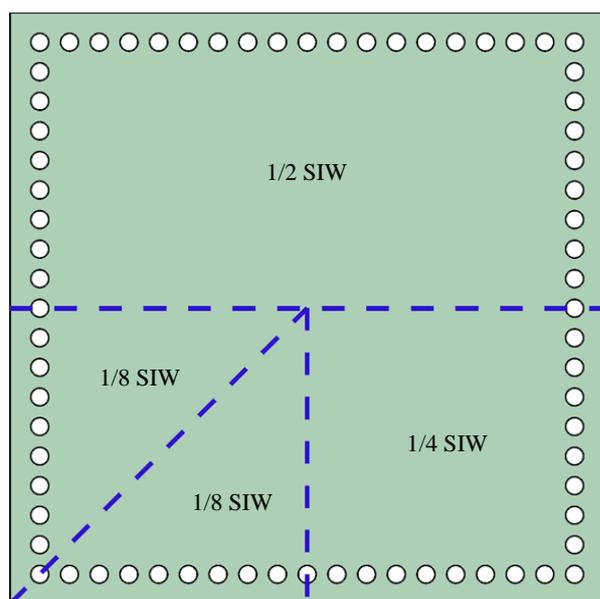


Рис. 1. SIW-резонатор (штриховая линия – магнитная стенка)

Fig. 1. SIW cavity (dashed line – magnetic wall)

тетрафторэтилена. Фольгированные пластины данного материала изготавливались прессованием слоев лакоткани с облицовкой медной электролитической гальваностойкой фольгой толщиной  $0.035 \pm 0.003$  мм с обеих сторон. Лакоткань (стеклоткань) в свою очередь состояла из нескольких слоев стекловолкна с многократной пропиткой каждого слоя фторопластовой эмульсией (водной суспензией) марки Ф-4Д (Ф-4ДС) с последующим спеканием каждого слоя. Толщина листа составляла  $1.0 \pm 0.05$  мм. Значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь полученного материала определялись с помощью цилиндрического резонатора [16], измерения проводились на стенде, собранном на основе векторного анализатора цепей Ceuear 3272C (Ceuear Technologies, Китай). Исследование показало, что на частоте  $\sim 10$  ГГц диэлектрическая проницаемость материала составила  $2.5 \pm 0.1$ , а тангенс угла диэлектрических потерь примерно 0.001. Данные параметры были использованы в ходе моделирования характеристик антенного МИМО-модуля.

Для изготовления прототипа использовался фрезерный ЧПУ-станок Roland MDX-540 (Roland DG Corporation, Япония). Это позволило сформировать топологию и сквозные отверстия

в едином технологическом цикле. Для металлизации сквозных отверстий использовались проводящие серебрясодержащие чернила. Для исследования частотной зависимости коэффициентов отражения и оценки взаимосвязи двух излучательных элементов АМ был использован ранее упомянутый измерительный стенд.

**Результаты.** В [13] впервые продемонстрирована конструкция МИМО-АМ, состоящего из двух 1/8-модовых SIW-резонаторов, разделенных щелью. Помимо целевого назначения, указанного в [13], данный модуль может быть использован в двухдиапазонных системах за счет формирования несимметричной щели. Конструкция предлагаемого двухдиапазонного АМ приведена на рис. 2. Увеличение ширины щели в сторону одного из резонаторов (см. размер  $dW$ ) позволяет сформировать 2 резонатора с близкими резонансными частотами. Таким образом, разница резонансных частот во многом будет определять взаимную изоляцию резонаторов в АМ. В рамках описываемой работы рассчитывалась конструкция АМ с резонансными частотами  $\sim 1.47$  и  $\sim 1.53$  ГГц. Основные размеры данного АМ приведены в табл. 1. В оригинальной конструкции [13] использовалась диэлектрическая подложка толщиной 3 мм. Это увеличивает массогабаритные харак-

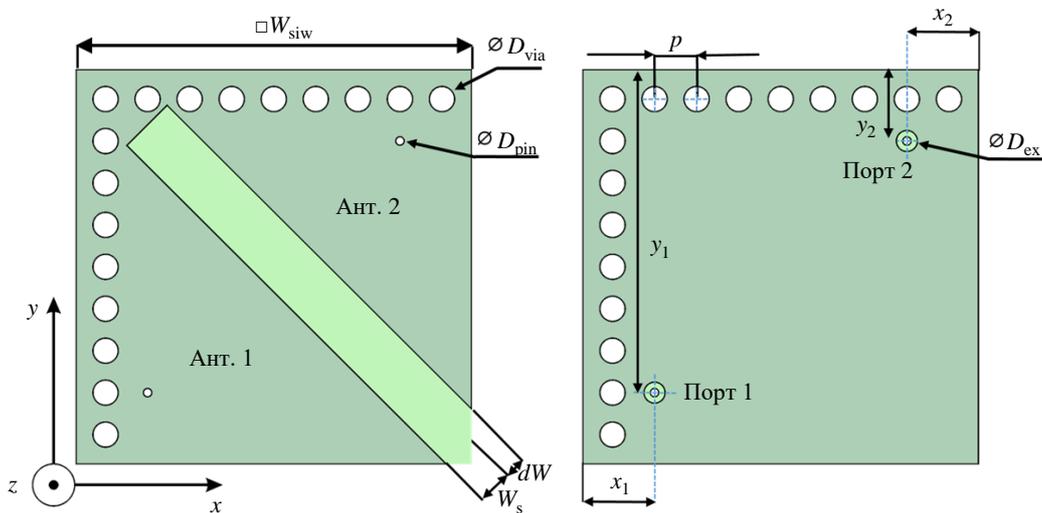


Рис. 2. Конструкция двухантенного МИМО-модуля на основе 1/8 SIW-резонаторов

Fig. 2. Design of two antenna MIMO module based on 1/8 SIW resonators

Табл. 1. Геометрические параметры АМ

Tab. 1. Geometrical parameters of AM

Параметр	$W_{siw}$	$D_{via}$	$D_{pin}$	$D_{ex}$	$W_s$	$dW$	$p$	$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$
Значение, мм	53	2.75	1	3	7	1	6	47	9	9	47

теристики устройства, а также может потребовать использования препрегов для формирования подложки АМ из более тонких слоев диэлектрика. Поэтому целесообразно исследовать влияние толщины подложки на характеристики антенны. Возбуждение резонаторов АМ осуществляется с помощью коаксиальной линии передачи, центральный проводник которой проходит через диэлектрическую пластину и формирует контакт с верхним слоем металлизации (рис. 2).

Результаты моделирования частотных зависимостей коэффициента отражения излучателей исследуемого АМ приведены на рис. 3. Наблюдается эффективное согласование на частотах как основной, так и последующей мод.

Зависимости КУ излучателей на резонансных частотах от толщины подложки приведены на рис. 4. Из рисунка следует, что увеличение толщины ведет к возрастанию КУ как для первой,

так и для второй мод. При этом для более высокой моды влияние толщины на КУ выражено сильнее. В ходе моделирования было установлено, что форма ДН в зависимости от толщины подложки меняется незначительно для каждой из рассматриваемых мод. Типичный вид нормированной ДН представлен на рис. 5.

Ввиду того, что излучатели АМ работают на близких частотах, необходимо оценить их взаимное влияние. Для этого проведено моделирование коэффициента передачи между портами излучателей АМ. В табл. 2 приведены максимальные значения коэффициента передачи ( $|S_{21}|$ ) в полосе частот, ограниченной резонансными частотами 1/8 SIW-резонаторов. Видно, что увеличение толщины подложки приводит к росту коэффициента передачи, что является негативным эффектом. Исходя из этого при выборе толщины подложки АМ необхо-

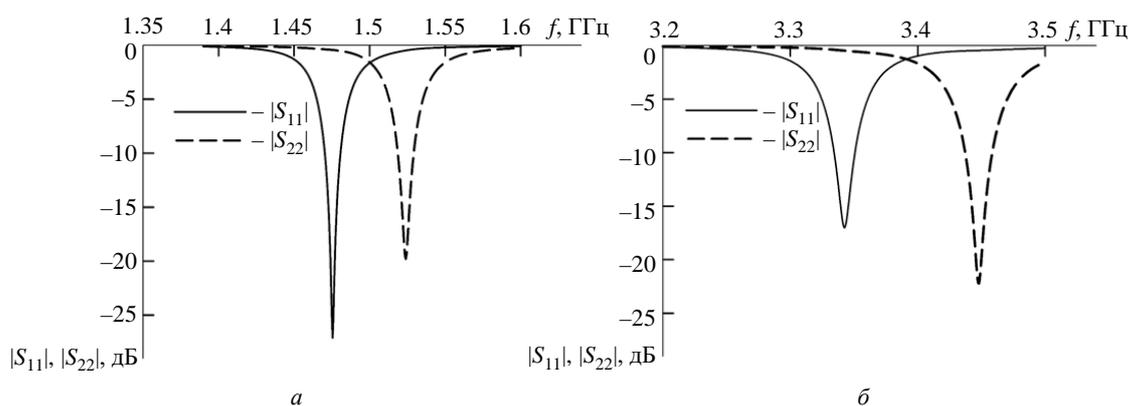


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения антенн МИМО-модуля:  
 а – для основной моды; б – для старшей моды

Fig. 3. Frequency dependencies of the reflection coefficient of the MIMO module antenna system:  
 а – for the fundamental mode; б – the higher mode

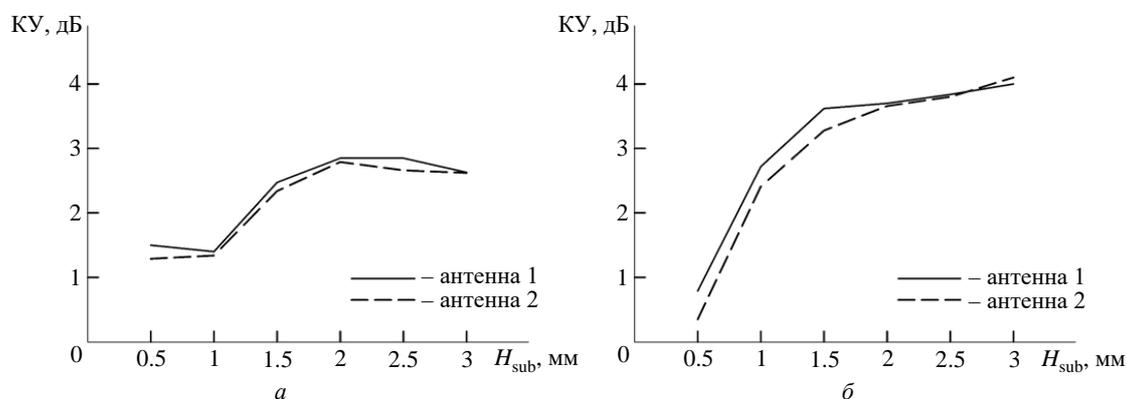


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления антенн МИМО-модуля от толщины подложки:  
 а – для основной моды; б – для старшей моды

Fig. 4. Dependence of the gain coefficient of the MIMO module antennas on the substrate thickness:  
 а – for the fundamental mode; б – the higher mode

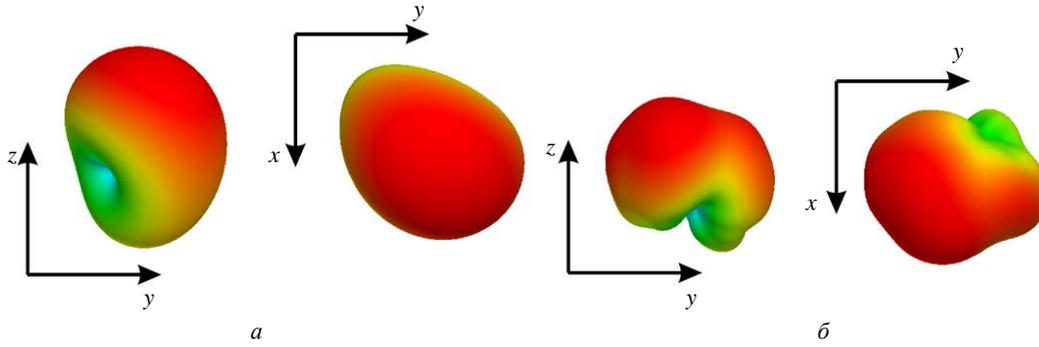


Рис. 5. Форма трехмерной диаграммы направленности каждой антенны МИМО-модуля: *a* – на основной; *б* – на старшей моде

Fig. 5. The shape of the three-dimensional radiation pattern of each MIMO module antenna: *a* – for the fundamental mode; *б* – the higher mode

Табл. 2. Результаты моделирования характеристик антенного модуля  
 Tab. 2. Simulated characteristics of the antenna module

$H_{\text{sub}}, \text{MM}$	Основная мода					Старшая мода				
	$f_1, \text{ГГц}$	$f_2, \text{ГГц}$	$ S_{11} , \text{дБ}$	$ S_{22} , \text{дБ}$	$ S_{21} , \text{дБ}$	$f_1, \text{ГГц}$	$f_2, \text{ГГц}$	$ S_{11} , \text{дБ}$	$ S_{22} , \text{дБ}$	$ S_{21} , \text{дБ}$
0.5	1.5	1.54	-10	-13	-26	3.3615	3.463	-21	-21	-24
1	1.48	1.52	-20	-20	-19.6	3.3425	3.448	-17	-22.2	-17
1.5	1.46	1.51	-20	-15	-15	3.319	3.4285	-17	-33	-13.6
2	1.44	1.49	-22	-15.5	-12	3.299	3.412	-19	-25	-11
2.5	1.43	1.48	-28	-15.25	-10	3.275	3.3925	-24	-17	-10
3	1.42	1.47	-30	-15.6	-9	3.2555	3.374	-43	-13	-10

димо учитывать изменение как КУ, так и коэффициента связи между излучателями.

Связь между антеннами внутри модуля осуществляется посредством электрического поля в объеме подложки, о чем свидетельствуют результаты моделирования. На рис. 6, *a* приведено распределение модуля напряженности электрического поля в подложке. Из рисун-

ка видно, что максимум напряженности электрического поля приходится на нижнюю область щели, что соответствует распределению электрического поля основной моды. Таким образом, одним из способов уменьшения связи между излучателями АМ без изменения характера распределения поля в резонаторах является использование топологии, приведенной на

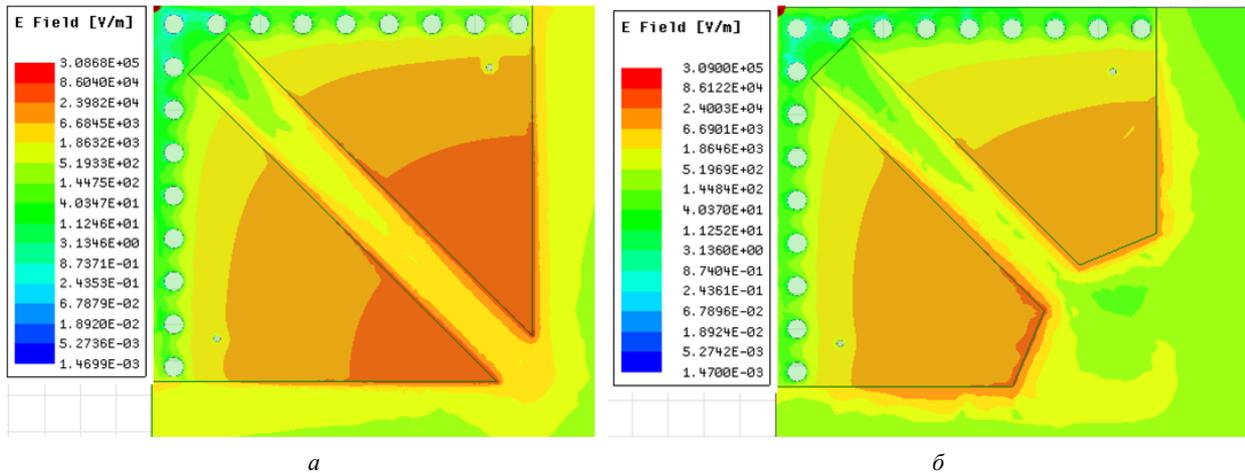


Рис. 6. Распределение амплитуды напряженности электрического поля резонаторов АМ: *a* – до усечения; *б* – после усечения

Fig. 6. Distribution of the amplitude of the electric field strength of AM resonators: *a* – before amplification; *б* – after amplification

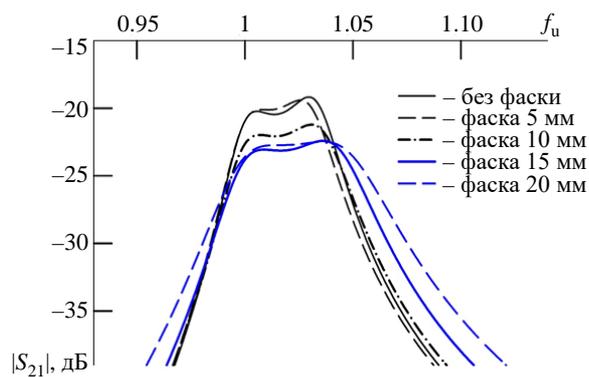


Рис. 7. Влияние размера усечения на связь между резонаторами АМ

Fig. 7. Effect of truncation size on the coupling between AM resonators

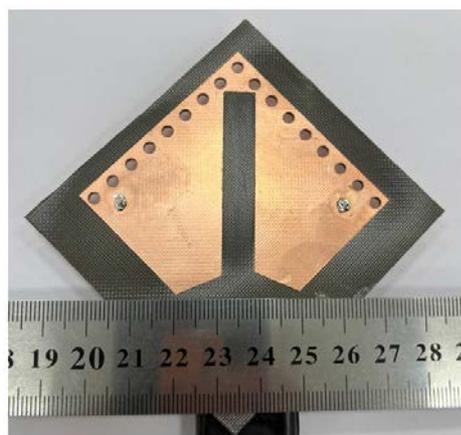


Рис. 8. Фотография изготовленного прототипа АМ

Fig. 8. Photograph of the manufactured AM prototype

Табл. 3. Результаты моделирования модифицированной конструкции АМ

Tab. 3. Simulation results of the modified AM design

Усечение, мм	$f_1$ , ГГц	$f_2$ , ГГц	$ S_{11} $ , дБ	$ S_{22} $ , дБ	$ S_{21} $ , дБ	КУ <sub>1</sub> , дБ	КУ <sub>2</sub> , дБ
0	1.48	1.52	-20	-20	-19.6	1.40	1.34
5	1.507	1.553	-28	-22.5	-19.4	1.89	1.90
10	1.572	1.628	-26.7	-24.3	-21	2.23	2.40
15	1.692	1.764	-27.5	-26.7	-22.4	2.90	3.25

рис. 6, б. На рис. 7 показана частотная зависимость коэффициента передачи между портами АМ с модифицированной топологией в зависимости от размера усечения металлизации в области, где наблюдался максимум напряженности электрического поля. Видно, что предложенная топология позволяет увеличить изоляцию резонаторов АМ.

Помимо увеличения изоляции между излучателями АМ наблюдается существенный рост КУ антенн. Результаты моделирования, демонстрирующие данный эффект, приведены в табл. 3. Видно, что при увеличении усечения металлизации топологии излучателей рост их КУ достигает 1.5 дБ.

Для экспериментального подтверждения наблюдаемого эффекта был разработан и изготовлен прототип АМ с модифицированной топологией. На рис. 8 приведена фотография прототипа АМ, а на рис. 9 – результаты экспериментального исследования его  $S$ -параметров и результаты моделирования.

**Обсуждение. Заключение. Выводы.** В результате проведения теоретических исследований было показано, что конструкция ММО-АМ на основе двух 1/8-модовых SIW-ре-

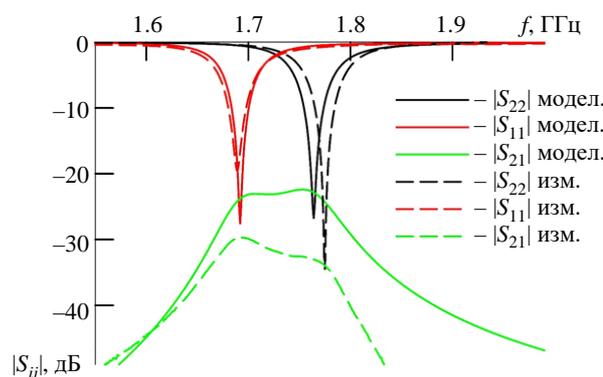


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования и измерений  $S$ -параметров АМ

Fig. 9. Comparison of simulation results and measurements of AM  $S$ -parameters

зонаторов, разделенных щелью, может быть использована в двухдиапазонных системах за счет работы на нескольких модах. Как показали результаты моделирования, эффективное возбуждение старшей моды не требует разработки дополнительных цепей питания и согласования. Выбранная точка питания SIW-резонатора позволяет добиться коэффициента отражения ниже -15 дБ для обеих мод. Также наблюдается увеличение КУ излучателей АМ при возбуждении старшей моды. Однако форма ДН, а также

положение максимума излучения (см. рис. 5) для старшей моды затрудняет создание антенных решеток на ее основе.

Показано, что использование несимметричной щели, разделяющей SIW-резонаторы, позволяет сформировать АМ с излучателями, разнесенными по частоте (см. рис. 2 и 3, а). Данный вариант модуля исследовался в рамках описываемой работы. Как показали исследования, одним из критических параметров конструкции ММО-модуля является толщина диэлектрической подложки. Ее увеличение приводит к существенному росту КУ излучателей АМ. Также в рамках работы показано, что связь между резонаторами АМ осуществляется через электрическое поле в объеме подложки. Поэтому одновременно с ростом КУ излучателей АМ наблюдался негативный эффект, заключающийся в ухудшении их взаимной изоляции при увеличении толщины подложки.

Также в рамках работы был рассмотрен вариант конструкции АМ, позволяющий повысить взаимную изоляцию излучателей. Это достигалось за счет усечения края металлизации излучателей, соответствующего положению максимума напряженности электрического поля для основной моды (см. рис. 6, а и 8). Варьирование размера усечения позволило снизить коэффициент связи излучателей АМ с  $-20$  до  $-27$  дБ (см. рис. 7). Помимо этого наблюдалось значительное увеличение КУ излучателей АМ (см. табл. 3).

Был изготовлен прототип АМ разработанной конструкции (см. рис. 8), измерена частотная зависимость его  $S$ -параметров. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных по коэффициенту передачи между излучателями АМ показало расхождение в максимальном значении коэффициента передачи более чем на 5 дБ, причем изоляция излучателей прототипа оказалась выше (см. рис. 9). Это можно объяснить тем, что формирование топологии на верхнем слое металлизации происходило методом фрезеровки. Использование данного метода подразумевает удаление не только слоя фольги с ламината, но и удаление части диэлектрического слоя. Поэтому у изготовленного прототипа АМ толщина диэлектрика в области щели, разделяющей 2 излучателя, ока-

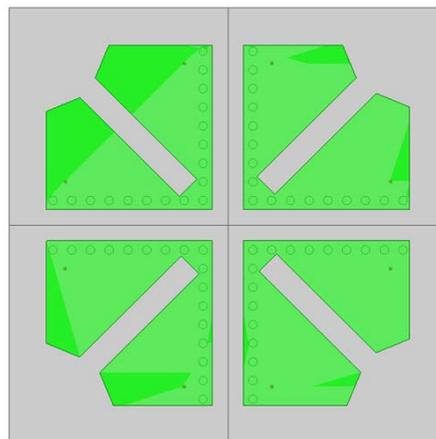


Рис. 10. ММО антенная решетка на основе 4 АМ

Fig. 10. MIMO antenna array based on 4 AM

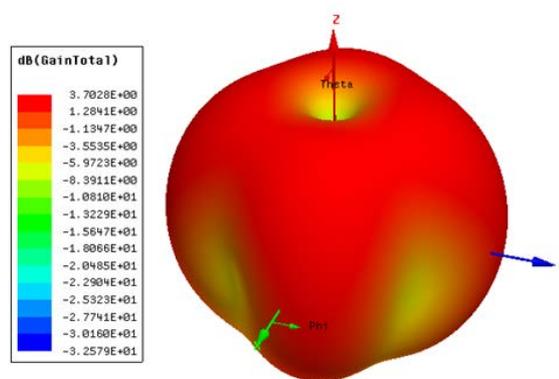


Рис. 11. Диаграмма направленности ММО антенной решетки на основе 4 АМ

Fig. 11. Directional diagram of MIMO antenna array based on 4 AM

залась ниже значения, заданного при моделировании. Как уже отмечалось, связь между излучателями АМ осуществляется через электрическое поле в объеме подложки, поэтому уменьшение толщины диэлектрика в области щели привело к росту взаимной изоляции излучателей прототипа.

С точки зрения применения данная конструкция может использоваться как в качестве отдельных АМ, так и в составе ММО-систем. Пример ММО-системы на основе предложенной конструкции АМ приведен на рис. 10. Результаты расчета ДН представлены на рис. 11. Данная конфигурация позволяет добиться высокой изоляции между АМ за счет металлизированных отверстий в подложке. Из результатов моделирования следует, что коэффициент передачи между портами резонаторов не более  $-22$  дБ.

### Авторский вклад

**Алтынников Андрей Геннадиевич** – разработка конструкции антенного модуля; проведение измерений частотных характеристик прототипа антенного модуля; написание и редактирование статьи.

**Платонов Роман Андреевич** – электродинамическое моделирование антенного модуля; оформление иллюстраций; написание и редактирование статьи.

**Цымбалюк Андрей Александрович** – изготовление и проведение измерений частотных характеристик прототипа антенного модуля.

**Комлев Андрей Евгеньевич** – изготовление образцов фольгированного материала; написание и редактирование статьи.

### Author's contribution

**Andrey G. Altynnikov**, development of the antenna module design; measurements of the frequency characteristics of the antenna module prototype; writing and editing the manuscript.

**Roman A. Platonov**, electrodynamic modeling of the antenna module; design of illustrations; writing and editing the manuscript.

**Andrey A. Tsybalyuk**, production and measurements of the frequency characteristics of the antenna module prototype.

**Andrey E. Komlev**, production of foil material samples; writing and editing the manuscript.

### Список литературы

1. Integrated LTE and millimeter-wave 5G MIMO antenna system for 4G/5G wireless terminals / S. Iffat Naqvi, N. Hussain, A. Iqbal, M. Rahman, M. Forsat, S. S. Mirjavadi, Y. Amin // *Sensors*. 2020. Vol. 20, iss. 14. Art. № 3926.

doi: 10.3390/s20143926

2. A novel high gain wideband MIMO antenna for 5G millimeter wave applications / D. A. Sehrai, M. Abdullah, A. Altaf, S. H. Kiani, F. Muhammad, M. Tufail, M. Irfan, A. Glowacz, S. Rahman // *Electronics*. 2020. Vol. 9, iss. 6. Art. № 1031.

doi: 10.3390/electronics9061031

3. Sghaier N., Latrach L. Design and analysis of wideband MIMO antenna arrays for 5G smartphone application // *Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies*. 2022. Vol. 14, iss. 4. P. 511–523.

doi: 10.1017/S1759078721000659

4. MIMO antennas: Design approaches, techniques and applications / P. Sharma, R. N. Tiwari, P. Singh, P. Kumar, B. K. Kanaujia // *Sensors*. 2022. Vol. 22, iss. 20. Art. № 7813.

doi: 10.3390/s22207813

5. Metamaterial-based highly isolated MIMO antenna system for 5G smartphone application / I. U. Din, S. Ullah, N. Mufti, R. Ullah, B. Kamal, R. Ullah // *Intern. J. of Communication Systems*. 2023. Vol. 36, iss. 3. Art. № e5392.

doi: 10.1002/dac.5392

6. Isolation enhancement in dual-band monopole antenna for 5G applications / W. Wang, Y. Wu, W. Wang, Y. Yang // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2020. Vol. 68, iss. 6. P. 1867–1871.

doi: 10.1109/TCSII.2020.3040164

7. Ameen M., Chaudhary R. K. Isolation enhancement of metamaterial-inspired two-port MIMO antenna using hybrid techniques // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2023. Vol. 70, iss. 6. P. 1966–1970.

doi: 10.1109/TCSII.2023.3237831

8. Compact SIW fed dual-port single element annular slot MIMO antenna for 5G mmWave applications / M. Usman, E. Kobal, J. Nasir, Y. Zhu, Ch. Yu, A. Zhu // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 91995–92002.

doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091835

9. Pant M., Malviya L. SIW MIMO antenna with high gain and isolation for fifth generation wireless communication systems // *Frequenz*. 2024. Vol. 78, iss. 9–10. P. 479–497.

doi: 10.1515/freq-2023-0440

10. Niu B. J., Cao Y. J. Bandwidth-enhanced four-antenna MIMO system based on SIW cavity // *Electronics Lett*. 2020. Vol. 56, iss. 13. P. 643–645.

doi: 10.1049/el.2020.0799

11. Kumari P., Das S. A Wideband Circularly Polarized SIW MIMO Antenna Based on Coupled QMSIW and EMSIW Resonators for Sub-6GHz 5G Applications // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett*. 2024. Vol. 23, iss. 10. P. 2979–2983.

12. A Quad-Band Shared-Aperture Antenna Based on Dual-Mode Composite Quarter-Mode SIW Cavity for 5G and 6G with MIMO Capability / A. T. Alta-khaineh, S. S. Alja'afreh, A. M. Almatarneh, E. Almajali, L. Al-Tarawneh, J. Yousaf // *Electronics*. 2023. Vol. 12, iss. 11. Art. № 2480.

doi: 10.3390/electronics12112480

13. Niu B. J., Tan J. H. Compact SIW cavity MIMO antenna with enhanced bandwidth and high isolation // *Electronics Lett*. 2019. Vol. 55, iss. 11. P. 631–632.

doi: 10.1049/el.2019.0838

14. Niu B. J., Tan J. H. Compact three-antenna MIMO system based on triangular half-mode substrate-integrated-waveguide cavity // *Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2020. Vol. 30, iss. 10. Art. № e22352.

doi: 10.1002/mmce.22352

15. A compact size and high isolation dual-band mimo antenna using emsiw / S. A. Ali, M. Wajid, M. Hashmi, M. Sh. Alam // 5<sup>th</sup> Intern. Conf. on Multi-

media, Signal Processing and Communication Technologies (IMPACT), Aligarh, India, 26–27 Nov. 2022. IEEE, 2022. P. 1–5.  
doi: 10.1109/IMPACT55510.2022.10029292

16. An Adaptation of the Split-Cylinder Resonator Method for Measuring the Microwave Properties of

Thin Ferroelectric Films in a "Thin Film—Substrate" Structure / A. Gagarin, D. Tsyganova, A. Altyunnikov, A. Komlev, R. Platonov // Sensors. 2024. Vol. 24, iss. 3. Art. № 755.

doi: 10.3390/s24030755

### Информация об авторах

**Алтынников Андрей Геннадиевич** – кандидат технических наук (2010), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – нелинейные материалы; устройства СВЧ; антенны; тонкие пленки.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: agaltynnikov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5932-2504>

**Платонов Роман Андреевич** – кандидат технических наук (2018), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика; устройства СВЧ; антенны.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: raplatonov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4556-629X>

**Цымбалюк Андрей Александрович** – аспирант, инженер научно-исследовательской лаборатории СВЧ-материалов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники; аддитивные технологии.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: aatsymbaliuk@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0002-4044-3167>

**Комлев Андрей Евгеньевич** – кандидат технических наук (2011), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники; плазма.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: aekomlev@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>

### References

1. Iffat Naqvi S., Hussain N., Iqbal A., Rahman M., Forsat M., Mirjavadi S. S., Amin Y. Integrated LTE and Millimeter-Wave 5G MIMO Antenna System for 4G/5G Wireless Terminals. Sensors. 2020, vol. 20, iss. 14, art. no. 3926.  
doi: 10.3390/s20143926

2. Sehrai D. A., Abdullah M., Altaf A., Kiani S. H., Muhammad F., Tufail M., Irfan M., Glowacz A., Rahman S. A Novel High Gain Wideband MIMO Antenna for 5G Millimeter Wave Applications. Electronics. 2020, vol. 9, iss. 6, art. no. 1031.  
doi: 10.3390/electronics9061031

3. Sghaier N., Latrach L. Design and Analysis of Wideband MIMO Antenna Arrays for 5G Smartphone Application. Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies. 2022, vol. 14, iss. 4, pp. 511–523.  
doi: 10.1017/S1759078721000659

4. Sharma P., Tiwari R. N., Singh P., Kumar P., Kanaujia B. K. MIMO antennas: Design Approaches, Techniques And Applications. Sensors. 2022, vol. 22, iss. 20, art. no. 7813.  
doi: 10.3390/s22207813

5. Din I. U., Ullah S., Mufti N., Ullah R., Kamal B., Ullah R. Metamaterial-Based Highly Isolated MIMO Antenna System for 5G Smartphone Application. Intern. J. of Communication Systems. 2023, vol. 36, iss. 3, art. no. e5392.  
doi: 10.1002/dac.5392

6. Wang W., Wu Y., Wang W., Yang Y. Isolation enhancement in Dual-Band Monopole Antenna for 5G Applications. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2020, vol. 68, iss. 6, pp. 1867–1871.  
doi: 10.1109/TCSII.2020.3040164

7. Ameen M., Chaudhary R. K. Isolation Enhancement of Metamaterial-Inspired Two-Port MIMO Antenna Using Hybrid Techniques. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2023, vol. 70, iss. 6, pp. 1966–1970.  
doi: 10.1109/TCSII.2023.3237831

8. Usman M., Kobal E., Nasir J., Zhu Y., Yu Ch., Zhu A. Compact SIW Fed Dual-Port Single Element Annular Slot MIMO Antenna for 5G mm Wave Applications. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 91995–92002.  
doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091835

9. Pant M., Malviya L. SIW MIMO Antenna with High Gain and Isolation for Fifth Generation Wireless Communication Systems. *Frequenz*. 2024, vol. 78, iss. 9–10, pp. 479–497.  
doi: 10.1515/freq-2023-0440

10. Niu B. J., Cao Y. J. Bandwidth-Enhanced Four-Antenna MIMO System Based on SIW Cavity. *Electronics Lett*. 2020, vol. 56, iss. 13, pp. 643–645.  
doi: 10.1049/el.2020.0799

11. Kumari P., Das S. A Wideband Circularly Polarized SIW MIMO Antenna Based on Coupled QMSIW and EMSIW Resonators for Sub-6GHz 5G Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett*. 2024, vol. 23, iss. 10, pp. 2979–2983.

12. Altakhaineh A. T., Alja'afreh S. S., Almatarneh A. M., Almajali E., Al-Tarawneh L., Yousaf J. A Quad-Band Shared-Aperture Antenna Based on

Dual-Mode Composite Quarter-Mode SIW Cavity for 5G and 6G with MIMO Capability. *Electronics*. 2023, vol. 12, iss. 11, art. no. 2480.  
doi: 10.3390/electronics12112480

13. Niu B. J., Tan J. H. Compact SIW Cavity MIMO Antenna with Enhanced Bandwidth and High Isolation. *Electronics Lett*. 2019, vol. 55, iss. 11, pp. 631–632.  
doi: 10.1049/el.2019.0838

14. Niu B. J., Tan J. H. Compact Three-Antenna MIMO System Based on Triangular Half-Mode Substrate-Integrated-Waveguide Cavity. *Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2020, vol. 30, iss. 10, art. no. e22352.  
doi: 10.1002/mmce.22352

15. Ali S. A., Wajid M., Hashmi M., Alam M. Sh. A Compact Size and High Isolation Dual-Band Mimo Antenna Using Emsiw. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. on Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies (IMPACT), Aligarh, India, 26–27 Nov. 2022. *IEEE*, 2022, pp. 1–5.  
doi: 10.1109/IMPACT55510.2022.10029292

16. Gagarin A., Tsyganova D., Altyunnikov A., Komlev A., Platonov R. An Adaptation of the Split-Cylinder Resonator Method for Measuring the Microwave Properties of Thin Ferroelectric Films in a "Thin Film—Substrate" Structure. *Sensors*. 2024, vol. 24, iss. 3, art. no. 755.  
doi: 10.3390/s24030755

#### Information about the authors

**Andrey G. Altyunnikov**, Cand. Sci. (Eng.) (2010), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: nonlinear materials; microwave devices; antennas; thin films.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: agaltyunnikov@etu.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5932-2504>

**Roman A. Platonov**, Candidate of Technical Sciences (2018), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics; microwave devices; antennas.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: raplatonov@etu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4556-629X>

**Andrey A. Tsymbalyuk**, Postgraduate student, engineer of the research laboratory of microwave materials and devices of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: technology of materials for electronic equipment; additive technologies.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: aatsymbaliuk@etu.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-4044-3167>

**Andrey E. Komlev**, Cand. Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: technology of materials for electronic engineering; plasma.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: aekomlev@etu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>