

УДК 621.372

Н.Д. Малютин, А.Г. Лоцилов, А.А. Ильин, А.Н. Малютин, И.В. Большанин

## Алгоритмы синтеза устройств на основе нерегулярных связанных полосковых линий по заданным частотным характеристикам

Описан алгоритм синтеза устройств на основе нерегулярных связанных линий по заданным частотным зависимостям  $s$ -параметров. Приведены расчетные и экспериментальные результаты реализации синтеза.

**Ключевые слова:** синтез устройств, нерегулярные связанные линии, алгоритмы синтеза.

В работе [1] представлено решение задачи анализа и синтеза топологии устройств формирования импульсов с заданными спектральными характеристиками. Устройства создаются на основе нерегулярных рельефных связанных полосковых линий (НРСПЛ). Их особенность состоит в том, что конструктивно связанные полоски располагаются на двух ортогонально расположенных подложках с разными диэлектрическими проницаемостями. Связанные проводники также выполнены в двух плоскостях, что позволяет сохранить возможность поверхностного монтажа элементов в составе устройства и в то же время обеспечить широкий диапазон вариации коэффициентов связи НРСЛ. При синтезе устройств в качестве прототипа берутся секции НРСЛ равной длины и ступенчато-неоднородными параметрами.

В настоящей работе проведено обобщение алгоритмов синтеза устройств на основе нерегулярных связанных полосковых линий по заданным частотным характеристикам. Исследованы устройства на основе секций НРСЛ с неодинаковыми продольными размерами секций. Подробно изложен вывод уравнений синтеза секций и устройств на основе НРСЛ по заданным частотным характеристикам. Приведены примеры построения функциональных устройств с 2D- и 3D-топологией.

### Эквивалентная схема секций и устройств

На рис. 1 показана эквивалентная схема устройств рассматриваемого типа.

Нерегулярные связанные линии (НСЛ) 1, 2 имеют в общем случае произвольные зависимости первичных параметров от продольной координаты. Входной сигнал подается с генератора  $E_1$ . Полезный сигнал формируется на одной из нагрузок  $z_2 - z_4$  в зависимости от функционального назначения устройства. Нагрузки  $z_1 - z_4$  и первичные параметры структуры выбираются таким образом, чтобы потери на отражение со стороны генератора были минимальны.

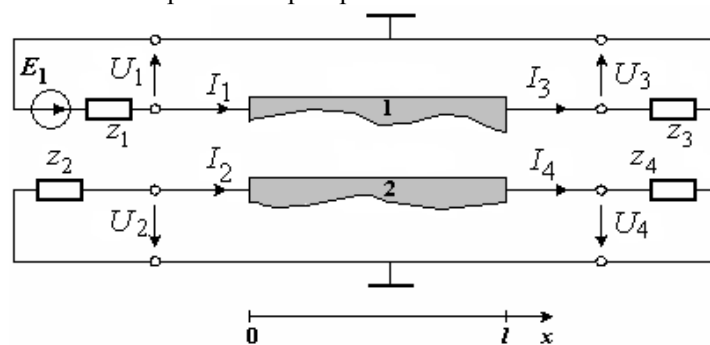


Рис. 1

### Исходные соотношения

Наиболее сложной частью задачи синтеза устройств на основе НРСЛ является отыскание матриц первичных параметров, которые зависят от продольной координаты. Остановимся на некоторых уточнениях алгоритма синтеза устройств рассматриваемого класса, представленного в работах [1–3].

С учетом граничных условий на входе и выходе устройства (см. рис. 1) запишем матричные уравнения, связывающие напряжения и токи на входе и выходе восьмиполосника:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ z_1^{-1} \cdot (E_1 - U_1) \\ -z_2^{-1} \cdot U_2 \end{bmatrix} = [as] \cdot \begin{bmatrix} U_3 \\ U_4 \\ z_3^{-1} \cdot U_3 \\ z_4^{-1} \cdot U_4 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $[as]$  – матрица передачи каскадно включенных отрезков НРСПЛ, находящаяся аналогично тому, как это сделано в работах [2, 4].

Сложив первое и третье, второе и четвертое уравнения в системе (1), осуществив преобразования, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} (1 - z_1^{-1})U_1 + E_1 z_1^{-1} - (as_{11} + as_{31} + as_{13}z_3^{-1} + as_{33}z_3^{-1})U_3 + (as_{12} + as_{32} + as_{14}z_4^{-1} + as_{34}z_4^{-1})U_4 = 0, \\ (1 - z_2^{-1})U_2 - (as_{21} + as_{41} + as_{23}z_3^{-1} + as_{43}z_3^{-1})U_3 + (as_{22} + as_{42} + as_{24}z_4^{-1} + as_{44}z_4^{-1})U_4 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Введем приближенные равенства  $U_2 \approx s_{21}U_1$ ,  $U_3 \approx s_{31}U_1$ ,  $U_4 \approx s_{41}U_1$ . Тогда система (2) примет вид

$$\begin{cases} (1 - z_1^{-1}) + E_1 z_1^{-1} U_1^{-1} - (as_{11} + as_{31} + as_{13}z_3^{-1} + as_{33}z_3^{-1})s_{31} + (as_{12} + as_{32} + as_{14}z_4^{-1} + as_{34}z_4^{-1})s_{41} = 0, \\ (1 - z_2^{-1})s_{21} - (as_{21} + as_{41} + as_{23}z_3^{-1} + as_{43}z_3^{-1})s_{31} + (as_{22} + as_{42} + as_{24}z_4^{-1} + as_{44}z_4^{-1})s_{41} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) позволяет при заданных элементах матрицы рассеяния  $s_{21}$ ,  $s_{31}$ ,  $s_{41}$  решить задачу отыскания первичных параметров. Если взять в качестве прототипа ступенчато-нерегулярную РСПЛ, тогда можно задать только максимальные значения коэффициентов передачи на заданных частотах.

При решении задачи можно ввести еще одно важное упрощение, приняв  $s_{41} \rightarrow 0$ . Тогда получаем систему уравнений в более компактном виде:

$$\begin{cases} (1 - z_1^{-1}) + E_1 U_1^{-1} z_1^{-1} - (as_{11} + as_{31} + as_{13}z_3^{-1} + as_{33}z_3^{-1})s_{31} = 0, \\ (1 - z_2^{-1})s_{21} - (as_{21} + as_{41} + as_{23}z_3^{-1} + as_{43}z_3^{-1})s_{31} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В первом уравнении системы (1) отношение  $E_1 U_1^{-1}$  следует брать равным единице, поскольку при синтезе закладывается идеальный вариант согласованного устройства.

Система уравнений (4) применительно к синтезу устройств на ступенчато-нерегулярных связанных линиях при одинаковых длинах секций НРСПЛ позволяет отыскать матрицы емкостей  $\mathbf{C}$  и индуктивностей  $\mathbf{L}$ , поскольку при этом образуется только два множества элементов матрицы передачи  $as$ , описывающих участки с сильной и слабой связью соответственно:  $as_{i,j}^{(1),(2)}$  ( $i=1,\dots,4; j=1,\dots,4$ ) [5]. При этом в качестве искомым параметров можно выбирать вместо матриц  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{L}$  вторичные параметры – коэффициенты емкостной и индуктивной связи  $k_C$ ,  $k_L$  и среднегеометрическое характеристическое сопротивление  $Z_0 = \sqrt{Z_{0e}Z_{0o}}$ , где  $Z_{0e}$ ,  $Z_{0o}$  – характеристические сопротивления синфазной и противофазной мод.

В случае произвольных соотношений продольных размеров секций задача вычисления первичных параметров усложняется. Проведем сначала анализ влияния неравенства продольных геометрических размеров на вид частотных зависимостей коэффициентов передачи  $s_{i,j}$  ( $i \neq j$ ).

#### Частотные характеристики устройств на основе секций с неравной длиной

Рассмотрим устройства – направленные ответвители с непериодически повторяющимися полосоми пропускания [3], построенные на НРСПЛ с варьируемыми соотношениями продольных размеров участков с сильной и слабой связью проводников. Был проведен анализ изменения частотных характеристик структуры, в которой изменялись конструктивные параметры в соответствии со схемой, показанной на рис. 2, где стрелками показано направление изменения продольных размеров  $l_1, \dots, l_5$  участков НРСПЛ с сильной и слабой связью. Первая итерация была взята из условия

$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5$ , вторая и последующие реализованы уменьшением размеров  $l_2, l_4$  вплоть до вырождения структуры в однородную рельефную связанную полосковую линию (РСПЛ).

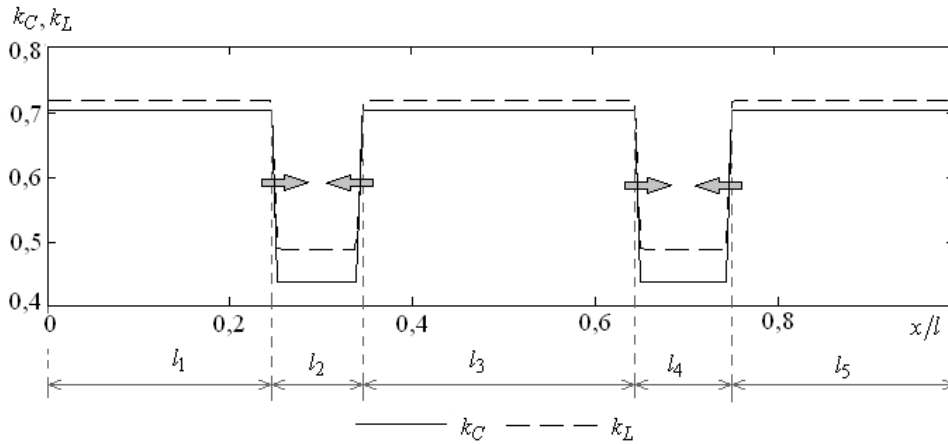
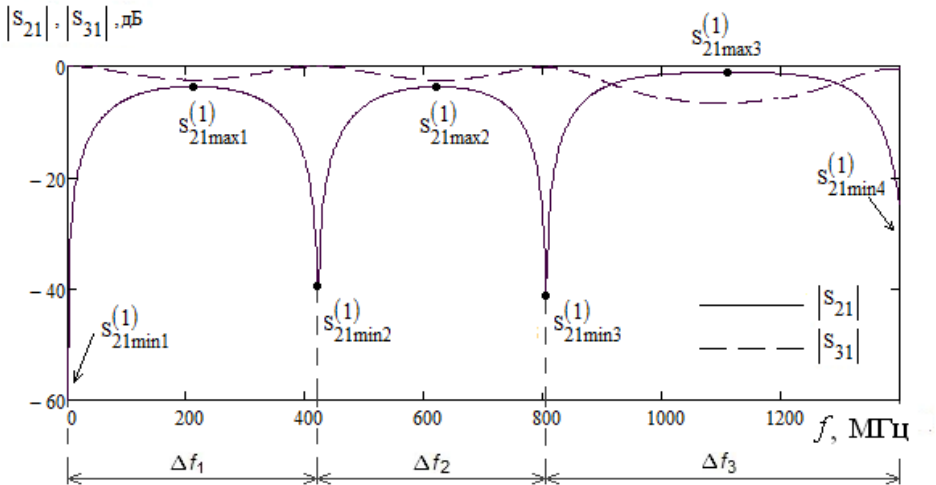
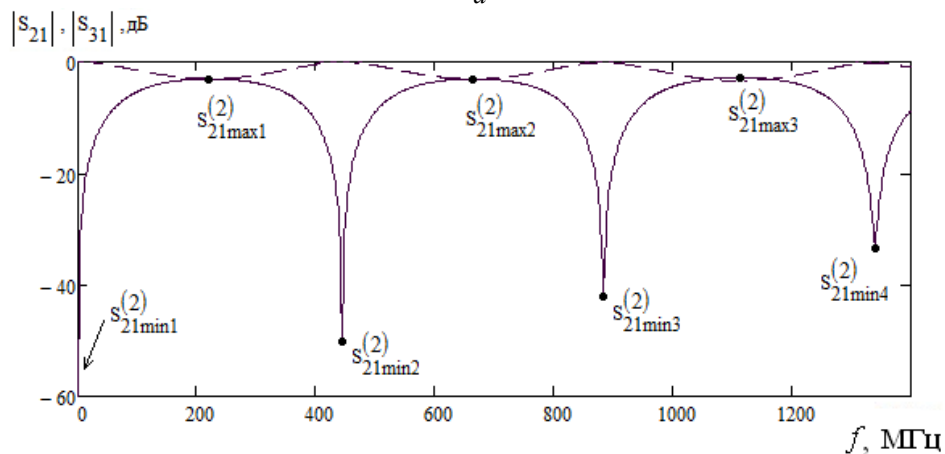


Рис. 2

Частотные зависимости коэффициентов передачи  $|s_{21}(f)|, |s_{31}(f)|$  при вариации  $l_2 = l_4$  показаны на рис. 3, где *а* – первая итерация; *б* – последняя итерация.



*а*



*б*

Рис. 3

На рисунках обозначены характерные точки на частотных характеристиках: максимумы коэффициента передачи из порта 1 в порт 2:  $s_{21max1}, s_{21max2}, s_{21max3}$ ; минимумы коэффициента пере-

дачи при тех же условиях:  $s_{21min1}$ ,  $s_{21min2}$ ,  $s_{21min3}$ . Всем характерным точкам поставлены в соответствие частоты. Анализ зависимостей  $s_{21}(f)$  показал, что с увеличением  $l_2$ ,  $l_4$  происходит расширение третьей полосы частот пропускания, первая и вторая полосы пропускания, напротив, уменьшаются, но в разной степени (рис. 4). Наиболее сильное влияние вариация  $l_2 = l_4$  сказывается на  $s_{21max3}$  (рис. 5). Величины  $s_{21min1}$ ,  $s_{21min2}$ , в отличие от  $s_{21max3}$ , с ростом  $l_2$  уменьшаются. Представленные зависимости  $|s_{21}(f)|$ ,  $|s_{31}(f)|$  позволяют проектировщикам аналогичных устройств ориентироваться во влиянии пространства изменяемых конструктивных параметров при оптимизации устройств 2D- и 3D-исполнения на основе нерегулярных связанных линий.

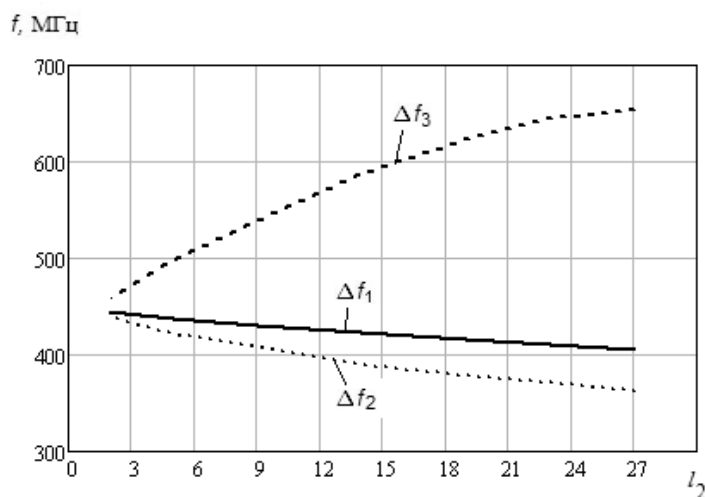


Рис. 4

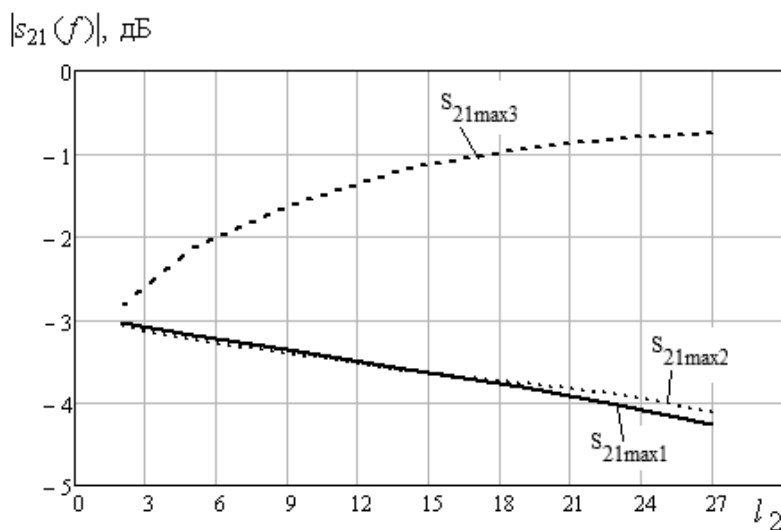


Рис. 5

Полученные результаты могут служить в качестве исходных посылок при структурном синтезе устройств с неравной длиной.

#### Упрощающие процедуры

Успех решения системы уравнений (3) или (4) существенно зависит от начального приближения, которое получается путем накопления данных. Это естественный путь для проектировщиков. Поэтому был проведен анализ устройств в широком диапазоне варьирования исходных конструктивных параметров. Составлена матрица, структура которой отражает результаты расчета частотной зависимости рабочих параметров от варьируемых конструктивных и электрических параметров. Матрица включает следующий набор параметров:

$l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$  – продольные размеры секций (ступенек) связанных линий;

$k_{C1}, k_{C1}, k_{L1}, k_{L2}$  – коэффициенты емкостной и индуктивной связи проводников секций;

$s_{21\max1}, s_{21\max2}, s_{21\max3}$  – максимумы коэффициентов передачи (см. рис. 3);

$f_{\max1}, f_{\max2}, f_{\max3}$  – частоты, на которых наблюдаются  $s_{21\max1}, s_{21\max2}, s_{21\max3}$ ;

$s_{21\min1}, s_{21\min2}, s_{21\min3}$  – минимумы коэффициентов передачи (см. рис. 3);

$f_{\min1}, f_{\min2}, f_{\min3}$  – частоты, на которых наблюдаются  $s_{21\min1}, s_{21\min2}, s_{21\min3}$ .

Стратегия выбора размеров и электрических параметров секций НРСПЛ состоит в поиске наиболее близкого аналога устройства, обеспечивающего заданные частотные характеристики. Затем, используя результаты поиска, реализуется один из алгоритмов оптимизации с применением системы уравнений (3).

### Примеры

1. Синтезирован направленный ответвитель с плавным изменением  $k_C, k_L$ , в зависимости от нормированной координаты в соответствии с рис. 6. Прототип – ступенчато-нерегулярная структура с аналогичным диапазоном изменения  $k_C, k_L$  по координате. Была поставлена цель получить коэффициент передачи  $s_{21\max1} > s_{21\max2} \geq s_{21\max3}$ , что и было достигнуто путем перехода от прототипа со ступенчато-нерегулярной структурой к НРСПЛ с плавной зависимостью коэффициентов связи от координаты. Размеры поперечного сечения были определены методом «выращивания» по работе [1]. Частотные характеристики устройства показаны на рис. 7.

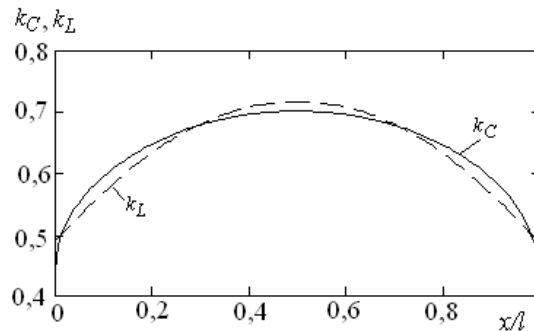


Рис. 6

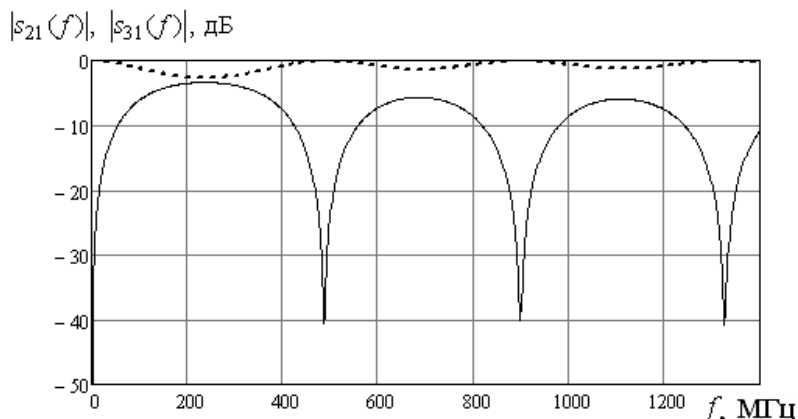
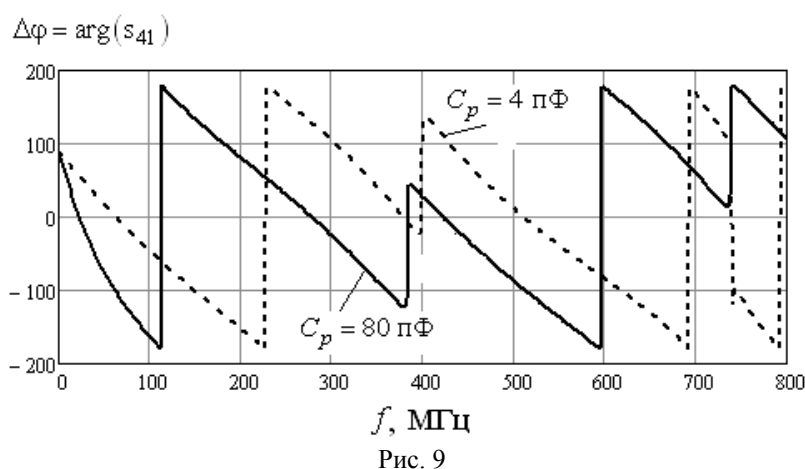
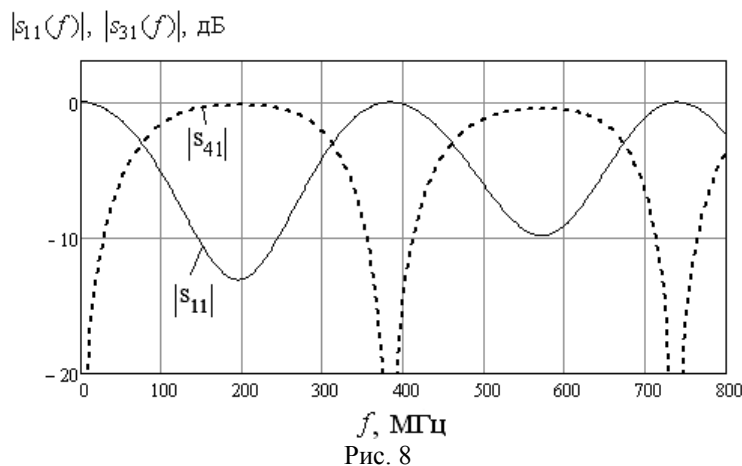


Рис. 7

2. Двухполосный фазовращатель моделировался по схеме рис. 1 при  $z_2 = z_3 = (j2\pi f C_p)^{-1}$ , где  $C_p$  – регулирующая емкость. Нерегулярные связанные линии образуют 5 ступенек с коэффициентами связи, лежащими в пределах  $k_C \approx k_L = 0,45 \dots 0,71$ . Емкость  $C_p$  изменялась от 4 до 80 пФ. На рис. 8 показаны зависимости  $|s_{11}(f)|$  и  $|s_{41}(f)|$ . Из рисунка видно, что в зависимостях наблюдается две полосы пропускания. На рис. 9 приведены фазочастотные характеристики  $\varphi = \arg(s_{41}(f))$  при крайних значениях регулирующей емкости  $C_p = 4$  и  $C_p = 80$  пФ.



Регулирование фазового  $\Delta\varphi = \arg(s_{41})$  на средней частоте 200 МГц первой полосы пропускания составляет 160 град, на частоте 575 МГц второй полосы пропускания – соответственно 100 град.

#### Заключение

Проведенные исследования показали достаточно высокую эффективность полученных алгоритмов при проектировании традиционных и новых функциональных устройств на основе нерегулярных связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью. Однако уже на данной стадии исследований стало ясно, что применение разработанных подходов возможно не только к рассмотренным типам устройств, но и при анализе других узлов с распределенными параметрами. Например, были исследованы экранированные витые пары, применяемые в магистралях космических аппаратов. Такие кабели, по сути, являются связанными проводниками с периодически нерегулярными параметрами. Первичные параметры подобных структур не рассчитываются с достаточной степенью достоверности вследствие больших допусков на геометрические размеры поперечного сечения и расположения проводников относительно друг друга и экрана. Поэтому весьма актуальна задача восстановления (экстракции) первичных параметров статистически нерегулярных связанных линий, каковыми являются экранированные витые пары. Эта задача была решена методами, рассмотренными в настоящей статье и в ранее опубликованных работах [1–5].

Исследовался отрезок кабеля длиной 10 м с неизвестными параметрами. Были измерены  $s$ -параметры и по этим данным на основе системы уравнений (3) рассчитаны матрицы погонных параметров  $\mathbf{L}, \mathbf{C}, \mathbf{R}, \mathbf{G}$ . На рис. 10,  $a$ – $g$  показаны частотные характеристики двухпроводного кабеля типа «витая пара». Пунктирные линии – экспериментальные характеристики, сплошные – расчет по восстановленным матрицам  $\mathbf{L}, \mathbf{C}, \mathbf{R}, \mathbf{G}$  первичных погонных параметров.

Решение системы (3) на разных частотах позволило обнаружить, что первичные параметры существенно зависят от частоты. Исходя из этого, получены частотные зависимости коэффициентов матриц  $\mathbf{L}, \mathbf{R}$ . В качестве примера зависимость коэффициента  $R_{11}$  от частоты показана на

рис. 10,  $\delta$ , а на рис. 10,  $e$  приведена частотная зависимость приращения индуктивной составляющей сопротивления  $\Delta \text{Im}(Z_{11})$ , выраженная в процентах. Как видим, изменение  $\text{Im}(Z_{11})$  существенно.

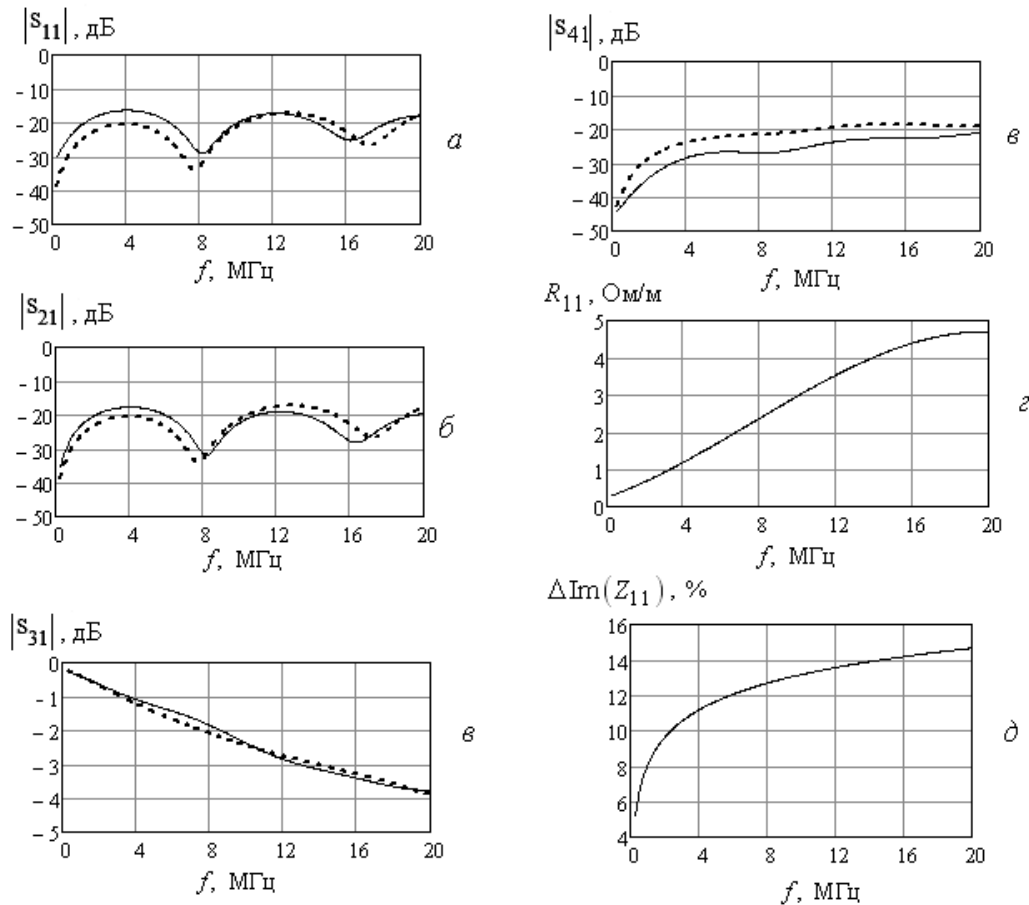


Рис. 10

Данная работа поддержана грантом в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (направление «Микроэлектроника», мероприятие 1.2.1, проект П-690).

#### Литература

1. Синтез топологии устройств формирования импульсов с заданными спектральными характеристиками на основе нерегулярных рельефных связанных микрополосковых линий / А.А. Ильин, Н.Д. Малютин, А.О. Мисюнас, А.Г. Лощилов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22). – С. 7–19.
2. Малютин Н.Д. Синтез нерегулярных рельефных связанных микрополосковых линий методом «выращивания» / Н.Д. Малютин, А.А. Ильин, А.Г. Лощилов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (СriMiCo – 2010): матер. 20-й Междунар. конф., Севастополь, Украина, 13–17 сентября 2010 г. – Севастополь: Вебер, 2010. – Т. 2. – С. 745–747.
3. Синтез направленных ответвителей с непериодически повторяющимися полосами пропускания на нерегулярных рельефных связанных полосковых структурах / Н.Д. Малютин, А.А. Ильин, А.Г. Лощилов и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (СriMiCo – 2011): матер. 21-й Междунар. конф., Севастополь, Украина, 12–16 сентября 2011 г. (в печати).
4. Малютин Н.Д. Квази-Т-волны в комбинированных структурах на основе нерегулярных линий передачи с сосредоточенными неоднородностями / Н.Д. Малютин, А.Г. Лощилов, Э.В. Семенов // Доклады Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2005. – № 4 (12). – С. 42–49.
5. Сычёв А.Н. Управляемые СВЧ-устройства на многомодовых полосковых структурах / под ред. Н.Д. Малютина. – Томск: Том. гос. ун-т. – 2001. – 318 с.

**Малютин Николай Дмитриевич**

Д-р. тех. наук, профессор, начальник научного управления ТУСУРа

Моб. тел. +7913-854-48-48

Эл. почта: ndm@main.tusur.ru

**Лоцилов Антон Геннадьевич**

Канд. техн. наук, ст. научный сотрудник СКБ «Смена»

Моб. тел. +7913-857-48-48

Эл. почта: yogl@mail.ru

**Ильин Александр Алексеевич**

Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа

Моб. тел. +7913-857-54-44

Эл. почта: pjin@mail.ru

**Малютин Александр Николаевич**

М.н.с. СКБ «Смена» ТУСУРа

Эл. почта: malex\_69@mail.ru

**Большанин Игорь Викторович**

Аспирант ТУСУРа

Эл. почта: bolshaniniv@mail.ru

Maljutin N.D., Loshilov A.G., Ijlin A.A., Maljutin A.N., Bolshanin I.V.

**Synthesis algorithms of devices on the basis of the irregular coupled strip lines under the set frequency characteristics**

The synthesis algorithm of devices on the basis of the irregular coupled lines on the set frequency dependences of s-parameters is described. Settlement and experimental results of realization of synthesis are presented.

**Keywords:** synthesis of devices, irregular coupled lines, synthesis algorithms.