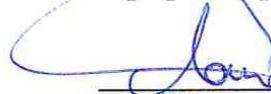


**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по ИР и инновациям



А.Г. Лоцилов

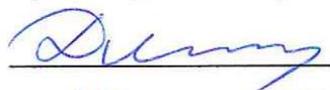


декабрь 2019 г.

**Методика восстановления погонных параметров связанных линий по измеренным с помощью векторного анализатора цепей S-параметрам**

**Согласовано**

Руководитель ЦКП «Импульс»



Н.Д. Малютин

«24» декабрь 2019 г.

Томск 2019

## Содержание

1	Объект исследования и измерительное оборудование. . . . .	3
2	Цель исследования . . . . .	3
3	Основные этапы методики исследования . . . . .	3
3.1	Калибровка векторного анализатора цепей и подготовка макета связанных линий (четырёхпортового устройства) . . . . .	4
3.2	Измерение S-параметров четырёхпортового устройства. . . . .	4
3.3	Исключение паразитного влияния межсоединений (деэмбеддинг) . .	5
3.4	Финальная обработка результатов измерений и восстановление погонных параметров связанных линий (экстракция, извлечение). . . . .	5
4	Заключение. . . . .	8
	Приложение А MATLAB-программа экстракции погонных параметров связанных линий . . . . .	9

## **1 Объект исследования и измерительное оборудование**

1.1 Наименование объекта – макет отрезка связанных линий (СЛ), выполненный в отдельном корпусе с коаксиальными соединителями и представляющий собой четырёхпортовое устройство («черный ящик»).

1.2 Назначение СЛ – использование в качестве базового компонента в составе фильтров, направленных ответвителей, балансных усилителей, согласующе-трансформирующих устройств, фазовращателей отражательного типа, аттенюаторов, модуляторов, диаграммообразующих устройств (ДОУ) антенных систем.

1.3 Измерительное оборудование: векторный анализатор цепей (ВАЦ) Rohde Schwarz ZVA40 (ФРГ) или S5048 ПЛАНАР (Россия) или аналогичный.

## **2 Цель исследования**

Целью экспериментального исследования СЛ является восстановление (экстракция, извлечение) «внутренних» погонных параметров связанных линий по измеренным «внешними»  $S$ -параметрам четырёхпортового устройства.

Расчетная часть методики восстановления базируется на математическом решении обратной задачи отыскания погонных параметров связанных линий по  $S$ -параметрам устройства («черного ящика»).

## **3 Основные этапы методики исследования**

Методика экспериментального исследования состоит из следующих основных этапов:

1 Калибровка векторного анализатора цепей и подготовка макета связанных линий (четырёхпортового устройства).

2 Измерение  $S$ -параметров четырёхпортового устройства.

3 Исключение паразитного влияния межсоединений (деэмбединг).

4 Финальная обработка результатов измерений и восстановление (экстракция, извлечение) погонных параметров связанных линий.

Весь набор погонных параметров связанных линий восстанавливается на заданной частоте из специфицированного диапазона.

### **3.1 Калибровка векторного анализатора цепей (ВАЦ) и подготовка макета связанных линий (четырёхпортового устройства)**

3.1.1 Подготовить ВАЦ к проведению измерений.

Установить диапазон рабочих частот.

3.1.2 Для выполнения полной однопортовой калибровки необходимо подготовить комплект калибровочных мер: КЗ, ХХ, нагрузка. Комплект калибровочных мер имеет наименование и характеризуется числовыми параметрами мер.

3.1.3 Выполнить полную двухпортовую калибровку.

3.1.4 Подготовить макет устройства – симметричных СЛ – для измерений. На макете необходимо обозначить номера портов: 1, 2, 3, 4. Измерить геометрическую длину отрезка СЛ и зафиксировать полученное значение.

3.1.5 Подготовить две согласованные нагрузки.

### **3.2 Измерение S-параметров четырёхпортового устройства**

Главной особенностью процедуры СВЧ измерений является, то что ВАЦ является двухпортовым прибором, следовательно, для измерения четырёхпортового симметричного устройства требуется не одно, а три измерения. Выполнение в диапазоне частот измерения S-параметров четырёхпортового устройства осуществляется в следующем порядке.

3.2.1 Подключить ВАЦ к портам 1 и 2 макета. К портам 3 и 4 подключить согласованные нагрузки (СН). Выполнить измерение модуля и фазы переходного ослабления (связи)  $S_{21}=S_{12}$ , а также возвратных потерь (коэффициента отражения)  $S_{11}=S_{22}$ .

3.2.2 Подключить ВАЦ к портам 1 и 3 макета. К портам 2 и 4 подключить СН. Выполнить измерение модуля и фазы вносимых потерь (рабочего затухания)  $S_{31}=S_{13}$ , а также возвратных потерь (коэффициента отражения)  $S_{11}=S_{33}$ .

3.2.3 Подключить ВАЦ к портам 1 и 4 макета. К портам 2 и 3 подключить СН. Выполнить измерение модуля и фазы развязки (изоляции)  $S_{41}=S_{14}$ , а также возвратных потерь (коэффициента отражения)  $S_{11}=S_{44}$ .

3.2.4 По данным измерений в диапазоне частот сформировать массив матриц S-параметров полного четырехпортового устройства и занести в файл в формате Touchstone с расширением \*.s4p.

### **3.3 Исключение паразитного влияния межсоединений (деэмбединг)**

3.3.1 Выбрать рабочую частоту, на которой требуется выполнить всю дальнейшую обработку полученных экспериментальных данных и восстановить погонные параметры связанных линий.

3.3.2 Для устранения влияния паразитных параметров соединителей – дополнительного удлинения каждого из портов из-за ненулевой длины подводящих линий – требуется осуществить процедуру исключения (деэмбединга), которая может быть выполнена следующим образом

$$A = A_1 A_0 A_1; \quad A_0 = A_1^{-1} A A_1^{-1},$$

где  $A$ ,  $A_0$ ,  $A_1$  – матрицы передачи макета СЛ с подводящими линиями, СЛ без подводящих линий и самих подводящих линий, соответственно.

3.3.3 Параметры подводящих линий  $A_1$  устанавливаются из предварительных измерений с известной перемычкой.

### **3.4 Финальная обработка результатов измерений и восстановление (экстракция, извлечение) погонных параметров связанных линий**

3.4.1 Финальная обработка результатов измерений с извлечением погонных параметров связанных линий основана на обращении (инверсии)

процедуры анализа и начинается с того, что на заданной частоте из матрицы рассеяния (S-параметров) формируется матрица проводимостей  $Y$  четырехпортового устройства, соответствующая «чистому» отрезку СЛ.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}.$$

3.4.2 Дальнейший алгоритм восстановления погонных (первичных) параметров состоит из двух основных этапов:

1. Определение модальных параметров СЛ по внешним параметрам четырёхпортового устройства. Модальные параметры СЛ синтезируются из матрицы проводимостей отрезка СЛ. Известны сингулярные разложения матриц-клеток  $Y_{aa}$ ,  $Y_{ab}$  составляющих матрицу проводимостей многопроводных СЛ:

$$Y_{aa} = I_m \{ \text{cth } \gamma l \} U_m^{-1}; \quad Y_{ab} = -I_m \{ \text{csch } \gamma l \} U_m^{-1}, \quad (1)$$

где  $U_m$  – матрица модальных напряжений размером  $N \times N$ ;

$I_m$  – матрица модальных токов размером  $N \times N$ ;

$\{ \text{cth } \gamma l \}, \{ \text{csch } \gamma l \}$  – матричные функции от диагональной матрицы постоянных распространения нормальных типов волн  $\{ \gamma \}$  размером  $N \times N$ ;

$l$  – длина отрезка связанных линий;

$N$  – количество связанных линий ( $N=2$ ).

На основе этих разложений (1) становится возможным определение матриц модальных параметров СЛ  $U_m$ ,  $I_m$ ,  $\{ \gamma \}$ . Из соотношения

$$A_{aa} = -Y_{ab}^{-1} Y_{aa} = U_m \{ \text{ch } \gamma l \} U_m^{-1} = U_m \{ \lambda \} U_m^{-1} \quad (2)$$

решением алгебраической проблемы собственных значений находятся собственные векторы  $U_m$  и собственные значения  $\lambda_i$  матрицы  $A_{aa}$ . Откуда выражение для постоянных распространения  $\gamma_i$  запишется так

$$\gamma_i = \text{Arch } \lambda_i / l = [\ln(\lambda_i + \mu_i)] / l, \quad (3)$$

где  $\lambda_i = \text{ch}\gamma_i l$ ,  $\mu_i = \pm\sqrt{\lambda_i^2 - 1} = \text{sh}\lambda_i l$ , ( $i=1, \dots, N$ ).

Из собственных векторов  $U_m$  матрицы  $A_{aa}$  составляется матрица модальных напряжений  $U_m$ . Матрица модальных токов  $I_m$  находится перемножением следующих матриц  $I_m = -Y_{ab} U_m \{\mu\}$ . В исследуемом случае двух связанных линий на основе этих соотношений становится возможным записать аналитически замкнутые выражения для каждого элемента матрицы модальных параметров:

$$\{\gamma\} = \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \end{bmatrix}; \quad U_m = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a & b \end{bmatrix}; \quad I_m = \begin{bmatrix} c & d \\ -c/b & -d/a \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{1,2} &= [\text{In}(\lambda_{1,2} + \mu_{1,2})]/l; & a &= (\lambda_1 - a_{11})/a_{12}; & c &= -\mu_1 (y_{13} + ay_{14})/\rho; \\ & & b &= (\lambda_2 - a_{11})/a_{12}; & d &= -\mu_2 (y_{13} + by_{14})/\rho, \end{aligned}$$

где  $\rho$  – волновое сопротивление подводящих линий,

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= (a_{11} + a_{22} + K)/2; & \left\{ \begin{array}{l} a_{11} = (y_{14}y_{12} - y_{11}y_{24})/\Delta_a; \\ a_{12} = (y_{14}y_{22} - y_{12}y_{24})/\Delta_a; \\ a_{21} = (y_{11}y_{14} - y_{13}y_{12})/\Delta_a; \\ a_{22} = (y_{12}y_{14} - y_{13}y_{22})/\Delta_a; \end{array} \right. \\ \lambda_2 &= \lambda_1 - K; \\ \mu_1 &= \pm\sqrt{\lambda_1^2 - 1}; \\ \mu_2 &= \pm\sqrt{\lambda_2^2 - 1}; \\ K &= \sqrt{(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12}a_{21}}; & \Delta_a &= y_{13}y_{24} - y_{14}^2. \end{aligned}$$

Выбор знака  $\pm$  в выражениях для  $\mu_{1,2}$  влияет на знаки постоянных распространения  $\gamma_{1,2}$ . Эти величины должны удовлетворять условиям физической реализуемости  $\text{Re } \gamma_{1,2} > 0$ ,  $\text{Im}\gamma_{1,2} > 0$ . Можно показать, что при четырех комбинациях знаков  $\pm$  в выражениях для  $\mu_{1,2}$ , а следовательно, и для  $\gamma_{1,2}$  всегда существует только одна физически реализуемая комбинация, соответствующая падающим волнам, и указанное затруднение является чисто математическим. Выбор знака никак не влияет на рассчитываемые далее погонные параметры, они всегда вычисляются однозначно.

2. Определение комплексных погонных параметров СЛ через их модальные параметры в матричном виде:

$$Z_l = U_m \{\lambda\} I_m^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{l11} & Z_{l12} \\ Z_{l12} & Z_{l22} \end{bmatrix}; \quad Y_l = I_m \{\lambda\} I_m^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{l11} & -Y_{l12} \\ -Y_{l12} & Y_{l22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Элементы матриц погонных параметров  $Z_l$  и  $Y_l$  записываются:

$$\begin{cases} Z_{l11} = (\gamma_2 c / b - \gamma_1 d / a) / \Delta_z; \\ Z_{l12} = (\gamma_2 c - \gamma_1 d) / \Delta_z; \\ Z_{l22} = (\gamma_2 c b - \gamma_1 d a) / \Delta_z; \end{cases} \quad \begin{cases} Y_{l11} = (\gamma_2 d a - \gamma_1 c b) / \Delta_y; \\ Y_{l12} = (\gamma_1 c - \gamma_2 d) / \Delta_y; \\ Y_{l22} = (\gamma_2 d / a - \gamma_1 c / b) / \Delta_y, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Delta_y = a - b$ ;  $\Delta_z = \Delta_y c d / (a b)$ .

Выделив действительную и мнимую части матриц получаем матрицы погонных сопротивлений  $R$ , индуктивностей  $L$ , проводимостей  $G$  и емкостей  $C$  СЛ:  $R = \text{Re } Z_l$ ;  $L = \text{Im } Z_l / \omega$ ;  $G = \text{Re } Y_l$ ;  $C = \text{Im } Y_l / \omega$ , где  $\omega$  – круговая частота, на которой производится восстановление.

Алгоритм восстановления погонных параметров имеет компьютерную реализацию.

#### 4 Заключение

Изложена методика восстановления (экстракции, извлечения) погонных параметров отрезков (секций) связанных линиях по измеренным S-параметрам, которые получены в результате измерения на векторном анализаторе цепей. Методика сопровождается прототипом компьютерной программы, реализующей алгоритм экстракции погонных параметров.

**Приложение А**  
**MATLAB-программа экстракции погонных параметров**  
**связанных линий**

```

% (С) А.Н.Сычев, 2019 ===== // Тип файла: (*.s4p)
% =====
clear % # GHZ S MA R 50
s4p=fopen('dc.s4p','r'); % Открытие файла для чтения в
% текстовом режиме
% s4p=fopen('CoupLin2a.s4p','r'); % Открытие файла для
% чтения в текстовом режиме
fseek(s4p,136,'bof'); % Смещение указателя от начала,
% здесь 136 символов
A=fscanf(s4p,'%g',[33,1001]); % Чтение файла по g-формату
% Си и запись его в матрицу А
Nmax=1001;
for i=1:118
    f(i)=A(1,i); % Формирование вектора частот и
% векторов хар-ик
    tet(i)=360*f(i)*8.61*0.020*2*1; % коррекция фазы из-за
% подвод.линий l=20mm
    S11(i)=20*log10(A(2,i)); F11(i)=A(3,i)+tet(i);
    S12(i)=20*log10(A(4,i)); F12(i)=A(5,i)+tet(i);
    S13(i)=20*log10(A(6,i)); F13(i)=A(7,i)+tet(i);
    S14(i)=20*log10(A(8,i)); F14(i)=A(9,i)+tet(i);
    if F11(i)>180; F11(i)=F11(i)-360; end, if F11(i)>180;
F11(i)=F11(i)-360; end,
    if F12(i)>180; F12(i)=F12(i)-360; end, if F12(i)>180;
F12(i)=F12(i)-360; end,
    if F13(i)>180; F13(i)=F13(i)-360; end, if F13(i)>180;
F13(i)=F13(i)-360; end,
    if F14(i)>180; F14(i)=F14(i)-360; end, if F14(i)>180;
F14(i)=F14(i)-360; end,
end
% Построение графиков ЧХ отрезка связанных линий l=78 mm
fmin=min(f); fmax=max(f); dB=-30;
figure(1), set(1,'color',[1 1 1]); % Установка белого
фона для графиков
subplot(211), axis([fmin fmax dB 0]), grid on, hold on,
title('АЧХ (дБ)')
    plot(f,S11,'r :'), plot(f,S12,'b --'),
    plot(f,S13,'r -'), plot(f,S14,'k -.'),
subplot(212), axis([fmin fmax -200 200]), grid on, hold on,
title('ФЧХ (град)')
    plot(f,F11,'r :'), plot(f,F12,'b --'),

```

```

        plot(f,F13,'r -'), plot(f,F14,'k -.'),
        fclose('all');          % Закрытие всех файлов

    % S-параметры в одной частотной точке с номером k (с
    % частотой fk, Гц )
        k=5; fk=f(k)
        S11k=S11(k), S12k=S12(k), S13k=S13(k), S14k=S14(k),
        F11k=F11(k), F12k=F12(k), F13k=F13(k), F14k=F14(k), i=sqrt(-1)
    % Формирование матрицы рассеяния S(4,4) для отрезка двух
    % связанных линий
        s11k=10.^(S11k/20.)*exp(j*.017453291*F11k);
        s12k=10.^(S12k/20.)*exp(j*.017453291*F12k);
        s13k=10.^(S13k/20.)*exp(j*.017453291*F13k);
        s14k=10.^(S14k/20.)*exp(j*.017453291*F14k);
        s=[s11k, s12k, s13k, s14k; ...
           s12k, s11k, s14k, s13k; ...
           s13k, s14k, s11k, s12k; ...
           s14k, s13k, s12k, s11k]
    % Формирование матрицы проводимостей отрезка связанных линий
    % l=78 mm
        E=eye(4); Zo=50; Yo=1/Zo; l =0.078, wk =2*pi*fk*10^9
        y=(2*(E+s)^-1-E)*Yo;
        Yaa=[y(1,1) y(1,2); y(2,1) y(2,2)];
        Yab=[y(1,3) y(1,4); y(2,3) y(2,4)];
        Aaa=-Yab^-1*Yaa;

    % Извлечение модальных параметров связанных линий
        [Um,lam] = eig(Aaa) % Квадрат.матр.СВ и диагонал.матр.СЗ
        mu = sqrt(lam^2-eye(2))
        Im =-Yab*Um*mu
        gam =acosh(diag(lam))/l, gamm=log(diag(lam+mu))/l % проверка
        гамма-вектора
        alph=real(gam), eef=(imag(gam)*2.997925e8/wk).^2

    % Извлечение (восстановление) матриц погонных параметров
    % связанных линий
        Zl=Um*diag(gam)*Im^-1
        Yl=Im*diag(gam)*Um^-1
        disp('Погонные параметры СЛ R(Ом/м), G(См/м), L(нГн/м),
        C(пФ/м)')
        Rl=real(Zl) % Ом/м
        Gl=real(Yl) % См/м
        Ll=10^9 *imag(Zl)/wk % нГн/м
        Cl=10^12*imag(Yl)/wk % пФ/м

```