

17 - Радиофизика. Электроника

Бармин Никита Михайлович, магистрант 1 года обучения
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Сравнение методов модуляции сигналов в спутниковых системах связи
Иванова Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.
e-mail: niki.barmin@yandex.ru стр. 253

Гризодуб Алексей Николаевич, магистрант 1 года обучения
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Полосно-пропускающий SIW-фильтр
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.
e-mail: agrizodub@sfedu.ru стр. 255

Коноплев Артем Александрович, магистрант 1 года обучения
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Моделирование диаграммообразующих устройств на основе метаповерхностей в ГГц диапазоне
Клещенок Анатолий Борисович, к.ф.-м.н.
e-mail: akonoplev@sfedu.ru стр. 256

Кудряшкин Назар Андреевич, 4 курс
Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
физический
Расчёт уширения спектральной линии излучения в дискретных моделях автоколебаний
Зайцев Валерий Васильевич, к.ф.-м.н.
e-mail: nazar.kudryashkin@mail.ru стр. 258

Михайлов Максим Александрович, магистрант 1 года обучения
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Повышения точности однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне волн для трассы Москва-Ростов-на-Дону путем коррекции модели IRI по ПЭС
Вертоградов Геннадий Георгиевич, д.ф.-м.н.
e-mail: mmih@sfedu.ru стр. 259

Павленко Михаил Андреевич, магистрант 1 года обучения
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Полосно-пропускающий фильтр на тонких резонансных диафрагмах
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.
e-mail: mpavlenko@sfedu.ru стр. 261

Панова Анастасия Владимировна, 4 курс
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Прохождение и излучение электромагнитной волны в системе релаксор-МПЛ с зазором
Сидоренко Евгений Никифорович, к.ф.-м.н.
e-mail: nastya.shaprinskaya@mail.ru стр. 262

Сдобнова Варвара Павловна, магистрант 1 года обучения
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Компактный полосно-пропускающий фильтр, выполненный по SIW-технологии
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.
e-mail: sdobnova@sfedu.ru стр. 263

Харченко Диана Геннадьевна, магистрант 1 года обучения
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Волноводный полосно-пропускающий фильтр на толстых металлических диафрагмах
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.
e-mail: i@dharchenko.ru стр. 264

Чучук Тамара Алексеевна, 4 курс
Новосибирск, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, физический
Модуль блокировок и мониторинга системы импульсного питания
Крылов Андрей Александрович
e-mail: tamara.chuchuk@gmail.com стр. 265

Шевченко Андрей Константинович, магистрант 1 года обучения
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Компактный волноводный полосно-пропускающий фильтр на толстых металлических диафрагмах
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.
e-mail: ash@sfnedu.ru стр. 266

Сравнение методов модуляции сигналов в спутниковых системах связи

Бармин Никита Михайлович
Южный федеральный университет
Иванова Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.
niki.barmin@yandex.ru

В спутниковых системах передачи данных очень важно передавать как можно больше информации с как можно меньшей вероятностью ошибок при небольших энергетических затратах. В системах спутниковой связи в основном приходится модулировать цифровой поток данных в аналоговый сигнал, передавать с помощью передатчика на антенне и демодулировать на приемнике в конечной точке приема. Поэтому, в таких системах чаще всего предпринимают манипуляции над сигналами [1].

PSK – вид манипуляции, при которой фаза несущего колебания меняется скачкообразно в зависимости от информационного сообщения. Фазовая манипуляция является хорошо помехоустойчивой.

QAM – разновидность амплитудной модуляции сигнала, которая представляет собой сумму двух несущих колебаний одной частоты, но сдвинутых по фазе относительно друг друга на 90 градусов, каждое из которых модулировано по амплитуде своим модулирующим сигналом.

FSK – вид манипуляции, при которой скачкообразно изменяется частота несущего сигнала в зависимости от значений символов информационной последовательности. Частотная манипуляция весьма помехоустойчива, поскольку помехи искажают в основном амплитуду, а не частоту сигнала.

Для сравнения типов манипуляции воспользуемся средой математического моделирования MATLAB.

Имеет смысл сравнивать виды манипуляции с равным числом позиций. Поэтому будем сравнивать сигналы с MFSK, MPSK, MQAM при числе уровней сигнала $M = 16, 32$ на уровнях «сигнал/шум» E_b/N_0 равном от 0 до 30 дБ, рисунки 1, 2. Это значит, что на один символ приходится 16 и 32 бит информации.

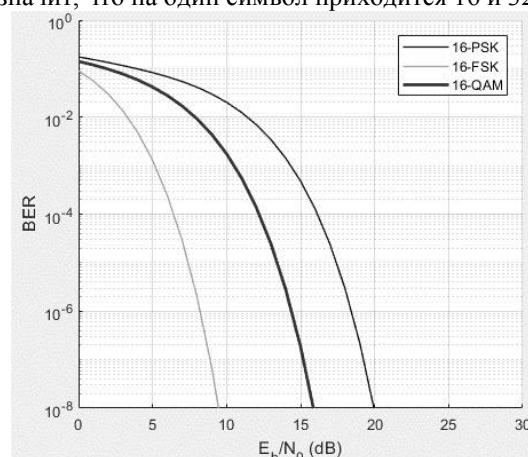


рис 1. График зависимости BER от E_b/N_0 для 16PSK, 16FSK, 16QAM.

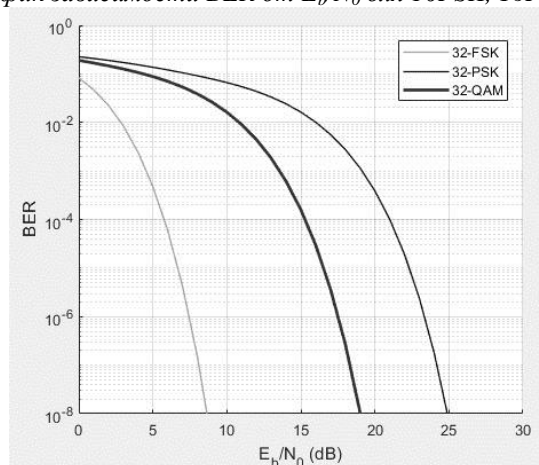


рис 2. График зависимости BER от E_b/N_0 для 32PSK, 32FSK, 32QAM.

В соответствии с приведенными результатами можно сделать вывод, что манипуляция MFSK будет выигрывать MPSK и MQAM по энергетической эффективности, так как в этом типе модуляции для передачи

информации с максимально меньшим количеством ошибок требуется меньше отношение «сигнал/шум» чем другим типам. Но на практике MFSK используется реже, ввиду того что в ССС ограниченная частотная полоса передачи данных, а при увеличении числа уровней спектр манипулированного сигнала по MFSK будет расширяться, так как новые частоты и ширина спектра растут по закону: $\frac{M}{\log_2 M}$, где M – число уровней [2]. Поэтому, метод манипуляции FSK чаще всего используют в системах передачи с низкими скоростями, где не является важным количество передаваемых символов за единицу времени.

Надо подчеркнуть, что увеличение числа уровней модуляции увеличивает спектральную эффективность в $K = \log_2 M$ раз, но это приводит к уменьшению энергетической эффективности из-за увеличения E_b/N_0 [3]. Поэтому, для устройств, работающих в ССС, стоит выбрать тип манипуляции между MPSK и MQAM.

Теоретическую максимальную энергетическая эффективность полосы частот системы можно определить по параметру K , который показывает сколько бит передается в секунду. Соответственно, чем больше K , тем больше бит мы можем передавать за единицу времени. Практическая же величина будет отклоняться от этой величины. [4].

Кроме того, помехозащищенность типов манипуляции можно определить численно по расстоянию между соседними точками сигнального созвездия. Расстояние между точками в созвездии MPSK меньше чем в MQAM, а значит есть большая вероятность ошибки детектирования соседнего символа. В [5] было показано, что расстояние между соседними точками в системе с QAM с L уровнями модуляции определяется выражением:

$$d = \frac{\sqrt{2}}{(\log_2 2^M) - 1} \quad (1)$$

Аналогично для PSK:

$$d = 2 * \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \quad (2)$$

Где M - число фаз. При $M = 16$ $d_{QAM} = 0.47$, $d_{PSK} = 0.396$, при $M = 32$ $d_{QAM} = 0.28$, $d_{PSK} = 0.174$.

Таким образом QAM по сравнению с PSK оказывается эффективнее и более помехоустойчив. Это позволяет использовать более многоуровневую модуляцию при одинаковом отношении «сигнал/шум»

На практике используют большие значения M , вплоть до 1024QAM. Такие виды манипуляции позволяют достичь очень высокой спектральной эффективности. Так как информация кодируется по фазе и амплитуде, то к M -QAM предъявляют высокие требования к параметрам усилителей мощности [6]. К минусам модуляции MQAM относится то, что из-за увеличения числа изменяемых параметров сильно усложняется и дорожает конструкция модемов.

Таким образом можно сделать вывод: 1) При небольшом уровне модуляции $M \leq 4$ следует использовать QPSK манипуляцию ввиду оптимальной энергетической эффективности BER к отношению «сигнал/шум». 2) При уровне модуляции $M > 4$ следует применять MQAM ввиду оптимальных показателей помехоустойчивости при декодировании информации.

Список публикаций:

- [1] Камнев В. Е. // *Спутниковые сети связи*. – М.: Альпина Паблишер – 2004. – 536 с.: ил
- [2] Сомов А. М. // *Спутниковые системы связи: Учебное пособие для вузов*. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 244 с.: ил
- [3] Скляр Б. // *Цифровая связь. Теоретические основы и практические применение*. – М.: Издательский дом «Вильямс» - 2003. - 1104 с.: ил
- [4] Саркисов Д. Б., Баранников Л. Н. // *Методы модуляции и спектральные характеристики сигналов в многоканальных радиосистемах передачи информации: учебное пособие*. – М.: Московский авиационный институт – 2005. – 15 с.: ил
- [5] Wagner R., Reil M. // *Модуляция и формирование сигналов с помощью генераторов сигналов компании R&S: обучающие материалы* – М: Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG/ - 2015. – 120 с.: ил
- [6] Галкин В. А. // *Цифровая мобильная радиосвязь*. – М: Горячая линия – Телеком, 2007. – 594 с.: ил

Полосно-пропускающий SIW-фильтр

Гризодуб Алексей Николаевич

Южный федеральный университет

Крутыев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.

agrizodub@sfedu.ru

В связи с развитием новых поколений мобильной связи (5G), интернет вещей (IoT) и т.п.,- возрастает спрос на высокопроизводительные, недорогие и компактные устройства. Наиболее подходящей технологией для реализации этих устройств считается встроенный в подложку волновод (SIW). Благодаря интеграции классических волноводных компонентов в плоской форме, технология SIW обеспечивает: простоту изготовления, компактные размеры, малый вес, а также хорошие электромагнитные характеристики [1–3].

В этой статье представлен фильтр, основанный на полумодовых резонаторах SIW с внешними полюсами. Структура состоит из двух встроенных полумодовых областей SIW, соединённых между собой окном с заглушкой в центре, представленной в виде микрополосковой линии с открытым концом. Топология фильтра представлена на рис. 1 [4, 5].

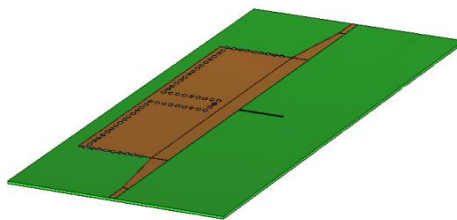


рис.1 – Топология фильтра

Наличие микрополосковой заглушки даёт двойной эффект. Во-первых, позволяет добавить передающий полюс за счёт резонансной связи. Во-вторых, она определяет нулевую передачу на частоте, где длина заглушки равна четверти длины волны.

Устройство смоделировано на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.2$ и толщина подложки $h = 0.51$ мм, толщина металлизации 35мкм. Амплитудно-частотная характеристика фильтра представлена на рис. 2.

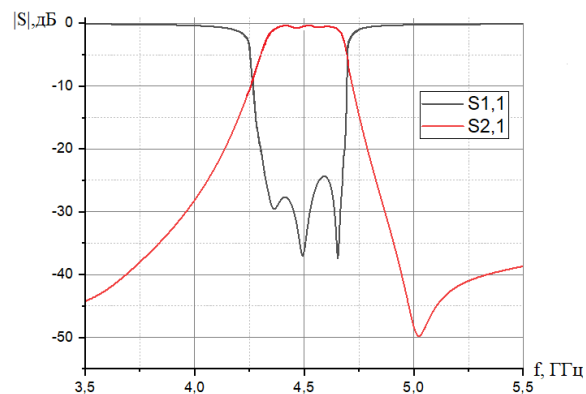


рис. 2 – Амплитудно-частотная характеристика фильтра

Список публикаций:

- [1] Krutiev, S., Lonkina, D., Makhno, A., Sdobnova, V. Synthesis of Band-Pass Filters Made Using SIW Technology // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2022, 2022, pp. 118–122
- [2] Krutiev, S., Lonkina, D., Makhno, P., Sdobnova, V. Narrow-Band Waveguide Filter on Complex Resonant Diaphragms // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2022, 2022, pp. 108–111
- [3] Гадзиева, А.А., Заргано, Г.Ф., Земляков, В.В., Крутыев, С.В., SIW-технологии, история создания, современное состояние и перспективы развития // Физические основы приборостроения, 2012. – Т. 1. – № 4. – С. 4–13.
- [4] Заргано, Г.Ф., Ляпин, В.П., Михалевский, В.С. и др. Волноводы сложных сечений. - М.: Радио и связь, 1986. – 124 с.
- [5] Заргано, Г.Ф., Земляков, В.В. Электродинамический анализ и синтез селективных устройств на волноводах сложного сечения для современных антенно-фидерных систем // Антенны, 2011. - Вып. 7 (170). – С. 64–73.

Моделирование диаграммообразующих устройств на основе метаповерхностей в ГГц диапазоне

Коноплев Артем Александрович
Южный федеральный университет
Клещенков Анатолий Борисович, к.ф.-м.н.
akonoplev@sfedu.ru

Метаматериалы - композитные материалы, свойства которых не встречаются в природе и достигаются за счет своей периодической структуры. На их основе конструируются метаповерхности – поверхности с необычными отражательными свойствами, состоящие из периодических структур с субволновой размерностью. Они имеют уникальные реконфигурируемые характеристики рассеяния и отражения, позволяющие создавать управляемые устройства радио и оптического диапазона и преодолевать фундаментальные ограничения. Метаповерхности отличаются малыми размерами, простотой интеграции и небольшой стоимостью. Метаповерхности широко применяются в таких устройствах как поляризаторы, отражатели, для создания голограмм и других сферах. Эта технология позволяет создавать легкие малогабаритные антенны для внушительного перечня задач ^{[1][3]}. Настоящая работа посвящена исследованию возможности применения метаповерхностей для антенн мм-диапазона. В работе в пакете CST MW Studio проведено моделирование некоторых двумерно-периодических структур. В качестве базовых элементов структур выбраны элементы в форме простых геометрических фигур. Проведено исследование модулей и фазы коэффициентов пропускания и отражения в зависимости от геометрии элементов.

Для нужд радиолокации применяются два варианта поворота диаграммы направленности (ДН) сканирующей антенны: механический и электронный. Оба варианта имеют как положительные, так и отрицательные моменты. В преимущества электронных сканеров можно отнести небольшие размеры, низкое энергопотребление и высокую скорость сканирования. Применение метаповерхностей даёт возможность развить эти преимущества. Представленная в работе модель активной фазированной антенной решетки (АФАР) позволяет управлять ДН с высокой скоростью ^{[2][4]}.

Для моделирования цифровой метаповерхности был выбран элемент со следующими характеристиками. Нижний слой диэлектрика состоит из текстолита (FR-4) с толщиной 0.058мм. Подложка состоит из идеального проводника с толщиной 0.018мм. Верхний диэлектрик состоит из материала Rogers RO4350B с толщиной 0,222мм. Патчи из идеального проводника с толщиной 0,018 мм, стороной квадрата 0,607мм. Паз с толщиной 0,012мм. Изменение геометрии обеспечивается за счет переключки с управляемой проводимостью. Предложенная структура позволяет управлять фазой коэффициента отражения. Был получен сдвиг фазы отраженной волны для элемента с рассоединенными антеннами и с соединенными. Для данных моделей сдвиг фазы составил 180 градусов. Модели продемонстрированы на рисунках 1 и 2, а на рисунке 3 представлены результаты расчетов частотных зависимостей фазового угла коэффициента отражения для двух дискретных состояний элемента – при наличии и отсутствии проводимости в переключке.

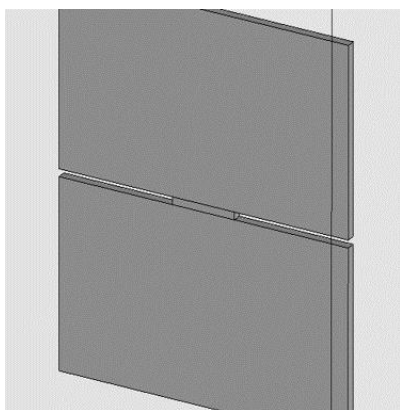


рис.1. «соединенные» антенны

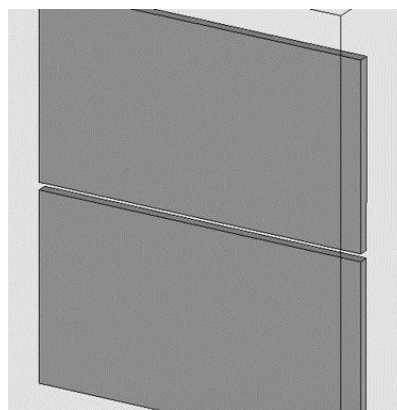


рис.2. «разъединенные» антенны

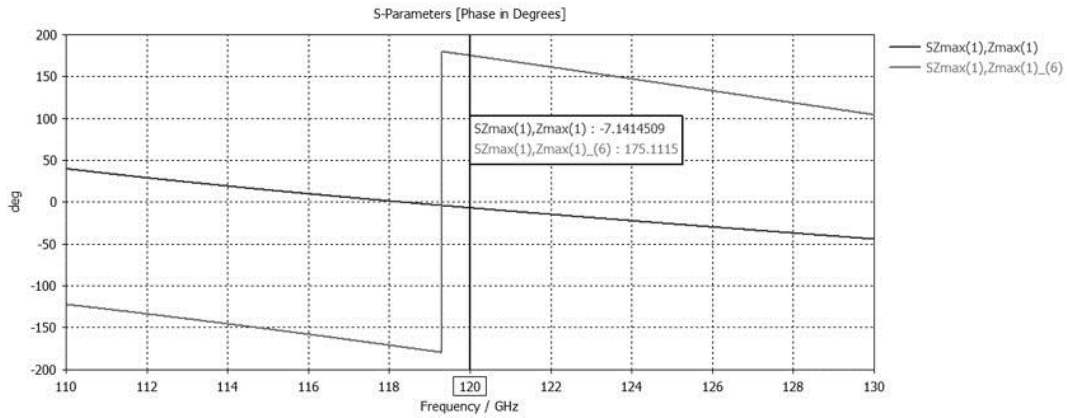


рис.3. разность фаз для моделей элементов

Для построения АФАР был смоделирован элемент, представляющий из себя квадрат из текстолита со стороной 1,25мм и толщиной 0,22мм с нанесенными металлическими прямоугольными антеннами 0,5x0,5мм с одной стороны и сплошного металлического экрана с другой стороны. Все металлические покрытия имеют толщину 0,018мм. Модель показана на рисунке 4.

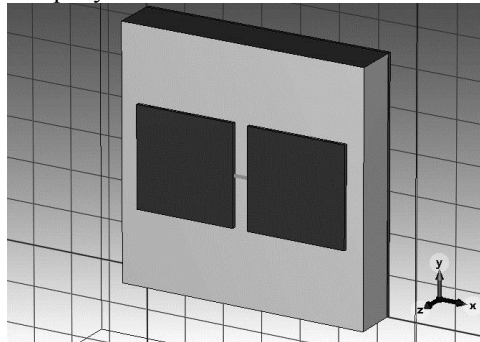


рис.4. представлен элемент АФАР

Был проведен электродинамический анализ модели АФАР с фазовой манипуляцией волны. Была выявлена зависимость изменения направления ДН в зависимости от распределения фаз по элементам. Анализ полученных результатов позволяет создать электронный отражатель для радара на частоте 120 ГГц продемонстрирован на рисунках 5-6. Получены наклоны в 1, 5 и 10 градусов.

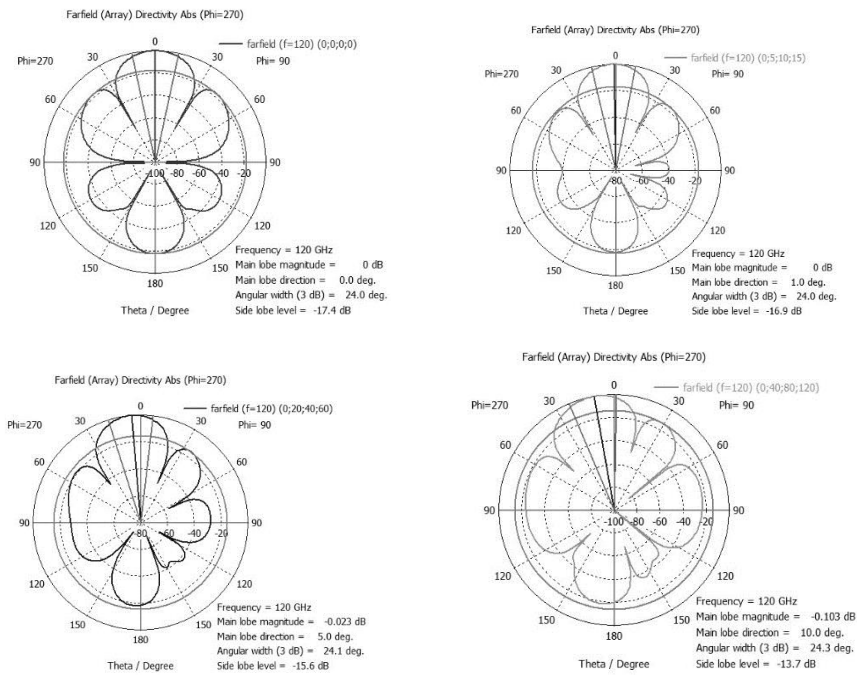


рис.2-5. Изменение угла ДН путем фазовой манипуляции

Список публикаций:

- [1] Roadmap on metasurfaces Oscar Quevedo-Teruel et al 2019 J. Opt. 21 073002.
 [2] Electronic Beam-steering Using 1-Bit Digital. Reflective Metasurface at Ka Band Jiaqi Han, Guangyao Liu, Yan Shi, and Long Li Xi'an 710071, China
 [3] Ke Chen, Zhongjie Yang, Yijun Feng, a Bo Zhu, Junming Zhao, and Tian Jiang AIP Advances 5, 067152 (2015)
 [4] Raeker B and Grbic A 2018 Paired metasurfaces for amplitude and phase control of wavefronts IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation (Boston, MA)

Расчёт уширения спектральной линии излучения в дискретных моделях автоколебаний

Кудряшкин Назар Андреевич

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

Зайцев Валерий Васильевич, к.ф.-м.н.

nazar.kudryashkin@mail.ru

При математическом моделировании радиоэлектронных систем часто встречаются квазигармонические случайные процессы, воспроизводящие сигналы реальных систем. Из-за флуктуаций сигналов форма их спектральных линий подвержена различным изменениям. Флуктуации частоты вызывают уширение спектральной линии, а флуктуации амплитуды – формирование пьедестала линии. Для описания механизма уширения в динамическую систему введено внешнее случайное воздействие. В данном случае дискретные автоколебания генерируются с учётом воздействия на осциллятор полосового белого шума. Это воздействие реализовано двумя способами.

В первом случае (аддитивная модель) дискретная стохастическая система представлена уравнениями (1). Вывод и подробное описание аддитивной модели (дискретного осциллятора томсоновского типа) рассмотрены в [1, 2].

$$\begin{cases} x_n - 2 \cos(2\pi\Omega_0)x_{n-1} + x_{n-2} = 2\pi\nu(pS(x_{n-1}) - 1)\dot{x}_{n-1} + \mathcal{E}\xi_{n-1}, \\ \dot{x}_{n-1} = \cos(2\pi\Omega_0)x_{n-1} - x_{n-2} \end{cases}, \quad (1)$$

где Ω_0 – собственная частота осциллятора, $\nu = \Omega_0 / Q$ – его полоса пропускания, Q – добротность, p – параметр превышения порога генерации, $S(x)$ – дифференциальная крутизна. Слагаемое $\mathcal{E}\xi_n$ описывает дискретный белый шум ξ_n с амплитудой \mathcal{E} .

При оценке спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала (1) было выявлено, что спектральная линия содержит как амплитудные флуктуации, так и фазовые. На рис.1 представлено сравнение (в логарифмическом масштабе) спектральных линий в анализируемой модели, и в модели без шумового воздействия. Из рисунка видно подтверждение теоретических предположений о том, как именно влияют на спектральную линию амплитудные и частотные (фазовые) флуктуации.

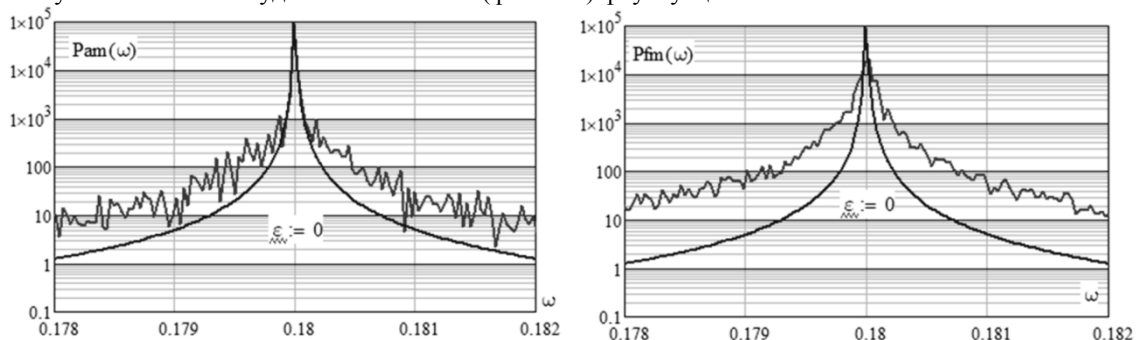


рис.1. Оценка СПМ сигнала, модулированного по амплитуде (слева) и по фазе (справа).

Во второй (параметрической) модели введём шумовое воздействие на частоту. Получим уравнение (2):

$$\begin{cases} x_n - 2 \cos(2\pi(\Omega_0 + \mu\xi_{n-1}))x_{n-1} + x_{n-2} = 2\pi\nu(pS(x_{n-1}) - 1)\dot{x}_{n-1}, \\ \dot{x}_{n-1} = \cos(2\pi\Omega_0)x_{n-1} - x_{n-2} \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mu\zeta_{n-1}$ характеризует шумовое воздействие. При оценке СПМ было выявлено, что модель (2) позволяет генерировать автоколебания, свободные от флуктуаций амплитуды.

Оценка СПМ также позволила определить, что в обоих случаях форма спектральных линий совпадает с лоренцевой формой однородно уширенной линии. При этом относительная ширина по порядку величины соответствовала $1/Q$.

Соответствие между теоретическими и экспериментальными данными говорит о том, что предложенные модели автоколебательных систем с однородно уширенной спектральной линией позволяют описать реальные источники сигналов в численных экспериментах.

Список публикаций:

[1] Зайцев В. В. Дискретный осциллятор ван дер Поля: Конечные разности и медленные амплитуды // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 6. С. 70–78. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-6-70-78.

[2] Зайцев В. В., Карлов А. В. Томсоновские автогенераторы в дискретном времени: синтез динамических систем. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2022. №3. DOI: 10.30898/1684-1719-2022-3-1.

Повышение точности однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне волн для трассы Москва-Ростов-на-Дону путем коррекции модели IRI по ПЭС

Михайлов Максим Александрович

Черных Владимир Дмитриевич

Южный федеральный университет

Вертоградов Геннадий Георгиевич, д.ф.-м.н.

mmih@sfedu.ru

На сегодняшний день для решения практических и научных задач распространения радиоволн в ионосфере являются актуальным определение местоположения источника радиоизлучения (ИРИ) в диапазоне декаметровых волн (ДКМВ) [1]. Для однопозиционного определения положения источника излучения (ИРИ) в ДКМВ достаточно из одного приёмного пункта (одной позиции) измерить углы прихода хотя бы одного луча от источника и задать каким-либо способом ионосферную обстановку (пространственное распределение электронной концентрации [2]). Погрешности местоопределения ИРИ при использовании прогностической модели IRI исследованы экспериментально многими авторами, в том числе и в работах [2-4]. В тоже время для решения указанных задач тестирование эффективности коррекции ионосферной модели по полному электронному содержанию (ПЭС или ТЕС) изучено только на основе имитационного моделирования [5].

а)

б)

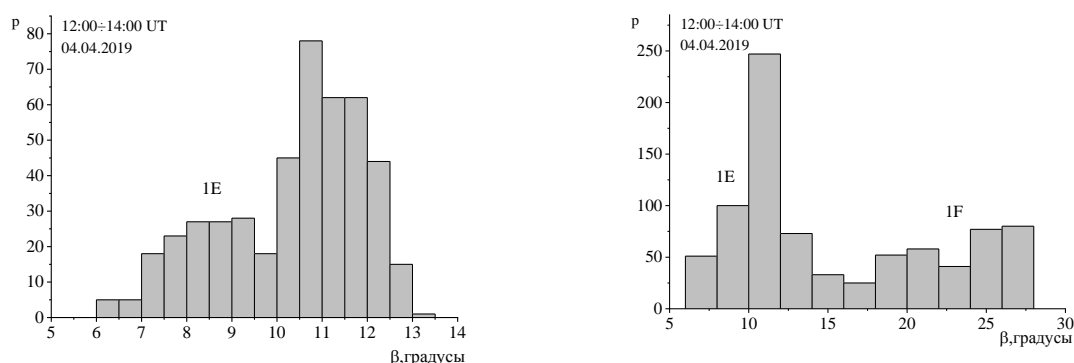


рис. 1. Гистограммы распределения углов места прихода ДКМВ на частоте 9996 кГц для трассы Москва – Ростов-на-Дону без коррекции по ТЕС (а) и с коррекции по ТЕС (б).

В экспериментах использован многоканальный широкоапертурный комплекс измерения углов ДКМВ. Круговая антенная решетка диаметром 200 м построена из 16 активных антенных элементов высотой 2.5 м размещена вблизи Ростова-на-Дону. В качестве контролируемых ИРИ были выбраны станция точного времени РВМ, работающая непрерывно на частоте 9996 кГц (длина трассы – 949.0 км, азимут – 352.8°). Измерения проводились в спокойных ионосферных условиях. Для разделения поля КВ на парциальные лучи и моды, в

работе использован способ, предполагающий одновременно спектральную обработку во временной и пространственной областях [2,3]. Способ основан на методе MUSIC [6].

Обработка результатов измерений углов прихода предполагала деление суток на часовые интервалы. На каждом часовом интервале с учетом решения задачи однопозиционного местоопределения строились гистограммы распределений для углов прихода. При построении гистограмм участвовали только те измерения, для которых удавалось с использованием модели IRI выполнить оценку дальности до ИРИ. Примеры полученных гистограмм показаны на рис.1. С помощью гистограмм выполнялась селекция результатов измерений углов прихода по модам распространения. После этого определялись наиболее вероятные углы прихода: азимут трассы – α и угол места – Δ парциальных мод распространения, а также среднеквадратичное отклонение относительно географического азимута σ_α и вероятных углов места σ_Δ .

Для различных частот E и F мод распространения находились: среднеквадратичное отклонение σ_α оценочного азимута трассы α от истинного значения α_0 , относительное среднеквадратичное отклонение расстояния до ИРИ σ_S/S_0 от истинного значения S_0 . Результаты, полученные для нескольких часовых интервалов, приведены в таблице 1. Здесь указаны также объемы выборок - N , по которым получены результаты, помещенные в таблицу. Эта колонка иллюстрирует вероятность оценки координат ИРИ однопозиционным методом после адаптации ионосферной модели по полному электронному содержанию. Видно, что в условиях минимальной солнечной активности коррекция по ТЕС существенно увеличивает вероятность оценки координат ИРИ, особенно для распространения сигналов F модой. Например, в условиях минимума солнечной активности, на трассе Москва–Ростов-на-Дону без адаптации модели IRI практически не удавалось получить оценки координат при отражении от слоя F-ионосферы. По этим причинам в таблице 1 отсутствуют строки усредненных оценок F-мод распространения в случае, когда коррекция по ТЕС не выполнялась.

Результаты оценки углов прихода и дальности до источника представлены в следующей таблице:

Полдень (10:00 -14:00 UT). $f = 9996$ кГц							
Коррекция	Мода	σ_S	σ_α	σ_Δ	$\langle \Delta \rangle$	σ_S/S_0	N
Отсутствует	E	100.2	0.6	1.7	10.3	9.3	1160
	F	-	-	-	-	-	
ТЕС	E	112.8	0.6	2.0	10.7	9.5	1425
	F	156.2	1.4	4.2	22.9	15.8	
Заход (14:00 -18:00 UT). $f = 9996$ кГц							
Отсутствует	E	-	-	-	-	-	718
	F	-	-	-	-	-	
ТЕС	E	-	-	-	-	-	1305
	F	88.8	0.8	3.9	28.7	9.0	

На основе измерений углов прихода на двух среднеширотных трассах различной протяженности и ориентации в условиях разделения скачковых 1E и 1F мод распространения показано, что девиации углов места парциальных лучей достигают в азимутальной плоскости $\sim 0.5^\circ$ для 1E и $\sim 2^\circ$ для 1F мод, а в угломестной – значений $\sim 1^\circ$ для 1E и 4.5° для 1F мод. Столь существенные вариации углов места 1F мод связаны с присутствием в ионосфере перемещающихся ионосферных возмущений. Коррекция ионосферной модели по экспериментальным значениям вертикального ТЕС позволяет в условиях минимума солнечной активности существенно повысить вероятность оценки координат ИРИ, особенно при отражении сигналов от F-слоя ионосферы.

Список публикаций:

- [1] Gething P. J. D. Radio direction finding and superresolution. –London: Peter Peregrinus Ltd, 1990. –365p.
- [2] Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Чайка Е. Г., Валов В. А., Выборнов Ф. И., Першин А. В., Стародубровский А. С. Однопозиционное определение местоположения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне с помощью широкоапертурного пеленгатора-дальномера и ТЧМ-иозонда-радиопеленгатора//Радиофизика, 2017, Т.60, № 12. С.1072-1092.
- [3] Вертоградов Г. Г., Чайка Е. Г. Оценка точности однопозиционного местоопределения на среднеширотных трассах при различных способах задания ионосферной обстановки// Радиотехника, 2016, № 11. –С.217-224.
- [4] Lay K. A real-time HF Single-Station Location system deve// Radar, 2008 International, Adelaide, Australia, 2008. –Pp.309-310.
- [5] Мальцева О.А., Родионова В.Т., Шлюпкин А.С. Использование полного электронного содержания для текущей диагностики состояния ионосферного канала связи// Геомагнетизм и аэрномия. – 2005, –Т.45. – С.480-486.
- [6] Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. –М.: Радио и связь, 2003. –200 с.

Полосно-пропускающий фильтр на тонких резонансных диафрагмах

Павленко Михаил Андреевич

Южный федеральный университет

Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.

mpavlenko@sfedu.ru

В данной работе представлена конструкция волноводного полосно-пропускающего фильтра. Апертура диафрагмы основана на ступенчатых пазах, которые играют роль фильтрующих секций. Ступенька на щели от стенки до стенки обеспечивает резонанс передачи в пределах одномодовой полосы прямоугольного волновода.

Был проведен электродинамический анализ одиночной ступенчатой диафрагмы, а также синтез полосно-пропускающего фильтра на тонких резонансных диафрагмах. На рис 1 представлена трехмерная модель ППФ. На рис.2 представлена АЧХ синтезированного ППФ.

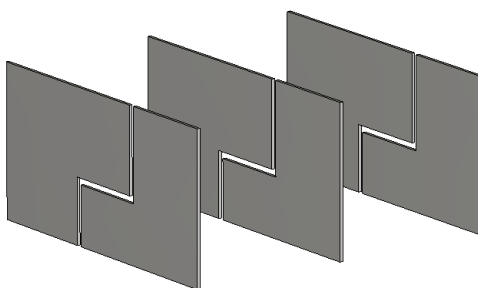


рис.1 Полосно-пропускающий фильтр на ступенчатых диафрагмах

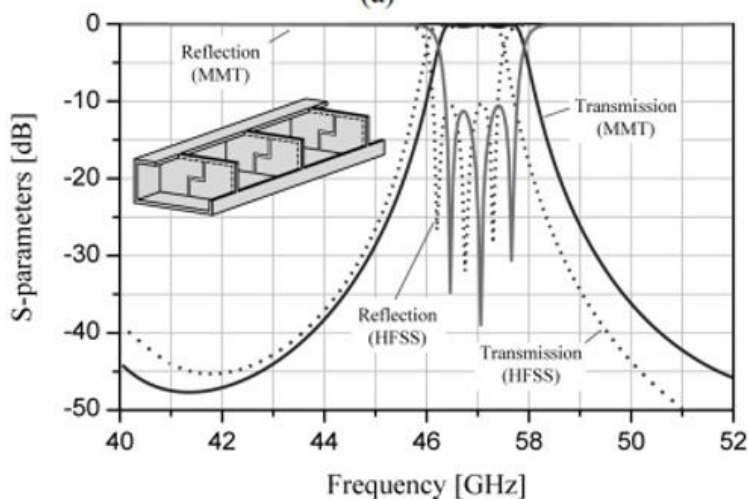


рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра

Список публикаций:

- [1] X. Chen, K. Wu, and Zh. Li, "Dual-Band and Triple-Band Substrate Integrated Waveguide Filters With Chebyshev and Quasi-Elliptic Responses" *IEEE Trans. Microw. Theory*, VOL. 55, NO. 12, PP. 2569-2578, 2007.
- [2] Sergey V. Krutiev; Daria V. Lonkina; Svetlana S. Efremova; Andrey S. Ipatiev *Electrodynamical Analysis and Synthesis of Band-pass Filters on a Rectangular Waveguide with Complex Thin Resonant Diaphragms in the Form of a Double-Shaped C-aperture // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 28 June 2021 - 02 July 2021, DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494046
- [3] S. V. Krutiev; D. V. Lonkina; P. V. Makhno; A. B. Kleshchenkov; V. V. Makhno *Design and Fabrication of Compact Waveguide Filter with Complementary Split-ring Resonators (CSRR) // 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 25-29 April 2022, DOI: 10.1109/PIERS55526.2022.9792588
- [4] Zemlyakov, V.V., Zargano, G.F., Krutiev, S.V., Tyaglov, M.Y. *Electrodynamical Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide // Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, 61(12), pp. 915-923, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09947-0>
- [5] Viacheslav Zemlyakov, Sergey Krutiev, Mikhail Tyaglov, Valery Shevchenko *A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture // International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2019, 47(1), pp. 55-64, DOI: <https://doi.org/10.1002/cta.2566>

Прохождение и излучение электромагнитной волны в системе релаксор-МПЛ с зазором

Панова Анастасия Владимировна

Сабурова Валерия Сергеевна

Южный федеральный университет

Сидоренко Евгений Никифорович, к.ф.-м.н.

nastya.shaprinskaya@mail.ru

В технике СВЧ совместное использование диэлектрических резонаторов и микрополосковой линии (МПЛ) позволяет конструировать ответвители СВЧ энергии с электромеханической регулировкой их резонансной частоты, ширины полосы пропускания, добротности. А совместное применение микрополосковых линий разного типа и диэлектрических резонаторов с различными свойствами и формами способствует созданию малогабаритных перспективных диэлектрических резонаторных антенны (ДРА), широко применяемых в настоящее время.

В данной работе экспериментально исследованы свойства волноводного тракта, содержащего несимметричную микрополосковую линию (МПЛ) с резонатором между зазорами микрополоска на диэлектрической подложке на прохождение и излучение электромагнитных волн (рис.1). В качестве резонатора используется оптически прозрачная сегнетоэлектрическая керамика PLZT. Она представляет собою твердый раствор сегнетоэлектрика титаната свинца (PbTiO_3) и антисегнетоэлектрика цирконата свинца (PbZrO_3), модифицированный лантаном с концентрацией La 9%. Эта керамика обладает сочетанием пьезоэлектрических и электрооптических свойств и является базовым материалом для устройств и приборов электроники, оптоэлектроники, механики.

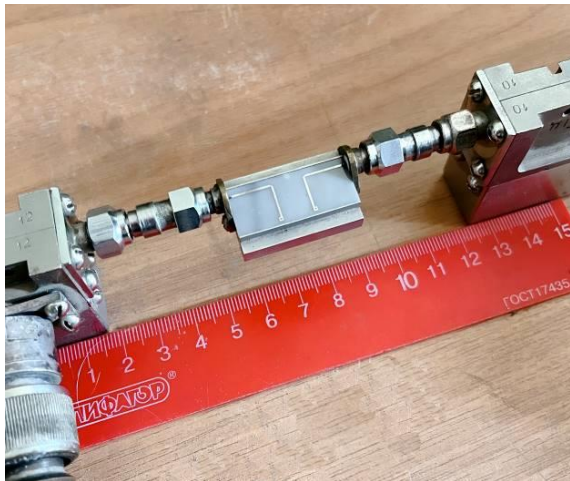


рис.1. Фотография несимметричной микрополосковой линии в волноводном тракте.

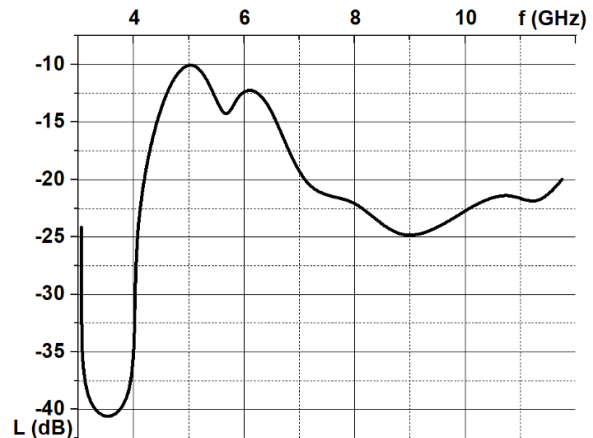


рис.2. Спектр поглощения СВЧ энергии несимметричной микрополосковой линией с ЦТСЛ-резонатором.

Измерительная установка, как и ранее [1, 2], содержала три генератора качающейся частоты, индикатор КСВН и ослабления, а также несимметричную микрополосковую линию. Патч-элемент МПЛ представлял собою систему двух медных проводников в виде полосок Г-образной формы шириной 1 мм. Расстояние между ними в области разрыва 8 мм. МПЛ была нагружена 50-омной нагрузкой. Таким образом, линия работала в режиме бегущей волны. Исследуемый образец ЦТСЛ размещался между параллельными разомкнутыми концами проводников в пучности Е электрической составляющей СВЧ поля.

При отсутствии образца на поверхности МПЛ волноводный тракт разорван и измеритель КСВН фиксирует -50 дБ поглощения. Полученные спектры поглощения энергии системы МПЛ-диэлектрический резонатор представлены на рис. 2. Максимальное поглощение ($L = -40$ дБ) наблюдается в диапазоне частот 3–4 ГГц из-за большого поглощения или отражения энергии. Следовательно, связь между МПЛ и резонатором в этом диапазоне частот отсутствует. Зато в области частот 5–6 ГГц благодаря возбуждению диэлектрического резонатора появилась зона с поглощением энергии менее $-10 \dots -15$ дБ, где реализуется режим бегущей волны.

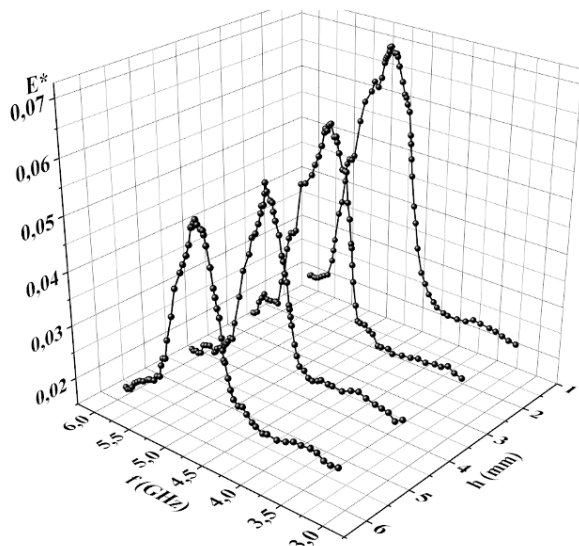


рис.3. Спектры интегрального излучения напряженности электрического поля на разных высотах h от поверхности образца.

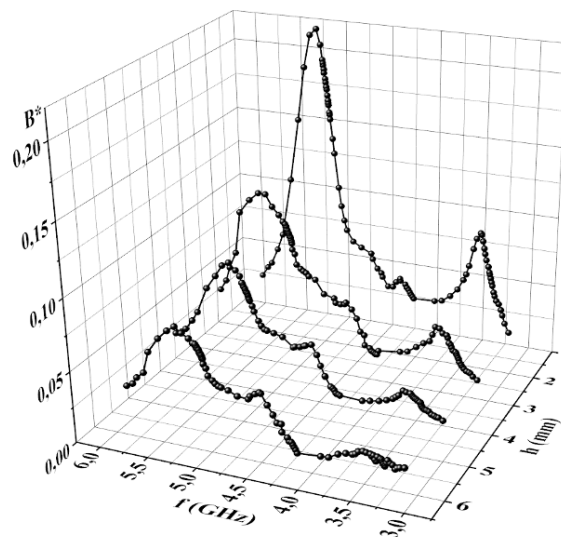


рис.4. Спектры интегрального излучения индукции магнитного поля на разных высотах h от поверхности образца.

С помощью штыревой и петлевой антенн измерены спектры интегрального излучения напряженности электрического (рис.3) и магнитного поля (рис.4) на разных высотах h от верхней поверхности керамического образца. На частоте ~ 5 ГГц наблюдается максимум излучения и электрического и магнитного полей. Максимальная высота, на которой еще фиксируется напряжение детектированного излучаемого сигнала цифровым вольтметром (без усилителя) равно 8-10 см. Мощность излучения в максимуме составляет 10% выходной мощности генератора.

Таким образом, экспериментально показано, что система несимметричная микрополосковая линия – ЦТСЛ резонатор обладает свойствами фильтра и диэлектрической резонаторной антенны.

Список публикаций:

[1] Sidorenko E.N., Chan Thi Beat Ngoc, Prikhodko G. I., Natkhin I.I., Shloma A.V., Kharchenko D.V.// *Journal of Advanced Dielectrics* Vol. 10, No. 01n02, 2020. P.2060020 - 2060027

[2] Sidorenko E.N., Rudskaya A. G., Agarkova M. E., Rudsky D. I., Panova A. V.// *Abstracts of 10th Anniversary International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2021–2022) Divnomorsk, Russia, 2022* P. 283-284.

Компактный полосно-пропускающий фильтр, выполненный по SIW-технологии

Сдобнова Варвара Павловна
Крутыев Сергей Владимирович
 Южный федеральный университет
 Крутыев Сергей Владимирович
sdobnova@sfedu.ru

Современные технологии проектирования интегральных микросхем дают возможность интегрировать в структуру трехмерные элементы. Технология интегрирования волновода в подложку получила широкое распространение благодаря уменьшению массогабаритных размеров и относительно низкой стоимости производства по сравнению с твердотельными прямоугольными волноводами. Такая технология была названа SIW-технологией (от англ. Substrate Integrated Waveguide – интегрированный в подложку волновод) [1,2].

SIW представляет собой волноводную структуру, которая создана двумя рядами металлических штырей, соединяющих две металлические пластины, ограничивающие диэлектрическую подложку.

Данная технология приобрела большую популярность благодаря тому, что SIW-структура объединяет в себе преимущества классических прямоугольных волноводов (большая передаваемая мощность, малые потери, полностью экранированная структура, высокая добротность резонаторов) и особенности планарных структур, приобретая малые размеры и вес, а также относительно низкую стоимость производства [3].

SIW-фильтры широко применяются в системах передачи информации, в средствах радиоэлектронной борьбы, а так же в спутниковых системах [4, 5].

Ранее был смоделирован трехслойный полосно-пропускающий фильтр без резонаторов и фильтр с одним [6]. В рамках данной работы был проведен электродинамический анализ и синтез трехслойного полосно-пропускающего фильтра с тремя резонаторами, выполненного по SIW-технологии, а также проанализирована его амплитудно-частотная характеристика, представленная на *рисунке 1*.

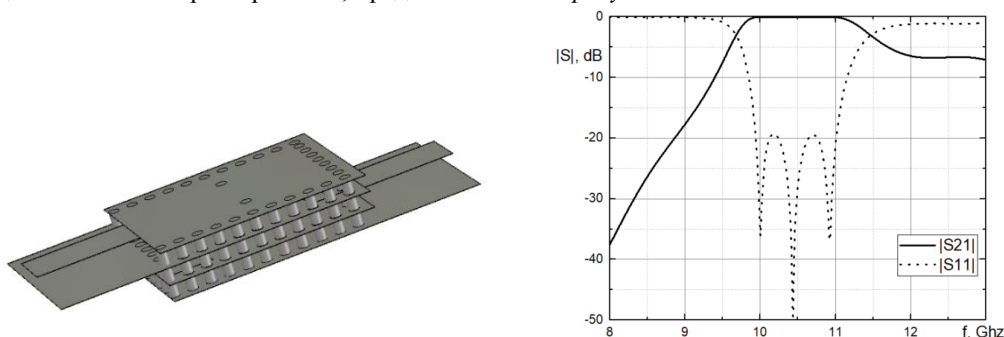


рис.1. Трехслойный SIW-фильтр с тремя резонаторами и его АЧХ.

Работа выполнена в Южном федеральном университете при поддержке Российского Научного Фонда, номер гранта № 22-79-00127 «Разработка гибких частотно-селективных устройств с применением SIW-технологии для спутников и беспилотных летательных аппаратов».

Список публикаций:

- [1] Krutiev, S., Lonkina, D., Makhno, A., Sdobnova, V. Synthesis of Band-Pass Filters Made Using SIW Technology // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2022, 2022, pp. 118–122
- [2] Krutiev, S., Lonkina, D., Makhno, P., Sdobnova, V. Narrow-Band Waveguide Filter on Complex Resonant Diaphragms // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2022, 2022, pp. 108–111
- [3] Гадзиева, А.А., Заргано, Г.Ф., Земляков, В.В., Крутыев, С.В., SIW-технологии, история создания, современное состояние и перспективы развития // Физические основы приборостроения, 2012. – Т. 1. – № 4. – С. 4–13.
- [4] Заргано, Г.Ф., Ляпин, В.П., Михалевский, В.С. и др. Волноводы сложных сечений. - М.: Радио и связь, 1986. – 124 с.
- [5] Заргано, Г.Ф., Земляков, В.В. Электродинамический анализ и синтез селективных устройств на волноводах сложного сечения для современных антенно-фидерных систем // Антенны, 2011. - Вып. 7 (170). – С. 64–73.
- [6] Sdobnova, V., Krutiev, S., Lonkina, D. Compact Three-layer Band-pass Filter Based on SIW-technology // Proceedings of the 2023 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St.Petersburg, January 24-26, 2024. Pp. 141–143.

Волноводный полосно-пропускающий фильтр на толстых металлических диафрагмах

Харченко Диана Геннадьевна

Южный федеральный университет

Крутыев.Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.

harchenko@sfedu.ru

Отдельным классом перспективных функциональных устройств СВЧ техники являются волноводные СВЧ фильтры. Микроволновые фильтры имеют широкий спектр применения в различных радиотехнических устройствах. Среди них приемные модули, передающие устройства, частота и устройства генерации сигналов, устройства развязки. Так как развитие систем связи требует увеличение частоты каналов, в настоящее время проектирование и разработка различных гибких микроволновых устройств, таких как направленные ответвители, фильтры, дуплексеры, делители мощности, антенны и т.д., является актуальной и важной задачей по обеспечению компактности и простоты использования [1-5].

В данной работе приводится электродинамический анализ фильтра с тремя диафрагмами, каждая из которых имеет по три прямоугольных щели. В работе был синтезирован полосовой фильтр третьего порядка, а затем был проведен его электродинамический анализ и синтез. На *рис. 1* показан внешний вид трехмерного фильтра, а на *рис.2* показана амплитудно-частотная характеристика фильтра. Толщина металлической диафрагмы составляет $w=1,5$ мм.

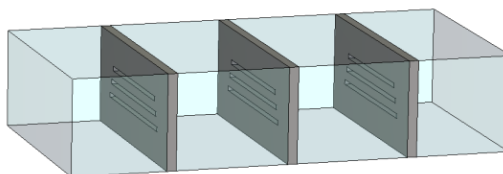


рис. 1 – Модель фильтра третьего порядка с тремя прямоугольными щелями

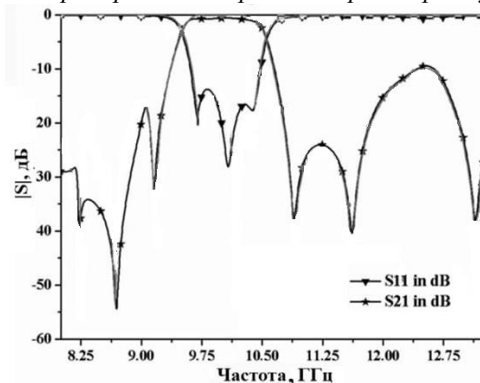


рис. 2 – Амплитудно-частотная характеристика фильтра третьего порядка с тремя прямоугольными щелями

Список публикаций:

- [1] X. Chen, K. Wu, and Zh. Li, "Dual-Band and Triple-Band Substrate Integrated Waveguide Filters With Chebyshev and Quasi-Elliptic Responses" *IEEE Trans. Microw. Theory*, VOL. 55, NO. 12, PP. 2569-2578, 2007.
- [2] Sergey V. Krutiev; Daria V. Lonkina; Svetlana S. Efremova; Andrey S. Ipatiev *Electrodynamic Analysis and Synthesis of Band-pass Filters on a Rectangular Waveguide with Complex Thin Resonant Diaphragms in the Form of a Double-Shaped C-aperture // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 28 June 2021 - 02 July 2021, DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494046
- [3] S. V. Krutiev; D. V. Lonkina; P. V. Makhno; A. B. Kleshchenkov; V. V. Makhno *Design and Fabrication of Compact Waveguide Filter with Complementary Split-ring Resonators (CSRR) // 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 25-29 April 2022, DOI: 10.1109/PIERS55526.2022.9792588
- [4] Zemlyakov, V.V., Zargano, G.F., Krutiev, S.V., Tyaglov, M.Y. *Electrodynamic Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide // Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, 61(12), pp. 915–923, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09947-0>
- [5] Viacheslav Zemlyakov, Sergey Krutiev, Mikhail Tyaglov, Valery Shevchenko *A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture // International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2019, 47(1), pp. 55–64, DOI: <https://doi.org/10.1002/cta.2566>

Модуль блокировок и мониторинга системы импульсного питания

Чучук Тамара Алексеевна

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Крылов Андрей Александрович

tamara.chuchuk@gmail.com

Импульсные источники питания (ИИП) для магнитных элементов ускорительных комплексов [1], предполагающие наличие больших ёмкостей, зараженных до высоких напряжений, являются опасными элементами с поражающим фактором электрического тока. Данная проблема стоит особенно остро, когда несколько независимых ИИП установлены в едином крейте. Возникает необходимость в создании общего модуля, следящего за безопасностью всех ИИП в стойке. Именно эта цель была поставлена в данной работе.

Согласно техническому заданию ИЯФ СО РАН, в стойке находится 8 источников [2]. Перечислим параметры, за которыми должен следить модуль безопасности:

1. Состояние заземлителей – подняты или опущены;
2. Двери стойки – открыты или закрыты;
3. Датчики температуры в стойке;

4. Внешние и внутренние разрешения/запросы на работу – разрешение на зарядку ёмкостей для каждого источника.

Эти параметры поступают на входные каналы модуля блокировок и мониторинга, и после их обработки модуль отправляет сигналы на выходные каналы:

1. Сигнал на силовые реле, включающие/выключающие питание стойки;
2. Сигнал заземлителям источников – поднять или опустить;
3. Ответ на внешний запрос о начале работы источника;
4. Индикация на стойке.

Отметим отдельно, что ИИП работают от служебного источника напряжения 48 В 3 кВт. Параметры, которые выдаёт данный преобразователь, отображаются на мониторе, расположенном в непосредственной близости от него. Датчики температуры и световая индикация также расположены непосредственно на стойке с источниками. Однако есть необходимость следить за этими параметрами удалённо, например, из пультной ускорителя, т.е. требуется разработать внешний интерфейс для модуля мониторинга, что и было сделано в данной работе. Все эти данные пользователь получает от сервера модуля мониторинга по статическому IP-адресу стойки с источниками.

Плату модуля мониторинга, внешний вид которой представлен на рис. 1 условно можно разделить на две части: все сигналы и блокировки обрабатывает ПЛИС семейства MAX V, а высокоуровневые задачи обработки информации и передачи её пользователю принимает на себя STM-контроллер.

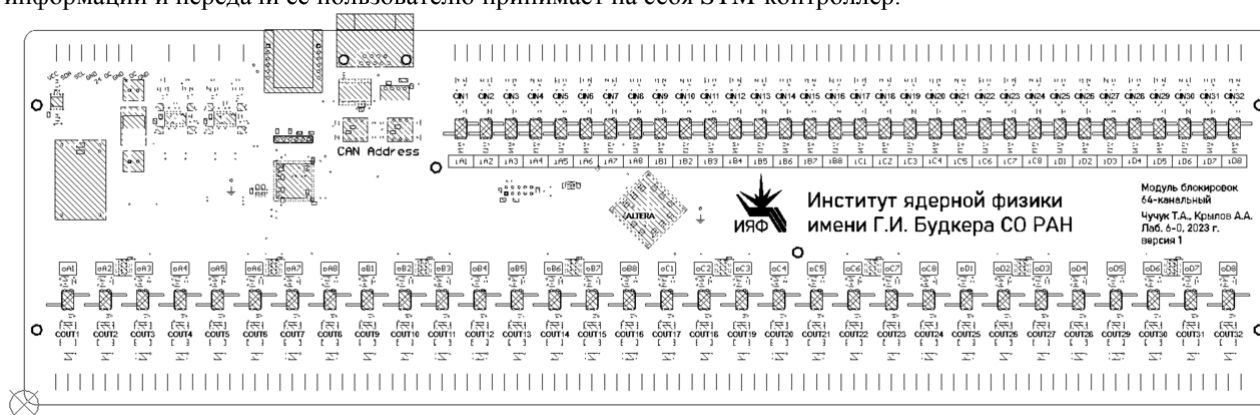


рис. 1 Плата модуля блокировок и мониторинга для ИИП

Список публикаций:

[1] Fatkin G. LIA-20 control system project // 16th ICALEPCS. 2017. P. 1485-1488.
 [2] Крылов А.А. ГИД-160 — импульсный генератор питания магнитных элементов ускорителей // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2022. №5. С. 457-463.

Компактный волноводный полосно-пропускающий фильтр на толстых металлических диафрагмах.

Шевченко Андрей Константинович
 Южный федеральный университет
 Крутиев. Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.
ash@sfnu.ru

Волноводные СВЧ фильтры представляют собой отдельный класс перспективных функциональных устройств, которые динамически развивается в настоящее время. Микроволновые фильтры имеют широкий спектр применения в различных радиотехнических устройствах: приемные модули, передающие устройства, частота и устройства генерации сигналов, устройства развязки. Развитие систем связи требует увеличение

частоты каналов. Таким образом, тренд миниатюризации в настоящее время является актуальным в системах связи [1–5].

В данной работе приводится электродинамический анализ и синтез компактного полосно-пропускающего фильтра. Уменьшение массо-габаритных размеров фильтра проводится путем введения в структуру фильтра емкостных диафрагм. На рис. 1 показан внешний вид трехмерного фильтра, а на рис. 2 показана амплитудно-частотная характеристика фильтра и компактного фильтра. Толщина резонансной металлической диафрагмы составляет $w=1,5$ мм. Продольный размер фильтра уменьшился в 3 раза при сохранении АЧХ.

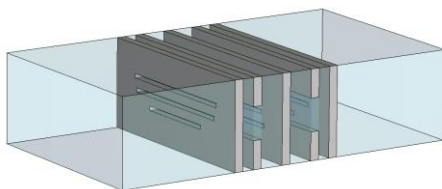


рис. 1 – Модель фильтра третьего порядка с тремя прямоугольными щелями

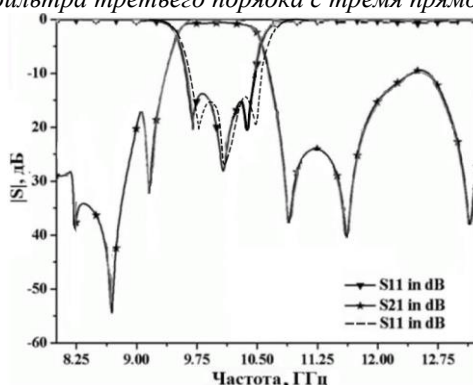


рис. 2 – АЧХ фильтра третьего порядка с тремя прямоугольными щелями

Список публикаций:

- [1] X. Chen, K. Wu, and Zh. Li, "Dual-Band and Triple-Band Substrate Integrated Waveguide Filters With Chebyshev and Quasi-Elliptic Responses" *IEEE Trans. Microw. Theory*, VOL. 55, NO. 12, PP. 2569-2578, 2007.
- [2] Sergey V. Krutiev; Daria V. Lonkina; Svetlana S. Efremova; Andrey S. Ipatiev *Electrodynamics Analysis and Synthesis of Band-pass Filters on a Rectangular Waveguide with Complex Thin Resonant Diaphragms in the Form of a Double-Shaped C-aperture // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 28 June 2021 - 02 July 2021, DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494046
- [3] S. V. Krutiev; D. V. Lonkina; P. V. Makhno; A. B. Kleshchenkov; V. V. Makhno *Design and Fabrication of Compact Waveguide Filter with Complementary Split-ring Resonators (CSRR) // 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 25-29 April 2022, DOI: 10.1109/PIERS55526.2022.9792588
- [4] Zemlyakov, V.V., Zargano, G.F., Krutiev, S.V., Tyaglov, M.Y. *Electrodynamics Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide // Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, 61(12), pp. 915–923, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09947-0>
- [5] Viacheslav Zemlyakov, Sergey Krutiev, Mikhail Tyaglov, Valery Shevchenko *A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture // International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2019, 47(1), pp. 55–64, DOI: <https://doi.org/10.1002/cta.2566>

