

## ВВЕДЕНИЕ

Замедляющие системы (ЗС) традиционно используются в СВЧ электронике (лампах с бегущей и обратной волной (ЛБВ и ЛОВ)), а также в качестве радиоволновых элементов технологических приборов и устройств [1, 2]. Большинство ЗС обладают нормальной дисперсией, и только некоторые имеют в своей характеристике небольшие участки с аномальной дисперсией.

Известно, что наиболее широкой полосой обладает спиральная ЗС. Обычно в такой системе дисперсия нормальная, что накладывает ограничения на ширину ее полосы рабочих частот [3-5]. Расширение полосы частот ЗС обычно достигается за счет улучшения согласования с сопрягаемыми устройствами и элементами, снижения паразитных явлений в самих ЗС и т.п. [6]. Известен ряд работ по коррекции амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) спиральных ЛБВ с помощью экрана с продольной проводимостью, обладающего аномальной дисперсией, что позволяет также добиться некоторого уменьшения их габаритных размеров в целом [7].

Уменьшение габаритов СВЧ элементов с распределенными постоянными (ответвители, фильтры, резонаторы и др.) может быть достигнуто путем повышения, например, диэлектрической проницаемости подложки, на которой они изготовлены [8, 9]. Однако более существенный результат – уменьшение в десятки раз габаритов устройств, получается при выполнении проводников в виде ЗС.

Интерес к таким структурам закономерен, поскольку их применение, благодаря резонансным явлениям в диэлектриках с большой диэлектрической проницаемостью и эффекту замедления электромагнитных волн, позволяет создавать новые устройства с габаритными размерами значительно меньшими рабочих длин волн, обладающие улучшенными электрическими характеристиками и низкой стоимостью.

Проблема миниатюризации СВЧ устройств остро встала во второй половине прошлого века. Она была частично решена благодаря созданию

гибридных и объемных интегральных схем СВЧ. Однако в сравнении с активными твердотельными элементами, пассивные устройства наиболее трудно поддаются миниатюризации даже в случае планарных схем, из-за достаточно высоких потерь и существенных трудностей при широкополосном согласовании устройств. Использование же сосредоточенных элементов и комбинированных схем с распределенными и сосредоточенными элементами весьма ограничено из-за низкой добротности последних.

Одним из перспективных способов уменьшения продольных размеров устройств является создание конструкций ЗС с аномальной дисперсией. В этом случае с уменьшением частоты колебаний фазовая скорость уменьшается при сохранении электрической длины структуры, а наличие замедления позволяет сократить геометрическую длину устройства в целом при сохранении электродинамических характеристик и параметров [10]. Сложный характер распределения поля между проводниками ЗС позволяет, в зависимости от конфигурации, в широких пределах управлять дисперсионной характеристикой [11], что представляет интерес при создании антенно-фидерных устройств, направленных ответвителей, поглощающих нагрузок, фазовращателей с управлением магнитным полем, резонаторов и линий задержки, согласующих устройств и ряда других пассивных элементов радиоволновых и СВЧ трактов [12, 13].

В настоящей монографии впервые получено решение электродинамической задачи для спиральных ЗС, позволяющее обеспечить получение и управление аномальной частотной дисперсией; предложена методика численного исследования и компьютерного проектирования устройств на отрезках ЗС с аномальной дисперсией; показана возможность уменьшения геометрических размеров таких устройств прямо пропорционально величине коэффициента замедления, что позволило предложить новые конструкции устройств с продольными размерами, значительно меньшими рабочих длин волн при сохранении электродинамических характеристик и параметров: коаксиальных и

микроросковокых фидерных линий, а также собирательных линий коротковолновых антенн.

Монография состоит из четырех глав.

В первой главе проведен обзор физических и конструктивно-технологических особенностей СВЧ устройств на ЗС с аномальной дисперсией. Рассмотрены причины возникновения и возможные способы управления частотной дисперсией в спиральных системах с помощью продольно-проводящего экрана и экрана с емкостной проводимостью в азимутальном направлении. Отмечена возможность получения аномальной дисперсии с помощью связанных ЗС с противофазным возбуждением. На основе выполненного обзора показано, что создание конструкций ЗС с аномальной дисперсией является перспективным способом уменьшения продольных размеров СВЧ устройств, при сохранении их электродинамических характеристик и параметров.

Проанализированы существующие методы расчета, проектирования и компьютерного моделирования, которые могут быть использованы для определения дисперсионных характеристик и параметров СВЧ устройств на ЗС. Подчеркнута эффективность использования приближенно-аналитических моделей и методов, в частности метода, основанного на замене электродинамической структуры эквивалентной длинной линией и последующем определении её погонных параметров с учетом дисперсии.

Во второй главе проанализирована возможность применения приближенно-аналитических моделей и методов для расчета и проектирования СВЧ устройств на отрезках ЗС с аномальной дисперсией. В частности, рассмотрен метод эквивалентных длинных линий, основанный на замене электродинамической структуры трехпроводной эквивалентной линией, позволяющий относительно просто учитывать влияние параметров сред и геометрических размеров проводников на величину коэффициента замедления раздельно в каждой из областей, прилегающих к импедансному проводнику.

Дано теоретическое обоснование и расчет предложенных моделей коаксиальной и микрополосковой фидерных линий, а также модели фидерной линии на связанных ЗС с противофазным возбуждением, дисперсионные характеристики которых обладают аномальной дисперсией. Приводятся приближенно-аналитические соотношения для определения эквивалентных погонных емкостей и индуктивностей таких электродинамических структур, модифицирующие метод эквивалентных длинных линий с учетом их дисперсионных свойств. Для указанных расчетных моделей получены также выражения для оценки относительного замедления и волнового сопротивления.

Проведена оценка затухания в отрезках ЗС с различными типами проводимостей.

В третьей главе дан краткий обзор современных программных средств для электромагнитного моделирования электродинамических структур. Показано, что для компьютерного анализа вида распределений электрического и магнитного полей и характера их изменения с ростом частоты в СВЧ устройствах на ЗС наиболее эффективно использование программного пакета High Frequency Structure Simulator (HFSS) компании Ansoft, относящегося к 3-D моделирующим программам и реализованного на основе метода конечных элементов.

Проанализированы возможности и особенности алгоритма численного моделирования с помощью HFSS СВЧ устройств на базе ЗС. Даны результаты численного моделирования коаксиальной фидерной линии, выполненной на основе спиральной ЗС с аномальной дисперсией, получены наглядные распределения электрического и магнитного полей в продольном и поперечном сечениях структуры на частотах 20 и 40 МГц, подтверждающие и уточняющие полученные ранее данные приближенно-аналитического расчета.

Дано теоретическое обоснование и приведены результаты численного исследования с помощью программы MMANA-GAL v1.2 предложенных

собираетельных линий коротковолновых антенн диапазона 4,05-24,05 МГц, обладающих уменьшенными продольными размерами за счет выполнения на основе отрезков замедляющих систем с аномальной дисперсией, в частности, 20-элементной антенны с бегущей волной и 9-элементной логопериодической антенны.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований дисперсионных характеристик отрезков спиральных ЗС в экранах с изотропной и анизотропной проводимостью. Рассмотрены особенности измерения дисперсионных характеристик ЗС в режимах бегущей и стоячей волн с помощью панорамного измерителя КСВН и ослабления типа Х1-42. Дана оценка погрешности экспериментальных измерений.

В заключении сделаны выводы по монографии в целом.

Авторы выражают глубокую признательность доктору технических наук, профессору Пчельникову Ю.Н. за возможность обсуждения большинства проблем, затронутых в данной книге, что способствовало улучшению отдельных разделов и монографии в целом.