

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СПИРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАССЕИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА БИАНИЗОТРОПНОЙ МЕТАСРЕДЫ

Осинов О.В., Плотников А.М., Салимова Н.Р.

В работе проводится теоретическое исследование характеристик бианизотропного метаматериала на основе тонкопроволочных проводящих спиралей двух модификаций. Данные элементы периодически располагаются и одинаково ориентируются в среде-контейнере, образуя метасреду. Основная доля рассеянного поля приходится на азимутальную плоскость. В данной работе показаны результаты исследований влияния формы спиральных элементов на рассеивающие свойства метасреды: для однозаходных элементов имеется два основных лепестка, направленных в противоположные стороны по оси ОХ, на которой расположены элементы, а для четырехзаходных спиралей – четыре основных лепестка, ориентированных во взаимоперпендикулярных направлениях.

Ключевые слова: киральная среда, метаматериал, дифракция, азимутальное рассеяние, элемент Телледжена, модифицированный элемент Телледжена, энергосбережение, малоотражающее покрытие, защитное покрытие, метасреда.

Введение

Создание энергосберегающих устройств для накопления энергии электромагнитных волн, поступающих из внешней среды, и последующее ее преобразование в энергию постоянного тока является одной из самых важных задач электродинамики. В [1-2] предложена и промоделирована энергоконцентрирующая структура, представляющая собой планарный слой метаматериала, состоящего из среды-контейнера, внутри которого периодически расположены и одинаково ориентированы проводящие киральные микроэлементы, образующую матрицу.

Каждый такой элемент состоит из электрически малого рамочного излучателя, в зазор которого включен электрический вибратор. Рамка может быть как сосредоточенной в одной плоскости, так и распределенной по длине вибратора, при этом образуя спираль. Также было выяснено, что они обладают такими свойствами, как возможность изменения направления потока электромагнитного излучения и рассеяния падающего поля в азимутальной плоскости.

Несмотря на наличие новых теоретически предсказанных свойств киральных метаструктур, можно отметить важный недостаток – невысокий

КПД вследствие малого уровня азимутального рассеяния поля. В [3] сделана попытка увеличения уровня азимутального рассеяния за счет использования структур в резонансном режиме, однако полученные значения КПД все же являются недостаточными для эффективного сбора и преобразования энергии и построения систем вторичного электропитания с приемлемыми техническими характеристиками.

В настоящей работе показано, что путем введения одного дополнительного захода (развернутого на 180° по отношению к ориентации исходного) в элемент Телледжена, на основе которых строится метаструктура, можно получить практически двукратное увеличение относительного уровня азимутального рассеяния поля и, как следствие, КПД. Увеличение КПД производится без существенного усложнения геометрии структуры и ее изготовления. Введение еще двух и более дополнительных заходов в структуру спирали не приводит к увеличению общего КПД.

Постановка задачи

Рассмотрим общий принцип получения на электродинамической структуре максимально возможного уровня поля рассеяния [4-5]. Пусть имеется некоторая проводящая поверхность S , которая облучается полем падающей электромагнитной волны $\vec{E}^{(ext)}$. На такой структуре будет наводиться некоторая поверхностная плотность электрического тока $\vec{\eta}$, и для каждой точки поверхности S окажется справедливо следующее условие:

$$\eta_m \sim E_m^{(ext)}, \quad (1)$$

где η_m – поверхностная плотность электрического тока, означающее, что амплитуда возбуждаемого вектора плотности тока на структуре будет тем больше, чем больше амплитуда вектора напряженности электрического поля падающей волны.

Кроме того, хорошо известно [4-5], что чем больше площадь S , на которой полем падающей волны $\vec{E}^{(ext)}$ создается плотность тока $\vec{\eta}$, тем больше окажется интегральное значение тока, текущего по проводящей поверхности:

$$I_m \sim \vec{E}_m^{(ext)}, \quad (2)$$

где $I = \int_S \vec{\eta}(\vec{r}) d\vec{r}$.

В свою очередь, поле $\vec{E}(\vec{r})$, рассеиваемое структурой, является функцией наведенного интегрального тока \vec{I} :

$$\vec{E}(\vec{r}) = f(I), \quad (3)$$

а с учетом соотношений (1)-(3):

$$\begin{aligned} \vec{E} &= f(\vec{\eta}, S) = f(\vec{E}^{(ext)}, S); \\ \vec{E}^{(ext)} \uparrow \cup S \uparrow &\Rightarrow \vec{E} \uparrow. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, с увеличением площади облучаемой структуры и амплитуды падающей волны возрастает также поле рассеяния. Из последнего утверждения следует вывод о том, что геометрическая площадь поверхности кирального элемента должна быть максимальной.

Подойдем к задаче с точки зрения технологической реализации элементов, а именно, оценим, при каких условиях возможно выполнение условия $S_{эл} \rightarrow \max$. Конструкция элемента предполагает размещение тонкопроволочного проводника на диэлектрическом каркасе-оправке

(предполагается, что материальные параметры среды-контейнера и оправки одинаковы). Увеличение площади поверхности элемента в этом случае теоретически достижимо за счет:

- увеличения диаметра проводника d ;
- увеличения числа витков N ;
- увеличения числа заходов (плеч) в элементе.

Расчет характеристик рассеяния элемента Телледжена показывает, что предъявляемые требования к уровням осевого и азимутального поля рассеяния удовлетворяются только при реализации условия в). При выполнении условий а) и б) наблюдается увеличение уровня осевого рассеяния и уменьшение уровня бокового, то есть ухудшение характеристик рассеяния, вплоть до непригодности элемента к работе в структуре концентратора.

С учетом вышеизложенного, а также специфики конфигурации элементов Телледжена можно сделать вывод о том, что реализация условия в) возможна только в случае модифицированных элементов (то есть цилиндрических объемных спиралей), причем значение N_{\max} ограничено исключительно сложностью технологического цикла и возрастанием стоимости изготовления метаструктур.

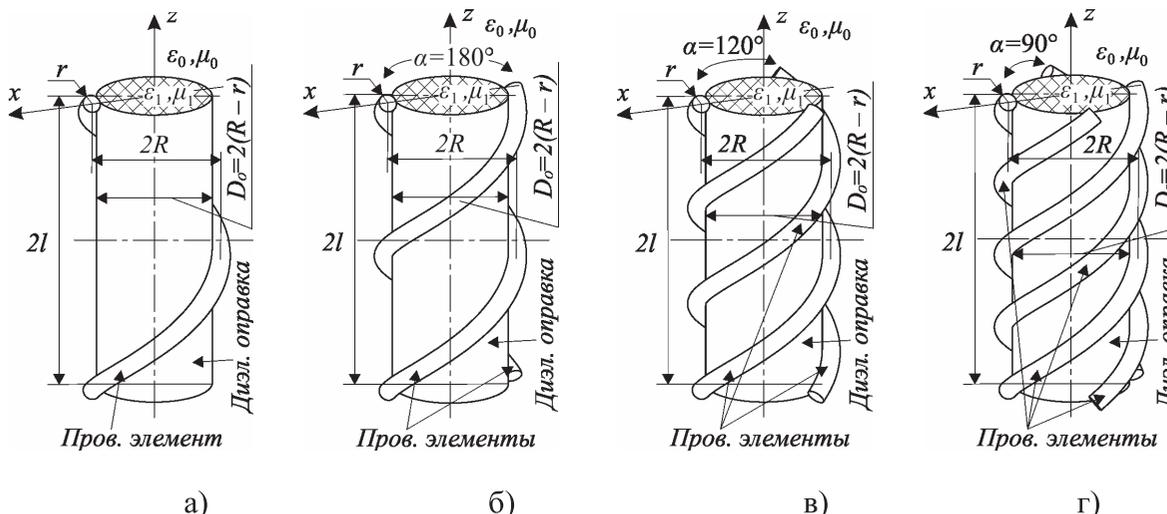


Рис. 1. Виды модифицированных элементов Телледжена: а) – однозаходных, б) – двухзаходных, в) – трехзаходных, г) – четырехзаходных

Авторами проанализированы четыре вида модифицированных элементов Телледжена, схематичные эскизы которых представлены на рис. 1. С технологической точки зрения наиболее быстрым и дешевым в изготовлении будет элемент с минимальным числом заходов, то есть $N = 1$.

Выбирать тот или иной вид элемента для построения концентратора следует, используя комплексный подход с оценкой оптимального соотношения «цена – качество – характеристики».

Таким образом, резюмируя вышеизложенные факты, можно сделать вывод о том, что для предельного снижения стоимости СВЧ-концентратора следует использовать модифицированные элементы Телледжена в спиральном исполнении.

Оптимизация характеристик матрицы элементов

Понятие киральной метасреды предполагает наличие контейнера, внутри которого некоторым

образом расположены и ориентированы составляющие ее элементы. Для построения СВЧ-концентратора в качестве таких элементов используются модифицированные элементы Телледжена, расположенные в виде периодической структуры (матрицы) с одинаковой ориентацией вдоль оси OZ . Такая структура является бианизотропной.

При построении подобной структуры и моделировании ее электродинамических характеристик необходимо провести количественную оценку наряду с качественной. После этого требуется выполнить оптимизацию характеристик структуры по критерию максимума азимутального и минимума осевого рассеяния поля. Подобная оптимизация выполняется по аналогии с предыдущим случаем одиночного элемента, однако здесь речь идет о варьировании расстояния между элементами S матрицы для выбора оптимального, притом что параметры самих элементов $2l$ и R для данной задачи берутся оптимальными.

На рис. 2 приведены диаграммы рассеяния (ДР) матрицы модифицированных элементов Телледжена размером 7×7 . Геометрические параметры элементов взяты оптимальными. Обязательным условием является проведение анализа поведения поля рассеяния в окрестностях точек найденных оптимальных параметров. Это необходимо сделать для оценки степени ухода качественных характеристик структуры при переходе от одиночного элемента к матрице за счет взаимного влияния элементов.

Из рис. 2 следует, что основная доля рассеянного поля приходится на азимутальную плоскость XOY – плоскость слоя метаструктуры.

Для случаев рис. 2а и рис. 2б характерным является наличие двух основных «лепестков», направленных в противоположные стороны оси OX , на которой расположены элементы. Максимумы рассеяния поля возникают в направлениях, соответствующих оптимальным расстояниям между элементами $S = S_{opt}$. В направлениях же под углом 45° к осям x и y (по диагоналям в азимутальной плоскости XOY) наблюдаются минимумы поля рассеяния, что связано с тем обстоятельством, что условие оптимальности расстояния между элементами здесь не соблюдается. Действительно, с учетом квадратной матрицы 7×7 расстояние между элементами в этих направлениях:

$S = \sqrt{2}S_{opt}$, то есть практически в полтора раза больше оптимального. Выводом из вышеизложенного является то, что в случае $S_{diag} = S_{opt}$ для метасреды будет наблюдаться поворот ДР на угол $\alpha = \arcsin(S/S_{diag}) = \arcsin(1/\sqrt{2}) = \pi/4$.

Форма лепестков ДР указывает на узкую угловую апертуру, в которой сосредоточена основная

энергия рассеяния поля. В случаях рис. 2в и рис. 2г наблюдается уже четыре лепестка, ориентированных в направлениях $+X$ и $-X$ и $+Y$ и $-Y$ плоскости XOY соответственно. Очевидно, что площадь таких ДР, которая показывает интегральную энергию, рассеиваемую метаструктурой в заданном диапазоне телесного угла, будет больше, чем у ДР на рис. 2а и рис. 2б.

Весьма интересны полученные результаты с точки зрения взаимного расположения лепестков ДР. Это расположение для случая рис. 2а свидетельствует о наличии симметрии относительно начала координат (по аналогии с функцией вида $f(x) = kx^{2n-1}$ – параболой нечетных степеней). Во всех остальных случаях рис. 2а и рис. 2б-г имеет место зеркальная (плоскостная) симметрия ДР (по аналогии с функцией $f(x) = kx^{2n}$ – параболой четных степеней).

Для метасреды справедливы принципы, лежащие в основе теории антенных решеток, то есть общая диаграмма рассеяния формируется как ДР одиночного элемента, умноженная на множитель решетки. Также очевидным является то обстоятельство, что даже без учета свойств диэлектрического контейнера и отсутствия явной границы раздела «контейнер – внешняя среда» наблюдается весьма узкая угловая апертура рассеяния – порядка 30° (по уровню $E = 0,707E_{max}$) для матрицы 7×7 . При увеличении матрицы и соответствующем увеличении размеров концентратора значение угловой апертуры рассеяния уменьшается.

Для определения оптимальных расстояний между соседними элементами матрицы проведем оптимизацию структуры, варьируя величину расстояния S между элементами. На рис. 2 проиллюстрированы результаты оптимизации матрицы модифицированных элементов Телледжена по расстоянию между элементами S для случая $l = l_{opt}^{(2)}$ и $R = R_{opt}^{(1)}$. Для сравнения взяты четыре вида элементов, внешний вид и начальные параметры которых приведены на рис. 1.

Из рис. 2а отчетливо видно, что оптимальное расстояние между элементами несущественным образом зависит от N , то есть от числа заходов (плеч) элементов. Необходимо отметить, что в точке $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ (на оси Z) наблюдается повышенный уровень поля рассеяния, значение которого в этой точке при некоторых S превышает уровень поля в точках $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, а также, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 90^\circ$. Однако это не сказывается существенным образом на КПД СВЧ-концентратора, поскольку повышенный уровень поля в осевых направлениях $+OZ$ и $-OZ$ наблюдается лишь в малом диапазоне углов.

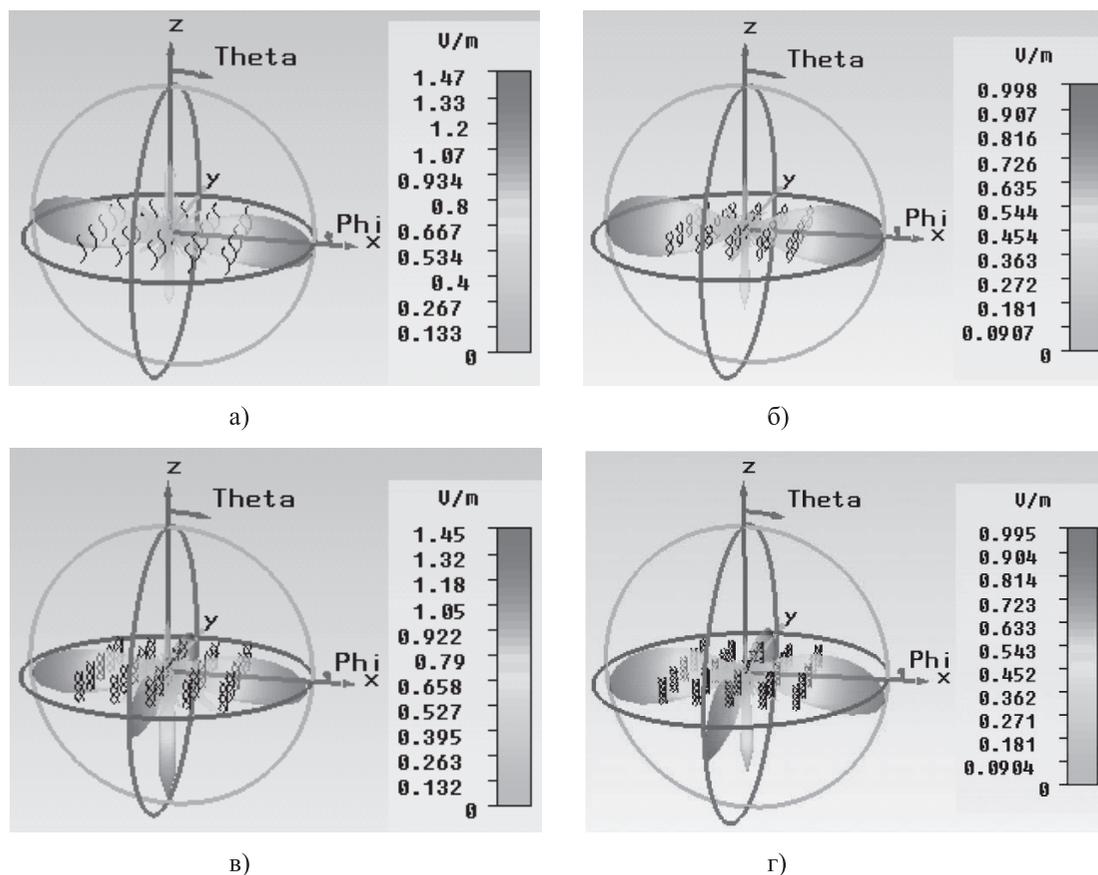


Рис. 2. 3D-диаграммы рассеяния электрического поля падающей электромагнитной волны на матрице размером 7×7 модифицированных элементов Телледжена: а) однозаходных; б) двухзаходных; в) трехзаходных; г) четырехзаходных

На рис. 3 представлены двумерные меридианальные и азимутальные сечения диаграмм рассеяния электрического поля падающей ЭМВ на матрице размером 7×7 модифицированных элементов Телледжена. Рассеяние в азимутальной плоскости затрагивает гораздо более значительный угловой сектор.

Таким образом, после определения интегральных значений мощности в осевых направлениях и сравнения ее уровня со значением, полученным при интегрировании поля в окрестностях точек азимутальной плоскости XOY , последнее значение оказывается несоизмеримо больше, что говорит нам о несущественности вклада паразитного осевого рассеяния в общую картину ДР, формируемую метасредой. Более того, вводя небольшую расстройку в значения найденных оптимальных параметров метаструктуры (в особенности S – расстояния между элементами матрицы), можно получить возможность регулировки КПД метасреды, то есть появляется возможность задавать долю отбора энергии от поля падающей электромагнитной волны

Выводы

В работе проведена количественная оценка уровней рассеяния при различном количестве заходов спирального элемента. Увеличение заходов в одном элементе приводит к появлению двух дополнительных лепестков в азимутальной плоскости, которые повышают КПД структуры в целом. Также определено количество заходов, при котором наступает максимум уровней бокового рассеяния поля, и, следовательно, дальнейшее увеличение числа заходов не имеет смысла.

Литература

1. Неганов В.А., Осипов О.В., Плотников А.М. Киральная метаструктура для концентрации сверхвысокочастотной энергии // Материалы IX МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». Челябинск, 2010. – С. 112.
2. Неганов В.А., Осипов О.В., Плотников А.М., Салимова Н.Р. Автоматизированная оптимизация характеристик кирального концентратора электромагнитной энергии в пакете CST MICROWAVE STUDIO // Материалы X МНТК

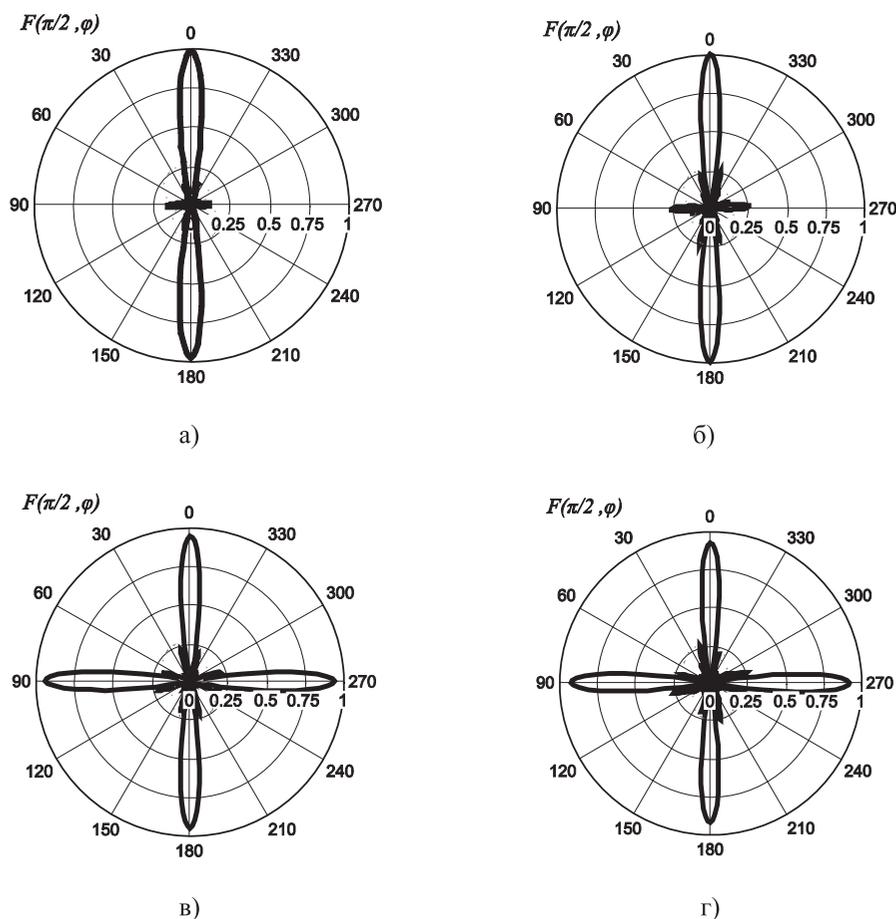


Рис. 3. Двумерные азимутальные сечения диаграмм рассеяния электрического поля падающей волны на матрице размером 7x7 модифицированных элементов Телледжена: а) однозаходных; б) двухзаходных; в) трехзаходных; г) четырехзаходных

- «Физика и технические приложения волновых процессов». Самара, 2011. – С. 188-189.
3. Осипов О.В., Плотников А.М., Салимова Н.Р. Использование эффекта азимутального рассеяния электромагнитных волн метаструктурой на основе элементов Телледжена в прикладных задачах электродинамики // ИКТ. Т.10, №1, 2012. – С. 8-15.
 4. Capolino F. Theory and Phenomena of Metamaterials. CRC Press / Taylor & Francis, 2009. – 992 p.
 5. Johnson R.C. Antenna Engineering Handbook. McGraw-Hill Inc., 1993. – 1512 p.

THE SPIRAL ELEMENTS SHAPE INFLUENCE ON THE BIANISOTROPIC METAMEDIA SCATTERING PROPERTIES

Babenko M.G., Lavrinenko I.N., Lyakhov P.A., Chervyakov N.I.

This paper deals with a theoretical research of the characteristics of bianisotropic meta-material that is based on two modifications of thin-wire conductive spiral. These elements are spaced periodically and oriented in the same media container forming metamedia. The main part of the scattered field are located on the azimuth plane. The paper shows the effect of the spiral elements shape on the scattering properties of the metamaterial. Monofilar helix has 2 main lobes that are directed in opposite directions along the x-axis where the elements are lo-cated. Quadruple helix has 4 main lobes that are oriented along the x-axis and y-axis respec-tively.

Keywords: chiral media, metamaterial, diffraction, azimuthal scattering, Tellegen's element, modified Tellegen's element, energy harvesting, low-reflecting cover, shield cover, metamedia.

Осипов Олег Владимирович, д.ф.м.н., профессор, проректор по информатизации и образовательным технологиям Поволжского государственного университета телекоммуникаций (ПГУТИ). Тел. (8-846) 332-61-99; 8-917-104-82-21. E-mail: o.osipov@psuti.ru

Плотников Александр Михайлович, к.т.н., научный сотрудник Кафедры основ конструирования и технологии радио и телекоммуникационных систем (ОКиТ РТС) ПГУТИ. Тел. 8-919-808-05-89. E-mail: pam@psati.ru

Салимова Назиля Раисовна, аспирант кафедры ОКиТ РТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 332-58-53. E-mail: azisa86@mail.ru

УДК 621.391.8

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОРРЕКТИРОВАНИЯ АЧХ- И ФЧХ-ЦЕПИ

Дежина Е.В., Ремизов С.Л., Рясный Ю.В., Тихобаев В.Г.

Рассмотрен метод коррекции импульсной характеристики (КИХ) цепи КИХ-фильтром. При анализе используется импульсная характеристика цепи, анализ ведется в частотной области, при этом используются левосторонние матрицы, сформированные из отсчетов входного сигнала, импульсной характеристики, отсчетов выходного сигнала и их дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Ключевые слова: коррекция характеристик, использование импульсной характеристики, дискретное преобразование Фурье.

Введение

Вопросами корректирования амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик электрических цепей уделялось и уделяется в настоящее время повышенное внимание, поскольку вид этих характеристик определяет линейные амплитудные и фазовые искажения передаваемых сигналов. Решение задачи корректирования характеристик проводится, как правило, во временной области, используя импульсную характеристику цепи [1]. Такой подход требует больших временных затрат и обеспечивает не очень высокую точность корректирования характеристик. Выравнивание характеристики в частотной области является предпочтительной процедурой коррекции для каналов, которые имеют очень длинную импульсную характеристику [2]. По сравнению с временным выравниванием она имеет меньшую сложность вычислений и лучшие свойства сходимости.

Методы корректирования характеристик канала в частотной области делятся на три основные группы в соответствии с допущениями, существующими для канала:

- импульсная характеристика канала известна получателю;

- импульсная характеристика неизвестна, но предполагается постоянной при передаче одного пакета;

- импульсная характеристика неизвестна и при передаче одного пакета изменяется.

В данной работе рассмотрен метод корректирования частотных характеристик квазистатических каналов, для которых значение характеристик во время передачи одного пакета можно считать постоянным. Для большинства методов коррекции характерно задание требований к сквозной характеристике канала в частотной области, как $H_{ид} = 1$ и определение коэффициентов корректирующего устройства при передаче каждого пакета [3-4]. В рассматриваемом методе требования предъявляются к импульсной характеристике сквозного канала и настройка коэффициентов КИХ-фильтра выполняется в адаптивном режиме.

Постановка задачи

Пусть имеется канал связи, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики которого неизвестны и могут изменяться под воздействием различных факторов (давление, влажность, температура, излучение и т.п.). Необходимо разработать метод и на основе метода – устройство корректирования характеристик.

Теория

Для решения поставленной задачи необходимо определить фазочастотную и амплитудно-частотную характеристики цепи или ее импульсную характеристику. В большинстве случаев определяют импульсную характеристику. Для этого на вход канала связи подается сигнал $x(t)$ в виде периодической последовательности импульсов малой длительности (длительность импульсов на несколько порядков меньше периода следования