

## ОЦЕНКА МЕТОДОВ FEM И FDTD ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ДИАФРАГМАМИ

**Пильтяй С. И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоинженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Булашенко А. В.** – старший преподаватель кафедры радиоинженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Быковский А. В.** – магистр кафедры радиоинженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Булашенко А. В.** – студент электромеханического отделения Шосткинского профессионального колледжа имени Ивана Кожедуба Сумского государственного университета, Шостка, Сумская обл., Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** На сегодняшний день происходит стремительное расширение круга современных отраслей науки и техники, которые активно используют спутниковые телекоммуникационные системы для приема, обработки и передачи различной информации. Такие радиоэлектронные системы достаточно часто требуют увеличения объемов информации, которые они обрабатывают и передают. Удвоения объемов передаваемой информации можно достичь, используя двухполяризационные антенные системы и устройства. В наше время большинство специалистов, которые занимаются разработкой разных современных поляризационных устройств СВЧ, выполняют их численное моделирование и оптимизацию с помощью вариационных методов расчета, методов интегральных уравнений, метода согласования полей частичных областей. Наиболее активно применяются методы с разбиением внутренней области устройств на элементарные ячейки. Среди них во временной области наиболее часто используют метод конечных разностей с разбиением на гексагональную сетку, а в частотной области применяют метод конечных элементов с адаптивной тетраэдрической сеткой. Таким образом, актуальной задачей является оценка скорости и точности этих методов с целью определения более эффективного из них.

**Цель.** Целью исследования является сравнение скорости и точности расчетов электромагнитных характеристик волноводных поляризаторов численными методами FEM и FDTD, а также сравнение сходимости этих методов при анализе поляризационных устройств СВЧ с диафрагмами.

**Метод.** Для расчетов и анализа электромагнитных характеристик в статье использовано метод конечных разностей во временной области FDTD и метод конечных элементов в частотной области FEM. В FEM осуществляется разбиение на тетраэдрические ячейки сетки. В FDTD область расчета разбивается на гексагональные ячейки сетки.

**Результаты.** Установлено, что сходимость коэффициента стоячей волны по напряжению для волноводного поляризатора является быстрой для обоих методов. Получено, что сходимости характеристик дифференциального фазового сдвига, коэффициента эллиптичности и кроссполяризационной развязки разработанного микроволнового устройства оказались значительно более чувствительными к используемому количеству ячеек сетки. Более того, в исследовании расчетным путем получено, что время вычислений методом конечных элементов в частотной области более чем в 2 раза меньше, чем соответственное время, необходимое для расчета время вычислений методом конечных разностей во временной области. При использовании метода конечных элементов в частотной области соответствующее количество ячеек тетраэдрической сетки в 10 раз меньше, чем количество ячеек гексагональной сетки в методе конечных разностей во временной области.

**Выводы.** Проведенные исследования показали, что метод FEM в частотной области, в котором применяется адаптивная тетраэдрическая сетка, более эффективен, чем метод FDTD для расчета фазовых и поляризационных характеристик современных волноводных поляризаторов для различных применений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** FDTD6 FEM; FIT; метод конечных разностей; метод конечных элементов; численные методы; сходимость; спутниковые информационные системы; микроволновые устройства; волновод; поляризатор; диафрагма; дифференциальный фазовый сдвиг; коэффициент эллиптичности; кроссполяризационная развязка.

### АБРЕВИАТУРЫ

FEM – Finite Element Method;  
FDTD – Finite Difference Time Domain;  
FETD – Finite Element Time Domain;  
FIT – Finite Integration Technique;  
SF-FDTD – Split-Field Finite Difference Time Domain;  
XPD – Crosspolar Discrimination;  
КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению;  
КПР – кроссполяризационная развязка;  
СВЧ – сверхвысокие частоты.

### НОМЕНКЛАТУРА

$A = S_{21,H}$  – коэффициент передачи поляризатора для волны горизонтальной поляризации;  
 $B = S_{21,V}$  – коэффициент передачи поляризатора для волны вертикальной поляризации;  
 $\Delta f$  – дифференциальный фазовый сдвиг, град.;  
 $\varphi_{\Sigma 21,H}$  – аргумент коэффициента передачи поляризатора для горизонтальной поляризации, град.;  
 $\varphi_{\Sigma 21,V}$  – аргумент коэффициента передачи поляризатора для вертикальной поляризации, град.;  
 $r$  – коэффициент эллиптичности, дБ;

$S_{\Sigma 11}$  – коэффициент отражения поляризатора;

$XPD$  – кроссполяризационная развязка, дБ;

$VSWR$  – коэффициент стоячей волны по напряжению.

## ВВЕДЕНИЕ

Волноводный поляризатор является важным элементом современных спутниковых антенных систем, которые применяют сигналы с одной или одновременно двумя ортогональными круговыми поляризациями электромагнитных волн. Все конструкции волноводных поляризаторов можно условно разделить на три основные группы. Сегодня существует множество научных статей и докладов на конференциях, посвященных разработке и оптимизации поляризаторов с диафрагмами [1–13], поляризаторов с перегородкой [14–21] и поляризаторов со штырями [22–26]. В современных антеннах с двойной поляризацией для радаров и спутниковых телекоммуникационных систем волноводные поляризаторы функционируют в сочетании с ортомодовыми преобразователями [27–41], которые осуществляют разделение сигналов с преобразованными поляризациями. Наиболее эффективными конструкциями ортомодовых преобразователей являются преобразователи на основе двухреберных переходов в прямоугольных волноводах [6, 26], четырехреберных волноводах [27], турникетных переходов [29, 31] и переходов Бойфота [28]. Кроме того, появились новые конструкции ортомодовых преобразователей [42–46] на основе коаксиальных четырехреберных [47, 48] и секторных коаксиальных гребенчатых волноводов [49–56] для двухдиапазонных систем питания антенн спутниковой связи и радиоастрономии. В настоящее время широкое применение получили волноводные поляризаторы [57, 58], которые используются в современных радиолокационных и спутниковых системах, некоторые из которых применяются в современных системах 5G [59, 60]. Кроме того, широкое применение получили и фазовращатели [61–66], которые применяются в качестве поляризаторов. Часто фазовращатели применяются в качестве основных частей фазированных антенных решеток в технологии интегрированных в подложку волноводов. Такую структуру было эффективно смоделировано с помощью метода согласования мод [61], который обеспечивает высокую скорость и большую точность вычислений. Конструкция такого фазовращателя состоит из пары цилиндрических штырей в волноводе на частоте 7.5 ГГц. Необходимый фазовый сдвиг обеспечивается за счет регулирования длины этих штырей. В [62] была предложена конструкция фазовращателя в волноводе на частоте 15.2 ГГц, который может осуществлять регулировку фазы в диапазоне от 0 до 360°. Эффективность передачи сильно зависит от зазора между регулируемой металлической пластинкой и волноводом. Авторы

[63] предложили конструкцию волноводного фазовращателя со встроенным металлическим ребром, который обеспечивает сдвиг фазы на 360°. Вторая конструкция фазовращателя с боковым щелевым волноводом реализует сдвиг фазы в 360° за счет регулировки металлической заслонки, что расположена на конце делителя мощности на 3 дБ.

**Объектами исследования** являются метод конечных разностей во временной области FDTD и метод конечных элементов в частотной области FEM, которые используются для расчета электромагнитных характеристик устройств СВЧ диапазона.

**Предметом исследования** являются сходимости дифференциального фазового сдвига, согласования и поляризационных характеристик волноводного поляризатора с диафрагмами.

**Целью работы** является сравнение скорости и точности расчетов электромагнитных характеристик волноводных поляризаторов численными методами FEM и FDTD, а также сравнение сходимости этих методов при анализе поляризационных устройств СВЧ с диафрагмами.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной инженерной проблемой при разработке волноводных поляризаторов и фазовращателей СВЧ является очень высокая чувствительность их фазовых и поляризационных характеристик к неточностям определения оптимальных размеров устройств и изготовления их конструкции. Целью данной научной статьи является сравнение сходимости и скорости расчетов электродинамических методов FEM и FDTD, которые активно применяются для анализа характеристик поляризационных устройств. В данной статье будем сравнивать методы при расчете электромагнитных характеристик волноводного поляризатора на примере конструкции с пятью диафрагмами. Для точного анализа необходимо сравнить время расчета двумя методами при их одинаковой точности, которая зависит от количества используемых ячеек сетки внутри объема поляризатора. Кроме того, задачей исследования является сравнение количества необходимых тетраэдрических ячеек сетки в частотной области для метода FEM с количеством гексагональных ячеек сетки для метода FDTD во временной области при одинаковой точности расчета обоими методами.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время существует множество вариантов модификаций метода конечных разностей во временной области (FDTD) и метода конечных элементов (FEM). Каждая из модификаций имеет свои характеристики эффективности и своеобразные приложения, где ее производительность лучше по сравнению с другими методами. Гибридный метод электромагнитного моделирования во временной области, сочетающий в себе явный метод FDTD и неявный метод временной области (FETD), был

разработан в [67]. Предлагаемый подход обеспечивает преимущества гибкости моделирования метода FETD для сложных геометрических структур и эффективности метода FDTD для простых геометрических структур. В [68] авторы сравнивают различные подходы к усреднению материала в методе конечного интегрирования (FIT) для изогнутых диэлектриков. Предлагается и исследуется новый смешанный метод с использованием нормальной и тангенциальной составляющих поля. Снижены ошибки, возникающие при резких перепадах диэлектрической проницаемости.

В [69] предлагается новый более высокого порядка с большой областью FEM для решения прямых трехмерных электромагнитных задач во временной области. Этот усовершенствованный FEM применяется для анализа многопортовых волноводных устройств СВЧ с произвольными металлическими и диэлектрическими неоднородностями. В статье [70] исследуются и сравниваются вычислительные характеристики метода естественных элементов и FEM. В [77, 72] авторы оптимизируют связи подсетей для FIT в пространстве и времени. Рекомендуемый метод оптимизации позволяет эффективно уменьшить нефизические отражения волн. В [73] предлагается модификация FIT для расчета анизотропных мод, мод с потерями и открытого волновода. Численные примеры, представленные в статье [73], подтверждают, что предложенный смешанный FIT с сосредоточением массы не содержит каких-либо ложных собственных мод и обеспечивает высокую вычислительную эффективность. В статье [74] авторы представляют новый неконформный гибридный метод FDTD/FETD без гибридизации через буферную зону. Численные примеры включены в [75], чтобы продемонстрировать производительность рекомендуемого гибридного метода, который является более точным и стабильным в течение длительного времени.

В [76] авторы предлагают новый гибридный метод схемы пространственно-фильтрованной FDTD (SF-FDTD) и метод подсеток для анализа многомасштабных объектов. Приведены результаты моделирования периодической волноводной структуры, подтверждающие точность и эффективность предложенного гибридного метода. Авторы [77] разработали новый метод FDTD, основанный на пространственных преобразованиях. Этот метод преодолевает препятствия, присущие традиционному алгоритму FDTD в пространственно сложной области. Результаты моделирования подтверждаются с помощью FIT. В [78] авторы разработали стабильный, точный и быстрый численный метод, основанный на треугольной сетке и пространственных преобразованиях для задач электродинамики с произвольными границами. Предлагаемый метод намного быстрее, чем

классический FDTD при наличии искривленных границ.

Поэтому определение оптимальных численных методик для высокоточного расчета всех электромагнитных характеристик СВЧ поляризаторов является важной и актуальной научной задачей. Результаты проведенного в статье исследования позволяют получить рекомендации относительно того, какой метод расчета является более быстрым и точным для разработки волноводных поляризаторов СВЧ диапазона для современных телекоммуникационных и радиолокационных систем

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современные широкополосные спутниковые антенные системы с двойной ортогональной круговой поляризацией используют волноводные поляризаторы с диафрагмами. Это компактное микроволновое устройство выполняет преобразование ортогональных электромагнитных волн с круговой поляризацией в ортогональные волны с линейной поляризацией. Конструкция такого поляризатора на основе квадратного волновода с 5 симметричными диафрагмами представлена на рис. 1.

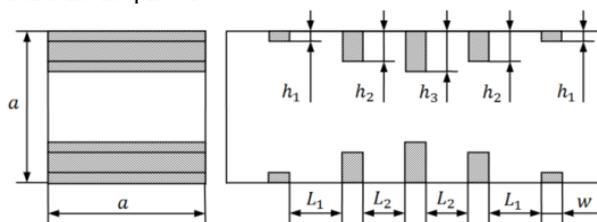


Рисунок 1 – Структура квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами

Основными характеристиками поляризационного устройства являются следующие: фазовые, согласующие и поляризационные. К фазовым характеристикам относится дифференциальный фазовый сдвиг. Согласующие характеристики поляризатора определяются коэффициентами стоячей волны по напряжению (КСВН) для волн обеих поляризаций. К поляризационным характеристикам относятся коэффициент эллиптичности и кроссполяризационная развязка (КПР).

Дифференциальный фазовый сдвиг определяется выражением

$$\Delta f = \varphi_{\Sigma 21.H} - \varphi_{\Sigma 21.V}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{\Sigma 21.H}$  – аргумент коэффициента передачи поляризатора для горизонтальной поляризации;  $\varphi_{\Sigma 21.V}$  – аргумент коэффициента передачи поляризатора для вертикальной поляризации.

КСВН горизонтальной и вертикальной поляризации определяется формулами

$$VSWR = \frac{1 + |S_{\Sigma 11}|}{1 - |S_{\Sigma 11}|}, \quad (2)$$

где  $S_{\Sigma 11}$  – коэффициент отражения поляризатора.

В логарифмической шкале коэффициент эллиптичности может быть выражен в дБ следующим образом [77]

$$r = 10 \lg \frac{A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2 \cos(2\Delta\varphi)}}{A^2 + B^2 - \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2 \cos(2\Delta\varphi)}}, \quad (3)$$

где  $A = S_{21,H}$  – коэффициент передачи поляризатора для волны горизонтальной поляризации;  $B = S_{21,V}$  – коэффициент передачи поляризатора для волны вертикальной поляризации.

Величина КПР обычно выражается в дБ и может быть рассчитана следующим образом

$$XPD \text{ (dB)} = 20 \lg \left( \frac{r+1}{r-1} \right), \quad (4)$$

где  $r$  – коэффициент эллиптичности, который предварительно необходимо перевести в линейную шкалу.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Во время численной оптимизации разработанного квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами одновременно анализировались коэффициент эллиптичности и КПР на выходе поляризатора, а также дифференциальный фазовый сдвиг и КСВН для основных электромагнитных мод обеих поляризаций. Целевыми функциями оптимизации являются КСВН для основных мод обеих линейных поляризаций менее 1,15 и КПР менее –32 дБ в рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц. Характеристики оптимизированной конструкции прямоугольного волноводного поляризатора с диафрагмами были рассчитаны с высокой точностью методом FEM в частотной области с использованием 100 000 ячеек тетраэдрической сетки, на которые внутренний объем структуры был разделен адаптивным способом.

Разработанный волноводный поляризатор обеспечивает эффективные поляризационные характеристики. Диапазон изменения дифференциального фазового сдвига составляет  $90^\circ \pm 2,6^\circ$ . КСВН для основных мод обеих линейных поляризаций меньше 1,13. Коэффициент эллиптичности разработанного поляризатора не превышает 0,4 дБ. Уровень КПР разработанного поляризатора ниже –32,9 дБ.

Во всем рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц максимальный уровень КСВН для основных мод как горизонтальной, так и вертикальной поляризации составляет примерно 1,13, что полностью удовлетворяет требованиям. Дифференциальный фазовый сдвиг оп-

тимизированного поляризатора диафрагмы прямоугольного волновода изменяется от  $87,5^\circ$  до  $92,5^\circ$ .

Рассмотрим поляризационные характеристики разработанного волноводного поляризатора с диафрагмами. Коэффициент эллиптичности поляризатора рассчитывался с использованием результатов моделирования методом FEM и формулы (3). Коэффициент эллиптичности оптимизированного поляризатора составляет менее 0,40 дБ в полосе рабочих частот 10,7–12,8 ГГц. Соответствующий КПР был получен из выражения (4). Во всем рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц КПР поляризатора менее –32,9 дБ.

Теперь исследуем зависимости согласующих, фазовых и поляризационных характеристик от количества ячеек тетраэдрической сетки, при которых внутренний объем структуры адаптивно делился для расчета методом FEM. Кроме того, мы сравним результаты, полученные с использованием FDTD с разным количеством ячеек гексаэдрической сетки.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Численные расчеты характеристик поляризатора обоими рассматриваемыми методами были осуществлены с помощью специализированного программного обеспечения CST Microwave Studio 2017 на персональном компьютере с процессором Intel Core i7-6700K с тактовой частотой 4 ГГц и объемом оперативной памяти 32 Гб. Входными параметрами расчетов, которые определяют погрешность полученных электромагнитных характеристик, является количество используемых ячеек сетки во внутреннем объеме волноводного поляризатора.

Результаты численного моделирования с использованием FEM были получены для количества ячеек тетраэдрической сетки от 20 000 до 200 000. Шаг увеличения числа ячеек сетки составлял 20 000 ячеек сетки. Рассчитанные электромагнитные характеристики поляризатора на основе квадратного волновода с диафрагмами в зависимости от количества ячеек сетки и времени расчета показаны в таблице 1.

Анализ таблицы 1 показывает, что при количестве тетраэдрических ячеек сетки, равном 200 000, электромагнитные характеристики поляризатора практически перестают изменяться. Поэтому для сравнения погрешностей расчета электромагнитных характеристик двумя рассматриваемыми методами в качестве наиболее точных значений возьмем характеристики, полученные методом FEM при использовании 200 000 тетраэдрических ячеек сетки.

Из таблицы 1 видно, что абсолютная погрешность расчетов КСВН методом FEM не превышает 0,004 в линейном масштабе (меньше 0,4% относительно точного значения 1,132). Из нижней части таблицы 1 (при количестве тетраэдрических ячеек сетки от 100 000 до 200 000) видно, что абсолютная погрешность определения точного значения дифференциального фазового сдвига находится в пределах  $0,2^\circ$ , а коэффициент эллиптичности и КПР поляризатора

были рассчитаны с абсолютными погрешностями 0,02 дБ и 0,6 дБ, соответственно.

На рис. 2 представлены результаты численного расчета фазовых и поляризационных характеристик разработанного квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами с использованием FEM в частотной области. На этих рисунках мы можем сравнить результаты, полученные с использованием грубой тетраэдрической сетки с 20 000 ячеек, с результатами, полученными с использованием средней сетки со 100 000 тетраэдров, и с результатами, рассчитанными с использованием плотной тетраэдрической сетки с 200 000 ячеек.

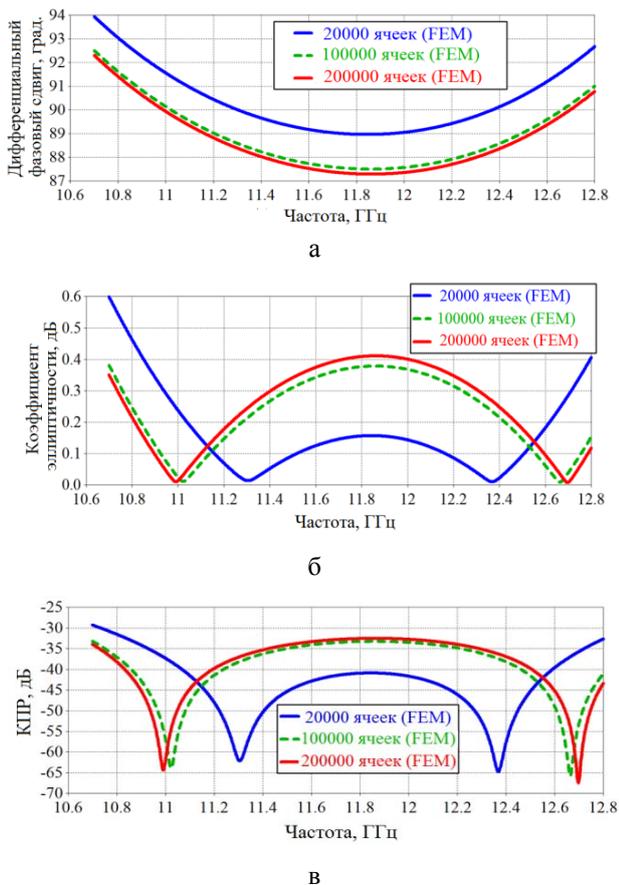


Рисунок 2 – Зависимость электромагнитных характеристик от частоты для метода FEM: а – дифференциального фазового сдвига; б – коэффициента эллиптичности; в – КПР

Результаты численного моделирования с использованием FDTD были получены для количества ячеек гексаэдрической сетки от 100 000 до 1500 000. Шаг приращения сетки составлял 100 000 ячеек сетки. Рассчитанные с помощью FDTD электромагнитные характеристики поляризатора на основе квадратного волновода с диафрагмами в зависимости от количества используемых ячеек гексаэдрической сетки и времени расчета показаны в таблице 2.

Анализ изменения рассчитанных электромагнитных характеристик поляризатора в таблицах 1 и 2 в зависимости от используемого метода и количества

ячеек сетки указывает на то, что наиболее точным является расчет методом FEM при количестве ячеек тетраэдрической сетки, равным 200 000. Сравнение с этими результатами метода FEM данных расчета методом FDTD, которые приведены в таблице 2, показывает, что абсолютная погрешность расчетов КСВН методом FDTD не превышает 0,002 в линейном масштабе (меньше 0,2% относительно точного значения 1,132). Из нижней части таблицы 2 (при количестве ячеек гексаэдрической сетки от 800 000 до 1500 000) видно, что абсолютная погрешность определения точного значения дифференциального фазового сдвига находится в пределах 0,2°, а коэффициент эллиптичности и КПР поляризатора были рассчитаны с абсолютными погрешностями 0,03 дБ и 0,6 дБ, соответственно.

На рис. 3 представлены результаты численного расчета фазовых и поляризационных характеристик разработанного квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами методом FDTD. На этих рисунках мы можем сравнить результаты, полученные с использованием грубой шестигранной сетки с 100 000 ячеек, с результатами, полученными с использованием средней сетки с 800 000 тетраэдрами, и с результатами, рассчитанными с использованием плотной гексаэдрической сетки с 1500 000 ячеек.

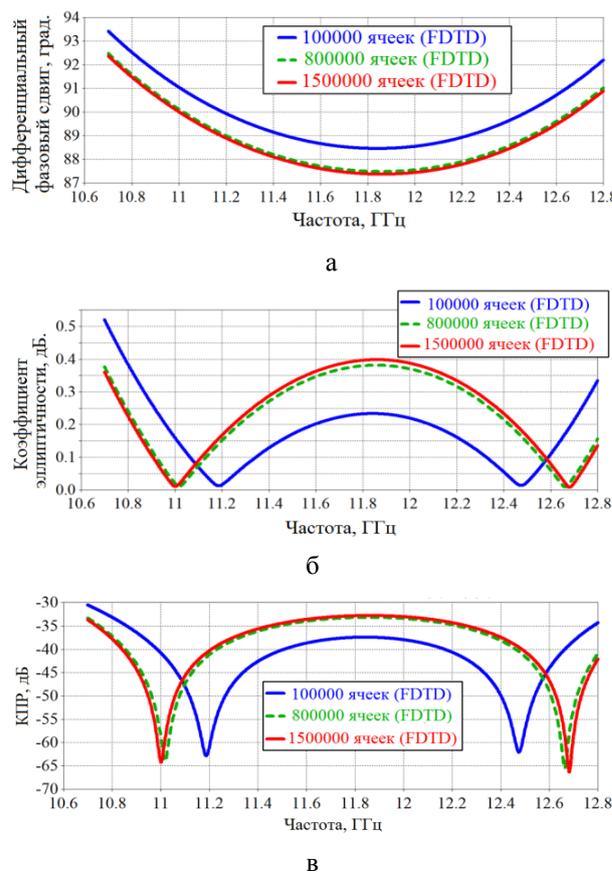


Рисунок 3 – Зависимость электромагнитных характеристик от частоты для метода FDTD: а – дифференциального фазового сдвига; б – коэффициента эллиптичности; в – КПР

Таблица 1 – Зависимость характеристик поляризатора и времени расчета от количества ячеек тетраэдрической сетки в методе FEM

Число тетраэдрических ячеек сетки	Время вычислений FEM, сек.	Максимальный КСВН	Дифференциальный фазовый сдвиг, град.	Коэффициент эллиптичности, дБ	КПР, дБ
20 000	28	1,136	90°±3,95°	0,60	-29,2
40 000	46	1,134	90°±3,11°	0,47	-31,3
60 000	64	1,133	90°±2,77°	0,42	-32,3
80 000	76	1,133	90°±2,62°	0,40	-32,8
100 000	100	1,132	90°±2,51°	0,39	-33,1
120 000	117	1,132	90°±2,55°	0,39	-33,0
140 000	139	1,132	90°±2,60°	0,40	-32,8
160 000	172	1,132	90°±2,65°	0,40	-32,7
180 000	205	1,132	90°±2,69°	0,41	-32,6
200 000	227	1,132	90°±2,70°	0,41	-32,5

Таблица 2 – Зависимость характеристик поляризатора и времени расчета от количества ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD

Число ячеек гексаэдрической сетки	Время вычислений FDTD, сек.	Максимальный КСВН	Дифференциальный фазовый сдвиг, град.	Коэффициент эллиптичности, дБ	КПР, дБ
100 000	24	1,134	90°±3,43°	0,52	-30,5
200 000	34	1,132	90°±3,06°	0,46	-31,5
300 000	57	1,132	90°±2,85°	0,43	-32,1
400 000	79	1,132	90°±2,66°	0,40	-32,7
500 000	95	1,132	90°±2,58°	0,39	-32,9
600 000	118	1,132	90°±2,54°	0,39	-33,1
700 000	144	1,132	90°±2,52°	0,38	-33,1
800 000	165	1,132	90°±2,51°	0,38	-33,1
900 000	194	1,132	90°±2,50°	0,38	-33,2
1 000 000	219	1,132	90°±2,55°	0,39	-33,1
1 100 000	243	1,132	90°±2,56°	0,39	-33,0
1 200 000	267	1,132	90°±2,58°	0,39	-33,0
1 300 000	293	1,132	90°±2,59°	0,39	-32,9
1 400 000	304	1,132	90°±2,61°	0,40	-32,8
1 500 000	322	1,132	90°±2,63°	0,40	-32,8

Таблица 3 – Сравнение методов FEM и FDTD для расчета характеристик волноводного поляризатора с диафрагмами

Время вычислений FEM, сек.	Время вычислений FDTD, сек.	Число тетраэдрических ячеек сетки	Число ячеек гексаэдрической сетки	Коэффициент эллиптичности, дБ	КПР, дБ
100	219	100 000	1 000 000	0.39	-33.1
117	243	120 000	1 100 000	0.39	-33.0
139	304	140 000	1 400 000	0.40	-32.8

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что время расчетов зависит от количества ячеек тетраэдрической сетки, используемых в FEM, и количества ячеек гексаэдрической сетки, используемых в FDTD, приблизительно как линейная функция. Сходимость КСВН к

точному значению происходит очень быстро. Для метода FDTD это объясняется хорошим соответствием используемой декартовой гексаэдральной сетки структуре квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами. Следовательно, расчет КСВН с помощью методов FEM и FDTD достаточно точен даже

для относительно неплотных сеток. На грубой сетке максимальный уровень КСВН составляет 1,134–1,136 и сходится к значению 1,132 на мелких сетках. Таким образом, по мере того, как используемая сетка становится более плотной, максимальный уровень КСВН немного уменьшается.

Из таблиц 1 и 2 видно, что на грубых сетках расчет дифференциального фазового сдвига, коэффициента эллиптичности и КПП волноводного поляризатора с диафрагмами является довольно неточным для обоих методов. Хотя разработанная конструкция поляризатора обеспечивает требуемый КПП менее –32 дБ, результаты расчетов методом FEM на грубых сетках от 20 000 до 60 000 ячеек тетраэдрической сетки предсказывают КПП на уровнях всего от –29 дБ до –31 дБ, а методом FDTD на грубых сетках от 100 000 до 200 000 ячеек гексаэдрической сетки — на уровнях от –30 дБ до –31 дБ.

Как видно из таблицы 1, для метода FEM увеличение количества ячеек тетраэдрической сетки с 20000 до 100000 приводит к уменьшению коэффициента эллиптичности поляризатора с 0,60 дБ до 0,37 дБ и одновременному уменьшению его КПП с –29,2 дБ до –33,1 дБ. Дальнейшее увеличение количества ячеек тетраэдрической сетки со 100000 до 200000 приводит к увеличению коэффициента эллиптичности разработанного поляризатора с 0,37 дБ до 0,40 дБ и одновременному увеличению его КПП с –33,1 дБ до –32,5 дБ.

Данные, приведенные в таблице 2, подтверждают такую же тенденцию для метода FDTD. Увеличение количества ячеек гексаэдрической сетки от 100 000 до 900 000 ведет к уменьшению коэффициента эллиптичности поляризатора с 0,52 дБ до 0,38 дБ и одновременному снижению пикового уровня его КПП с –30,5 дБ до –33,2 дБ. Последующее увеличение количества ячеек гексаэдрической сетки с 900 000 до 1500 000 приводит к небольшому увеличению коэффициента эллиптичности разработанного поляризатора с 0,38 дБ до 0,40 дБ и одновременному повышению его КПП с –33,2 дБ до –32,8 дБ.

Как видно на рис. 2 и 3, численные результаты сходятся относительно быстро при увеличении количества ячеек тетраэдрической сетки в методе FEM от 20 000 до 100 000 и при увеличении количества ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD от 100 000 до 800 000. Дальнейшее увеличение количества ячеек сетки приводит к гораздо более медленному изменению рассчитанных фазовых и поляризационных характеристик поляризатора.

Следовательно, объем конструкции поляризатора необходимо разделять на более чем 100 000 ячеек тетраэдрической сетки в методе FEM и на более чем 800 000 ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD, если расчет коэффициента эллиптичности поляризатора и КПП выполняются с требуемой точностью менее 0,5 дБ. В случае применения FEM со 100 000 ячеек тетраэдрической сетки время расчета на персональном компьютере, используемом для численного анализа, составило 100 секунд. Для метода FDTD с © Пильтай С. И., Булашенко А. В., Быковский А. В., Булашенко А. В., 2021  
DOI 10.15588/1607-3274-2021-4-4

применением 800 000 ячеек гексаэдрической сетки соответствующее время расчета на том же персональном компьютере составило 165 секунд.

Сравним численные характеристики методов FEM и FDTD при расчете электромагнитных параметров поляризатора на основе квадратного волновода с диафрагмами. Для этого мы объединяем и анализируем несколько строк Таблиц 1 и 2, содержащих результаты, рассчитанные на одном и том же персональном компьютере, в новую Таблицу 3.

Из таблицы 3 видно, что при той же точности расчета фазовых и поляризационных характеристик СВЧ волноводных устройств время вычислений, необходимое для FEM в частотной области, более чем в 2 раза меньше, чем время, необходимое для метода FDTD. Кроме того, соответствующее количество ячеек тетраэдрической сетки в FEM в 10 раз меньше, чем количество ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD. Это приводит к снижению требований к памяти компьютера, необходимой для расчетов. Следовательно, метод FEM в частотной области, в котором применяется тетраэдрическая сетка, более эффективен, чем метод FDTD для расчета электромагнитных характеристик современных волноводных поляризаторов с диафрагмами.

## ВЫВОДЫ

В выполненном исследовании решено актуальную задачу определения оптимального численного сеточного метода расчета электромагнитных характеристик волноводных устройств преобразования поляризации с диафрагмами. Результаты проведенного в статье исследования позволили получить рекомендации относительно того, какой метод расчета является более быстрым и точным для разработки волноводных поляризаторов СВЧ диапазона для современных телекоммуникационных и радиолокационных систем.

**Научной новизной** есть то, что впервые было осуществлено сравнение времени расчета и сходимости электромагнитных характеристик волноводного поляризатора с диафрагмами при их расчете методом конечных элементов (FEM) в частотной области и методом конечных разностей во временной области (FDTD). Впервые показано, что время вычислений, необходимое для расчета с помощью FEM в частотной области, более чем в 2 раза меньше, чем соответствующее время, необходимое для расчета методом FDTD. Установлено, что при этом количество ячеек тетраэдрической сетки в методе FEM в 10 раз меньше, чем необходимое количество ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD.

**Практическая ценность** заключается в том, что было определено необходимое минимальное количество ячеек сетки для методов FEM и FDTD, которое необходимо использовать для расчета поляризационных характеристик волноводного преобразователя поляризации с диафрагмами с заданной точностью.

Было показано, что необходимо применять более 100 000 ячеек тетраэдрической сетки на объем конст-

рукции волноводного поляризатора, если расчет кроссполаризационной развязки выполняется методом FEM в частотной области с требуемой точностью 0,5 дБ. Если расчет поляризационных характеристик выполняется методом FDTD с требуемой точностью 0,5 дБ, то необходимо использовать более 800 000 ячеек гексаэдрической сетки на весь объем структуры волноводного поляризатора.

Следовательно, для расчета фазовых и поляризационных характеристик волноводных поляризаторов с диафрагмами метод FEM в частотной области, в котором применяется тетраэдрическая сетка, является более быстрым и эффективным, чем метод FDTD.

**Перспективы дальнейших исследований** заключаются в сравнении сеточных численных методов анализа с методом интегральных уравнений, методом согласования мод и другими аналитическими методами, которые применяются для расчета волноводных поляризаторов сверхвысоких частот.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на кафедре радиоинженерии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского».

### ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Optimum iris set concept for waveguide polarizers / [G. Virone, R. Tascone, O. A. Peverinin, R. Orta] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2007. – Vol. 17, No. 3. – P. 202–204. DOI:10.1109/LMWC.2006.890474.
2. Hwang S. New design method for a dual band waveguide iris polarizer / S. Hwang, B.-C. Ahn // IEEE International symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Hangzhou, China, 16–17 of August 2007 : proceedings. – Hangzhou : IEEE, 2007. – P. 435–438. DOI: 10.1109/MAPE.2007.4393644.
3. Combined-phase-shift waveguide polarizer / [G. Virone, R. Tascone, O. A. Peverinin et al.] // IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters. – 2008. – Vol. 18, No. 8. – P. 509–511. DOI: 10.1109/LMWC.2008.2001005.
4. Hwang S.-M. Study on design parameters of waveguide polarizer for satellite communication / S.-M. Hwang, J.-M. Kim, K.-H. Lee // IEEE Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation, Singapore, 27–29 of August 2012: proceedings. – Singapore: IEEE, 2012. – P. 153–154. DOI: 10.1109/APCAP.2012.6333202.
5. Yang D.-Y. Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds / D.-Y. Yang, M.-S. Lee // Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. – 2012. – Vol. 13, No. 7. – P. 3201–3206. DOI:10.5762/KAIS.13.7.3201.
6. Dubrovka F.F. A novel wideband coaxial polarizer / F. F. Dubrovka, S.I. Piltyay // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, Odesa, Ukraine, 16–20 of September 2013: proceedings. – Odesa: IEEE, 2013. – P. 473–474. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
7. Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots / [D. Yu. Kulik, L. P. Mospan, A. O. Perov, N. G. Kolmakova] // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 75, No. 1. – P. 1–9. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10
8. Piltyay S. I. High performance extended C-band 3.4–4.8 GHz dual circular polarization feed system / S. I. Piltyay // XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine, 24–27 of May 2017: proceedings. – Kyiv: IEEE, 2017. – P. 284–287. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972644.
9. Zhang N. Design of K/Ka-band duplex circular polarizer with high isolation / [N. Zhang, Y.-L. Wang, J.-Z. Chen et al.] // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Chengdu, China, 7–11 of December 2018: proceedings. DOI: 10.1109/ICMMT.2018.8563363.
10. A tunable compact polarizer in a circular waveguide / [A. A. Kirilenko, S. O. Steshenko, V. N. Derkach, Y. M. Ostryzhnyi] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Vol. 67, No. 2. – P. 592–596. DOI:10.1109/TMTT.2018.2881089.
11. Piltyay S. Development and optimization of microwave guide polarizers using equivalent network method / S. Piltyay, A. Bulashenko, V. Shuliak, O. // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2021. – Vol. 35. DOI: 10.1080/09205071.2021.1980913.
12. Comparative analysis of compact satellite polarizers based on a guide with diaphragms / [S. Piltyay, A. Bulashenko, I. Fesyuk, O. Bulashenko] // Advanced Electromagnetics. – 2021. – Vol. 10, No. 2. – P. 44–55. DOI: 10.77167aem.v10i2.1713
13. Bulashenko A. V. Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development / A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay // Visnyk NTUU KPI Seria – Radio-tehnika Radioaparaturbuduvannya. – 2020. – Вип. 83. – P. 17–28. DOI: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.
14. Waveguide antenna feeders with integrated reconfigurable dual circular polarization / [J. A. Ruiz-Cruz, M. M. Fahmi, S. A. Fouladi, R. R. Mansour] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011. – Vol. 59, No. 12. – P. 3365–3374. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2170581.
15. Wang X. Novel square/rectangle waveguide septum polarizer / X. Wang, X. Huang, X. Jin // IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband, Nanjing, China, 16–19 of October 2016: proceedings. – Nanjing: IEEE, 2016. – P. 725–726. DOI: 10.1109/ICUWB.2016.7790510.
16. Mrnka M. Antenna range illuminator based on a septum polarizer and dual-mode horn / M. Mrnka, M. Pavlovic, Z. Raida // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 82–86. DOI: 10.1109/MAP.2016.2569444.
17. A septum polarizer with integrated square to circular tapered waveguide / [N. Nikolic, A. Weily, I. Kekic et al.] // International Symposium on Antennas and Propagation, Boston, USA, 8–13 of July 2018: proceedings, P. 725–726. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608909.
18. Deutschmann B. Broadband septum polarizer with triangular common port / B. Deutschmann, A.F. Jacob // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2020. – Vol. 68, No. 2. – P. 693–700. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2951138.
19. Compact X-band stepped-thickness septum polarizer / [F. F. Dubrovka, S.I. Piltyay, O. Sushko et al.] // IEEE Ukrainian Microwave Week, Kharkiv, Ukraine, 21–25 of September 2020: proceedings. – Kharkiv: IEEE, 2020. – P. 135–138. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.

20. Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station / [F. F. Dubrovka, S. Martunyuk, R. Dubrovka, et al.] // *IEEE Ukrainian Microwave Week, Kharkiv, Ukraine, 21–25 of September 2020: proceedings – Kharkiv: IEEE, 2020.* – P. 196–202. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
21. Cano J. L. On the accurate full characterization of septum polarizers through simple amplitude measurements in back-to-back configuration / J. L. Cano, A. Mediavilla // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – Vol. 69, No. 1. – P. 179–188. DOI: 10.1109/TMTT.2020.302063.
22. Subbarao B. Compact coaxial-fed CP polarizer / B. Subbarao, V. F. Fusco // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.* – 2004. – Vol. 3. – P. 145–147. DOI: 10.1109/LAWP.2004.831084.
23. Mohseni S. H. A new profile for metal post circular waveguide polarizer / S. H. Mohseni, F. H. Kashani, M. Fallah // *Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge, USA, 5–8 of July 2010 : proceedings.* – P. 703–705. DOI: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198499.
24. Chittora A. A compact circular waveguide polarizer with higher order mode excitation / A. Chittora, S. V. Yadav // *IEEE Int. Conf. on Electronics, Computing and Com. Technologies, Bangalore, India, 2–4 of July 2020 : proceedings* DOI: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198499.
25. Analytical modeling and optimization of new Ku-band tunable square waveguide iris-post polarizer / [S. Pilyay, A. Bulashenko, O. Sushko et al.] // *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields.* – 2021. – Vol. 34, No. 5. – P. 1–27. DOI: 10.1002/jnm.2890.
26. Electromagnetic simulation of new tunable guide polarizers with diaphragms and pins / [S. Pilyay, A. Bulashenko, V. Suliak, O. Bulashenko] // *Advanced Electromagnetics.* – 2021. – Vol. 10, No. 3. – P. 24–30. DOI: 10.7716/aem.v10i3.1737.
27. Development of a submillimeter double-ridged waveguide ortho-mode transducer (OMT) for the 385–500 GHz band / [M. Kamikura, M. Naruse, S. Asayama et al.] // *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves.* – 2010. – Vol. 31, No. 6. – P. 697–707. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9632-1>.
28. Dubrovka F. F. A high performance ultrawideband ortho-mode transducer and a dual-polarized quad-ridged horn antenna based on it / F. F. Dubrovka, S. I. Pilyay // *VIII Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques.* – Kyiv, Ukraine, 20–23 of September 2011: proceedings. – P. 176–178. DOI: 10.1109/ICATT.2011.6170737.
29. Development of a wideband compact orthomode transducer for the 180–270 GHz band / [C. A. Leal-Sevillano, T. J. Reck, G. Chattopadhyay] // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology.* – 2014. – Vol. 4, No. 5. – P. 634–636. DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2336540.
30. W-Band orthomode transducer for dense focal-plane clusters / [G. Virone, O. A. Peverinin, M. Lumia et al.] // *IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters.* – 2015. – Vol. 25, No. 2. – P. 85–87. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2373638.
31. A compact L-band orthomode transducer for radio astronomical receivers at cryogenic temperature / [G. Valente, G. Montisci, T. Pisanu et al.] // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2015. – Vol. 63, No. 10. – P. 3218–3227. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2464809.
32. Orthomode transducers with folded double-symmetry junctions for broadband and compact antenna feeds / [J. A. Ruiz-Cruz, J. R. Montejo-Garai, C. A. Leal-Sevillano, J. M. Rebolgar] // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* – 2018. – Vol. 66, No. 3. – P. 1160–1168. DOI: 10.1109/TAP.2018.2794364.
33. Menargues E. Four-port broadband orthomode transducer enabling arbitrary interelement spacing / [E. Menargues, S. Capdevila, T. Debogovic et al.] // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2018. – Vol. 66, No. 12. – P. 5521–5530. DOI: 10.1109/TMTT.2018.2878208.
34. Pollak A. W. A compact quad-ridge orthogonal mode transducer with wide operational bandwidth / A. W. Pollak, M. E. Jones // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.* – 2018. – Vol. 17, No. 3. – P. 422–425. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2793465.
35. Sakr A. A. Theory of polarization-selective coupling and its application to design of orthomode transducers / A. A. Sakr, W. M. Dyab, K. Wu // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* – 2018. – Vol. 66, No. 2. – P. 749–762. DOI: 10.1109/TAP.2017.2778015.
36. Gomez-Torrent A. Compact silicon-micromachined wideband 220–330-GHz turnstile orthomode transducer / A. Gomez-Torrent, U. Shah, J. Oberhammer // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology.* – 2019. – Vol. 9, No. 1. – P. 38–46. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2882745.
37. Compact symmetric opposed port orthomode transducer / [L. Gerhardt, F. Castro, C. Muller, M. Castro] // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters.* – 2019. – Vol. 29, No. 7. – P. 471–473. DOI: 10.1109/LMWC.2019.2917770.
38. Abdelaal M. A. Ka-band 3-D-printed wideband groove gap waveguide orthomode transducer / M. A. Abdelaal, A. A. Kishk // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2019. – Vol. 67, No. 8. – P. 3361–3369. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2919630.
39. Molero C. Circuit modeling of 3-D cells to Design versatile full-metal polarizers / C. Molero, M. Garcia-Vigueras // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2019. – Vol. 67, No. 4. – P. 1357–1369. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2898828.
40. A simple asymmetric orthomode transducer based on groove gap waveguide / [Yu. Quan, J. Yang, H. Wang, A. U. Zaman] // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters.* – 2020. – Vol. 30, No. 10. – P. 953–956. DOI: 10.1109/LMWC.2020.3016333.
41. Ultra-compact taper branching orthomode transducer / [Q. Wu, C. Fan, Y. Yang, X. Shi] // *International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering.* – 2020. – Vol. 3. – P. 1–6. DOI: 10.1002/MMCE.22215.
42. Manshari S. Compact dual-polarized corrugated horn antenna for satellite communication / S. Manshari, S. Koziel, L. Leifsson // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* – 2020. – Vol. 68, No. 7. – P. 5122–5129. DOI: 10.1109/TAP.2020.2980337.
43. Dubrovka F. F. Novel high performance coherent dual-wideband orthomode transducer for coaxial horn feeds / F. F. Dubrovka, S. I. Pilyay // *XI Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, Kyiv, Ukraine, 24–27 of May 2017: proceedings.* – P. 277–280. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972642.
44. Jazani G. Design of dual-polariswd (RHCP/LHCP) quad-ridged antenna with wideband septum polarizer waveguide feed / G. Jazani, A. Pirhadi // *IET Microwaves, Antennas &*

- Propagations. – 2018. – Vol. 12, No. 9. – P. 1541–1545. DOI: 10.1049/iet-map.2017.0611.
45. Piltyay S. I. Enhanced C-band coaxial orthomode transducer / S. I. Piltyay // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*. – 2014. – Vol. 58. – P. 27–34. DOI: 10.20535/RADAP.2014.58.27-34.
46. Granet C. The designing, manufacturing, and testing of a dual-band feed system for the Parkes radio telescope / [C. Granet, H. Z. Zhang, A. R. Forsyth et al.] // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2005. – Vol. 47, No. 3. – P. 13–19. DOI: 10.1109/MAP.2005.1532537.
47. Dubrovka F.F. Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Theory / F.F. Dubrovka, S.I. Piltyay // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2014. – Vol. 57, No. 1, P. 1–30. DOI: 10.3103/S0735272714010014.
48. Dubrovka F.F. Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical Results / F.F. Dubrovka, S.I. Piltyay // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2014. – Vol. 57, No. 2. – P. 59–69. DOI: 10.3103/S0735272714020010.
49. Piltyay S. I. Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides / S. I. Piltyay // *14-th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kyiv, Ukraine, 28–30 of August 2012*. – P. 492–495. DOI: 10.1109/MMET.2012.6331195.
50. Piltyay S. I. Radiation of the thin-walled circular waveguide aperture at co- and crosspolarization / S. I. Piltyay // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*. – 2009. – Vol. 39. – P. 70–76. DOI: 10.20535/RADAP.2009.39.70-76.
51. Naydenko V. Evolution of radiopulses radiated by Hertz's dipole in vacuum / V. Naydenko, S. Piltyay // *12th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Odessa, Ukraine, 1–2 of July 2008*. – P. 492–495. DOI: 10.1109/MMET.2008.4580972.
52. Dubrovka F. F. Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides / F. F. Dubrovka, S. I. Piltyay // *XI Int. Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecomm. and Computer Science, Slavske, Ukraine, 21–24 of February 2012: proceedings*. – P. 191.
53. Piltyay S. I. Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory / S. I. Piltyay, F. F. Dubrovka // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*. – 2013. – Vol. 54. – P. 13–23. DOI: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
54. Dubrovka F. F. Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 2. Results / F. F. Dubrovka, S. I. Piltyay // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*. – 2013. – Vol. 55. – P. 13–23. DOI: 10.20535/RADAP.2013.55.13-23.
55. Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers / [A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, S. A. Pricolotin et al.] // *IX Int. Conf. on Antenna Theory and Tech., Odessa, Ukraine, 16–20 of September 2013: proceedings*. – P. 470–472. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
56. Design and optimization of broadband ridged coaxial waveguide polarizers / [A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, S. A. Pricolotin et al.] // *International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkov, Ukraine, 23–28 of June 2013: proceedings*. – P. 445–447. DOI: 10.1109/MSMW.2013.6622082.
57. Волноводный поляризатор для радиолокационных и спутниковых систем / [А. В. Булашенко, С. И. Пильтяй, Е. И. Калиниченко, И. В. Забегалов] // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparato-buduvannia*. – 2021. – Вып. 86. – P. 5–13. DOI: 10.20535/RADAP.2021.86.5-13.
58. Bulashenko A. FDTD and wave matrix simulation of adjustable DBS-band waveguide polarizer / [A. Bulashenko, S. Piltyay, I. Dikhtyaruk, O. Bulashenko] // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. – 2021. – Vol. 35. DOI: 10.1080/09205071.2021.1995897.
59. Булашенко А. В. Оцінка зв'язності D2D комунікацій у мережах 5G / А. В. Булашенко // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparato-buduvannia*. – 2020. – № 81. – С. 21–29. DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.
60. Булашенко А.В. Комбінований критерій вибору маршрутизації на основі D2D технологій / А. В. Булашенко // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2021. – № 1. – P. 7–13. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-1.
61. Zhao C. Mode-matching analysis of phase shifter in substrate-integrated waveguide technology / C. Zhao, C. Fumeaux // *IX International Conference on Computational Electromagnetics, Shanghai, China, 20–22 of March 2019: proceedings*. DOI: 10.1109/COMPEM.2019.8779223.
62. Ku-band rectangular waveguide wide side dimension adjustable phase shifter / [Y.-M. Yang, C.-W. Yuan, G.-X. Cheng, B.-L. Qian] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2015. – Vol. 43, No. 5, P. 1666–1669. DOI: 10.1109/TPS.2014.2370074.
63. Zhang Q. Studies on mechanical tunable waveguide phase shifters for phased-array antenna applications / Q. Zhang, C. Yan, L. Liu // *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, USA, 18–21 of October 2016: proceedings*. DOI: 10.1109/TPS.2016.7832555.
64. Muneer B. A broadband tunable multilayer substrate integrated waveguide phase shifter / B. Muneer, Z. Qi, X. Shanjia // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2015. – Vol. 25, No. 4, P. 220–222. DOI: 10.1109/LMWC.2015.2400923.
65. Ibrahim A. A. A Sub-THz rectangular waveguide phase shifter using piezoelectric-based tunable artificial magnetic conductor / A. A. Ibrahim, H. N. Shaman, K. Sarabandi // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2018. – Vol. 8, No. 6, P. 666–680. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2866018.
66. Der E. T. Miniaturized 4\*4 Butler matrix and tunable phase shifter using ridged half-mode substrate integrated waveguide / E. T. Der, T. R. Jones, M. Daneshmand // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2020. – Vol. 68, No. 8. – P. 3379–3388. DOI: 10.1109/TAP.2020.2989798.
67. Zhu B. A hybrid finite-element / finite-difference method with implicit-explicit time stepping scheme for Maxwell's equations / B. Zhu, J. Chen, W. Zhong // *IEEE Int. Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics, Beijing, China, 22–25 of May 2011*. – P. 481–484: proceedings. DOI: 10.1109/ICMTCE.2011.5915564.
68. Classen C. Local approximation based material averaging approach in the finite integration technique / C. Classen, B. Bandlow, R. Schuhmann // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol. 48, No. 2. – P. 447–450. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2176317.
69. Šekeljčić N. J. Higher order time-domain finite-element method for microwave device modeling with generalized

- hexahedral elements / N. J. Šekeljić, M. M. Ilić, B. M. No-taroš // IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech-niques. – 2013. – Vol. 61, No. 4. – P. 1425–1434. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2246186.
70. Marechal Y. Computational performances of natural ele-ment and finite element methods / Y. Marechal, B. Ram-dane, D. P. Botelho // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – Vol. 50, No. 2. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2285259.
71. Sakata T. Optimal subgrid connection for space-time finite integration technique / T. Sakata, T. Mifune, T. Matsuo // IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Miami, USA, 13–16 of November 2016: proceedings. DOI: 10.1109/CEFC.2016.7816159.
72. Sakata Y., Mifune T., Matsuo T. Optimal subgrid connec-tion for space-time finite integration technique / Y. Sakata, T. Mifune, T. Matsuo // IEEE Transactions on Magnetics, 2017. – Vol. 53, No. 6. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2655626.
73. Liu N. The mixed finite element method with mass lumping for computing optical waveguide modes / [N. Liu, G. Cai, C. Zhu et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2015. – Vol. 22, No. 2. DOI: 10.1109/JSTQE.2015.2473689.
74. Sun Q. 3-D implicit–explicit hybrid finite difference/spectral element/finite element time domain method without a buffer zone / [Q. Sun, R. Zhang, Q. Zhan, Q. H. Liu] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 67, No. 8. – P. 5469–5476. DOI: 10.1109/TAP.2019.2913740.
75. Xu J. A novel hybrid method of spatially filtered FDTD and subgridding technique / J. Xu, G. Xie // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 85622–85626. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2925835.
76. Kazemzadeh M. Faster and more accurate time domain elec-tromagnetic simulation using space transformation / M. Ka-zemzadeh, W. Xu, N.G.R. Broderick // IEEE Photonics Journal. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 1–13. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3005704.
77. Kazemzadeh M. R. Novel time-domain electromagnetic simulation using triangular meshes by applying space curva-ture / M. R. Kazemzadeh, N.G.R. Broderick, W. Xu // IEEE Open Journal on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 1. – P. 387–395. DOI: 10.1109/OJAP.2020.3011920.
78. Milligan T. A. Modern Antenna Design / T. A. Milligan. – Hoboken, New Jersey : John Wiley and Sons, 2005.

Received 23.11.2020.  
Accepted 29.11.2021.

УДК 621.39

## ОЦІНКА МЕТОДІВ FEM И FDTD ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ІЗ ДІАФРАГМАМИ

**Пильтій С. І.** – канд. техн. наук, доцент кафедри радіоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Булашенко А. В.** – старший викладач кафедри радіоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Быковський О. В.** – магістр кафедри радіоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Булашенко А. В.** – студент електромеханічного відділення Шосткінського фахового коледжу імені Івана Кожедуба Сумського державного університету, Шостка, Сумська обл., Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** На сьогоднішній день відбувається стрімке розширення кола сучасних галузей науки і техніки, які активно використовують супутникові телекомунікаційні системи для прийому, оброблення та передачі різної інформації. Такі радіоелектронні системи досить часто вимагають збільшення обсягів інформації, які вони обробляють та передають. Подвоєння обсягів переданої інформації можна досягти, використовуючи двополяризаційні антенні системи та пристрої. У наш час більшість спеціалістів, котрі займаються розробленням різних сучасних поляризаційних пристроїв НВЧ, виконують їх чисельне моделювання та оптимізацію за допомогою варіаційних методів розрахунку, методів інтегральних рівнянь, методу узгодження полів часткових областей. Найбільш активно використовують методи із розбиттям внутрішньої області пристрою на елементарні комірки. Серед них у часовій області найбільш часто використовують метод скінченних різниць із розбиттям на гексагональну сітку, а в частотній області застосовують метод скінченних елементів із адаптивною тетраедричною сіткою. Таким чином, актуальною задачею є оцінка швидкості та точності цих методів з метою визначення більш ефективного із них.

**Мета.** Метою дослідження є порівняння швидкості та точності розрахунків електромагнітних характеристик хвилевідних поляризаторів чисельними методами FEM і FDTD, а також порівняння збіжності цих методів при аналізі поляризаційних пристроїв НВЧ із діафрагмами.

**Метод.** Для розрахунків і аналізу електромагнітних характеристик у статті використано метод скінченних різниць у часовій області FDTD та метод скінченних елементів у частотній області FEM. У FEM здійснюється розбиття на тетраедричні комірки сітки. У FDTD область розрахунку розбивається на гексагональні комірки сітки.

**Результати.** Установлено, що збіжність коефіцієнта стійкої хвилі за напругою для хвилевідного поляризатора є швидкою для обох методів. Отримано, що збіжності характеристик диференційного фазового зсуву, коефіцієнта еліптичності та кросполяризаційної розв'язки розробленого мікрохвильового пристрої виявилися значно більш чутливими до використаної кількості комірок сітки. До того ж, у дослідженні розрахунковим шляхом отримано, що час обчислень методом скінченних елементів в частотній області більш ніж в 2 рази менший, ніж відповідний час, що необхідний для обчислень методом скінченних різниць у часовій області. При використанні методу скінченних елементів у частотній області відповідна кількість

комірок тетраедричної сітки в 10 разів менша, ніж кількість комірок гексагональної сітки методі скінчених різниць у часовій області.

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що метод FEM у частотній області, в якому використовується адаптивна тетраедрична сітка, більш ефективний, ніж метод FDTD для розрахунку фазових та поляризаційних характеристик сучасних хвилевідних поляризаторів та інших мікрохвильових пристроїв для різних застосувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** FDTD; FEM; FIT; метод скінчених різниць; метод скінчених елементів; збіжність; супутникові інформаційні системи; мікрохвильові пристрої; хвилевід; поляризатор; діафрагма; диференційний фазовий зсув; коефіцієнт еліптичності; кросполяризаційна розв'язка.

UDC 621.39

## ESTIMATION OF FEM AND FDTD METHODS FOR SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF POLARIZATION TRANSFORMING DEVICES WITH DIAPHRAGMS

**Piltyay S. I.** – PhD, Associate Professor of the Department of Radio Engineering of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Bulashenko A. V.** – Senior Lecturer of the Department of Radio Engineering of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Bykovskiy O. V.** – Student of the Department of Radio Engineering of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Bulashenko O. V.** – Student of the Electromechanical Department of Ivan Kozhedub Shostka Professional College of Sumy State University, Shostka, Sumy region, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** Today, there is a rapid expansion of the range of modern branches of science and technology, which actively use satellite telecommunication systems to receive, process and transmit various information. These radioelectronic systems quite often require an increase of the volumes of information, which they are processing and transmitting. Increase of the volumes of transmitted information in two times can be achieved by using dual-polarization antenna systems and devices. Nowadays, most part of the specialists, who are engaged in the development of various modern polarization-processing microwave devices, carry out their numerical modeling and optimization using variational techniques, methods of integral equations, method of fields matching in partial regions. The methods with division of the internal region of the device into elementary cells are applied most actively. Among them in the time domain the most often used approach is finite difference method with the decomposition at hexagonal mesh, while and in the frequency domain the finite elements method with the adaptive tetrahedral mesh is applied. Therefore, the estimation of the speed and accuracy of these methods with the purpose of determination of more effective among them is a relevant problem.

**Objective.** The goal of the research is comparison of speed and accuracy of the calculations of electromagnetic characteristics of waveguide polarizers using FEM and FDTD methods, as well as the comparison of the convergence of these methods for the analysis of polarization-processing microwave devices with diaphragms.

**Method.** For the calculations and analysis of electromagnetic characteristics in the article we used the method of finite differences in the time domain (FDTD) and the method of finite elements in the frequency domain (FEM). In FEM the volume is split into the tetrahedral mesh cells. In FDTD the computational domain is divided into hexagonal mesh cells.

**Results.** It was found that the convergence of voltage standing wave ratio for the waveguide polarizer is fast for both methods. It was obtained that the convergence of the characteristics of differential phase shift, axial ratio, and crosspolar discrimination of the developed microwave device turned out to be much more sensitive to the number of mesh cells used. Moreover, in the research it was obtained by calculations that the computation time by the finite elements method in the frequency domain is more than 2 times less than the corresponding time required for calculations by the finite difference time domain method. When using the finite elements method in the frequency domain the corresponding number of tetrahedral mesh cells is 10 times less than the number of hexagonal mesh cells, which are used in the finite difference time domain method.

**Conclusions.** Performed investigations have shown that FEM in the frequency domain, which applies an adaptive tetrahedral mesh, is more efficient than the FDTD method for the calculations of phase and polarization characteristics of modern waveguide polarizers and other microwave devices for various applications.

**KEYWORDS:** FDTD; FEM; FIT; finite differences method; finite elements method; numerical techniques; convergence; satellite information systems; microwave devices; waveguide; polarizer; diaphragm; differential phase shift; axial ratio; crosspolar discrimination.

### REFERENCES

1. Virone G., Tascone R., Peverinin O.A., Orta R. Optimum iris set concept for waveguide polarizers, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, Vol. 17, No. 3, pp. 202–204. DOI:10.1109/LMWC.2006.890474.
2. Hwang S., Ahn B.-C. New design method for a dual band waveguide iris polarizer, *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, Hangzhou, China, 16–17 of August 2007: proceedings, pp. 435–438. DOI: 10.1109/MAPE.2007.4393644.
3. Virone G., Tascone R., Peverinin O.A., Addamo G., Orta R. Combined-phase-shift waveguide polarizer, *IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters*, 2008, Vol. 18, No. 8, pp. 509–511. DOI: 10.1109/LMWC.2008.2001005.
4. Hwang S.-M., Kim J.-M., Lee K.-H. Study on design parameters of waveguide polarizer for satellite communication, *IEEE Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation*, Singapore, 27–29 of August 2012: proceedings, pp. 153–154. DOI: 10.1109/APCAP.2012.6333202.
5. Yang D.-Y., Lee M.-S. Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds, *Journal of the Korea Acade-*

- mia-Industrial cooperation Societly*, 2012, Vol. 13, No. 7, pp. 3201–3206. DOI:10.5762/KAIS.13.7.3201.
6. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. A novel wideband coaxial polarizer, *IX Int. Conf. on Antenna Theory and Tech.* Odessa, Ukraine, 16–20 of September 2013, proceedings, pp. 473–474. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
  7. Kulik D. Yu., Mospan L. P., Perov A. O., Kolmakova N. G. Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2016, Vol. 75, No. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10
  8. Piltyay S.I. High performance extended C-band 3.4–4.8 GHz dual circular polarization feed system, *XI Int. Conf. on Antenna Theory and Tech.* Kyiv, Ukraine, 24–27 of May 2017, proceedings, pp. 284–287. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972644.
  9. Zhang N., Wang Y.-L., Chen J.-Z., Wu B., Li G. Design of K/Ka-band duplex circular polarizer with high isolation, *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Chengdu, China, 7–11 of December 2018, proceedings. DOI: 10.1109/ICMMT.2018.8563363.
  10. Kirilenko A. A., Steshenko S. O., Derkach V. N., Ostryzhnyi Y. M. A tunable compact polarizer in a circular waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, Vol. 67, No. 2, pp. 592–596. DOI:10.1109/TMTT.2018.2881089.
  11. Piltyay S., Bulashenko A., and Shuliak V., Development and optimization of microwave guide polarizers using equivalent network method, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2021, Vol. 35. DOI: 10.1080/09205071.2021.1980913.
  12. Piltyay S., Bulashenko A., Fesyuk I., Bulashenko O. Comparative analysis of compact satellite polarizers based on a guide with diaphragms, *Advanced Electromagnetics*, 2021, Vol. 10, No. 2, pp. 44–55. DOI: 10.77167/aem.v10i2.1713.
  13. Bulashenko A.V., Piltyay S.I. Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannya*, 2020, Vol. 83, pp. 17–28. DOI: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.
  14. Ruiz-Cruz J.A., Fahmi M.M., Fouladi S.A., Mansour R.R. Waveguide antenna feeders with integrated reconfigurable dual circular polarization, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, Vol. 59, No. 12, pp. 3365–3374. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2170581.
  15. Wang X., Huang X., Jin X. Novel square/rectangle waveguide septum polarizer, *IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband*, Nanjing, China, 16–19 of October 2016, proceedings, pp. 725–726. DOI: 10.1109/ICUWB.2016.7790510.
  16. Mrnka M., Pavlovic M., Raida Z. Antenna range illuminator based on a septum polarizer and dual-mode horn, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, Vol. 58, No. 4, pp. 82–86. DOI: 10.1109/MAP.2016.2569444.
  17. Nikolic N., Weily A., Kekic I., Smith S. L., Smart K. W. A septum polarizer with integrated square to circular tapered waveguide, *Int. Symposium on Antennas and Propagation*, Boston, USA, 8–13 of July 2018, proceedings, pp. 725–726. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608909.
  18. Deutschmann B., Jacob A.F. Broadband septum polarizer with triangular common port, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, Vol. 68, No. 2, pp. 693–700. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2951138.
  19. Dubrovka F. F., Piltyay S. I., Sushko O., Dubrovka R. R., Lytvyn M. M., Lytvyn S. M. Compact X-band stepped-thickness septum polarizer, *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, Ukraine, 21–25 of September 2020, proceedings, pp. 135–138. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.
  20. Dubrovka F., S. Martunyuk, R. Dubrovka et al. Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station, *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, Ukraine, 21–25 of September 2020: proceedings, pp. 196–202. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
  21. Cano J.L., Mediavilla A. On the accurate full characterization of septum polarizers through simple amplitude measurements in back-to-back configuration, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 69, no. 1, pp. 179–188. DOI: 10.1109/TMTT.2020.3020639.
  22. Subbarao B., Fusco V.F. Compact coaxial-fed CP polarizer, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2004, Vol. 3, pp. 145–147. DOI: 10.1109/LAWP.2004.831084.
  23. Mohseni S. H., Kashani F. H., Fallah M. A new profile for metal post circular waveguide polarizer, *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, Cambridge, USA, 5–8 of July 2010: proceedings, pp. 703–705. DOI: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198499.
  24. Chittora A., Yadav S. V. A compact circular waveguide polarizer with higher order mode excitation, *IEEE Int. Conf. on Electronics, Computing and Com. Technologies*, Bangalore, India, 2–4 of July 2020, proceedings. DOI: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198499.
  25. Piltyay S., Bulashenko A., Sushko O., Bulashenko O., Demchenko I. Analytical modeling and optimization of new Ku-band tunable square waveguide iris-post polarizer, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2021, Vol. 34, No. 5, pp. 1–27. DOI: 10.1002/jnm.2890.
  26. Piltyay S., Bulashenko A., Shuliak V., Bulashenko O., Electromagnetic simulation of new tunable guide polarizers with diaphragms and pins, *Advanced Electromagnetics*, 2021, Vol. 10, No. 3, pp. 24–30. DOI: 10.7716/aem.v10i3.1737.
  27. Kamikura M., Naruse M., Asayama S., Satou N., Shan W., Sekimoto Y. Development of a submillimeter double-ridged waveguide ortho-mode transducer (OMT) for the 385–500 GHz band, *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2010, Vol. 31, No. 6, pp. 697–707. DOI: https://doi.org/10.1007/s10762-010-9632-1.
  28. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. A high performance ultrawideband orthomode transducer and a dual-polarized quad-ridged horn antenna based on it, *VIII Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*. Kyiv, Ukraine, 20–23 of September 2011, proceedings, pp. 176–178. DOI: 10.1109/ICATT.2011.6170737.
  29. Leal-Sevillano C. A., Reck T. J., Chattopadhyay G., Ruiz-Cruz J. A., Montejo-Garai J. R., Rebollar J. M. Development of a wideband compact orthomode transducer for the 180–270 GHz band, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, Vol. 4, No. 5, pp. 634–636. DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2336540.
  30. Virone G., Peverinin O. A., Lumia M., Farooqui M. Z., Addamo G., Tascone R. W-Band orthomode transducer for dense focal-plane clusters, *IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters*, 2015, Vol. 25, No. 2, pp. 85–87. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2373638.
  31. Valente G., Montisci G., Pisanu T., Navarrini A., Marongiu P., Casula G.A. A compact L-band orthomode transducer for radio astronomical receivers at cryogenic temperature, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015,

- Vol. 63, No. 10, pp. 3218–3227. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2464809.
32. Ruiz-Cruz J.A., Montejo-Garai J.R., Leal-Sevillano C.A., Rebollar J. M. Orthomode transducers with folded double-symmetry junctions for broadband and compact antenna feeds, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, Vol. 66, no. 3, pp. 1160–1168. DOI: 10.1109/TAP.2018.2794364.
33. Menargues E., Capdevila S., Debogovic T., Dimitriadis A.I., Simon L., Garcia-Vigueras M., Mosing J.R., Skrivervik A.K., Rijk E. Four-port broadband orthomode transducer enabling arbitrary interelement spacing, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, Vol. 66, No. 12, pp. 5521–5530. DOI: 10.1109/TMTT.2018.2878208.
34. Pollak A. W., Jones M. E. A compact quad-ridge orthogonal mode transducer with wide operational bandwidth, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, Vol. 17, No. 3, pp. 422–425. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2793465.
35. Sakr A. A., Dyab W. M., Wu K. Theory of polarization-selective coupling and its application to design of orthomode transducers, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, Vol. 66, No. 2, pp. 749–762, 2018. DOI: 10.1109/TAP.2017.2778015.
36. Gomez-Torrent A., Shah U., Oberhammer J. Compact silicon-micromachined wideband 220-330-GHz turnstile orthomode transducer, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, Vol. 9, No.1, pp. 38–46. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2882745.
37. Gerhardt L., Castro F., Muller C., Castro M. Compact symmetric opposed port orthomode transducer, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, vol. 29, no.7, pp. 471–473. DOI: 10.1109/LMWC.2019.2917770.
38. Abdelaal M.A., Kishk A.A. Ka-band 3-D-printed wideband groove gap waveguide orthomode transducer, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, Vol. 67, No. 8, pp. 3361–3369. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2919630.
39. Molero C., Garcia-Vigueras M. Circuit modeling of 3-D cells to Design versatile full-metal polarizers, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, Vol. 67, No. 4, pp. 1357–1369. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2898828.
40. Quan Yu., Yang J., Wang H., Zaman A.U. A simple asymmetric orthomode transducer based on groove gap waveguide, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, Vol. 30, No. 10, pp. 953–956. DOI: 10.1109/LMWC.2020.3016333.
41. Wu Q., Fan C., Yang Y., Shi X. Ultra-compact taper branching orthomode transducer, *International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering*, 2020, Vol. 3, pp. 1–6. DOI: 10.1002/MMCE.22215.
42. Manshari S., Koziel S., Leifsson L. Compact dual-polarized corrugated horn antenna for satellite communication, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, Vol. 68, No. 7, pp. 5122–5129. DOI: 10.1109/TAP.2020.2980337.
43. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Novel high performance coherent dual-wideband orthomode transducer for coaxial horn feeds, *XI Int. Conf. on Antenna Theory and Tech.* Kyiv, Ukraine, 24–27 of May 2017, proceedings, pp. 277–280. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972642.
44. Jazani G., Pirhadi A. Design of dual-polariswd (RHCP/LHCP) quad-ridged antenna with wideband septum polarizer waveguide feed, *IET Microwaves, Antennas & Propagations*, 2018, Vol. 12, No. 9, pp.1541–1545. DOI: 10.1049/iet-map.2017.0611.
45. Pilyay S. I. Enhanced C-band coaxial orthomode transducer, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, 2014, Vol. 58, pp. 27–34. DOI: 10.20535/RADAP.2014.58.27-34.
46. Granet C., Zhang H. Z., Forsyth A. R., Graves G. R., Doherty P., Greence K. J., James G. L., Sykes P., Bird T. S., Sinclair M. W., Moore G. The designing, manufacturing, and testing of a dual-band feed system for the Parkes radio telescope, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2005, Vol. 47, No. 3, pp. 13–19. DOI: 10.1109/MAP.2005.1532537.
47. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Theory, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2014, Vol. 57, No. 1, pp. 1–30. DOI: 10.3103/S0735272714010014.
48. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical Results, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2014, Vol. 57, No. 2, pp. 59–69. DOI: 10.3103/S0735272714020010.
49. Pilyay S. I. Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides, *14-th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*. Kyiv, Ukraine, 28–30 of August 2012, pp. 492–495. DOI: 10.1109/MMET.2012.6331195.
50. Pilyay S. I. Radiation of the thin-walled circular waveguide aperture at co- and crosspolarization, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, 2009, Vol. 39, pp. 70–76. DOI: 10.20535/RADAP.2009.39.70-76.
51. Naydenko V., Pilyay S. Evolution of radiopulses radiated by Hertz’s dipole in vacuum, *12th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, Odessa, Ukraine, 1–2 of July 2008: proceedings, pp. 492–495. DOI: 10.1109/MMET.2008.4580972.
52. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Prediction of eigenmodes cut-off frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides, *XI Int. Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecomm. and Computer Science*. Slavske, Ukraine, 21–24 of February 2012, proceedings, P. 191.
53. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, 2013, Vol. 54, pp. 13–23. DOI: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
54. Dubrovka F.F., Pilyay S.I. Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 2. Numerical results, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, 2013, Vol. 55, pp. 13–23. DOI: 10.20535/RADAP.2013.55.13-23.
55. Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Pricolotin S. A., Rud L. A., Steshenko S. A. Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers, *IX Int. Conf. on Antenna Theory and Tech.* Odessa, Ukraine, 16–20 of September 2013, proceedings, pp. 470–472. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
56. Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Prikolotin S. A., Rud L. A., Steshenko S. A. Design and optimization of broadband ridged coaxial waveguide polarizers, *International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves*. Kharkov, Ukraine, 23–28 of June 2013, proceedings, pp. 445–447. DOI: 10.1109/MSMW.2013.6622082.
57. Bulashenko A. V., Pilyay S. I., Kalinichenko Y. I., Zabegalov I. V. Waveguide polarizer for radar and satellite systems,

- Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparato- buduvannya*, 2021, Vol. 86, pp. 5–13. DOI: 10.20535/RADAP.2021.86.5-13
58. Bulashenko A., Pilyay S., Dikhtyaruk I., and Bulashenko O. FDTD and wave matrix simulation of adjustable DBS-band waveguide polarizer, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2021, Vol. 35, DOI: 10.1080/09205071.2021.1995897.
59. Bulashenko A.V. Evaluation of D2D Communications in 5G, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato- buduvannya*, 2020, Vol. 81, pp. 21–29. DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.
60. Bulashenko A. V. Combined criterion for the choice of routing based on D2D technology, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2021, No. 1, pp. 7–13. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-1.
61. Zhao C., Fumeaux C. Mode-matching analysis of phase shifter in substrate-integrated waveguide technology, *IX International Conference on Computational Electromagnetics*, Shanghai, China, 20–22 of March 2019, proceedings. DOI: 10.1109/COMPEM.2019.8779223.
62. Yang Y.-M., Yuan C.-W., Cheng G.-X., Qian B.-L. Ku-band rectangular waveguide wide side dimension adjustable phase shifter, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, Vol. 43, No. 5, pp. 1666–1669. DOI: 10.1109/TPS.2014.2370074.
63. Zhang Q., Yan C., Liu L. Studies on mechanical tunable waveguide phase shifters for phased-array antenna applications, *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*. Waltham, USA, 18–21 of October 2016. proceedings. DOI: 10.1109/TPS.2016.7832555.
64. Muneer B., Qi Z., Shanjia X. A broadband tunable multi-layer substrate integrated waveguide phase shifter, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, Vol. 25, No. 4, pp. 220–222. DOI: 10.1109/LMWC.2015.2400923.
65. Ibrahim A.A., Shaman H.N., Sarabandi K. A Sub-THz rectangular waveguide phase shifter using piezoelectric-based tunable artificial magnetic conductor, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, Vol. 8, No. 6, pp. 666–680. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2866018.
66. Der E.T., Jones T.R., Daneshmand M. Miniaturized 4\*4 Butler matrix and tunable phase shifter using ridged half-mode substrate integrated waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, Vol. 68, No. 8, pp. 3379–3388. DOI: 10.1109/TAP.2020.2989798.
67. Zhu B., Chen J., Zhong W. A hybrid finite-element / finite-difference method with implicit-explicit time stepping scheme for Maxwell’s equations, *IEEE Int. Conference on Microwave Technology and Computational Electromag- netic*, Beijing, China, 22–25 of May 2011, pp. 481–484, proceedings. DOI: 10.1109/ICMTCE.2011.5915564.
68. Classen C., Bandlow B., Schuhmann R. Local approximation based material averaging approach in the finite integration technique, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, Vol. 48, No. 2, pp. 447–450. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2176317.
69. Šekeljić N. J., Ilić M. M., Notaroš B. M. Higher order time-domain finite-element method for microwave device modeling with generalized hexahedral elements, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, Vol. 61, No. 4, pp. 1425–1434. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2246186.
70. Marechal Y., Ramdane B., Botelho D. P. Computational performances of natural element and finite element methods, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, Vol. 50, No. 2. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2285259.
71. Sakata T., Mifune T., Matsuo T. Optimal subgrid connection for space-time finite integration technique, *IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Miami, USA, 13–16 of November 2016, proceedings. DOI: 10.1109/CEFC.2016.7816159.
72. Sakata Y., T. Sakata, T. Mifune, T. Matsuo Optimal subgrid connection for space-time finite integration technique, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, Vol. 53, No. 6. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2655626.
73. Liu N., Cai G., Zhu C., Huang Y., Liu Q.H. The mixed finite element method with mass lumping for computing optical waveguide modes, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, Vol. 22, No. 2. DOI: 10.1109/JSTQE.2015.2473689.
74. Sun Q., Zhang R., Zhan Q., Liu Q. H. 3-D implicit-explicit hybrid finite difference/spectral element/finite element time domain method without a buffer zone, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, Vol. 67, No. 8, pp. 5469–5476. DOI: 10.1109/TAP.2019.2913740.
75. Xu J., G. Xie. A novel hybrid method of spatially filtered FDTD and subgridding technique, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 85622–85626. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2925835.
76. Kazemzadeh M., Xu W., N.G.R. Broderick Faster and more accurate time domain electromagnetic simulation using space transformation, *IEEE Photonics Journal*, 2020, Vol. 12, No. 4, pp. 1–13. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3005704.
77. Kazemzadeh M. R., Broderick N.G.R., Xu W. Novel time-domain electromagnetic simulation using triangular meshes by applying space curvature, *IEEE Open Journal on Antennas and Propagation*, 2020, Vol. 1, pp. 387–395. DOI: 10.1109/OJAP.2020.3011920.
78. Milligan T. A. *Modern Antenna Design*. Hoboken, New Jersey, John Wiley and Sons, 2005.