

CHAPTER «ENGINEERING SCIENCES»

MODELLING AND OPTIMIZATION OF WAVEGUIDE POLARIZERS WITH THE ACCOUNT OF IRISES THICKNESS

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛНОВОДНЫХ ПОЛЯРИЗАТОРОВ С УЧЕТОМ ТОЛЩИНЫ ДИАФРАГМ

Andrew Bulashenko¹
Stepan Piltyay²

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-021-6-34>

Abstract. Today, there is a continuous improvement of modern satellite telecommunication systems caused by the requirements of constantly increasing information volumes. The fundamental elements of such systems are antennas with polarization processing of signals. This processing is mainly performed using microwave waveguide polarizers and orthomode transducers. Therefore, the development and optimization of new waveguide polarizers is a relevant engineering problem. The simplest from the technological point of view are the polarizers based on waveguides with irises. Analysis and optimization of electromagnetic characteristics of a polarizer based on a square waveguide with irises are the goals of the presented research. To solve this optimization problem we have created a new mathematical model, which allows to investigate the influence of the design parameters of the polarizer on its electromagnetic characteristics. A new mathematical model of the polarizer based on square waveguide with irises was created using wave transmission and scattering matrices of the structure elements. Developed mathematical model takes into account the thickness of the irises. A new mathematical model of a waveguide

¹ Senior Lecturer at Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

² Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

polarizer is based on the general wave scattering matrix. This matrix was calculated using the theory of microwave circuits. The main characteristics of the square waveguide polarizer were expressed through the elements of this matrix. The developed new mathematical model of a square waveguide polarizer with irises takes into account the heights of the irises, the distances between them and their thickness. The new mathematical model is simpler and faster for the determination of the electromagnetic characteristics of the waveguide polarizer compared to the finite integration technique, which is often applied to analyze microwave devices for various purposes. In addition, developed new mathematical model of the waveguide iris polarizer allows to estimate the variations of all required electromagnetic characteristics if the structure parameters deviate from their optimal values. Using the created mathematical model we have carried out the optimization of the polarizer matching and polarization characteristics in the operating satellite Ku-band 10.7–12.8 GHz. Simulated optimum design of the waveguide polarizer provides VSWR for horizontal and vertical polarizations less than 3.26. Optimized differential phase shift is $90^\circ \pm 4.2^\circ$. Axial ratio of the waveguide iris polarizer is less than 1.43 dB. Corresponding XPD is higher than 21.7 dB.

1. Введение

Постоянное увеличение объемов информации, которая передается каналами связи и увеличение их энергетической эффективности, приводит к постоянному совершенствованию систем передачи информации. В телекоммуникационных системах связи 5G для этой цели используется технологи прямого соединения устройств D2D [1–6], машинное соединение устройств M2M [7–8], разные виртуальные технологии [9–11] и ортогональное частотное уплотнение OFDM [12–13]. В спутниковых та радарных системах для повторного использования частотного ресурсу используют поляризационную обработку сигналов [14–16].

Современные спутниковые и радарные телекоммуникационных систем связи применяются во многих отраслях науки и техники. Ключевым элементом таких систем являются антенные системы с поляризационной обработкой. Отмеченные системы широко применяют сигналы с одной или двумя ортогональными круговыми поляризациями. Их применение улучшает информационные характеристики системы.

Кроме того, это приводит к повышению уровня принятого сигнала в плохих условиях распространения электромагнитных волн. Преимущества антенных систем с ортогональными поляризациями широко используют для увеличения информационной емкости спутниковых систем связи [14].

Антенные системы с поляризационной обработкой сигналов содержат устройства преобразования поляризации и блоки разделения сигналов с ортогональными поляризациями. Такие системы применяются для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур, оценка интенсивности дождей, измерения параметров ледяных и снеговых покровов и многое другое.

Наиболее известными разработанными конструкциями поляризаторов являются структуры со штырями [17–19], ребристые структуры [20–33] и структуры с диафрагмами [34–45].

В исследовании [17] авторы проанализировали три поперечных цилиндрических штыря в прямоугольном волноводе. Показано, что возможен относительно большой диапазон реактивного сопротивления штыря по сравнению с диапазоном от одного штыря переменной длины. В статье [18] анализируется волноводный узел с парой прямоугольных штырей, что расположены симметрично вдоль широкой стенки прямоугольного волновода. Результаты позволяют моделировать различные полосовые фильтры. Статья [19] содержит результаты исследования характеристики рассеяния волноводной секции с парой прямоугольных штырей, что расположены противоположно в поперечном сечении. Продемонстрирована высокая точность оценки в широком диапазоне частот ширины полосы пропускания с помощью частотного метода. Новые поляризаторы на основе одной или двух секций квадратного волновода с диагонально расположенными ребристыми структурами были предложены в [20]. Они обеспечивают полосу пропускания от 11% до 23% с коэффициентом эллиптичности менее 2 дБ. Компактный двухдиапазонный волноводный поляризатор на основе гребенчатой структуры в диапазонах 10.9–11.7 ГГц и 14.0–14.5 ГГц обеспечивает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 1.2^\circ$ с КСВН меньше 1.03 [21–22]. Авторы статей [22–33] разработали математическую модель секторных коаксиальных ребристых волноводов, на основе которых создают двухдиапазонные поляризации-

онные устройства, с помощью метода интегральных уравнений. Были получены максимальные отношения частот отсечки двух низших мод секторных коаксиальных ребристых волноводов. Недостатком поляризаторов на основе секторных коаксиальных ребристых волноводов является относительная сложность их изготовления, а также повышенная опасность пробоя в области зазора между ребром и цилиндрической стенкой волновода.

Статья [34] показывает результаты расчета поляризатора на основе круглого волновода с диафрагмами в Ка-диапазоне. Такой поляризатор обеспечивает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 1^\circ$ в полосе частот 10%. Авторы работ [35–45] разработали методику анализа и с ее помощью компактные поляризаторы на основе квадратного волновода с диафрагмами для Ку-диапазона 10.7–12.8 ГГц, что обеспечивает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 3.5^\circ$ с КСВН меньше 1.24.

Поляризаторы с более широкой полосой строятся на ребристые структурах и структурах из диафрагм. Такие структуры обычно анализируются с помощью метода согласования мод [46–47], метода частичных областей с непосредственным сшиванием полей [48–50], метода интегральных уравнений для магнитного поля [51], метода интегральных уравнений [52–53], что учитывает сингулярность поля на ребрах, что исключает относительность сходимости рядов в методе частичных областей [54], так же метод обобщенной матрицы рассеивания для дисперсионного анализа [55].

Перечисленные методы имеют один существенный недостаток, который проявляется в сложности расчета полной структуры электромагнитных полей. Поэтому актуальной задачей будет разработка более простого метода анализа поляризационных устройств, в котором отсутствует данный недостаток. Таким методом является матричный метод анализа микроволновых цепей, которые формируются на волновых матрицах рассеивания и передачи. Преимуществом такого метода является учет взаимодействия волн высших типов.

Матричный метод используется для анализа разных фильтров СВЧ [56] и фазосдвигателей [57–60], что применяются в фазированных антенных решетках [61–65]. Статья [57] демонстрирует процедуру синтеза фильтров СВЧ, основанную на модели с распределенными параметрами. Такой синтез использует волновые матрицы рассеива-

ния и передачи. В статье [59] разработана модель широкополосного фазовращателя. Основные параметры волновой матрицы рассеивания были определены через элементы матрицы передачи. Новый класс фильтрующих дифференциальных фазовращателей был разработан [60]. Они позволяют обеспечить постоянный фазовый сдвиг и функцию встроенной фильтрации. Метод синтеза был реализован с помощью волновых матриц.

К сожалению, много научных статей, посвященных поляризаторам [66–78], содержат только результаты компьютерного моделирования. Моделирование является сложным и требует большое количество времени для процесса оптимизации конструкции. Статья [66–68] рассматривает конструкции вращателей плоскости поляризации на 90° в виде щелей с полосой пропускания 5%. Исследование [69] содержит экспериментальное сравнение двух типов прямоугольных волноводах поляризаторов, что используются в КА-диапазоне в гироскопах. В [70] предложен компактный волноводный вращатель плоскости поляризации, что поворачивает плоскость поляризации на произвольный угол. Конструкция содержит четыре щелевые планарные диафрагмы в прямоугольном волноводе, что имеет полосу пропускания порядка 2%. Новый широкополосный коаксиальный поляризатор был разработан авторами [71] для диапазона 3,4–4,8 ГГц. Конструкция основана на 27 симметричных диафрагмах и имеет смоделированный дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 2,5^\circ$ и коэффициент отражения S11 лучше, чем -33 дБ во всем рабочем диапазоне. Статья [72] представляет конструкцию и измеренные характеристики оргомодового преобразователя на основе четырехреберного волновода диапазона частот 4.0–8.5 ГГц. Такой преобразователь имеет значение кроссполяризационной развязки ниже -40 дБ. У [73] представлена конструкция и характеристики компактного широкополосного трехмерного печатного поляризатора на основе волновода в КА-диапазоне 28–34 ГГц. Конструкция состоит из пары радиально противоположных канавок внутри круглого волновода, что возбуждаются с помощью коаксиального зонда. Такой поляризатор обеспечивает коэффициент эллиптичности лучше 3 дБ в полосе частот. Перестраиваемый компактный поляризатор в круглом волноводе, что имеет узкую полосу рассмотрен в [74]. Поворот осуществляется за счет поворота диафрагм относи-

тельно друг друга. В статье [75] представлен новый широкополосный поляризатор с перегородками. Он обеспечивает относительную полосу пропускания 37.8% с коэффициентом эллиптичности меньше 1дБ. В другом исследовании [76] авторы показывают возможность оптимизации поляризаторов с перегородками постоянной толщины для различной относительной ширины полосы пропускания от 5% до 20%. Было осуществлено моделирование прототипов поляризаторов Q- и K-диапазонов. Работы [77–78] посвящена последним разработкам пластинчатых поляризаторов кафедры теоретических основ радиотехники.

Все обсуждаемые конструкции волноводных поляризаторов имеют некоторые общие недостатки, включая ограниченную рабочую полосу пропускания, сложность изготовления и настройки структуры, низкую кроссполяризационную развязку. Все поляризационные характеристики очень чувствительны к неточностям изготовления. Решить эту проблему можно, используя оптимизацию конструкции предлагаемого поляризатора.

Таким образом, точное аналитическое моделирование и оптимизация поляризационных характеристик является важной задачей для создания современных волноводных поляризаторов. Следовательно разработка новой математической модели волноводных поляризаторов из диафрагмами является актуальной задачей. Предложенная новая модель учитывает толщину диафрагм поляризатора, что улучшает методику определения его характеристик и не требует больших затрат времени.

2. Математическая модель поляризатора на основе квадратного волновода с двумя диафрагмами

Рис. 1 демонстрирует внутреннюю конструкцию квадратного волноводного поляризатора с поперечными размерами $a \times a$. Такое устройство имеет две одинаковые диафрагмы с равными высотами h , толщиной w и расстоянием между ними l .

С помощью теории СВЧ цепей [70] представим такой поляризатор общей структурной схемой замещения (рис. 2).

Разобьем на отдельные четырехполосники структурную схему (рис. 2). Среди них можно выделить: два в виде включенных параллельно реактивных элементов, одного отрезка регулярной линии передачи [79].

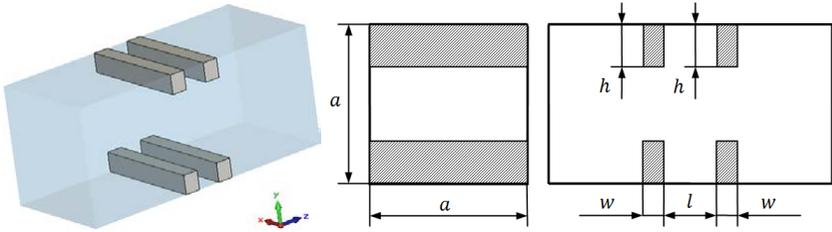


Рис. 1. Конструкция квадратного волноводного поляризатора с двумя диафрагмами

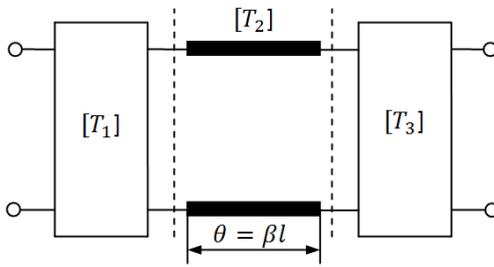


Рис. 2. Структурная схема замещения

Элементы общей матрица рассеивания можно определить через элементы общей матрицы передачи

$$[S_{\Sigma}] = \begin{bmatrix} S_{11\Sigma} & S_{12\Sigma} \\ S_{21\Sigma} & S_{22\Sigma} \end{bmatrix} = \frac{1}{T_{11\Sigma}} \begin{bmatrix} T_{21\Sigma} & |T| \\ 1 & -T_{12\Sigma} \end{bmatrix},$$

где $|T|$ – определитель волновой матрицы передачи.

Из матрицы определим элементы матрицы рассеивания через элементы T-матрицы:

$$S_{11\Sigma} = \frac{T_{21\Sigma}}{T_{11\Sigma}} = \frac{T_{11}T_{21}e^{j\theta} + T_{21}T_{22}e^{-j\theta}}{T_{11}^2e^{j\theta} + T_{12}T_{21}e^{-j\theta}}; \quad S_{21\Sigma} = \frac{1}{T_{11\Sigma}} = \frac{1}{T_{11}^2e^{j\theta} + T_{12}T_{21}e^{-j\theta}}.$$

Общая волновая матрица передачи поляризатора

$$[T_{\Sigma}] = [T_1] \cdot [T_2] \cdot [T_3] = \begin{bmatrix} T_{11\Sigma} & T_{12\Sigma} \\ T_{21\Sigma} & T_{22\Sigma} \end{bmatrix},$$

где

$$[T_1] = [T_3] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}; [T_2] = \begin{bmatrix} e^{j\theta} & 0 \\ 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix},$$

где θ – электрическая длина эквивалентной регулярной линии передачи.

Электрическая длина регулярной линии передачи определяется формулой

$$\theta = \frac{2\pi l}{\lambda_g},$$

где λ_g – длина волны в волноводе.

Длина волны в волноводе определяется по формуле:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_A}\right)^2}},$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; λ_A – критическая длина волны в квадратном волноводе.

Упрощенная эквивалентная схема поляризатора содержит индуктивности, которые включены параллельно (рис. 3 а) для основной волны горизонтальной поляризации. А эквивалентная схема содержит емкости, что включены параллельно (рис. 3 б) для основной волны вертикальной поляризации.

На рис. 4 представлены эквивалентные схемы индуктивной и емкостной диафрагмы. Эти схемы позволяют учесть толщину диафрагмы. Т-образная эквивалентная схема используется для индуктивной диафрагмы (рис. 4а), а П-образная эквивалентные схемы для емкостной (рис. 4б).

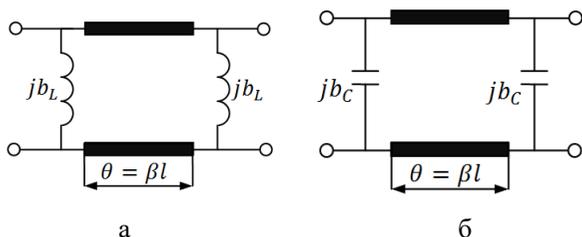


Рис. 3. Эквивалентная схема волновода с 2 реактивными элементами

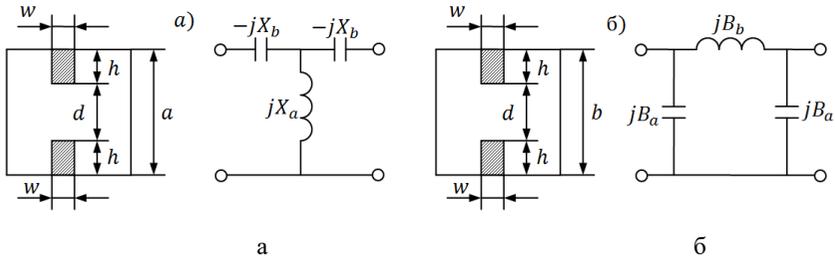


Рис. 4. Эквивалентная схема индуктивной и емкостной диафрагм

Реактивные сопротивления эквивалентной схемы (рис. 4а) для Т-образной схемы определяются выражениями [80, с. 255]:

$$X_a = \frac{2a}{\lambda_g} \cdot \left(\frac{a}{\pi \cdot D_1} \right)^2; \quad X_b = \frac{a}{8\lambda_g} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_2}{a} \right)^4,$$

где

$$D_1 = \frac{2h}{\sqrt{2}} \cdot \left[1 + \frac{w}{\pi \cdot 2h} \ln \left(\frac{4\pi \cdot 2h}{e \cdot w} \right) \right]; \quad D_2 = \sqrt[4]{\frac{4}{3\pi} w \cdot (2h)^2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_2}{a} \right)^4,$$

где a – размер большой стенки волновода; w – толщина диафрагмы; h – высота диафрагмы.

Реактивные сопротивления эквивалентной схемы (рис. 4б) для П-образной схемы определяются выражениями [80, с. 251]:

$$B_a = B_1 + \frac{b}{d} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \cdot w}{\lambda_g} \right); \quad B_b = \frac{b}{d} \cdot \operatorname{csc} \left(\frac{2\pi \cdot w}{\lambda_g} \right),$$

где

$$B_1 = \frac{b}{\lambda_g} \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot 2h}{2b} \cdot g \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{\pi \cdot 2h}{2b} \cdot g \right) - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2h}{b} \cdot \frac{w}{d} + \frac{3}{2} \left(\frac{b}{\lambda_g} \right)^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2h}{2b} \right)^4 \right],$$

$$g = 1 + \frac{w}{\pi \cdot 2h} \cdot \ln \left(\frac{4\pi}{e} + \frac{2h}{w} \right),$$

где b – размер малой стенки волновода; w – толщина диафрагмы; h – высота диафрагмы.

В результате, основные электромагнитные характеристики волноводного поляризатора из диафрагмами можно рассчитать через

элементы общей волновой матрицы рассеивания. К ним относятся: дифференциальный фазовый сдвиг, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), коэффициент эллиптичности, кроссполяризационная развязка (КПР)

Дифференциальный фазовый сдвиг рассчитывается по формуле

$$\Delta\varphi = \varphi_L - \varphi_C = \arg(S_{21\Sigma L}) - \arg(S_{21\Sigma C}),$$

где $S_{21\Sigma L}$ та $S_{21\Sigma C}$ – элементы общей матрицы рассеивания в случае индуктивной и емкостной диафрагм соответственно.

КСВН определяется выражением:

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}.$$

Коэффициент эллиптичности вычисляется по формуле:

$$r = 10 \lg \frac{|S_{21\Sigma L}|^2 + |S_{21\Sigma C}|^2 + \sqrt{|S_{21\Sigma L}|^4 + |S_{21\Sigma C}|^4 + 2|S_{21\Sigma L}|^2 |S_{21\Sigma C}|^2 \cos(2\Delta\varphi)}}{|S_{21\Sigma L}|^2 + |S_{21\Sigma C}|^2 - \sqrt{|S_{21\Sigma L}|^4 + |S_{21\Sigma C}|^4 + 2|S_{21\Sigma L}|^2 |S_{21\Sigma C}|^2 \cos(2\Delta\varphi)}},$$

КПР определяется по такой формуле:

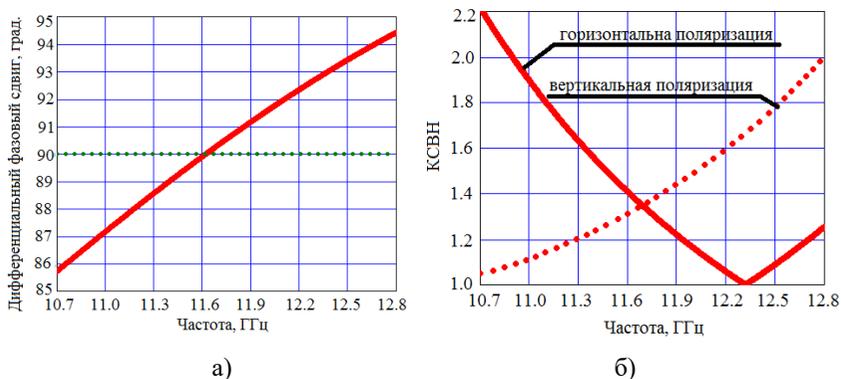
$$XPD = 20 \lg \left(\frac{10^{0.05r} + 1}{10^{0.05r} - 1} \right).$$

3. Результат разработки поляризатора на основе созданной математической модели

Рассмотрим результаты вычислений новой математической модели волноводного поляризатора в диапазоне частот от 10.7 ГГц до 12.8 ГГц.

За счет изменения размеров поляризатора осуществляем оптимизацию его конструкции. Для достижения необходимого дифференциального фазового сдвига изменяем высоту диафрагм h , а для достижения необходимого согласования изменяем расстояния между диафрагмами. Настройку необходимо проводить на оптимальной толщине диафрагмы, на которой обеспечивается лучшее согласование с небольшим отклонением дифференциального фазового сдвига от 90° .

Основные электромагнитные характеристики математической модели поляризатора приведены на рис. 5 – рис. 6. Из рис. 5а видно, что максимальное отклонение дифференциального фазового сдвига от 90° составляет 4.5° .



**Рис. 5. Частотные зависимости для математической модели:
а) дифференциального фазового сдвига; б) КСВН**

На рис. 5а видим, что максимальное значение КСВН для двух поляризаций составляет 2.15 на частоте 10.7 ГГц. Кроме того рисунок показывает, что КСВН горизонтальной поляризации уменьшается с ростом частоты, что свидетельствует про то, что согласование улучшается. КСВН вертикальной увеличивается с ростом частоты, что свидетельствует про то, что согласование ухудшается с ростом частоты.

Рис. 6 демонстрируют, что максимальное значение коэффициента эллиптичности составляет 1.5 дБ, а КПР является больше чем 21.5 дБ. Эти характеристики показывают, что на двух диафрагмах достаточно качественные характеристики коэффициента эллиптичности и КПР получить нельзя, поскольку в современных спутниковых системах необходимо иметь развязку больше 30 дБ.

Таким образом, полученные характеристики обеспечивают такие параметры конструкции высоты диафрагм $h = 3,36$ мм, расстояний между ними $l = 6,17$ мм и их толщины $w = 3,1$ мм.

На рис. 7 и рис. 8 показаны зависимости электромагнитных характеристик от частоты при изменении параметров h , l и w по размеру $\pm 1\%$ и $\pm 2\%$ соответственно.

На рис. 7 введены такие обозначения: 1 – размеры, что были уменьшены на 1%; 2 – истинные размеры; 3 – размеры, что были увеличены

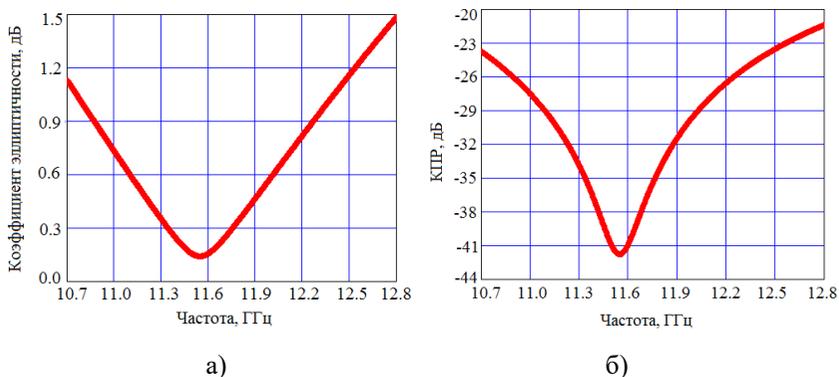


Рис. 6. Поляризационные характеристики математической модели

на 1%. Рис. 7а демонстрирует, что максимальное отклонение дифференциального фазового сдвига от 90° составляет 5.5° .

Рис. 7б показывает, что максимальное значение КСВН составляет 2.15. Из рис. 7в видно, что при уменьшении размеров на 1% коэффициент эллиптичности уменьшился с 1.5 дБ до 1.3 дБ, а при увеличении размеров на 1% коэффициент эллиптичности увеличился с 1.5 дБ до 1.7 дБ. Рис. 7 иллюстрирует, что при увеличении размеров на 1% КПР увеличивается с 21.5 дБ до 21.6 дБ, а при уменьшении размеров на 1% КПР уменьшается с 21.5 дБ до 21.3 дБ.

На рис. 8 введены такие обозначения: 1 – размеры, что были уменьшены на 2%; 2 – истинные размеры; 3 – размеры, что были увеличены на 2%. Рис. 8а демонстрирует, что максимальное отклонение дифференциального фазового сдвига от 90° составляет 8.5° . Рис. 8б показывает, что максимальное значение КСВН составляет 2.5. Из рис. 8в видно, что при уменьшении размеров на 1% коэффициент эллиптичности уменьшился с 1.5 дБ до 1.4 дБ, а при увеличении размеров на 1% коэффициент эллиптичности увеличился с 1.5 дБ до 1.9 дБ. Рис. 8 иллюстрирует, что при уменьшении размеров на 1% КПР уменьшается с 21.5 дБ до 21.45 дБ, а при увеличении размеров на 1% КПР увеличился с 21.5 дБ до 19 дБ.

Следовательно, рассмотренная математическая модель поляризатора на основе квадратного волновода с двумя диафрагмами в Ку-диа-

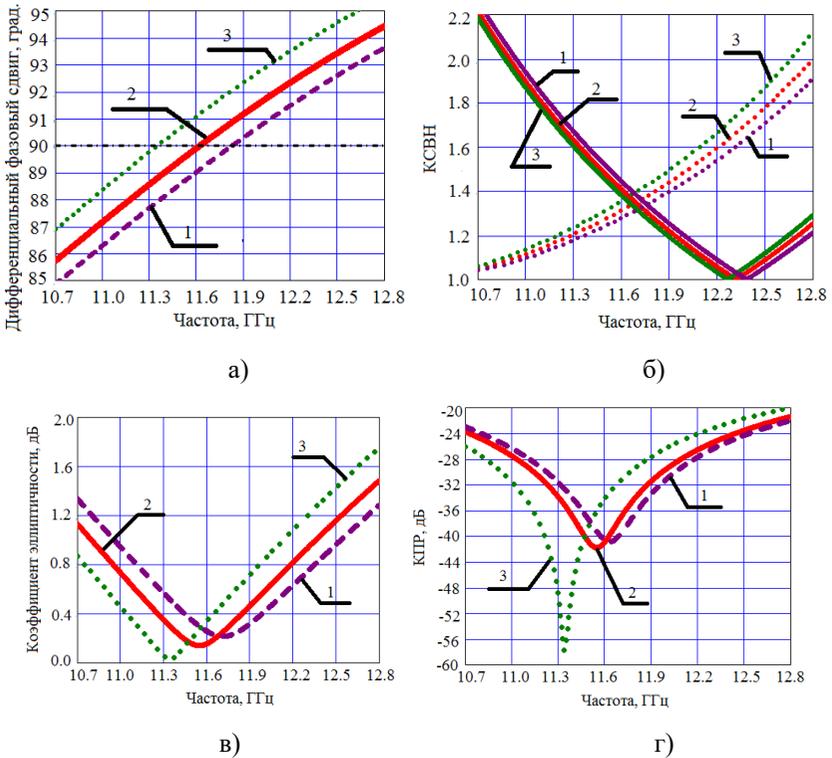


Рис. 7. Зависимость электромагнитных характеристик поляризатора от частоты для математической модели при изменении размеров на $\pm 1\%$

пазоне частот 10.7–12.8 ГГц имеет такие характеристики. КСВН горизонтальной и вертикальной поляризаций составляет меньше чем 2.15, дифференциальный фазовый сдвиг составляет $90^\circ \pm 4.5^\circ$, коэффициент эллиптичности является меньше чем 1.5 дБ, КПР является больше чем 21.5 дБ. Кроме того, модель дает возможность проанализировать, как изменяются электромагнитные характеристики при отклонении параметров модели. Отклонение параметров модели более чем на 1% есть нежелательными, поскольку значительно ухудшаются характеристики. Расчет поляризационных характеристик с использованием

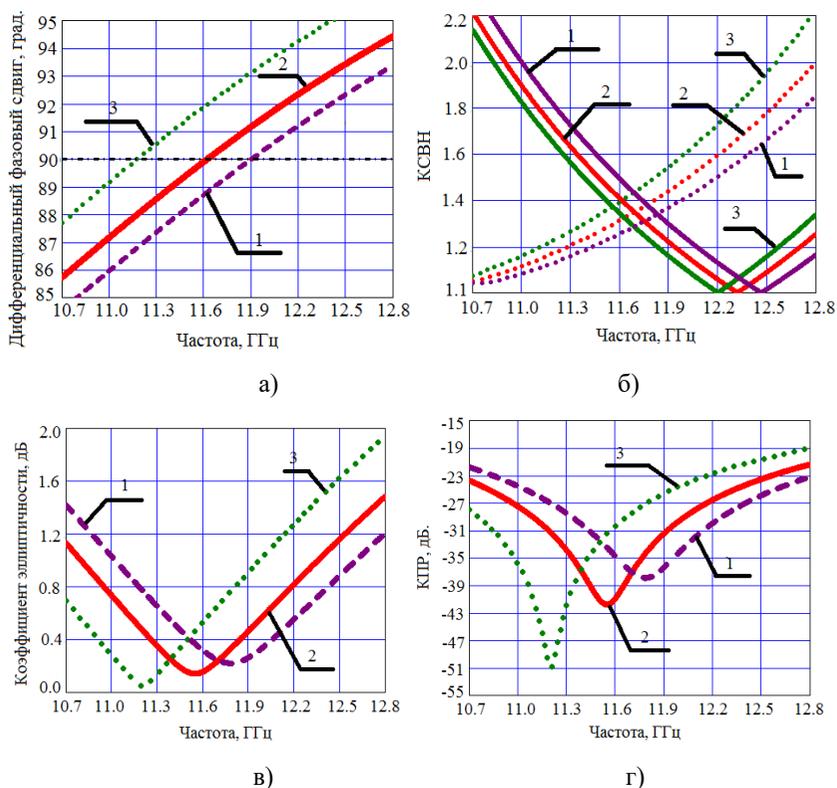


Рис. 8. Зависимость электромагнитных характеристик поляризатора от частоты для математической модели при изменении размеров на $\pm 2\%$

новой математической модели требует в 40 с на один расчет. В ходе оптимизации таких расчетов может быть достаточно много.

4. Результаты оптимизации разработанного волноводного поляризатора методом конечных элементов

В Ku-диапазоне 10.7–12.8 ГГц был смоделирован и оптимизирован волноводный поляризатор с двумя диафрагмами с помощью метода конечных элементов.

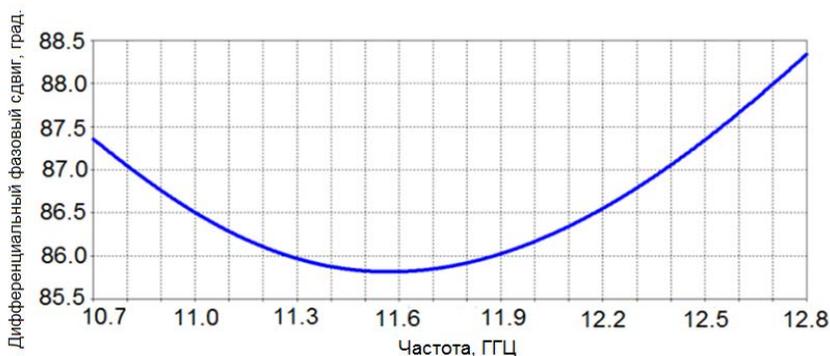


Рис. 9. Зависимость дифференциального фазового сдвига от частоты

На рис. 9 показана зависимость дифференциального фазового сдвига от частоты. Из рисунка видно, что дифференциальный фазовый сдвиг составляет $90^{\circ} \pm 4.2^{\circ}$.

На рис. 10 представлена зависимость КСВН от частоты для двух видов поляризаций. Из рисунка видим, что максимальное значение величины КСВН для двух поляризаций принимает значение 3.26 на частоте 12.8 ГГц.

На рис. 11 и рис. 12 показаны поляризационные характеристики волноводного поляризатора.

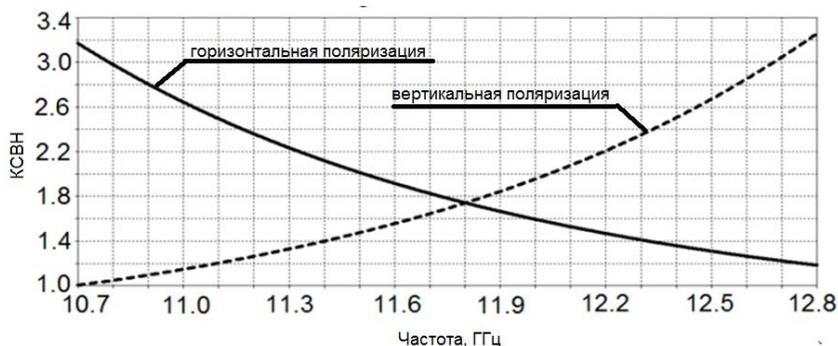


Рис. 10. Зависимости КСВН от частоты для волн обеих поляризаций

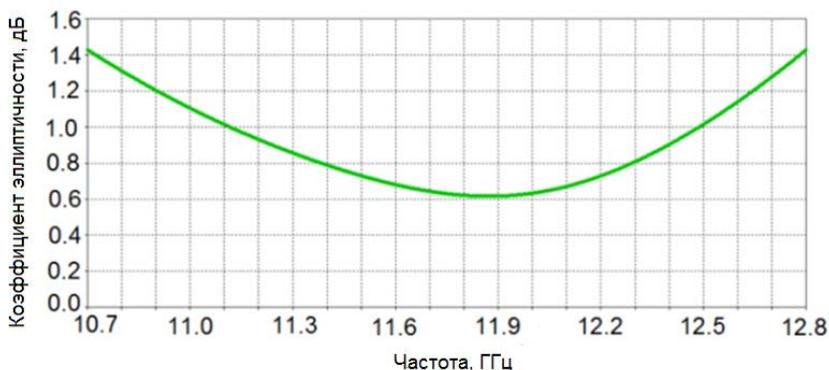


Рис. 11. Зависимость коэффициента эллиптичности от частоты

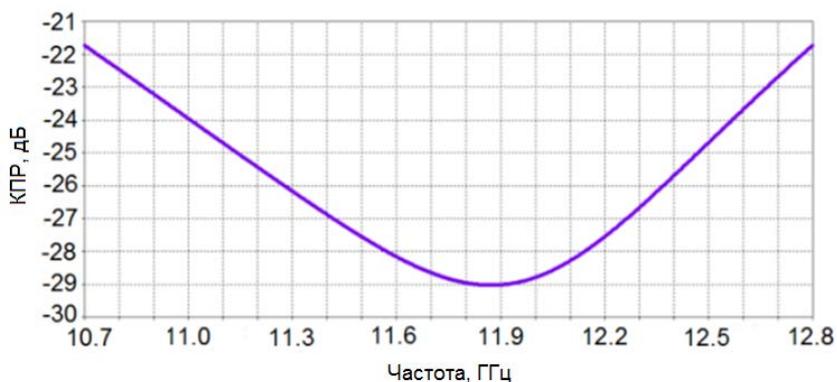


Рис. 12. Зависимость КПР от частоты

Рис. 11 показывает зависимость коэффициента эллиптичности от частоты, а рис. 12 показывает зависимость КПР от частоты. Из рисунков видно, что максимальные значения коэффициента эллиптичности составляет 1.43 дБ, а КПР больше чем 21.7 дБ.

Таким образом, модель оптимизированного волноводного поляризатора с двумя диафрагмами в диапазоне от 10.7 ГГц до 12.8 ГГц обеспечивает такие характеристики. КСВН для горизонтальной и вертикальной поляризаций составляет меньше чем 3.26, дифференциальный фазовый сдвиг составляет $90^{\circ} \pm 4.2^{\circ}$, коэффициент эллиптично-

сти меньше чем 1.43 дБ, КПР больше, чем 21.7 дБ. Такие характеристики свидетельствуют, что КСВН является неудовлетворительным, а отклонение дифференциального фазового сдвига составляет $\pm 4.2^\circ$ в пределах нормы. Расчет поляризационных характеристик с помощью модели по методу конечных элементов составляет 128 с при 120000 тетраэдрах адаптивной сетки.

5. Сравнение оптимальных размеров и характеристик, полученных двумя методами

Параметры оптимизированного волноводного поляризатора с двумя диафрагмами в Ku-диапазоне частот 10.7-12.8 ГГц приведены в таблице 1.

Таблица 1

Размеры оптимизированного волноводного поляризатора с диафрагмами в Ku-диапазоне для новой математической модели и модели по методу конечных элементов

Название параметра	Новая математическая модель	Модель по методу конечных элементов
Размер стенок квадратного волновода	$a = 21.96$ мм	$a = 21.96$ мм
Высота диафрагм	$h = 3.36$ мм	$h = 3.57$ мм
Расстояние между диафрагмами	$L = 6.17$ мм	$L = 4.34$ мм
Толщина всех диафрагм	$w = 3.1$ мм	$w = 2.96$ мм

Таблица 2 содержит характеристики оптимальных поляризаторов, рассчитанных двумя методами для новой математической модели и модели на основе метода конечных элементов.

Таким образом, таблицы показывают небольшую разницу между размерами и характеристиками двух методов. Это объясняется следующим образом. Используемые модели применяли различные численные методы. Кроме того, представленная математическая модель не учитывала влияния всех высших типов волн в волноводе. В результате, оптимизированная структура поляризатора на основе представленной математической модели имеет лучшие характеристики согласования за счет небольшого увеличения отклонения дифференциального фазо-

**Оптимальные поляризационные характеристики двух моделей
для волноводного поляризатора с двумя диафрагмами
для Ku-диапазона**

Характеристика	Новая математическая модель	Модель по методу конечных элементов
Дифференциальный фазовый сдвиг	$90^\circ \pm 4.5^\circ$	$90^\circ \pm 4.2^\circ$
КСВН	2.15	3.26
Коэффициент эллиптичности	1.46 дБ	1.43 дБ
КПР	21.5 дБ	21.7 дБ

вого сдвига от 90° . Расчет поляризационных характеристик с использованием новой математической модели требует в 3 раза меньше времени, чем с помощью модели по методу конечных элементов на один расчет. Но во время оптимизации по методу конечных элементов может понадобиться от 1000 и более таких расчетов.

6. Выводы

Создано новую математическую модель волноводного поляризатора с диафрагмами, которая учитывает влияние параметров конструкции на его согласование и поляризационные характеристики. Разработанная модель позволяет производить оптимизацию характеристик согласования в рабочем диапазоне частот за счет изменения геометрических размеров диафрагм и обеспечивать необходимое значение дифференциального фазового сдвига поляризатора. Новизна предложенной математической модели состоит в том, что она учитывает влияние толщины диафрагм на основные характеристики поляризатора.

Разработанную математическую модель рекомендовано применять для создания новых волноводных поляризаторов на основе разного количества диафрагм с различной толщиной. Предложенная модель позволяет в 3 раза быстрее исследовать и оптимизировать электромагнитные характеристики за счет изменения размеров конструкции устройства по сравнению с методом конечных элементов. При этом возможно обеспечивать улучшение характеристик согласования поляризаторов и достигать необходимых значений дифференциального

фазового сдвига. Используя созданную математическую модель было выполнено оптимизацию волноводного поляризатора с двумя диафрагмами для спутникового рабочего диапазона частот 10,7–12,8 ГГц.

Будущие исследования необходимо сосредоточить на создании математической модели волноводных поляризаторов, которая будет учитывать большее количество диафрагм и большее количество волн высших типов.

Список литературы:

1. Cheng Y., Dong Y. (2020). Wideband circularly polarized planar antenna array for 5G millimeter-wave applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Early Access. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3028213>
2. Булашенко А.В. (2020). Оцінка зв'язності D2D комунікацій у мережах 5G. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. Вип. 81. С. 21–29. <https://doi.org/10.20535/RADAR.2020.81.21-29>
3. Булашенко А.В. (2020). Система вивантаження даних за технологією D2D у неліцензованому діапазоні частот у складі системи зв'язку 5G. *Технічна інженерія*, Вип. 86. № 2. С. 103–107. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-103-107](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-103-107)
4. Bulashenko A.V., Piltyay S.I., Demchenko I.V. (2020). Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G networks, *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology, (Ukraine, Kharkiv, October 2-4, 2020)*, Kharkiv, pp. 324–329.
5. Piltyay S.I., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Wireless sensor network connectivity in heterogeneous 5G mobile systems, *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (Ukraine, Kharkiv, October 2-4, 2020)*, Kharkiv, pp. 508–513.
6. Гладун В.В., Булашенко А.В. (2019). Забезпечення високої якості мережі 5G за допомогою технології D2D. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» (Україна, Київ, 18-24 листопада, 2019)*, Київ: КПІ, с. 57–59. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35676/1/RTPSAS_2019_s1_t16.pdf.
7. Булашенко А.В. (2020). Розподіл ресурсів для пристроїв малої потужності технології M2M у мережах 5G. *Наукові вісті КПІ*. 2020. Вип. 3. С. 7–13. <http://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.3.203863>
8. Bulashenko A.V., Piltyay S.I., Polishchuk A.V., Bulashenko O.V. (2020). New traffic model of M2M technology in 5G wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory. (Ukraine, Kyiv, November 25-27, 2020)*, Kyiv, pp. 231–235.
9. Булашенко А.В., Литвинець О.Л. (2017). Аналіз можливості хмарних технологій : Матеріали II Всеукраїнської науково-методичної конференції (Україна, Шостка, 20 квітня, 2017), Суми: Сумський державний університет, 2017. С. 188–191. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66966/1/Bulashenko_cloud_technologies.pdf

10. Булашенко А.В., Забегалов І.В. (2020). Конструкція портативного цифрового мегомметра та вимірювача струму витоку. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 3. С. 37–42. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-37-42>
11. Гниতেцький В.А., Булашенко А.В. (2019). Забезпечення дуже низьких затримок у стільниковій системі 5G на базі MEC : *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» (Україна, Київ, 18-24 Листопада, 2019)*, Київ: КПІ, с. 153–155. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35744/1/RTPSAS_2019_s5_t06.pdf
12. Цапков С.В., Булашенко А.В. (2019). Метод перехресної ентропії для зниження відношення PAPR в системах OFDM : *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» (Україна, Київ, 18-24 Листопада, 2019)*, Київ: КПІ, с. 51–53. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35674/1/RTPSAS_2019_s1_t14.pdf
13. Myronchuk O., Shpylka O., Zhuk S. (2020). Two-stade channel frequency response estimation in OFDM systems. *Path of Science*. Vol. 6. No. 2. Pp. 1001-1007. <https://doi.org/10.22178/pos.55-1>
14. Pozar D.M. (2012). *Microwave Engineering. Antennas: From Theory to Practice*. New Jersey : John Wiley and Sons, 732 p.
15. Булашенко А.В., Пільтяй С.І., Кушнір Г.С., Булашенко О.В. (2020). Компактний хвилевідний поляризатор із трьома протифазними штирями. *Вісник ВПІ*. Вип. 5. С. 97–104. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-2-97-104>
16. Piltyay S., Bulashenko A., Kushnir H., Bulashenko O. (2020). Information resources economy in satellite systems based on new microwave polarizers with tunable posts. *Path of Science*. Vol. 6. Pp. 5001–5010. <https://doi.org/10.22178/pos.64-6>
17. Roelvink J., Williamson A.G. (2010). Three transverse cylindrical posts in a rectangular waveguide. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. Vol. 20. No. 5. Pp. 253–255. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2010.2045578>
18. Mospan L.P., Kirilenko A.A., Kulik D.Yu., Prikolotin S.A. (2014). Spectral properties of a rectangular wave guiding unit involving a pair of rectangular posts of equal heights. *Telecommunications and Radio Engineering*. Vol. 73. No. 1. Pp. 1–17. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i1.10>
19. Mospan L.P., Prikolotin S.A., Kirilenko A.A. (2015). Rectangular waveguide section with a pair of antipodal posts: spectral characteristics : *Proceeding of the X IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kharkiv, April 21-24, 2015)*, Kyiv: IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2015.7136867>
20. Rud L.A., Shpachenko K.S. (2011). Polarizer on sections of square waveguides inner corner ridges. *Proceeding of the VIII IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, September 20-23, 2011)*, Kyiv: IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2011.6170775>
21. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2011). A high performance ultrawideband orthomode transducer and a dual-polarized quad-ridged horn antenna based on it. *Proceeding of the VIII IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, September 20-23, 2011)*, Kyiv: IEEE, pp. 176–178. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2011.6170737>

22. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2012). Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged. *Proceeding of the International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (Ukraine, Lviv, Feb. 21-24, 2012)*, Lviv: IEEE, p. 191.

23. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2012). Electrodynamics boundary problem solution for sectoral coaxial ridged waveguides by integral equation technique. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 55. No. 5. Pp. 191–203. <https://doi.org/10.3103/S0735272712050019>

24. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2012). Eigenmodes of sectoral coaxial ridged waveguides. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 55, No. 6. Pp. 239–247. <https://doi.org/10.3103/S0735272712060015>

25. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2013). A novel wideband coaxial polarizer, *Proceeding of the IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Odessa, September 16-20, 2013)*, Odessa: IEEE, pp. 473–474. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2013.6650816>

26. Пільтяй С.І. (2009). Випромінювання відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу на основній та крос-поляризації. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. Вип. 39. С. 70–76. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2009.39.70-76>

27. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2014). Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides. *Information and telecommunication science*. Vol. 1. No. 1. Pp. 48–61. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Telnu_2014_1_1_10

28. Piltyay S.I. (2014). Enhanced C-band coaxial orthomode transducer. *Visnik NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaпаратobuduvannia*. Vol. 58. Pp. 27–34. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2014.58.27-34>

29. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2014). Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Theory. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 57. No 1. Pp. 1–30. <https://doi.org/10.3103/S0735272714010014>

30. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2014). Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results. *Radioelectronics and Comm. Systems*. Vol. 57. No 2. Pp. 59–69. <https://doi.org/10.3103/S0735272714020010>

31. Naydenko V., Piltyay S. (2008). Evolution of radiopulses radiated by Hertz's dipole in vacuum. *Proceeding of the 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Ukraine, Odessa, July 1-2, 2008)*, Odessa: IEEE, pp. 294–297. <http://doi.org/10.1109/MMET.2008.4580972>

32. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2017). Novel high performance coherent dual-wideband orthomode transducer for coaxial horn feeds. *Proceeding of the XI IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2017)*, Kyiv: IEEE, pp. 277–280. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972642>

33. Moharram M.A., Mahmoud A., Kishk A.A. (2018). A simple coaxial to circular waveguide OMT for low-power dual-polarized antenna applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 66. No 1. Pp. 109–115. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2734089>

34. Virone G., Tascone R., Peverinin O.A., Orta R. (2007). Optimum iris set concept for waveguide polarizers. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. Vol. 17. No. 3. Pp. 202–204. <http://doi.org/10.1109/LMWC.2006.890474>
35. Bulashenko A.V., Piltyay S.I., Demchenko I.V. (2020). Analytical technique for iris polarizers development. *Proceeding of the IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (Ukraine, Kharkiv, October 2-4, 2020)*, Kharkiv, pp. 464–469.
36. Piltyay S.I., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Analytical synthesis of waveguide iris polarizers. *Telecommunications and Radio Engineering*. Vol. 79. No. 18. Pp. 1579–1597. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10>
37. Piltyay S.I., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Compact polarizers for satellite information systems. *Proceeding of the IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (Ukraine, Kharkiv, October 2-4, 2020)*, Kharkiv, pp. 350–355.
38. Piltyay S.I., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. Vol. 12. No. 5, 05024. [http://doi.org/10.21272/jnep.12\(5\).05024](http://doi.org/10.21272/jnep.12(5).05024)
39. Булашенко А.В., Пільтяй С.І., Демченко І.В. (2020). Оптимізація поляризатора на основі квадратного хвилеводу з діафрагмами. *Наукові технології*. Вип. 47. № 3. Pp. 287–297. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.47.14878>
40. Булашенко А.В., Пільтяй С.І., Калініченко Є.І. (2020). Регульований поляризатор на основі квадратного хвилеводу із діафрагмами та штирями. *Технічна інженерія*. Вип. 86. № 2. С. 108–116. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-108-116](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-108-116)
41. Piltyay S.I., Sushko O.Yu., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems. *Telecommunications and Radio Engineering*. Vol. 79. No. 19. Pp. 1673–1690. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10>
42. Bulashenko A.V., Piltyay S.I. (2020). Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development. *Visnyk NTUU KPI Seriia – Radioteknika Radioaparotobuduvannia*. Vol. 83. Pp. 17–28. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.17-28>
43. Bulashenko A., Piltyay S., Kalinichenko Ye., Bulashenko O. Mathematical modeling of iris-post sections for waveguide filters, phase shifters and polarizers. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory. (Ukraine, Kyiv, November 25-27, 2020)*, Kyiv, 2020. Pp. 121–126.
44. Piltyay S., Bulashenko A., Kushnir H., Bulashenko O. New tunable-post square waveguide polarizers for satellite information systems. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory. (Ukraine, Kyiv, November 25-27, 2020)*, Kyiv, 2020. Pp. 132–137.
45. Piltyay S., Bulashenko A., Herhil Ye., Bulashenko O. FDTD and FEM simulation of microwave waveguide polarizers. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory. (Ukraine, Kyiv, November 25-27, 2020)*, Kyiv, 2020. Pp. 190–195.

46. Eleftheriades G.V., Omar A.S., Katehi L.P.B., Rebeiz G.M. (1994). Some important properties of waveguide junction generalized scattering matrices in the context of the mode matching technique. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 42. No. 10. Pp. 1896–1903. <http://doi.org/10.1109/22.320771>
47. Prikolotin S.A., Kirilenko A.A. (2011). Mode matching technique allowance for field singularities as applied to inner problems with arbitrary piecewise-coordinate boundaries: Part 1. Plane-transverse junctions and “in-line” objects”. *Telecommun Radio Eng.* Vol. 70. No. 11. Pp. 937–958. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v70.i11.10>
48. Steshenko S.O., et al. (2014). Partial domain technique considering field singularities in the internal problems with arbitrary piecewise-coordinate boundaries: Part 2. Plane-transverse junctions and “in-line” objects”. *Telecommun Radio Eng.* Vol. 73. No. 3. Pp. 187–201. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i3.10>
49. Piltyay S.I., Dubrovka F.F. (2013). Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory. *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radioteknika Radioaparotobuduvannia*. vol. 54. Pp. 13–23. <http://doi.org/10.20535/RADAP.2013.54.13-23>
50. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2013). Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 2. Results, *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radioteknika Radioaparotobuduvannia*. Vol. 55. Pp. 13–23. <http://doi.org/10.20535/RADAP.2013.55.13-23>
51. Sun W., Balanis C. A. (1993). MFIE analysis and design of ridged waveguides. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* Vol. 41. No. 11. Pp. 1965–1971. <http://doi.org/10.1109/22.273423>
52. Serebryannikov A.E., Vasylychenko O.E., Schunemann K. (2004). Fast coupled-integral-equations-based analysis of azimuthally corrugated cavities. *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.* Vol. 14. No. 5. Pp. 240–242. <http://doi.org/10.1109/LMWC.2004.827833>
53. Piltyay S.I. (2012). Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides, *Proceedings of 14-th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Ukraine, Kyiv, August 28-30, 2012)*, Kyiv, pp. 492–495. <http://doi.org/10.1109/MMET.2012.6331195>
54. Amari S., Bornemann J., Vahldieck R. (1996). Application of a coupled-integral-equations technique to ridged waveguides. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* Vol. 44. No. 12. Pp. 2256–2264. <http://doi.org/10.1109/22.556454>
55. Kirilenko A.A., Senkevich S.L., Steshenko S.O. (2015). Application of the generalized scattering matrix technique for the dispersion analysis of 3D slow-wave structures. *Telecommunications and radio Engineering*. Vol. 74. No. 17. Pp. 1497–1511. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v74.i17.10>
56. Tascone R., Savi P., Trinchenco D., Orta R. (2000). Scattering matrix approach for the design of microwave filter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*. Vol. 48. No. 3. Pp. 423–430. <http://doi.org/10.1109/22.826842>
57. Zheng S.Y., Chan W.S., Man K.F. (2010). Broadband phase shifter using loaded transmission line, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. Vol. 20. No. 9. Pp. 498–500. <http://doi.org/10.1109/LMWC.2010.2050868>

58. Piltyay S.I. (2013). Wideband antiphase power combiner/divider. *Proceeding of the International Scientific and Technical Conference «Modern Problems of Radio Engineering and Telecommunications» (Ukraine, Sevastopol, April 22-26, 2013)*, Sevastopol, p. 220. URL: <http://rt-sevastopol.ru/files/conference/2013/materials/220.pdf>

59. Lyu Y.-P., Zhu L., Cheng C.-H. (2017). Proposal and synthesis design of differential phase shifters with filtering function. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 65. No. 8. Pp. 2906–2917. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2673819>

60. Kulik D.Yu., Steshenko S.A., Kirilenko A.A. (2017). Compact polarization plane rotator for arbitrary angle, *Proceeding of the XI IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2017)*, Kyiv : IEEE, pp. 273–276. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972641>

61. Булашенко А.В. (2010). Принципи формування променя інтелектуальних антен. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. Вип. 1. С. 111–120. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/956>

62. Булашенко А.В., Дубровка Ф.Ф. (2010). Живлення антенних решіток на основі лінз Ротмана (огляд). *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. Вип. 3. С. 113–120. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/956>

63. Булашенко А.В. (2010). Багатопробневі антенні решітки на основі лінз Ротмана. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Вип. 42. С. 178–186. <https://doi.org/10.20535/RADAR.2010.42.178-186>

64. Крелевецький О.В., Забегалов І.В., Булашенко А.В. (2018). Спосіб оцінки струму витоку. Матеріали III Всеукраїнської науково-методичної конференції (Україна, Шостка, 19 квітня, 2018), Суми : Сумський державний університет, 2017. С. 165–166. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/67537>

65. Булашенко А.В. (2010). Побудова векторних діаграм за допомогою математичного пакету MathCAD. Матеріали Науково-методичної конференції викладачів, співробітників і студентів (Україна, Шостка, 27 квітня, 2010), Суми : СумДУ, с. 10–13. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/21088>

66. Kirilenko A.A., Steshenko S.O., Derkach V.N., Ostrizhnyi Y.M. (2018). Comparative analysis of tunable compact rotators. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. Vol. 33. Pp. 304–319. <http://doi.org/10.1080/09205071.2018.1550443>

67. Kulik D.Yu., Mospan L.P., Perov A.O., Kolmakova N.G. (2016). Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots. *Telecommun. Radio Eng.* Vol. 75. No. 1. Pp. 1–9. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10>

68. Tikhov Y. (2016). Comparison of two kinds of Ka-band circular polarisers for use in a gyro-travelling wave amplifier. *IET Microwaves Antennas and Propagation*. Vol. 10. No. 2. Pp. 147–151. <http://doi.org/10.1049/IET-MAP.2015.0292>

69. Kolmakova N., Perov A., Derkach V., Kirilenko A. (2016). Polarization plane rotation by arbitrary angle using D4 symmetrical structures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 64. No. 2. Pp. 429–435. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2509966>

70. Piltyay S.I. (2017). High performance extended C-band 3.4-4.8 GHz dual circular polarization feed system, *Proceeding of the XI IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2017)*, Kyiv : IEEE, pp. 284–287. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972644>

71. Pollak A.W., Jones M.E. (2018). A compact quad-ridge orthogonal mode transducer with wide operational bandwidth. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Vol. 17. No. 3. Pp. 422–425. <http://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2793465>

72. Agnihotri I., Sharma S.K. (2019). Design of a compact 3D metal printed Ka-band waveguide polarizer. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Vol. 18. No. 12. Pp. 2726–2730. <http://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2950312>

73. Kirilenko A.A., Steshenko S.O., et al. (2019). A tunable compact polarizer in a circular waveguide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 67. No. 2. Pp. 592–596. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2881089>

74. Shu C., et al. (2020). A wideband dual-circular polarization horn antenna for mmWave wireless communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Vol. 18. No. 9. Pp. 1726–1730. <http://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2927933>

75. Deutschmann B., Jacob A.F. (2020). Broadband septum polarizer with triangular common port. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 68. No. 2. Pp. 693–700. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2951138>

76. Dubrovka F.F., Piltyay S.I., et al. (2020). Optimum septum polarizer design for various fractional bandwidths. *Radioelectron. Commun. Syst.* Vol. 63. No. 1. Pp. 15–23. <http://doi.org/10.3103/S0735272720010021>

77. Dubrovka F., Piltyay S., et al. (2020). Compact X-band stepped-thickness septum polarizer”, *Proceeding of the IEEE Ukrainian Microwave Week (Ukraine, Kharkiv, September 21-25, 2020)*, Kharkiv, pp. 135–138. <http://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252583>

78. Dubrovka F., et al. (2020). Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station. *Proceeding of the IEEE Ukrainian Microwave Week, (Ukraine, Kharkiv, September 21-25, 2020)*, Kharkiv, pp. 196–202. <http://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252600>

79. Bulashenko A.V., Piltyay S.I., Demchenko I.V. (2020). Wave matrix technique for waveguide iris polarizers simulation. Theory. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. Vol. 12. No. 6. P. 06026. [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(6\).06026](https://doi.org/10.21272/jnep.12(6).06026)

80. Marcuvitz N. (1986). *Waveguide handbook*. USA : Short Run Press Ltd., 446 p.

References:

1. Cheng Y., Dong Y. (2020). Wideband circularly polarized planar antenna array for 5G millimeter-wave applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Early Access. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3028213>

2. Bulashenko A.V. (2020). Evaluation of D2D Communications in 5G networks. *Visnik NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparatabuduvannia*, vol. 81, pp. 21–29. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.81.21-29>

3. Bulashenko A.V. (2020). Data upload system using D2D technology in the unlicensed frequency range as part of the 5G communication system. *Technical*

Engineering, vol. 86, no. 2, pp.103–107. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-103-107](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-103-107) (in Ukrainian)

4. Bulashenko A.V., Piltyay S.I., Demchenko I.V. (2020). Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G networks, *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology, (Ukraine, Kharkiv, October 2-4, 2020)*, Kharkiv, pp. 324–329.

5. Piltyay S.I., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Wireless sensor network connectivity in heterogeneous 5G mobile systems, *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (Ukraine, Kharkiv, October 2-4, 2020)*, Kharkiv, pp. 508–513.

6. Gladun V.V., Bulashenko A.V. (2019). Zabezpechennja vysokoi' yakosti merezhi 5G za dopomogou tehnologii' D2D [Obtaining of high quality 5G network with D2D technology]. *Proceeding of the International Scientific and Technical Conference «Radioengineering fields, signals, devices and systems» (Ukraine, Kyiv, November 18-24, 2019)*, Kyiv: KPI, pp. 57–59. Retrieved from: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35676/1/RTPSAS_2019_s1_t16.pdf (in Ukrainian)

7. Bulashenko A.V. (2020). Rozpodil resursiv dlja prystroi'v maloi' potuzhnosti tehnologii' M2M v merezhah 5G [Resource allocation for low-power devices of M2M technology in 5G networks] *KPI Science news*, vol. 3, pp. 7–13. <http://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.3.203863> (in Ukrainian)

8. Bulashenko A.V., Piltyay S.I., Polishchuk A.V., Bulashenko O.V. (2020). New traffic model of M2M technology in 5G wireless sensor networks, *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (Ukraine, Kyiv, November 25-27, 2020)*, Kyiv pp. 231–235.

9. Bulashenko A.V., Litvinets O.L. (2017). Analysis of the possibility of cloud technologies. *Proceeding of the II All-Ukrainian scientific-methodical conference (Ukraine, Shostka, April 20, 2017)*, Sumy: Sumy State University, pp. 188–191. Retrieved from: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66966/1/Bulashenko_cloud_technologies.pdf (in Ukrainian)

10. Bulashenko A.V., Zabegalov I.V. (2020). Design of a portable digital megohmmeter and leakage current meter. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnic Institute*, vol. 3, pp. 37–42. Retrieved from: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-37-42> (in Ukrainian)

11. Gnitetsky V.A., Bulashenko A.V. (2019). Zabezpechennja duzhe nyz'kyh zatrymok u stil'nykovij merezhi 5G na bazi MEC [Obtaining of very low delays in the 5G cellular system on the basis of MEC]. *Proceeding of the International Scientific and Technical Conference «Radioengineering fields, signals, devices and systems» (Ukraine, Kyiv, November 18-24, 2019)*, Kyiv: KPI, pp. 153–155. Retrieved from: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35744/1/RTPSAS_2019_s5_t06.pdf (in Ukrainian)

12. Tsapkov S.V., Bulashenko A.V. (2019). Metod perehresnoi' entropii' dlja znyzhennja vidnoshennja PAPR v systemah OFDM [Cross-entropy method for reduction PAPR ratio in OFDM system]. *Proceeding of the International Scientific and Technical Conference «Radioengineering fields, signals, devices and systems» (Ukraine, Kyiv, November 18-24, 2019)*, Kyiv: KPI, pp. 51–53. Retrieved

from: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35644/1/RTPSAS_2019_s1_t14.pdf
(in Ukrainian)

13. Myronchuk O., Shpylka O., Zhuk S. (2020). Two-stade channel frequency response estimation in OFDM systems. *Path of Science*, vol. 6, no. 2, pp. 1001–1007. <https://doi.org/10.22178/pos.55-1>

14. Pozar D.M. (2012)/ *Microwave Engineering. Antennas: From Theory to Practice*. New Jersey: John Wiley and Sons, 732 p.

15. Bulashenko A. V., Piltyay S. I., Kushnir H. S., Bulashenko O. V. (2020). Compact waveguide polarizer with three antiphase posts. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnic Institute*, vol. 5, pp. 97–104. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-2-97-104> (in Ukrainian)

16. Piltyay S., Bulashenko A., Kushnir H., Bulashenko O. (2020). Information resources economy in satellite systems based on new microwave polarizers with tunable posts. *Path of Science*, vol. 6, pp. 5001–5010. <https://doi.org/10.22178/pos.64-6>

17. Roelvink J., Williamson A.G. (2010). Three transverse cylindrical posts in a rectangular waveguide. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, no. 5, pp. 253–255. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2010.2045578>

18. Mospan L.P., Kirilenko A.A., Kulik D.Yu., Prikolotin S.A. (2014). Spectral properties of a rectangular wave guiding unit involving a pair of rectangular posts of equal heights. *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 73, no. 1, pp. 1–17. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i1.10>

19. Mospan L.P., Prikolotin S.A., Kirilenko A.A. (2015). Rectangular waveguide section with a pair of antipodal posts: spectral characteristics, *Proceeding of the X IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kharkiv, April 21-24, 2015)*, Kyiv: IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2015.7136867>

20. Rud L.A., Shpachenko K.S. (2011). Polarizer on sections of square waveguides inner corner ridges. *Proceeding of the VIII IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, September 20-23, 2011)*, Kyiv: IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2011.6170775>

21. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2011). A high performance ultrawideband orthomode transducer and a dual-polarized quad-ridged horn antenna based on it. *Proceeding of the VIII IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, September 20-23, 2011)*, Kyiv: IEEE, pp. 176–178. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2011.6170737>

22. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2012). Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged. *Proceeding of the International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (Ukraine, Lviv, Feb. 21-24, 2012)*, Lviv: IEEE, p. 191.

23. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2012). Electrodynamics boundary problem solution for sectoral coaxial ridged waveguides by integral equation technique. *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 5, pp. 191–203. <https://doi.org/10.3103/S0735272712050019>

24. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2012). Eigenmodes of sectoral coaxial ridged waveguides. *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 239–247. <https://doi.org/10.3103/S0735272712060015>

25. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2013). A novel wideband coaxial polarizer, *Proceeding of the IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Odessa, September 16-20, 2013)*, Odessa: IEEE, pp. 473–474. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2013.6650816>

26. Piltyay S.I. (2009). Vyprominjувannya vidkrytogo kincja tonkostinnogo kruglogo hvylevodu na osnovnij ta kros-poljaryzacji' [Radiation of the open end of a thin-walled circular waveguide at co- and cross polarization]. *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannya*, vol. 39, pp. 70–76. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2009.39.70-76> (in Ukrainian)

27. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2014). Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides. *Information and telecommunication science*, vol. 1, no. 1, pp. 48–61. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Telnuu_2014_1_1_10

28. Piltyay S.I. (2014). Enhanced C-band coaxial orthomode transducer. *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannya*, vol. 58, pp. 27–34. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2014.58.27-34>

29. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2014). Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Theory. *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 57, no. 1, p. 1–30. <https://doi.org/10.3103/S0735272714010014>

30. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2014). Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results. *Radioelectronics and Comm. Systems*, vol. 57, no. 2, pp. 59–69. <https://doi.org/10.3103/S0735272714020010>

31. Naydenko V., Piltyay S. (2008). Evolution of radiopulses radiated by Hertz's dipole in vacuum. Proceeding of the 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Ukraine, Odessa, July 1-2, 2008), Odessa: IEEE, pp. 294–297. <http://doi.org/10.1109/MMET.2008.4580972>

32. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2017). Novel high performance coherent dual-wideband orthomode transducer for coaxial horn feeds. *Proceeding of the XI IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2017)*, Kyiv: IEEE, pp. 277–280. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972642>

33. Moharram M.A., Mahmoud A., Kishk A.A. (2018). A simple coaxial to circular waveguide OMT for low-power dual-polarized antenna applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 1, pp. 109–115. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2734089>

34. Virone G., Tascone R., Peverinin O.A., Orta R. (2007). Optimum iris set concept for waveguide polarizers. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 202–204. <http://doi.org/10.1109/LMWC.2006.890474>

35. Bulashenko A.V., Piltyay S.I., Demchenko I.V. (2020). Analytical technique for iris polarizers development. *Proceeding of the IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (Ukraine, Kharkiv, October 2-4, 2020)*, Kharkiv, pp. 464–469.

36. Piltyay S.I., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Analytical synthesis of waveguide iris polarizers. *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579–1597. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10>

37. Piltyay S.I., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Compact polarizers for satellite information systems. *Proceeding of the IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (Ukraine, Kharkiv, October 2-4, 2020)*, Kharkiv, pp. 350–355.

38. Piltyay S.I., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 5, 05024. [http://doi.org/10.21272/jnep.12\(5\).05024](http://doi.org/10.21272/jnep.12(5).05024)

39. Bulashenko A.V., Piltyay S.I., Demchenko I.V. (2020). Optimization of a polarizer based on a square waveguide with irises. *Science-based Technologies*, vol. 47, no. 3, pp. 287–297. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.47.14878> (in Ukrainian)

40. Bulashenko A. V., Piltyay S. I., et al. (2020). Tunable square waveguide polarizer with irises and posts. *Technical Engineering*, vol. 86, no. 2, pp. 108–116. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-108-116](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-108-116) (in Ukrainian)

41. Piltyay S.I., Sushko O.Yu., Bulashenko A.V., Demchenko I.V. (2020). Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems. *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 19, pp. 1673–1690. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10>

42. Bulashenko A.V., Piltyay S.I. (2020). Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radioteknika Radioaparotobuduvannia*, vol. 83, pp. 17–28. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.17-28>

43. Bulashenko A., Piltyay S., Kalinichenko Ye., Bulashenko O. (2020). Mathematical modeling of iris-post sections for waveguide filters, phase shifters and polarizers. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory. (Ukraine, Kyiv, November 25-27, 2020)*, Kyiv, pp. 121–126.

44. Piltyay S., Bulashenko A., Kushnir H., Bulashenko O. (2020). New tunable-post square waveguide polarizers for satellite information systems. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory. (Ukraine, Kyiv, November 25-27, 2020)*, Kyiv, pp. 132–137.

45. Piltyay S., Bulashenko A., Herhil Ye., Bulashenko O. (2020). FDTD and FEM simulation of microwave waveguide polarizers. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory. (Ukraine, Kyiv, November 25-27, 2020)*, Kyiv, pp. 190–195.

46. Eleftheriades G.V., Omar A.S., Katehi L.P.B., Rebeiz G.M. (1994). Some important properties of waveguide junction generalized scattering matrices in the context of the mode matching technique. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 42, no.10, pp. 1896–1903. <http://doi.org/10.1109/22.320771>

47. Prikolotin S.A., Kirilenko A.A. (2011). Mode matching technique allowance for field singularities as applied to inner problems with arbitrary piecewise-coordinate boundaries: Part 1. Plane-transverse junctions and “in-line” objects”. *Telecommun Radio Eng.*, vol. 70, no. 11, pp. 937–958. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v70.i11.10>

48. Steshenko S.O., et al. (2014). Partial domain technique considering field singularities in the internal problems with arbitrary piecewise-coordinate boundaries: Part 2. Plane-transverse junctions and “in-line” objects”. *Telecommun Radio Eng.*, vol. 73, no. 3, pp. 187–201. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i3.10>

49. Piltyay S.I., Dubrovka F.F. (2013). Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radioteknika Radioaparotobuduvannia*, vol. 54, pp. 13–23. <http://doi.org/10.20535/RADAP.2013.54.13-23>
50. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2013). Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 2. Results. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radioteknika Radioaparotobuduvannia*, vol. 55, pp. 13–23. <http://doi.org/10.20535/RADAP.2013.55.13-23>
51. Sun W., Balanis C.A. (1993). MFIE analysis and design of ridged waveguides. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 41, no. 11, pp. 1965–1971. <http://doi.org/10.1109/22.273423>
52. Serebryannikov A.E., Vasylychenko O.E., Schunemann K. (2004). Fast coupled-integral-equations-based analysis of azimuthally corrugated cavities. *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, 2004, vol. 14, no. 5, pp. 240–242. <http://doi.org/10.1109/LMWC.2004.827833>
53. Piltyay S.I. (2012). Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides. *Proceedings of 14-th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Ukraine, Kyiv, August 28-30, 2012)*, Kyiv, pp. 492–495. <http://doi.org/10.1109/MMET.2012.6331195>
54. Amari S., Bornemann J., Vahldieck R. (1996). Application of a coupled-integral-equations technique to ridged waveguides. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 12, pp. 2256–2264. <http://doi.org/10.1109/22.556454>
55. Kirilenko A.A., Senkevich S.L., Steshenko S.O. (2015). Application of the generalized scattering matrix technique for the dispersion analysis of 3D slow-wave structures. *Telecommunications and radio Engineering*, vol. 74, no. 17, pp. 1497–1511. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v74.i17.10>
56. Tascone R., Savi P., Trinchenco D., Orta R. (2000). Scattering matrix approach for the design of microwave filter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, vol. 48, no. 3, pp. 423–430. <http://doi.org/10.1109/22.826842>
57. Zheng S.Y., Chan W.S., Man K.F. (2010). Broadband phase shifter using loaded transmission line, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, no. 9, pp. 498–500. <http://doi.org/10.1109/LMWC.2010.2050868>
58. Piltyay S.I. (2013). Wideband antiphase power combiner/divider. *Proceeding of the International Scientific and Technical Conference «Modern Problems of Radio Engineering and Telecommunications» (Ukraine, Sevastopol, April 22-26, 2013)*, Sevastopol, p. 220. Retrieved from: <http://rt-sevastopol.ru/files/conference/2013/materials/220.pdf>
59. Lyu Y.-P., Zhu L., Cheng C.-H. (2017). Proposal and synthesis design of differential phase shifters with filtering function. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 8, pp. 2906–2917. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2673819>
60. Kulik D.Yu., Steshenko S.A., Kirilenko A.A. (2017). Compact polarization plane rotator for arbitrary angle, *Proceeding of the XI IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2017)*, Kyiv: IEEE, pp. 273–276. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972641>

61. Bulashenko A.V. (2010). Pryncypy formuvannja promenja intelektual'nyh anten [Principles of intelligent antenna beam formation]. *Visnyk of Sumy State University. Technical Science Series*, vol. 1, pp. 111–120. Retrieved from: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/956> (in Ukrainian)

62. Bulashenko A.V., Dubrovka F.F. (2010). Zhyvlennja antennyh reshitok na osnovi linz Rotmana (ogljad) [Power supply of antenna arrays based on Rothman lenses (review)]. *Visnyk of Sumy State University. Technical Science Series*, vol. 3, pp. 113–120. Retrieved from: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/956> (in Ukrainian)

63. Bulashenko A.V. (2010). Bagatopromenevi anteny reshitky na osnovi linz Rotmana [Multibeam arrays on the basis of Rotman lenses]. *Visnyk NTUU KPI Seriya. Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, vol. 42, pp. 178–186. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2010.42.178-186> (in Ukrainian)

64. Krolevetsky O.V., Zabegalov I.V., Bulashenko A.V. (2018). Sposib ocinky strumu vytku [The method of estimating the leakage current]. *Proceeding of the III All-Ukrainian scientific-methodical conference (Ukraine, Shostka, April 19, 2018)*, Sumy: Sumy State University, pp. 188–191. Retrieved from: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/67537> (in Ukrainian)

65. Bulashenko A.V. (2010). Pobudova vektornyh diagram za dopomogoju matematychnogo paketu MathCAD [Construction of vector diagrams using the mathematical package MathCAD]. *Proceeding of the Scientific and methodical conference of teachers, staff and student (Ukraine, Shostka, April 27, 2010)*, Sumy: Sumy State University, pp. 10–13. Retrieved from: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/21088>

66. Kirilenko A.A., Steshenko S.O., Derkach V.N., Ostrizhnyi Y.M. (2018). Comparative analysis of tunable compact rotators. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 33, pp. 304–319. <http://doi.org/10.1080/09205071.2018.1550443>

67. Kulik D.Yu., Mospan L.P., Perov A.O., Kolmakova N.G. (2016). Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots. *Telecommun. Radio Eng.*, vol. 75, no. 1, pp. 1–9. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10>

68. Tikhov Y. (2016). Comparison of two kinds of Ka-band circular polarisers for use in a gyro-travelling wave amplifier. *IET Microwaves Antennas and Propagation*, vol. 10, no. 2, pp. 147–151. <http://doi.org/10.1049/IET-MAP.2015.0292>

69. Kolmakova N., Perov A., Derkach V., Kirilenko A. (2016). Polarization plane rotation by arbitrary angle using D4 symmetrical structures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 2, pp. 429–435. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2509966>

70. Piltyay S.I. (2017). High performance extended C-band 3.4-4.8 GHz dual circular polarization feed system, *Proceeding of the XI IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2017)*, Kyiv: IEEE, pp. 284–287. <http://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972644>

71. Pollak A.W., Jones M.E. (2018). A compact quad-ridge orthogonal mode transducer with wide operational bandwidth. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 422–425. <http://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2793465>

72. Agnihotri I., Sharma S.K. (2019). Design of a compact 3D metal printed Ka-band waveguide polarizer. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 2726–2730. <http://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2950312>
73. Kirilenko A.A., Steshenko S.O., et al. (2019). A tunable compact polarizer in a circular waveguide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 592–596. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2881089>
74. Shu C., et al. (2020). A wideband dual-circular polarization horn antenna for mmWave wireless communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1726–1730. <http://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2927933>
75. Deutschmann B., Jacob A.F. (2020). Broadband septum polarizer with triangular common port. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 2, pp. 693–700. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2951138>
76. Dubrovka F.F., Piltyay S.I., et al. (2020). Optimum septum polarizer design for various fractional bandwidths. *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 63, no. 1, pp. 15–23. <http://doi.org/10.3103/S0735272720010021>
77. Dubrovka F., Piltyay S., et al. (2020). Compact X-band stepped-thickness septum polarizer”, *Proceeding of the IEEE Ukrainian Microwave Week (Ukraine, Kharkiv, September 21-25, 2020)*, Kharkiv, pp. 135–138. <http://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252583>
78. Dubrovka F., et al. (2020). Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station. *Proceeding of the IEEE Ukrainian Microwave Week, (Ukraine, Kharkiv, September 21-25, 2020)*, Kharkiv, pp. 196–202. <http://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252600>
79. Bulashenko A. V., Piltyay S. I., Demchenko I.V. (2020). Wave matrix technique for waveguide iris polarizers simulation. Theory. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 6, pp. 06026. [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(6\).06026](https://doi.org/10.21272/jnep.12(6).06026)
80. Marcuvitz N. (1986). *Waveguide handbook*. USA: Short Run Press Ltd., 446 p.