

СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАЗВЯЗКИ АНТЕНН

STRUCTURES OF THE ANTENNA SPACE DECOUPLING

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы построения импедансных структур пространственной развязки антенн. Приводятся некоторые теоретические и экспериментальные результаты анализа свойств импедансных структур различных типов.

**Summary.** The questions of the creation of impedance structures of the antenna space decoupling are considered. Some theoretical and experimental results of the analysis of several types of impedance structures are presented.

Возрастание требований по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС), сосредоточенных в пределах ограниченного по размерам пространства, приводит к необходимости снижения взаимного влияния близкорасположенных антенн этих средств. С этой целью используются, например, такие традиционные методы обеспечения ЭМС, как частотная и временная селекция [1,2], если же спектральные и временные характеристики излучаемых и принимаемых антеннами электромагнитных полей близки или совпадают, то применяют методы пространственной и поляризационной селекции [3].

С той же целью эффективно применяется размещение в области между близкорасположенными антеннами специальных "импедансных" структур, которые называют структурами пространственной развязки антенн или, для краткости, "развязывающими структурами" [4]. Известны многие публикации (см., например, [5-7]), в которых на простых теоретических моделях анализируются свойства подобных структур, однако экспериментальные исследования встречаются крайне редко. Настоящая статья предполагает частично восполнить этот пробел.

**Конструкции и параметры развязывающих структур.** Конструктивно структуры пространственной развязки антенн, расположенных на общей поверхности, могут быть плоскими (рис. 1 а), выпуклыми или ленточными (рис. 1,б), иметь преимущественно реактивный характер поверхностного импеданса, либо содержать поглотитель (комплексный импеданс).

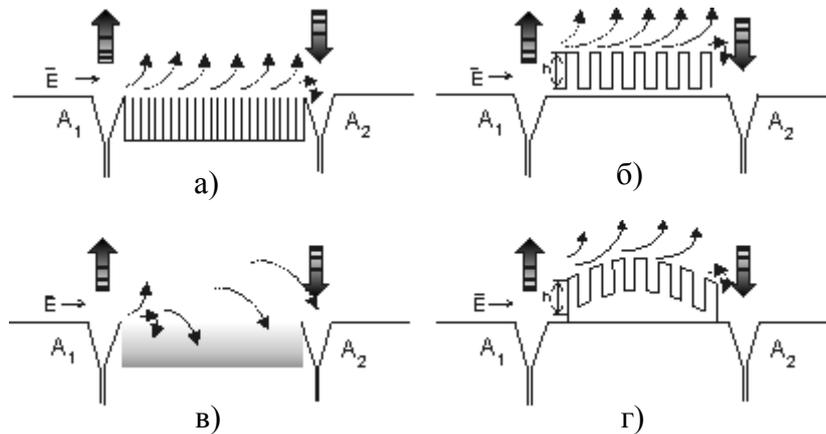


Рисунок 1 – Профили развязывающих структур:

(а – ребристая, б – ленточная, в – с поглощением, г – изогнутая ленточная)

Импедансной обычно называют такую структуру, для которой электродинамические свойства ее поверхности могут быть охарактеризованы импедансными граничными условиями, отражающими связь между касательными составляющими векторов на поверхности структуры.

$$[\vec{n}, \vec{E}] = -\dot{\rho}[\vec{n}, \vec{H}], \tag{1}$$

где  $\dot{\rho}$  – сторонний поверхностный импеданс;  $\vec{n}$  – орт нормали к поверхности  $S$ , направленный внутрь тела, квадратными скобками отмечено векторное произведение.

Если рассматриваемые области не содержат сторонних источников (свойство пассивности), то условие физической осуществимости (реализуемости) поверхностного импеданса имеет вид:

$$\operatorname{Re} \dot{\rho} \geq 0 \quad (2)$$

Следовательно, физически реализуемые значения поверхностного импеданса лежат в правой комплексной полуплоскости (рис. 2). Если  $\operatorname{Im} \dot{\rho} > 0$ , то импеданс называют индуктивным, и, если  $\operatorname{Im} \dot{\rho} < 0$ , то емкостным.

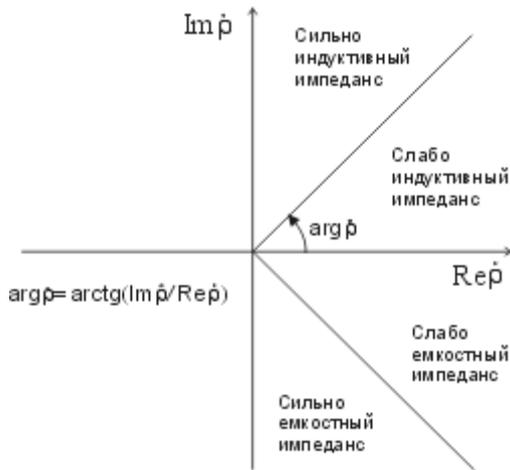


Рисунок 2 – Плоскость комплексного импеданса

Над поверхностями с разным импедансом электромагнитные волны распространяются различным образом. Так, средний и слабо индуктивный характер поверхностного импеданса способствуют возникновению поверхностной волны, при этом развязывающие свойства структуры значительно ухудшаются.

В противоположность этому, при сильно индуктивном характере поверхностного импеданса происходит "срыв" поверхностной волны, а при емкостном – поверхностная волна не только не возникает, а наоборот, происходит «отталкивание» поля от поверхности. При этом развязывающие свойства улучшаются и хорошо выражены эффекты «взлетной» и «посадочной» площадки, следовательно эффективным становится применение

небольших по размерам структур в областях, примыкающих к раскрывам антенн.

Таким образом, импедансные структуры могут различаться по форме поверхности (плоские, выпуклые, ленточные) и характеру импеданса (чисто реактивный импеданс, комплексный импеданс, однородный и неоднородный импеданс).

В качестве характеристики свойств структуры, применяемой для развязки двух антенн, используется понятие (абсолютного) коэффициента пространственной развязки антенн

$$\eta_a = 10 \lg \frac{P_a}{P_{пр}} \quad (4)$$

где  $P_a$  – мощность, подведенная к передающей антенне,  $P_{пр}$  – мощность в нагрузке приемной антенны. Величина  $\gamma_a = 1/\eta_a$ , обратная коэффициенту развязки, называется (абсолютным) коэффициентом связи.

В некоторых случаях более наглядной оказывается величина "выигрыша" – относительного коэффициента развязки  $\eta_0$ , равного отношению мощностей в нагрузке приемной антенны при отсутствии ( $P_{пр0}$ ) и при наличии ( $P_{прs}$ ) импедансной структуры между антеннами:

$$\eta_0 = 10 \lg \frac{P_{пр0}}{P_{прs}} \quad (5)$$

Относительный коэффициент развязки характеризует электродинамические свойства самой импедансной структуры (в отличие от  $\eta_a$ , в котором одновременно со свойствами структур учитываются и характеристики антенн). Обратная ему величина  $\gamma_0 = 1/\eta_0$  называется относительным коэффициентом связи.

**Анализ развязывающих свойств импедансной структуры.** При анализе свойств плоских однородных поглощающих развязывающих структур можно использовать импедансную модель, примером которой служит решение следующей двумерной задачи. Пусть на бесконечном идеально проводящем экране, расположенном в плоскости  $xoy$ , имеется импедансная полоса  $\Delta$ , параллельная оси  $x$  и лежащая в плоскости экрана (рис. 3).

«Раскрыв» передающей антенны имитируется областью  $d$ , шириной  $\lambda$ , с постоянным чисто активным поверхностным импедансом ( $Re \dot{\rho}_n = 1$ ,  $Im \dot{\rho}_n = 0$ ), в которой расположены источники в виде нитей магнитного тока единичной амплитуды. «Раскрыв» приемной антенны имитируется областью  $\delta$ , шириной  $\lambda$ , с постоянным чисто активным импедансом ( $Re \dot{\rho}_n = 1$ ,  $Im \dot{\rho}_n = 0$ ). Обе области вплотную примыкают к импедансной полосе  $\Delta$ .

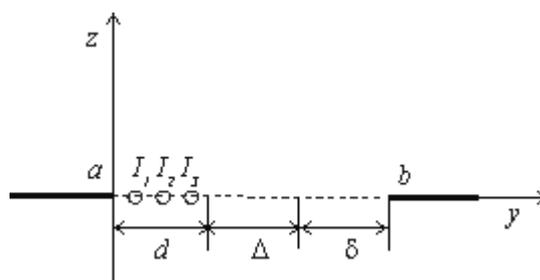


Рисунок 3 – Геометрия задачи

В такой постановке задача решается методом Крылова-Боголюбова применительно к интегральному уравнению для плотности электрического поверхностного тока на импедансной полосе [8].

Интегральное уравнение сводится к системе линейных алгебраических уравнений, путем численного решения которой находится распределение плотности поверхностного тока и рассчитывается относительный коэффициент развязки  $\eta_0$

$$\eta_0 = \frac{\int_V |\bar{F}(x, y, z, \rho_0)|^2 dV}{\int_V |\bar{F}(x, y, z, \rho)|^2 dV}.$$

Векторная функция  $\bar{F}(x, y, z, \dot{\rho})$  означает комплексную амплитуду вектора  $\bar{E}$  (либо  $\bar{H}$ ) электромагнитного поля в области  $V$  при наличии развязывающей структуры с поверхностным импедансом  $\dot{\rho}$ , а  $\rho_0$  – значение импеданса, принятое за эталон (например, в качестве эталона целесообразно принять  $\rho_0 = 0$ ).

На рис. 4 приведены зависимости величины  $\eta_0$  при разных значениях мнимой части комплексного импеданса в области  $\Delta$ .

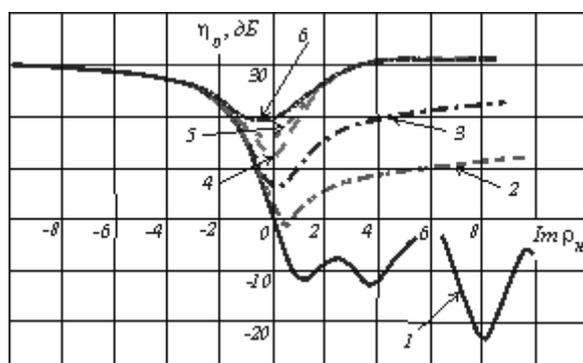


Рисунок 4 – Результаты расчетов коэффициента подавления:

- 1 –  $Re \dot{\rho}_n = 0,0$ ; 2 –  $Re \dot{\rho}_n = 0,175$ ; 3 –  $Re \dot{\rho}_n = 0,3$ ; 4 –  $Re \dot{\rho}_n = 0,8$ ,  
5 –  $Re \dot{\rho}_n = 1,0$ ; 6 –  $Re \dot{\rho}_n = 1,4$

Показанные зависимости позволяют отметить следующую закономерность: наличие положительной действительной части комплексного импеданса на полосе  $\Delta$  практически не влияет на коэффициент развязки при значениях  $Im \dot{\rho}_n \leq -1,5$ , слабо влияет при  $-1,5 \leq Im \dot{\rho}_n \leq -0,5$  и существенно влияет, если  $Im \dot{\rho}_n > -0,5$ .

Это приводит к мысли о разном механизме снижения связи между антеннами в случае комплексного импеданса: "отталкивание" поля при отрицательном значении  $Im \dot{\rho}_n$  и "поглощение" при положительном. Можно утверждать, что структуры с "чисто активным" импедансом ( $Im \dot{\rho}_n \cong 0$ ) обладают невысокой эффективностью.

По мере роста действительной части импеданса имеет место сглаживание кривых и рост коэффициента подавления, что показывает возможность создания развязывающих устройств, обладаю-

щих повышенной широкополосностью. Однако, при этом нерешенным остается вопрос о конструктивной реализации заданных значений комплексного импеданса.

**Развязывающие структуры, применяемые на практике.** *Плоские однородные структуры.* Плоские однородные структуры пространственной развязки антенн могут быть реализованы в виде ребристой или "волноводной" структуры. Ребристая структура представляет собой ряд параллельных канавок, продольный размер которых значительно превышает длину волны, прорезанных в хорошо проводящей (металлической) поверхности, (рис. 5).

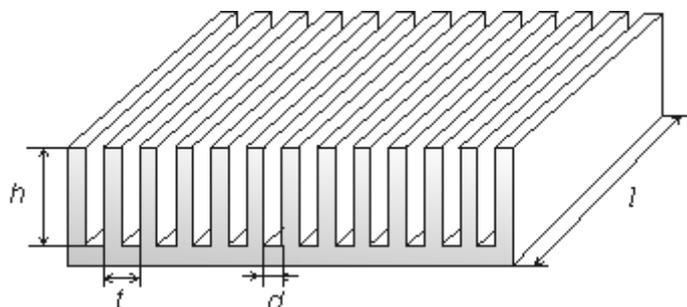


Рисунок 5 – Геометрия плоской однородной ребристой структуры

Для снижения отражений крайние части структуры могут быть заполнены поглотителем.

Период  $t$  ребристой структуры, ее поперечный размер  $l$ , а также ширина канавки  $d$  должны удовлетворять условиям  $t \ll \lambda$ ,  $l \gg \lambda$ ,  $d < 0,1\lambda$ . Структуры "волноводного" типа (рис. 6) имеют относительно небольшой поперечный размер ( $a \approx \lambda/2$ ) и представляют собой ряд узких прямоугольных закороченных волноводов.

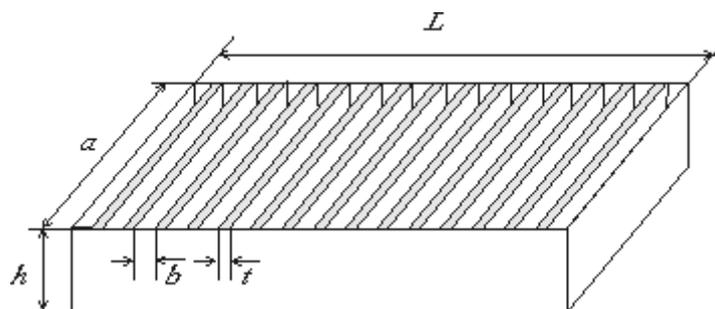


Рисунок 6 – Геометрия плоской структуры "волноводного" типа

Обычно, анализируя импедансные характеристики ребристой структуры в целом, и одного ее элемента, в частности, обычно опираются на предположение существования в канавке только одного (основного) типа волны. Рассматривая сечение одной канавки, как замкнутую на конце двухпроводную линию, поверхностный импеданс  $\dot{\rho}$  такой канавки приближенно выражают формулой:

$$\dot{\rho} = i \frac{d}{t} W \operatorname{tg}(kh), \quad (8)$$

где  $W$  – волновое сопротивление двухпроводной линии;  $h$  – глубина канавки (для "волноводных" структур в (8) следует заменить волновое число  $k = 2\pi/\lambda$  на  $\beta = 2\pi/\lambda_{\text{в}}$ , где  $\lambda_{\text{в}} = k/\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}$  – длина волны в волноводе).

При более строгом анализе характеристик структур следует основываться на понятии эквивалентного поверхностного импеданса [9], для расчета которого необходимо учитывать несколько первых высших типов волн.

Из формулы (10) следует, что при глубине канавки  $h < \lambda/4$  импеданс имеет индуктивный характер, а при  $\lambda/4 < h < \lambda/2$  – емкостный характер, следовательно, развязка антенн может быть обеспечена лишь в ограниченной полосе частот.

При этом, для ребристых структур произведение  $kh$  прямо пропорционально частоте и частотная зависимость импеданса имеет периодический характер, что обуславливает ухудшение развяз-

ки антенн на кратных частотах. Для "волноводных" структур, где  $\beta$  меняется с частотой нелинейно, указанного недостатка можно частично избежать.

*Ленточные структуры.* В антенной технике часто применяются линейные замедляющие структуры. К ним относятся, например, структуры, выполненные в виде комбинации штырей, меандровые структуры (рис. 1, б) и ряд других. При определенном соотношении геометрических параметров вдоль структуры может распространяться направляемая (медленная) волна.

Однако, изменив соотношения размеров структуры и длины волны можно добиться срыва направляемой волны. При этом электромагнитное поле отталкивается от структуры и она приобретает свойства развязывающей. Конструктивные размеры и вес подобных структур существенно меньше, чем у плоских, поэтому они могут применяться не только в сантиметровом, но и в более длинноволновых диапазонах. В дальнейшем будем называть их, в отличие от плоских структур, ленточными развязывающими структурами.

Как и в плоском случае, развязывающие свойства ленточной структуры проявляются при  $h$  ("глубине" меандра) в пределах от половины до четверти длины волны. Период такой структуры не должен превышать четверти длины волны ( $t < \lambda/4$ ).

Максимальное значение коэффициента развязки достигается, если  $h \approx \lambda/4$ , при этом ленточные структуры обеспечивают больший коэффициент развязки, чем плоские структуры той же длины. Это можно объяснить тем, что такие структуры располагаются не на поверхности, а в объеме, определяющем взаимную связь антенн, при этом они не только "отталкивают" поле вверх, но и "расталкивают" во все стороны.

*Плоские неоднородные структуры.* Плоские однородные развязывающие структуры, реализуемые, например, в виде ребристых конструкций с постоянной шириной и глубиной канавок, работают в полосе частот с перекрытием  $f_{\max} / f_{\min} < 2$ , хотя в ряде случаев этого недостаточно.

Одним из возможных способов расширения полосы частот развязки является применение неоднородных конструкций, в частности ребристых структур с переменной глубиной канавок (рис. 7).

Особенностью такой структуры является то, что глубина канавок в ней максимальна вблизи антенн и уменьшается по мере приближения к середине области пространства между антеннами.

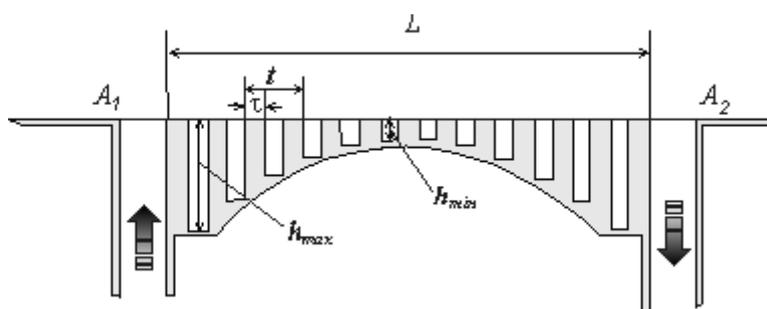


Рисунок 7 – Профиль плоской неоднородной ребристой структуры

При этом область структуры с большей глубиной канавок «работает» на низкочастотном краю рабочего диапазона, а по мере роста частоты эта область сдвигается все дальше и дальше от антенн и на высокочастотном краю диапазона более эффективно действует часть структуры расположенная ближе к центру.

**Экспериментальные результаты.** Измерения частотной зависимости абсолютного коэффициента связи в присутствии структур пространственной развязки антенн проводились в сантиметровом диапазоне волн. Взаимное расположение импедансной структуры, приемной и передающей антенн (открытые концы прямоугольных волноводов сечением  $(23 \times 10) \text{ мм}^2$ ) показано на рис. 8.



Рисунок 8 – Пример расположения плоской ребристой структуры

На рис. 9 приведенные кривые, иллюстрирующие результаты измерений частотной зависимости абсолютного коэффициента связи в присутствии разных структур: двух плоских однородных, отличающихся глубиной канавки, и неоднородной.

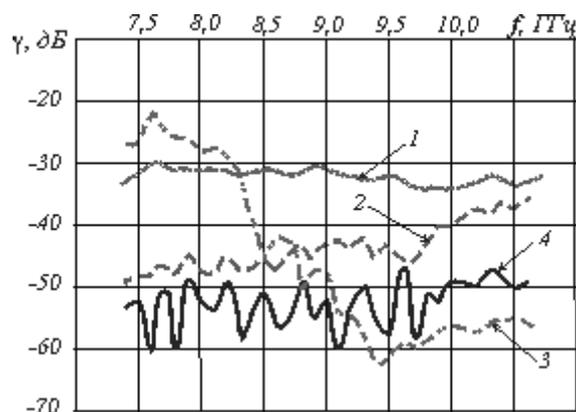


Рисунок 9 – Частотная зависимость коэффициента связи:

1 – без структуры; 2 и 3 – с плоской однородной ребристой структурой при глубине канавок  $h = 15$  мм и  $h = 7$  мм; 4 – с плоской неоднородной структурой

Расстояние между ближайшими краями антенн равно длине структуры  $L$  и составляло 120 мм. Для плоской однородной ребристой структуры ширина  $l$  равна 200 мм, период  $t = 5$  мм, толщина ребер  $\tau = 0,25$  мм.

Частотные зависимости коэффициента связи в присутствии такой ребристой структуры измерены при двух значениях глубины канавки:  $h = 15$  мм (кривая 2) и  $h = 8$  мм (кривая 3). Заметно, что поведение этих кривых практически отражает частотную зависимость импеданса.

Результаты исследования неоднородной структуры (изображенной на рис. 7) также иллюстрирует рис. 9 (кривая 4), при этом в отличие от однородной структуры в глубине канавок переменная:  $h_{\max}$  и  $h_{\min}$  равны 15 мм и 6 мм соответственно.

Основываясь на приведенных результатах нетрудно заметить, что неоднородная структура обеспечивает «выигрыш» в развязке во всем рассмотренном частотном диапазоне не менее 16 дБ, тогда как однородные структуры эффективны только в его части. Это подтверждает предположение о том, что плоская ребристая структура с переменной глубиной канавок обладает большей широкополосностью по сравнению с однородной структурой.

Аналогичные измерения были проведены в присутствии между антеннами (открытые концы прямоугольных волноводов сечением  $(28,5 \times 12,6)$  мм<sup>2</sup>) развязывающей структуры «волноводного» типа. Сама структура была образована пятью короткозамкнутыми прямоугольными волноводами с параметрами (см. рис. 6):  $a = 36$  мм (поперечный размер структуры),  $b = 5$  мм,  $h = 15$  мм и  $t = 2$  мм. Следовательно, продольный размер такой структуры  $L$  составлял примерно 22 мм. Результаты измерения частотной зависимости абсолютного коэффициента связи в присутствии между антеннами структуры «волноводного» типа приведены на рис. 10.

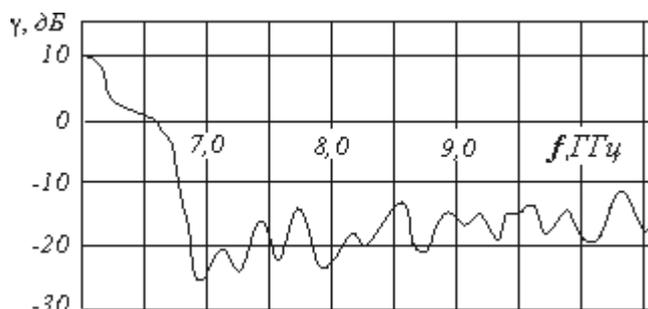


Рисунок 10 – Относительный коэффициент связи в присутствии структуры «волноводного» типа

Приведенные результаты подтверждают возможность использования таких структур для целей развязки антенн. При этом нужно отметить, что ширина области развязки у рассматриваемых структур меньше, чем у ребристых, однако средний уровень достигаемой развязки выше.

Наличие дополнительного параметра (ширины структуры  $a$ ) позволяет более гибко управлять характеристиками структуры, в частности – снижать уровень паразитной связи на кратных частотах.

Измерения частотной зависимости абсолютного коэффициента связи ленточных меандровых развязывающих структур двух типов: прямой (см. рис. 1,б) и выгнутой (см. рис. 1,г) показаны на рис. 11.

Ленточные структуры устанавливались в плоскости проходящей через центры раскрывов антенн на высоте около 5 мм над металлической поверхностью.

Для сравнения на этом же рисунке приведены кривые для случая размещения между антеннами плоской ребристой структуры с параметрами:  $h = 8$  мм,  $t = 4$  мм,  $\tau = 0,5$  мм.

Видно, что ленточные структуры несколько более широкополосны по сравнению с плоскими ребристыми структурами и позволяют добиться снижения коэффициента связи между близкорасположенными антеннами примерно на 20...30 дБ, причем более эффективны выгнутые структуры.

Широкополосность и большая развязка, обеспечиваемые ленточными структурами обусловлены тем, что такие структуры взаимодействуют с электромагнитным полем в некотором объеме, тогда как плоские структуры взаимодействуют «поверхностно».

Проведенный на основе импедансной модели теоретический анализ установил основные закономерности поведения характеристик структур пространственной развязки с чисто реактивным, а также с комплексным характером импеданса, что позволяет использовать полученные результаты при разработке конструкций импедансных развязывающих структур с расширенной полосой рабочих частот и повышенным значением развязки.

Результаты экспериментальных исследований характеристик плоских ребристых однородных и неоднородных, "волноводных" и ленточных структур дают возможность судить о конструктивных особенностях и реальных возможностях таких структур для целей обеспечения ЭМС близко расположенных антенных систем.

### Литература

- 1 Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
- 2 Виноградов Е.М., Винокуров В.И., Харченко И.П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – Л.: Судостроение, 1986. – 264 с.
- 3 Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.
- 4 Терешин О.Н., Белов А.С. К вопросу по развязке антенн щелевого типа с помощью импедансной структуры, лежащей в плоскости щелей // Известия вузов. Сер. «Радиотехника». – 1960. – № 3.
- 5 Кюркчан А.Г. Связь между антеннами в присутствии ребристых структур // Радиотехника и электроника. – 1977. – № 7.
- 6 Марцафев В.В., Швайко И.Г. Влияние ребристых структур на взаимодействие антенных решеток – // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1982. – № 2.
- 7 Цалиев Т.А., Черенков В.С. Анализ развязывающих свойств однородной импедансной полосы, расположенной на бесконечном экране // Радиотехника и электроника. – 1985. – № 1. – С. 165-167.
- 8 Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – М-Л: Энергия, 1967. – 376 с.
- 9 Цалиев Т.А., Черенков В.С. Возбуждение одиночной канавки и эквивалентный поверхностный импеданс ребристых структур // Радиотехника и электроника. – 1985. – № 9. – С. 1689-1694.

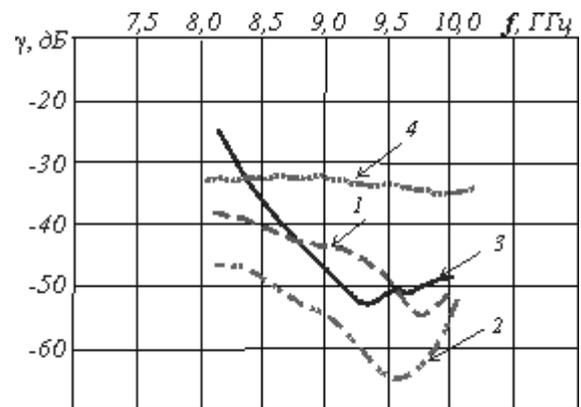


Рисунок 11 – Частотная зависимость коэффициента связи ленточных структур:

- 1 – линейная ленточная меандровая структура,
- 2 – выгнутая ленточная меандровая структура,
- 3 – плоская однородная ребристая структура,
- 4 – без структур