

УДК 621.371, 621.372

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКТА СКАЛЯРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ

О. А. Дьяконова, Д. С. Каленов, Ю. Н. Казанцев

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

Статья поступила в редакцию 11 октября 2016 г.

Аннотация. В данной работе описан автоматизированный комплекс для измерения коэффициентов прохождения и отражения от плоских образцов в условиях свободного пространства в диапазоне 3,5 – 37,5 ГГц. Приведены результаты измерения отражения от периодической решетки из разомкнутых колец, а также комплексной диэлектрической проницаемости резистивных пленок.

Ключевые слова: скалярные анализаторы цепей, свободное пространство, коэффициенты прохождения и отражения, сантиметровые волны.

Abstract. In this paper we implemented an automated measuring system for the frequency band 3.5 - 37.5 GHz based on a set of six scalar network analyzers and six pairs of smooth horn antennas. Horn antennas are designed in IRE RAS transformed H₀₁ fundamental mode of a rectangular waveguide horn at the entrance to the quasi-plane wave at the output. Smooth transition horn for low reflection rate (<- 25 dB). As the computer system used measuring and computing complex based on the ATX computer. The interface components are based on standard module ADC L-Card E14-140. Computer used interactively. The software runs under the Windows XP operating system. Control routines, data collection and reporting are written in language Lab View. The complex allows you to quickly measure the reflection coefficients (to a level of - 25 dB) and the passage (to the level of - 30 dB) flat specimens periodic lattices and materials, including radio-absorbing materials and the resistive film. Checking coordination of all elements of measurement system carried out by measuring the calibration sample. Calibration sample is a plane-parallel dielectric plate made of polystyrene 4mm thick. There is good agreement between the

results of measurement and calculation, confirming the need for accuracy. The accuracy of measurement of reflection and transmission coefficients is sufficient to assess the complex permittivity of the thin film resistor that is subject to a comparison with the results of independent measurements in a plant equipped with a vector network analyzer.

Key words: scalar network analyzers, the measurement in free space, transmission and reflection coefficients, centimeter wave ranges.

Введение

В последние 30 лет произошли серьезные изменения в технике измерения характеристик электрических цепей. На смену скалярным анализаторам цепей (т.н. измерителям КСВН) пришли векторные анализаторы различных модификаций, обладающие широким спектром новых возможностей. Одной из этих возможностей является пространственно-частотная обработка сигналов отражения и прохождения, что позволяет существенно понизить паразитный фон из-за отражения и переотражений в измерительном тракте и тем самым повысить точность измерений [1, 2]. Тем не менее во многих практических случаях, где не требуется измерение очень малых коэффициентов отражения (менее – 25 – 30 дБ), применение скалярных анализаторов цепей вполне оправдано поскольку их цена значительно меньше, чем векторных анализаторов. Дополнительными аргументами в пользу применения скалярных анализаторов цепей является их надежность и долговечность, и поэтому приборы серии P2 до сих пор используются во многих научно – исследовательских организациях. Недостатком приборов этой серии является большая трудоемкость измерений, которые проводятся вручную.

Целью данной работы является создание автоматизированного измерительного комплекса на основе шести измерителей КСВН серии P2, позволяющего получать характеристики исследуемых образцов в реальном времени.

1. Структурные схемы и реализация измерительного комплекса

На рис. 1 а, б представлены структурные схемы в режимах измерения коэффициента отражения и прохождения, соответственно.

На этом рисунке полные схемы даны для одного из шести поддиапазонов. Для остальных поддиапазонов эти схемы аналогичны. Для каждого поддиапазона используется соответствующий отдельный генератор, но измерительный блок – общий для всех поддиапазонов. При переключении поддиапазонов к единому измерительному блоку 6 подключаются детекторы (встроенные в направленные ответвители) требуемого поддиапазона.

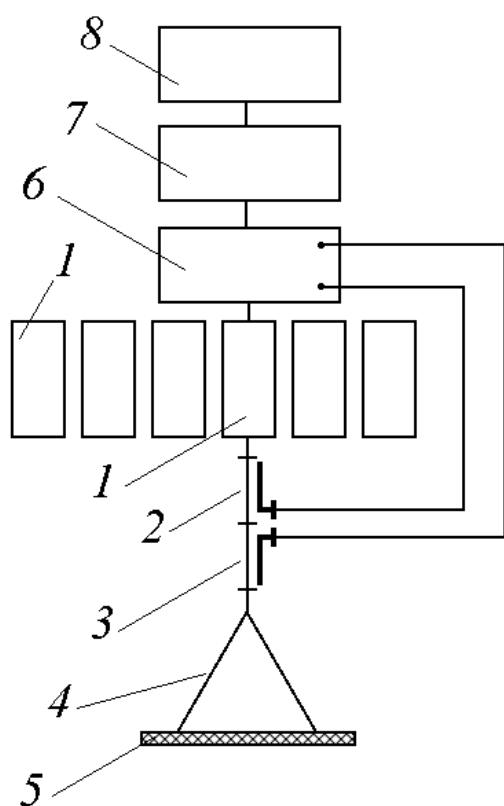


Рис. 1а

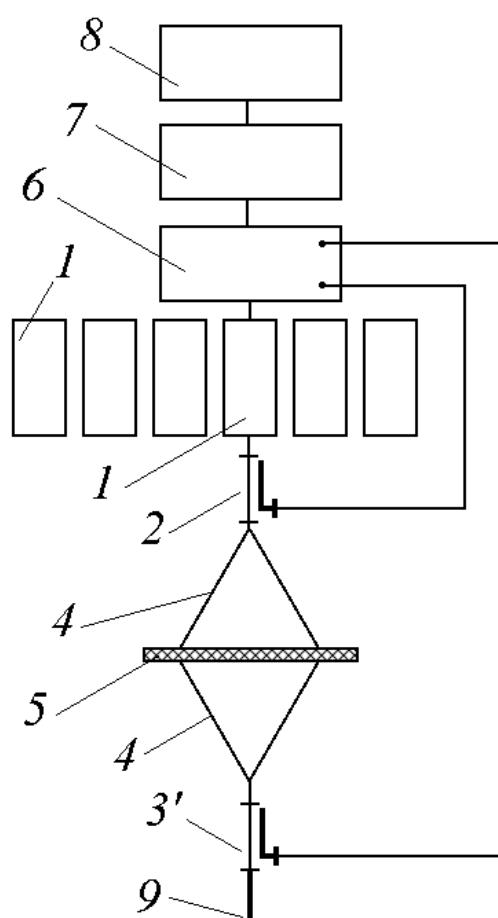


Рис. 1б,

где 1 – генераторный блок; 2 – направленный ответвитель падающей волны; 3 – направленный ответвитель отраженной волны; 3' – направленный ответвитель прошедшей волны; 4 – рупорная антенна; 5 – исследуемый образец; 6 – измерительный блок; 7 – АЦП; 8 – компьютер; 9 – согласованная нагрузка.

В реализованный автоматизированный измерительный комплекс вошли следующие блоки из комплекта измерителей КСВН серии Р2: генераторные блоки, волноводные направленные ответвители падающей и отраженной волн и один измерительный блок. Марки генераторных блоков, соответствующие им поддиапазоны, длины волн и сечения волноводов указаны в таблице 1.

Таблица 1.

Тип панорамного измерителя КСВН	Рабочий диапазон длин волн, мм	Сечение волновода $a \times b$, мм	Выходная апертура рупора $A \times B$, мм	Длина рупора l , мм
P2-58	76,1-53,2	48*24	239*176	995,5
P2-59	53,2-36,4	35*15	160*120	653
P2-61	36,4-24,9	23*10	120*90	498
P2-67	24,9-17,2	16*8	80*60	328
P2-66	17,2-11,6	11*5,5	55*41	227
P2-65	11,6-8,0	7,2*3,4	32*24	134

В этой же таблице даны характерные размеры рупорных антенн (длина и размер выходной апертуры). Рупорные антенны, разработанные в ИРЭ РАН, трансформируют основную моду H_{01} прямоугольного волновода на входе рупора в квазиплоскую волну на его выходе. Плавность рупорного перехода обеспечивает малый уровень отражения ($< - 25$ дБ) [3]. Коэффициенты отражения R и прохождения T определяются согласно формуле:

$$R, T = \frac{P_{1,2}}{P} \quad (1)$$

где P – мощность падающей волны, P_1 – мощность волны, отраженной от образца, P_2 – мощность волны, прошедшей через образец. Величина P определяется для схем на рис. 1а и рис. 1б соответственно как мощность волны,

отраженной от калибровочной металлической пластины на выходе рупора, либо как мощность прошедшей волны в отсутствии образца.

Устройство и принцип действия измерительного блока скалярного анализатора цепей позволяют применить средства вычислительной техники для измерения, управления и обработки данных.

Процесс измерения автоматизирован, схематично это показано на рис. 2.

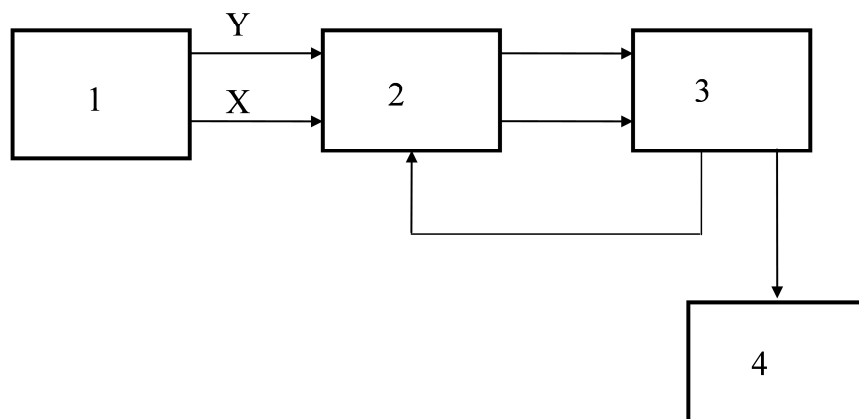


Рис.2. Структурная схема автоматизированной системы для измерения характеристик отражения и прохождения.

Сигнал, пропорциональный мощности – сигнал Y ; сигнал развертки – X . С измерительного блока 1, аналоговые сигналы Y и X поступают на внешний аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 2. Преобразованные и оцифрованные сигналы попадают в компьютер 3. Окончательный результат выводится на монитор 4 в виде графиков или осуществляется запись графиков и массивов данных в файл.

В качестве ЭВМ в системе применен измерительно-вычислительный комплекс на базе компьютера АТХ. Элементы сопряжения выполнены на основе стандартного модуля АЦП L-Card E14-140. ЭВМ используется в диалоговом режиме. Программное обеспечение работает под управлением операционной системы *Windows XP*. Подпрограммы управления, сбора и представления данных написаны на языке *Lab View*.

Алгоритм работы автоматизированной системы представлен на рис. 3.

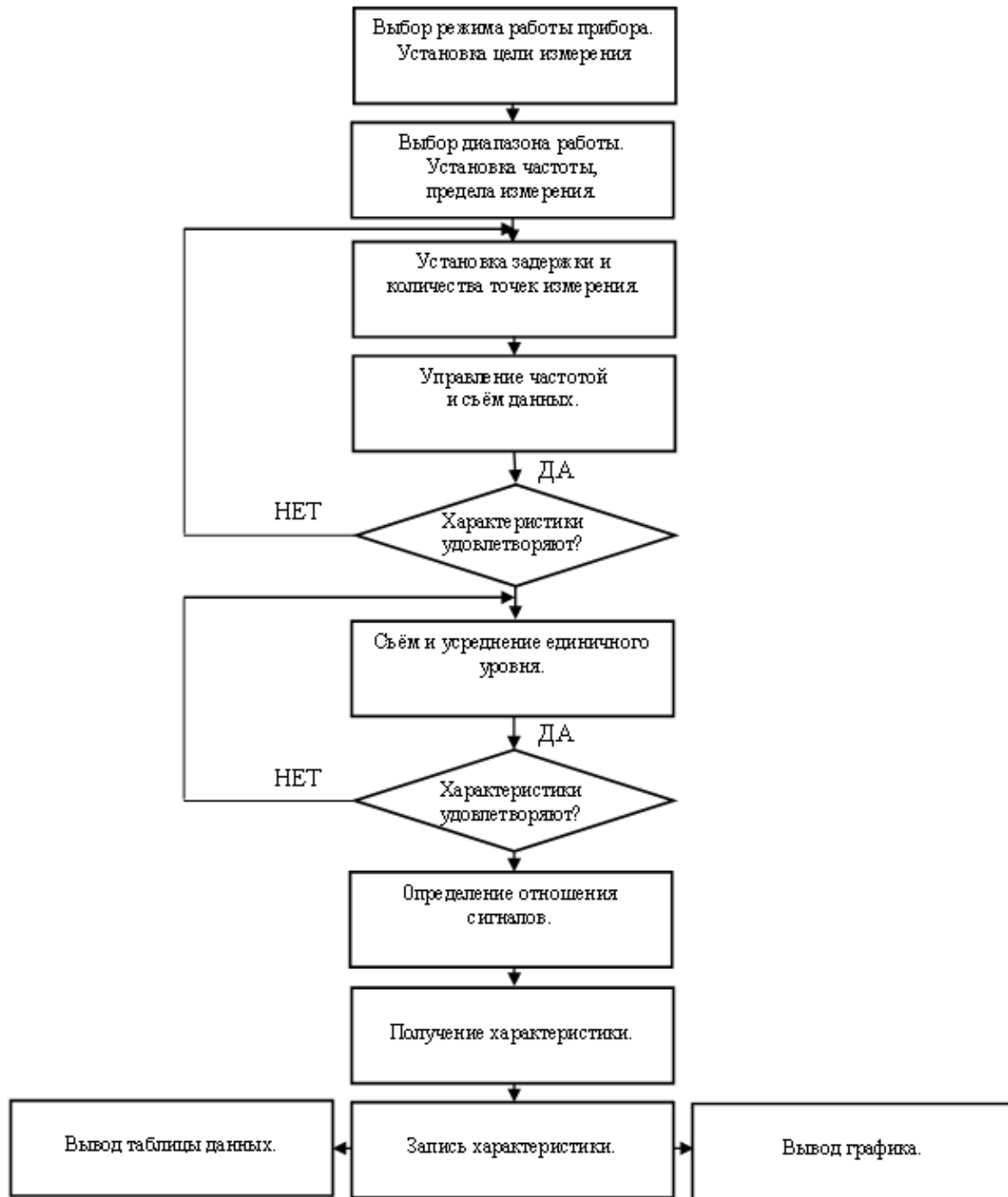


Рис.3. Алгоритм работы автоматизированной установки.

На рис. 4 представлена фотография четырех линий измерительного комплекса, остальные две линии расположены на отдельной стойке и на фотографии отсутствуют.

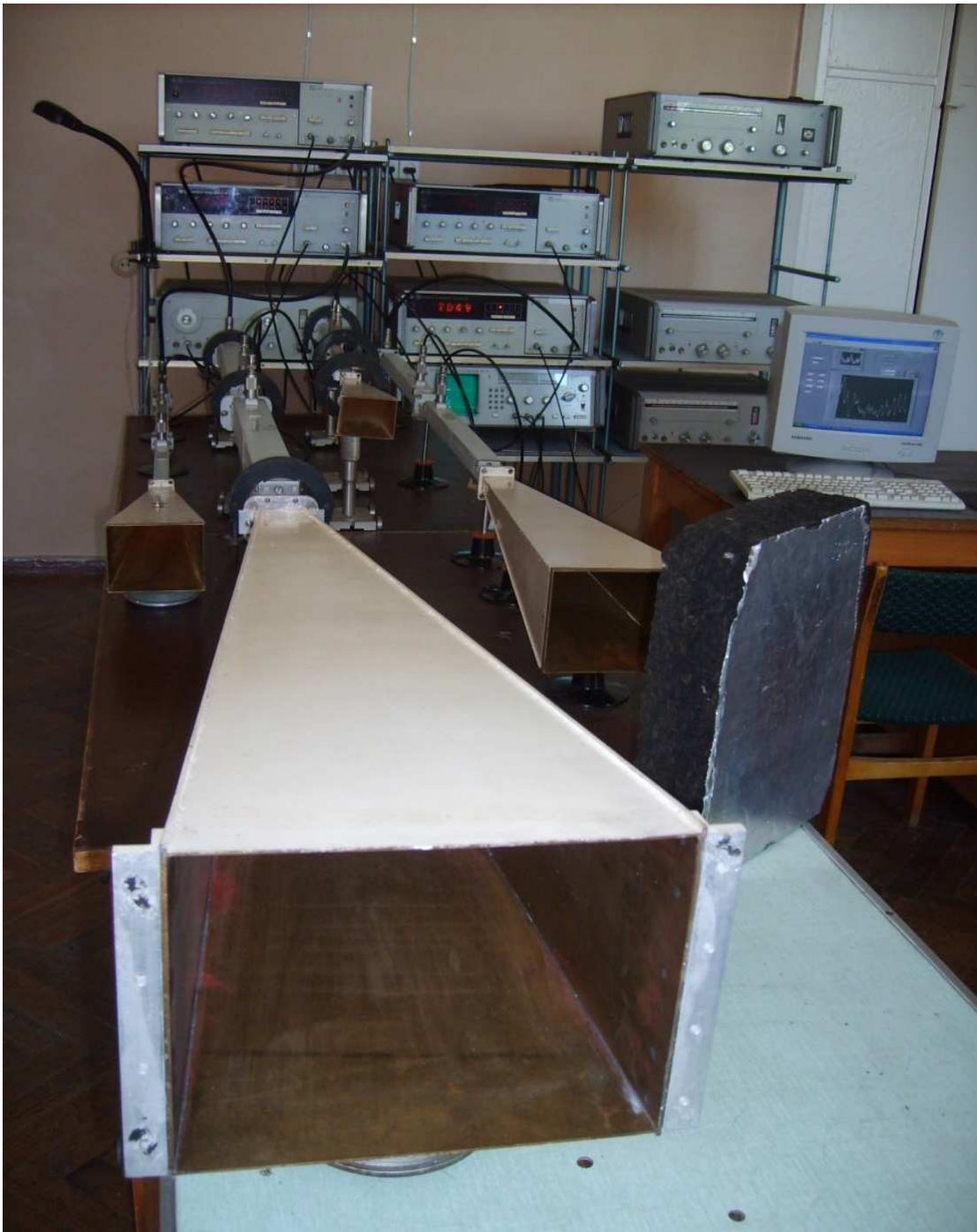


Рис.4. Автоматизированный измерительный комплекс.

Проверка согласования работы всех элементов измерительного комплекса осуществляется путем измерения поверочного образца. Поверочный образец представляет собой плоскопараллельную диэлектрическую пластину из полистирола толщиной 4мм.

На рис.5 приведены частотные зависимости коэффициентов отражения R от поверочного образца толщиной d , полученные экспериментально и

рассчитанные по формуле:

$$R = \left| \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon + 1 + 2i\sqrt{\varepsilon} \operatorname{ctg}(kd\sqrt{\varepsilon})} \right| \quad (2)$$

где ε – комплексная диэлектрическая проницаемость; $k = \frac{2\pi f}{c}$, f – частота, ГГц; c – скорость света в вакууме.

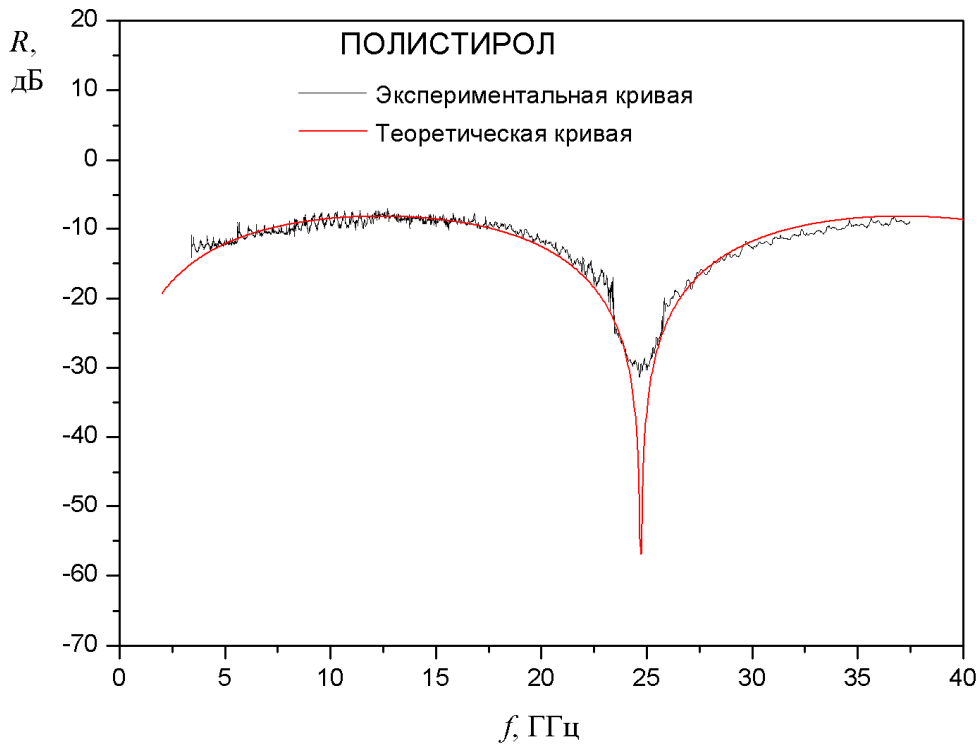


Рис. 5. Частотные спектры коэффициентов отражения от поперечного образца (расчет – красная линия, эксперимент – черная линия).

Из приведенных графиков видно, что имеет место хорошее совпадение результатов измерения и расчета, что подтверждает необходимую точность измерений коэффициента отражения до уровня – 25 дБ.

2. Результаты измерений

Точность измерений, реализованная в автоматизированном комплексе, позволяет не только успешно измерять коэффициенты отражения и прохождения различных плоских образцов, но и определять комплексную диэлектрическую проницаемость немагнитных материалов. Эти возможности

были подтверждены измерением коэффициента отражения от решеток из электропроводящих элементов, а также измерением комплексной диэлектрической проницаемости резистивных пленок, используемых в радиопоглощающих структурах [4,5]. Решетка с кольцевыми элементами из вольфрама была нанесена на подложку из стеклоткани методом ионно-плазменного магнетронного распыления. Форма и расположение колец показаны на рис. 6.

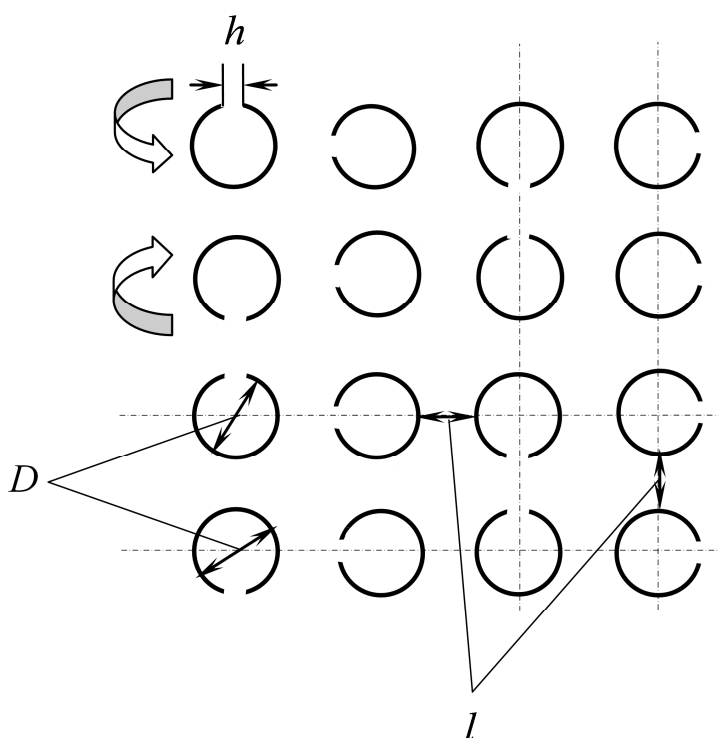


Рис. 6. Схема расположения кольцевых элементов на подложке.

Каждое из колец диаметром $D=10\text{мм}$ с разрывом $h=0,5\text{мм}$ в нечетном ряду повернуто относительно соседних на 90° против часовой стрелки, а в четных рядах элементы поворачиваются на 90° по часовой стрелке. Расстояние l между кольцами составляло 1мм .

В качестве подложки применена стеклоткань со следующими характеристиками: толщина $130\ \mu\text{м}$; диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2,2$; удельное сопротивление $\rho = 10^{14}\ \text{Ом}\cdot\text{см}$.

На рис. 7 представлена частотная зависимость коэффициента отражения от решетки, измеренная в диапазоне $3,5 - 37,5\ \text{ГГц}$ (черная линия). На том же рисунке для сравнения дана частотная зависимость коэффициента отражения

той же решетки, измеренная по рупорной методике на установке, оборудованной векторным анализатором цепей марки Agilent PNA-L N5230A (красная линия).

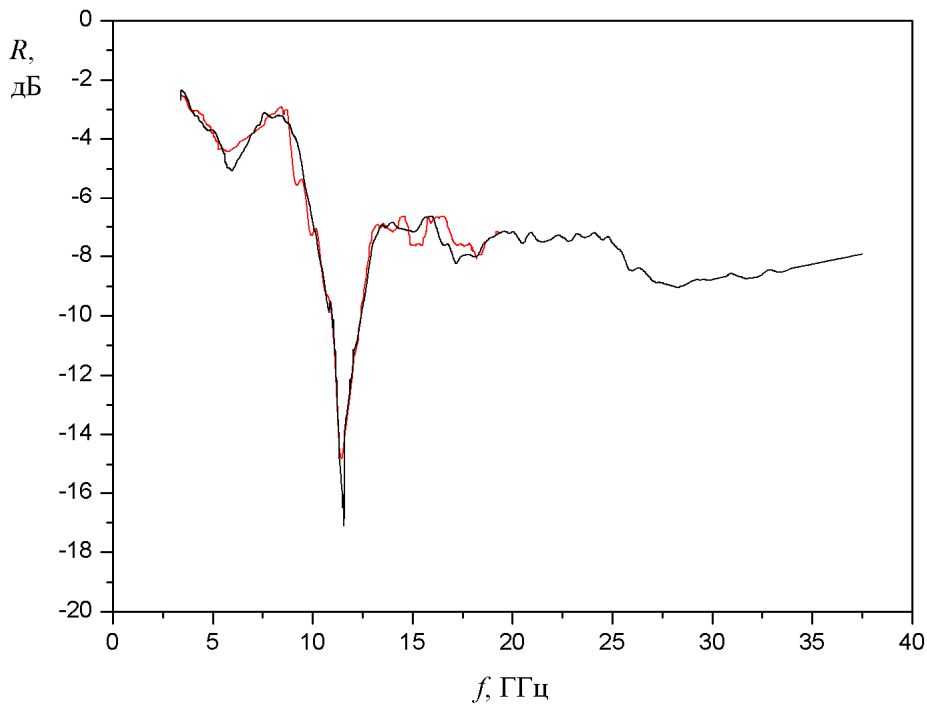


Рис. 7. Частотные спектры коэффициентов отражения электромагнитного излучения от образца однослойной структуры в свободном пространстве.

Мнимая и действительная части ϵ'' и ϵ' комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ такой пленки толщиной d определяются через коэффициенты R и T с помощью следующих приближенных формул:

$$\epsilon'' = \frac{1 - |T|^2}{kd} \quad (3)$$

$$\epsilon' = \frac{\sqrt{4|R|^2 - (\epsilon''kd)^2}}{kd}, \quad (4)$$

где $|\epsilon' - j\epsilon''| = |n|^2 \gg 1$ и $2kd|n| \ll 1$.

На автоматизированном комплексе были измерены ϵ' и ϵ'' двух типов углеродо-содержащих бумаг толщиной 70 мк с сопротивлением 500 Ом на

квадрат и 7 кОм на квадрат, обозначаемых далее, соответственно, номерами 1 и 2. На рис. 8 и 9 представлены результаты этих измерений (черные линии).

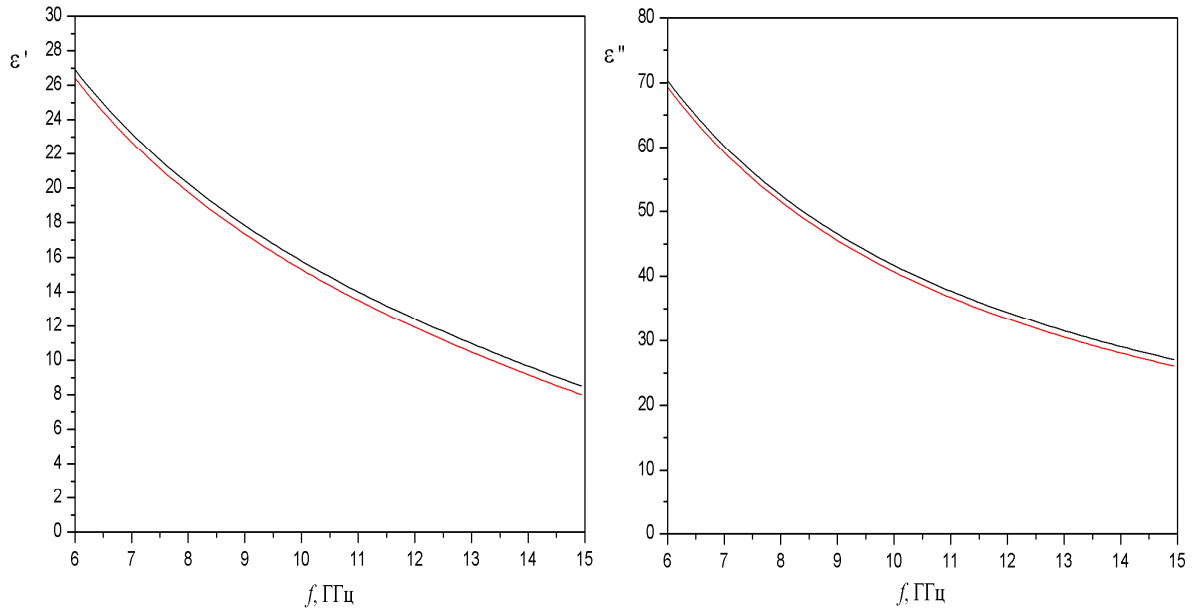


Рис. 8 Частотные зависимости ϵ' и ϵ'' резистивной пленки №1

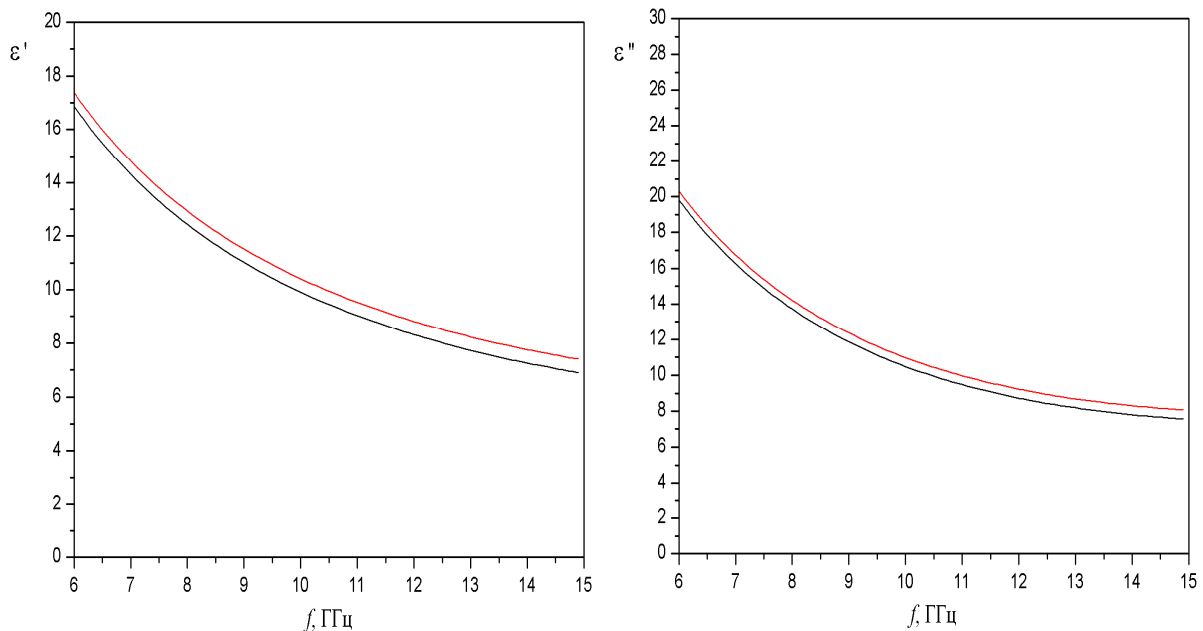


Рис. 9 Частотные зависимости ϵ' и ϵ'' резистивной пленки №2

На этих же рисунках приведены для сравнения результаты измерения тех же бумаг на рупорной установке, оборудованной векторным анализатором

Agilent PNA-L N5230A (красные линии). Эти измерения подтвердили наличие в комплексной диэлектрической проницаемости резистивных пленок существенной действительной части, сравнимой по величине с мнимой.

Заключение

На основе комплекта из шести скалярных анализаторов цепей серии P-2 и шести пар плавных рупорных антенн реализован автоматизированный измерительный комплекс для диапазона частот 3,5 – 37,5 ГГц. Комплекс позволяет оперативно измерять коэффициенты отражения (до уровня – 25 дБ) и прохождения (до уровня – 30 дБ) плоских образцов периодических решеток и материалов, включая радиопоглощающие материалы и резистивные пленки. Точность измерения коэффициентов отражения и прохождения была достаточной для оценки комплексной диэлектрической проницаемости тонких резистивных пленок, что подтверждено сравнением с результатами независимых измерений на установке, оборудованной векторным анализатором цепей.

Литература

1. В. Н. Аплеталин, Ю. Н. Казанцев, А.Н. Козырьков, В. С. Солосин. Измерение электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью векторного анализатора цепей. // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2009. Т.14. №11. С. 39-43.
2. О.А. Дьяконова, Ю.Н. Казанцев, С.В. Маречек, И.В. Воронин, С.А. Горбатов. Методы и средства для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волнах. // *Приборы и техника эксперимента*. 2011. № 2. С. 51-57.
3. В. Н. Аплеталин, О. А Дьяконова, Ю. Н.Казанцев, В. С. Солосин. Методы и установки для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых волнах. // *Измерительная техника*. 1991. №7. С.40-42.

4. Ю.Н. Казанцев, В.А.Бабаян, Н.Е. Казанцева, О.А. Дьяконова, Я. Вилчакова, П. Сага. Слоистый радиопоглотитель на основе двупериодических решеток из резистивных квадратов. // *Радиотехника и электроника*. 2013. Т.58. №3. С.264-269.
5. Ю.Н. Казанцев, Г.А. Крафтмахер, В.П. Мальцев.С.В. Компенсация отражения от радиопоглощающего материала с помощью решетки из двойных разомкнутых колец. // *Радиотехника и электроника*. 2016. Т.61. №6. С.575-580.