

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧ и КР)

Утверждаю  
Зав. каф. СВЧ и КР  
\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович

## **Исследование поляризации электромагнитных волн**

### **РУКОВОДСТВО**

к лабораторной работе по дисциплинам «Электродинамика и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны»

для бакалавров направлений подготовки:

210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,

210400.62 «Радиотехника»; специалистов направления подготовки

210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Разработчики:

доц. каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ Ж.М. Соколова

проф. каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ А.Е. Мандель

доц. каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ А.В. Фатеев

Зав.лаб. ЭДиРРВ

\_\_\_\_\_ А.Н. Никифоров

2013

## Содержание

1. Цель работы.....	3
2. Краткие теоретические сведения.....	3
2.1. Виды поляризаций электромагнитных волн.....	3
2.2. Соотношения, определяющие типы поляризаций волны..	4
2.3. Геометрические параметры эллипса поляризации	6
2.4. Поляризационная решетка...	8
2.5. Дополнительные сведения ....	10
3. Расчетное задание	13
4. Экспериментальная часть..	14
4.1. Схема и принцип работы установки.	14
4.2.Методика проведения эксперимент..	15
4.2.1.Настройка установки	15
4.2.2 Исследование волны с круговой поляризацией	16
4.2.3 Снятие частотной зависимости коэффициента	16
эллиптичности.	
4.2.4 Исследование линейно поляризованной волны	16
4.2.5 Исследование волны с эллиптической поляризацией	17
4.2.6. Измерение коэффициента эллиптичности волны	17
5. Контрольные вопросы.	17
6. Содержание отчета	18
. Литература	18

## 1.Цель работы

Целью работы является:

- \*изучение видов поляризации электромагнитных волн;
- \*изучение одного из способов создания полей с вращающейся поляризацией;
- \*получение волн с линейной, круговой и эллиптической поляризацией;
- \*измерение диаграммы поляризационной решетки.

## 2.Краткие теоретические сведения

### 2.1.Виды поляризации электромагнитных волн

Под поляризацией электромагнитной волны понимается закон изменения величины и направления вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  (или вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ ) этой волны в фиксированной точке пространства за промежуток времени, равный периоду колебаний  $T$ . Плоскостью поляризации называют плоскость, проходящую через вектор  $\vec{E}$  и направление распространения волны.

Волны, распространяющиеся в однородной изотропной среде без потерь, являются поперечными волнами, т.е. векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  этих волн перпендикулярны направлению распространения и взаимно перпендикулярны. Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  изменяются в фазе. Поверхность, во всех точках которой векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  имеют одну и ту же фазу, называется фазовой поверхностью.

В электромагнитной волне векторы электрического и магнитного полей в каждый момент времени определенным образом ориентированы в пространстве. В случае линейной поляризации электромагнитной волны в фиксированной точке пространства будет наблюдаться возвратно поступательное колебание конца вектора  $\vec{E}$ . В случае круговой поляризации - перемещение конца вектора  $\vec{E}$  по

окружности и в случае эллиптической поляризации - по эллипсу.

Если векторы поля, изменяясь по абсолютной величине, не изменяют своего направления в пространстве, то такие электромагнитные волны называют поляризованными линейно. У линейно-поляризованной волны плоскость поляризации не меняет своей ориентации в пространстве.

На рисунке 1 представлены мгновенные картины электрического поля линейно-поляризованной волны (а), поляризованной по кругу (б) и эллиптически поляризованной волны (в).

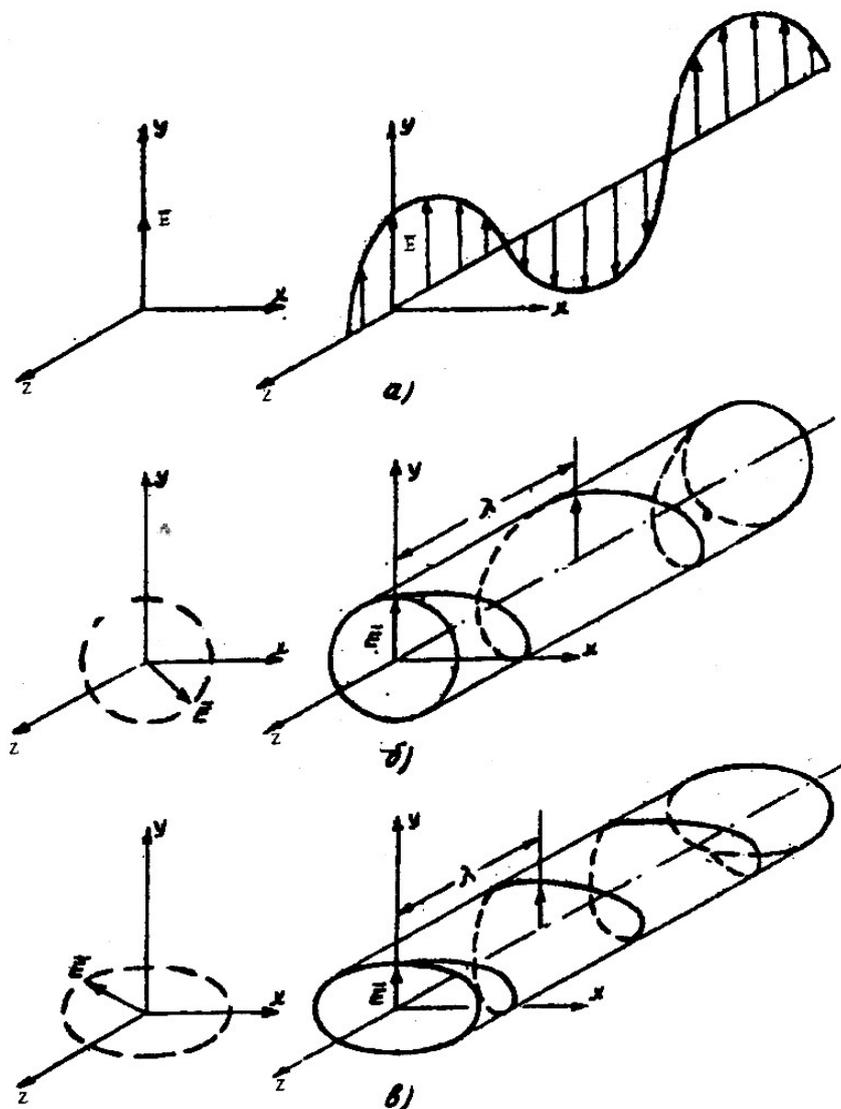


Рис. 1. Виды поляризации электромагнитной волны: а) - линейная поляризация; б) - круговая поляризация; в) - эллиптическая поляризация

## 2.2. Соотношения, определяющие типы поляризации волны

Получим соотношения, позволяющие построить годограф вектора  $\vec{E}$  и определить виды поляризации.

Пусть плоская волна движется вдоль оси  $z$  (рис 2) и имеет составляющие вектора  $\vec{E}$ :

$$\dot{E}_x = E_{xm} e^{j(-kz + \varphi_x)}, \quad \dot{E}_y = E_{ym} e^{j(-kz + \varphi_y)} \quad (2.1)$$

где  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  - начальные фазы, при  $z=0$ ,  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  - длина рабочей волны

Предполагая гармоническую зависимость поля от времени, запишем (2.1) в виде мгновенных значений составляющих электрического поля:

$$E_x = E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_x), \quad E_y = E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \quad (2.2)$$

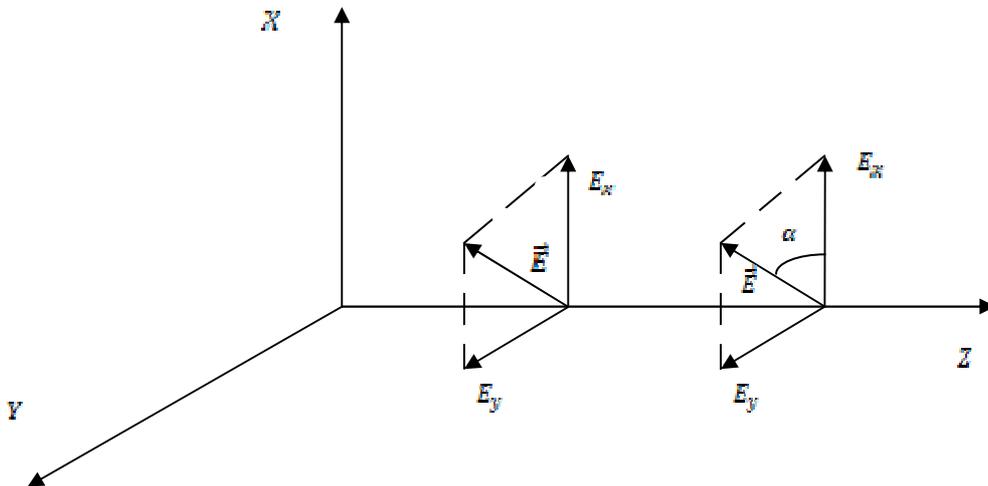


Рис 2. Распространение плоской волны вдоль оси  $Z$ .

Длину вектора  $\vec{E}$  и угол  $\alpha$ , который вектор  $\vec{E}$  образует с осью  $x$ , находим из формул

$$E(z, t) = \sqrt{(E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_x))^2 + (E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_y))^2}; \quad (2.3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) / [E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_x)].$$

Зависимость угла  $\alpha$  от  $z$  и  $t$  определяет поляризацию волны

1) Положим, начальные фазы равными  $\varphi_y = \varphi_x$ , а амплитуды - произвольные.

Тогда из (2.3) следует, что

$$E(z, t) = \sqrt{E_{xm}^2 + E_{ym}^2} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \quad (2.4)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}(E_{ym} / E_{xm})$$

т.е. направление вектора  $\vec{E}$  остается в пространстве неизменным, а длина его изменяется по закону косинуса. Это линейно поляризованная волна.

2) Положим амплитуды волн равными  $E_{xm} = E_{ym}$ , а фазы сдвинуты на  $\pi/2$

$$\varphi_y = \varphi_x - \pi/2,$$

тогда

$$E(z, t) = E_{xm}, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{\cos(\omega t - kz + \varphi_x - \pi/2)}{\cos(\omega t - kz + \varphi_x)} = \omega t - kz + \varphi_x \quad (2.5)$$

Эти соотношения характеризуют круговую поляризацию, т.к. длина вектора  $\vec{E}$  остается постоянной, а угол, образуемый им с осью абсцисс, линейно изменяется при изменении времени и координаты. Конец вектора описывает в плоскости  $z = \text{const}$  окружность, вращаясь с угловой частотой  $\omega$  по часовой стрелке, если смотреть по направлению движения волны. При изменении времени  $t$  конец вектора  $\vec{E}$  будет описывать винтовую линию (спираль, рис.1.б). При увеличении координаты  $z$  вектор  $\vec{E}$  поворачивается по часовой стрелке. Такая

волна называется лево поляризованной.

Если сдвиг фаз  $\varphi_y = \varphi_x + \pi/2$ , то направление вращения вектора  $\bar{E}$  изменяется на противоположное (волна с правой круговой поляризацией).

3) Если амплитуды составляющих вектора  $\bar{E}$  произвольные, а фазы сдвинуты на  $\pi/2$ , то получаем эллиптическую поляризацию (рис.1,в )

Можно получить параметрическое уравнение траектории движения конца вектора  $\bar{E}$  [1], распространяющейся вдоль оси  $z$  волны, в фиксированной точке пространства при произвольных начальных фазах. Для этого в (2.2) представим  $E_x = x$  и  $E_y = y$ , и будем рассматривать их как координаты поляризации волны. Введем обозначение  $\theta = \omega t - kz$ . Разложим соотношения

$$\begin{aligned} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) &= \cos[\theta + \varphi_x] = \cos \theta \cos \varphi_x - \sin \theta \sin \varphi_x \\ \cos(\omega t - kz + \varphi_y) &= \cos[\theta + \varphi_y] = \cos \theta \cos \varphi_y - \sin \theta \sin \varphi_y \end{aligned}$$

Решим эту систему уравнений относительно  $\cos \theta$ ,  $\sin \theta$  методом определителей, получим:

$$\cos \theta = \frac{\frac{x}{E_{mx}} \sin \varphi_y - \frac{y}{E_{my}} \sin \varphi_x}{\sin(\varphi_y - \varphi_x)}, \quad \sin \theta = \frac{\frac{x}{E_{mx}} \cos \varphi_y - \frac{y}{E_{my}} \cos \varphi_x}{\sin(\varphi_y - \varphi_x)}$$

Возводя обе части этих уравнений в квадрат и почленно складывая получающиеся выражения, приходим к уравнению вида:

$$\frac{x^2}{E_{mx}^2} + \frac{y^2}{E_{my}^2} - 2 \frac{xy}{E_{mx} E_{my}} \cos \phi = \sin^2 \phi, \quad (2.6)$$

где  $\phi = \varphi_y - \varphi_x$  - разность начальных фаз компонентов  $\dot{E}_x$ , и  $\dot{E}_y$ . Соотношение (2.6) представляет собой уравнение эллипса. Большая ось эллипса повернута относительно оси  $x$  на угол  $\eta = 90^\circ - \xi$  (рис. 3), определяемый соотношением

$$\operatorname{tg} 2\eta = \frac{2E_{mx}E_{my}}{E_{mx}^2 - E_{my}^2} \cos(\varphi_y - \varphi_x)$$

Таким образом, годографом вектора поля  $\vec{E}$  является эллипс, называемый поляризационным эллипсом или эллипсом поляризации. Внутри этого эллипса вектор  $\vec{E}$  совершает вращение, причем полный оборот происходит за период колебаний  $T = 2\pi / \omega$ .

### 2.3. Геометрические параметры эллипса поляризации

Основными количественными характеристиками эллипса поляризации являются геометрические параметры: коэффициент эллиптичности  $\tau$ , угол  $\xi$  (рис.3) и направление обхода вектора  $\vec{E}$  по эллипсу.

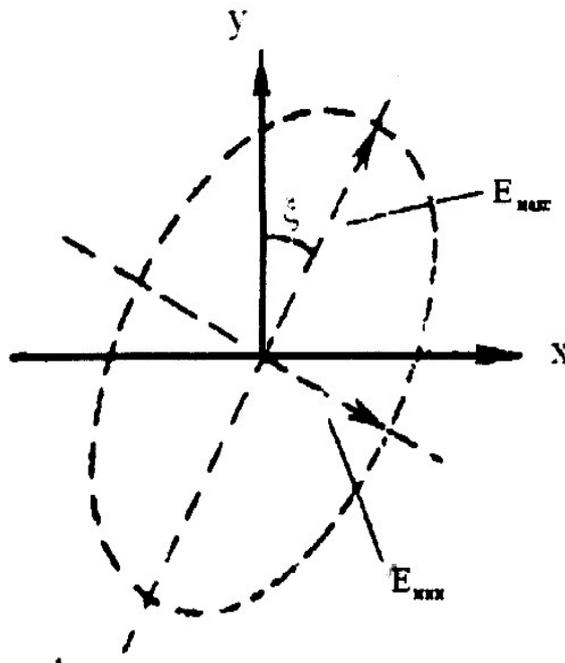


Рис. 3. Параметры эллипса поляризации

Коэффициент эллиптичности  $\tau$  характеризует форму эллипса и равен отношению его осей - минимальной к максимальной оси в данной точке:

$$\tau = E_{\min} / E_{\max}, \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

Угол  $\xi$  - угол между большой осью эллипса и осью Y, выбранной

прямоугольной системы координат (рис.3).

Выражения для угла  $\xi$  и коэффициента эллиптичности  $\tau$  запишем в виде:

$$\xi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left( -\frac{2 \cos \phi \cdot E_x E_y}{E_x^2 - E_y^2} \right) \quad (2.7)$$

$$\tau = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \approx \sqrt{\frac{E_y^2 + E_x^2 \operatorname{tg}^2 \xi}{E_x^2 + E_y^2 \operatorname{tg}^2 \xi}} \quad (2.8)$$

$$E_{\min} \approx \sin \phi \sqrt{\frac{1 - \operatorname{tg}^2 \xi}{E_x^2 + E_y^2 \operatorname{tg}^2 \xi}} E_x E_y$$

$$E_{\max} \approx \sin \phi \sqrt{\frac{1 - \operatorname{tg}^2 \xi}{E_y^2 + E_x^2 \operatorname{tg}^2 \xi}} E_x E_y \quad (2.9)$$

Рассмотрим ряд частных случаев уравнения (2.6)

### 1) Волна линейной поляризации.

Разность фаз пусть равна  $\phi = 2\pi n$  или  $\phi = \pi(2n-1)$ , где  $n=0, \pm 1, \pm 2$ .

Уравнение (2.6) при этом превращается в уравнение прямой линии:  $\frac{x}{E_x} = \pm \frac{y}{E_y}$ . В

этих случаях говорят, что волна линейно поляризована. Параметр  $\tau$  линейно-поляризованной волны равен нулю. Ориентация плоскости поляризации зависит от соотношения амплитуд составляющих  $E_y$  и  $E_x$ . Если  $E_y \neq 0$ , а  $E_x = 0$  плоскость поляризации совпадает с плоскостью  $x = 0$  ( $YOZ$ ). Значение угла  $\xi$  равно нулю.

### 2). Волна с эллиптической поляризацией.

Если разность фаз  $\phi = \frac{\pi}{2} \pm 2\pi m$ , а амплитуды любые, то уравнение (2.6)

преобразуется в уравнение эллипса:

$$\frac{x^2}{E_x^2} + \frac{y^2}{E_y^2} = 1.$$

В общем случае, при произвольной разности фаз  $\phi$ , оси эллипса наклонены по отношению к осям  $x$  и  $y$ .

### 3) Волна с круговой поляризацией.

Если разность фаз  $\phi$  равна  $\phi = \frac{\pi}{2} \pm 2\pi m$  и одновременно равны амплитуды  $E_x = E_y$ , то уравнение (2.6) представляет собой уравнение окружности. В этом случае имеет место круговая поляризация. Для круговой поляризации величина  $\tau = 1$ .

Поля с вращающейся поляризацией находят широкое применение для повышения помехозащищенности, дальности и надежности обнаружения целей в радиолокации, уменьшения влияния осадков на обнаружение целей и для устойчивого приема телевизионных сигналов.

## 2.4. Поляризационная решетка

Способы создания полей с вращающейся поляризацией можно разбить на две группы.

В первой группе взаимно перпендикулярные поля возбуждаются первичными излучателями, например системой двух вибраторов, развернутых относительно друг друга на  $90^\circ$  и питаемых от одного источника с некоторым сдвигом фаз или без сдвига фаз.

Во второй группе первичный излучатель или излучатели создают линейно поляризованное поле. Это поле затем раскладывается на взаимно перпендикулярные компоненты, одна из которых сдвигается по фазе на необходимый угол относительно второй.

Расщепляющие и фазирующие устройства могут располагаться в волноводном тракте, в раскрыве антенны или на поверхности антенны. Расщепляющие устройства, располагаемые в раскрыве антенны, например, рупора, получили название поляризационных решеток.

Металлопластинчатая поляризационная решетка (рис.4,а) состоит из тонких параллельных металлических полос, имеющих в направлении распространения

волны ширину  $L$ . Расстояние между пластинами  $d$  должно быть таким, чтобы на рабочей частоте могла существовать только одна волна  $H_{10}$ , а для волн высших типов волновод являлся бы запертым. Это условие выполняется, если:

$$\frac{\lambda_0}{2} < d < \lambda_0 \quad (2.10)$$

где  $\lambda_0$  - длина волны в свободном пространстве. Ее обычно задают.

Такая решетка может рассматриваться как набор прямоугольных волноводов, имеющих очень большой размер  $b$  (в десять раз или больше размера  $d$ , рис.4,а), и установленных рядом друг с другом так, что их боковые стенки смыкаются между собой.

При повороте пластин решетки на некоторый угол  $\varphi$  относительно ее исходного положения вектор  $\bar{E}$  падающей линейно поляризованной волны внутри решетки распадается на две ортогональные составляющие, одна из которых  $E_\tau$ , параллельна пластинам решетки, а другая  $E_n$  - перпендикулярна им (рис.4, б)

Если вектор  $\bar{E}$  падающей плоской волны ориентирован перпендикулярно пластинам, эта пластина не оказывает никакого воздействия на волну и между ними распространяется волна, близкая по структуре к чисто поперечной  $T$ - волне. При этом, граничные условия на поверхности пластин удовлетворяются автоматически, скорость распространения этой волны равна скорости света в свободном пространстве с некоторой поправкой на параметр  $\epsilon_r$  пенопласта, в котором закреплены пластины, волновое сопротивление среды в решетке равно волновому сопротивлению свободного пространства.

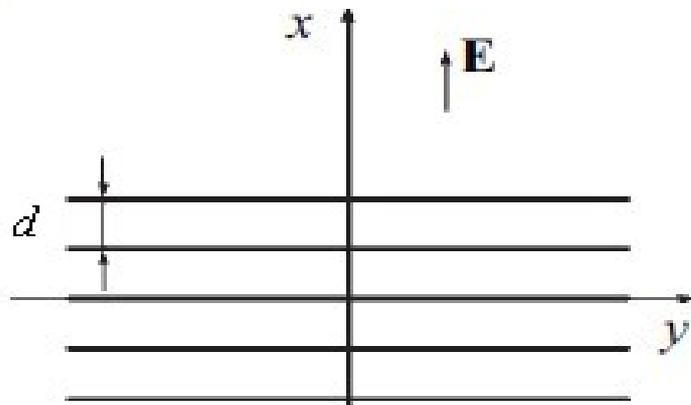
Если вектор  $\bar{E}$  падающей плоской волны будет ориентирован параллельно пластинам решетки, то поле волны, возбуждающейся между ними, будет удовлетворять на пластинах граничному условию  $E_\tau = 0$ , и по структуре поле оказывается аналогичным полю  $\bar{E}$  волны  $H_{10}$  (или  $H_{01}$ ) в прямоугольном

волноводе, Фазовая скорость этого поля отличается от скорости света и определяется формулой

$$V_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\lambda_0/2d\right)^2}} \quad (2.11)$$

При падении на решетку волны, вектор  $\vec{E}$  которой ориентирован под произвольным углом  $\varphi$  к пластинам, между пластинами возбуждаются оба типа волн ( $\vec{H}_{10}$  и  $\vec{O}$ ), имеющие на выходе разность фаз:

а)



б)

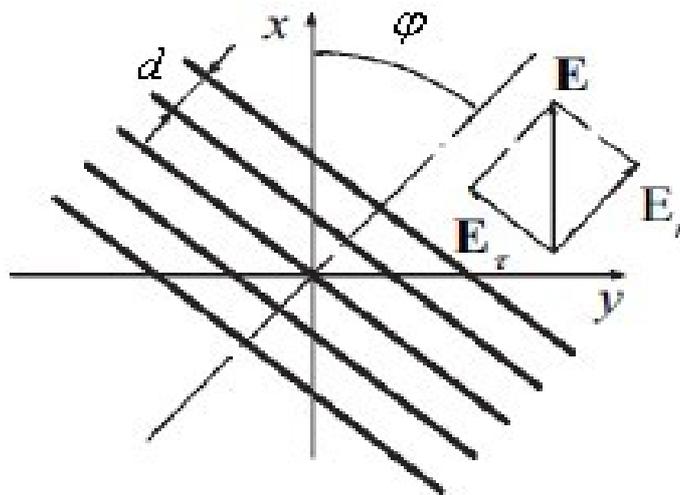


Рис. 4. Поляризационная решетка

$$\Phi = \frac{2 \pi L}{\lambda_0} - \frac{2 \pi L}{\lambda_g} \quad (2.12)$$

где  $\lambda_g$  длина волны в волноводе

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\lambda_0/2d\right)^2}} \quad (2.13)$$

$L$ - ширина пластин решетки.

Амплитуды составляющих электрического вектора (рис.4.б) равны,

$$E_\tau = E_0 \sin \varphi \quad , \quad E_n = E_0 \cos \varphi \quad (2.14)$$

где  $E_0$ - амплитуда линейно- поляризованной волны, падающей на решетку.

Для того чтобы с помощью металлопластинчатой поляризационной решетки линейно поляризованное поле превратить в поле с круговой поляризацией необходимо на выходе решетки иметь сдвиг фаз, равный

$$\Phi = \frac{\pi}{2} (2m - 1) \quad (2.15)$$

где  $m=1, 2, 3 \dots$

и равенство амплитуд нормальной и касательной составляющих на выходе,

т. е.  $E_n = E_\tau$ . Для волны, вектор  $\vec{E}$  которой  $E_\tau$  параллелен пластинам, решетка представляет собой среду, волновое сопротивление которой будет отличаться от волнового сопротивления свободного пространства. Это приводит к тому, что волна будет отражаться как от передней, так и от задней поверхности решетки. Для того чтобы эти отражения скомпенсировали друг друга, необходимо, чтобы

пластины решетки имели полуволновую (или кратную половине волны) ширину:

$$L = \frac{\lambda_{\text{в}}}{2} n \quad (2.16)$$

где  $n$  - 1,2,3...

При выполнении условия (2.16) и повороте решетки на угол  $\varphi = 45^\circ$  (между плоскостью поляризации линейно поляризованной волны и пластинами решетки) амплитуды составляющих полей за решеткой будут равны. В предположении плоского фазового фронта волны от решетки отсутствует отражение. В действительности, за счет отклонения фронта волны от плоского, всегда будет отражение для обеих составляющих полей. Это приведет к неравенству амплитуд вертикальной и горизонтальной компонент. Более тщательное выравнивание амплитуд вертикальной и горизонтальной составляющих достигается при подборе расстояния между излучающим рупором и решеткой.

Таким образом, за решеткой возбуждается эллиптически поляризованная волна, жестко связанная с положением пластин решетки относительно вектора  $\vec{E}$  падающей на нее линейно поляризованной волны. Полуоси эллипса всегда будут расположены так, что одна из них совпадает с направлением пластин решетки. Поэтому при вращении решетки относительно вектора  $\vec{E}$  падающей на нее электромагнитной волны, будет изменяться как коэффициент эллиптичности волны, возбуждаемой в свободном пространстве за решеткой, так и угол наклона большей полуоси поляризационного эллипса этой волны.

Удовлетворив условиям (2.15):

$$\frac{2 \pi L}{\lambda_0} - \frac{2 \pi L}{\lambda_{\text{в}}} = \frac{\pi}{2} \dots\dots (m = 1) , \quad (2.17)$$

т.е. сдвиг фазы между ортогональными компонентами равен  $90^\circ$ , что будет соответствовать случаю четвертьволновой решетки, и

$$L = \frac{\lambda_g}{2} \quad (n=1), \quad (2.18)$$

и решив совместно (2.17) и (2.18), найдем, что

$$L = \frac{3}{4} \cdot \lambda_0 = \frac{\lambda_g}{2} \quad (2.19)$$

Зная зависимость  $\lambda_g$  от  $\lambda_0$  и  $a$  (2.15), находим из (2.19) расстояние между пластинами

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{9}{5}} \cdot \lambda_0 \cong 0,67 \lambda_0 \quad (2.20)$$

При вращении поляризационной решетки будут меняться соотношения между ортогональными составляющими. При углах  $\varphi = 0^\circ, \pm 90^\circ, \pm 180^\circ$ , на выходе решетки будет линейно поляризованная волна.

Для всех остальных случаев будем иметь дело с эллиптической поляризацией. Таким образом, вращая четвертьволновую решетку, можно получить поле любой поляризации.

## 2.5. Дополнительные сведения [3]

Если сложить последовательно друг за другом две решетки, рассчитанные по выше изложенной методике, то общая ширина удвоится. В этом случае вместо (2.18) будет выполняться равенство (2.16) при  $n=2$ , т.е.

$$L = \frac{\lambda_g}{2} \cdot 2 = \lambda_g.$$

В связи с этим результирующая решетка тоже окажется прозрачной.

При этом если пластины обеих решеток совпадают друг с другом по направлению, то разность фаз между ортогональными компонентами будет составлять

$$\frac{2 \pi L}{\lambda_0} - \frac{2 \pi L}{\lambda_0 \epsilon} = \pi . \quad (2.21)$$

В результате на выходе будем иметь линейно - поляризованное поле, но плоскость поляризации этого поля будет повернута по сравнению с плоскостью поляризации падающей на решетку волны на некоторый угол, величина которого изменяется в зависимости от угла между пластинами решетки и плоскостью поляризации антенны. Например, если  $\varphi = 45^\circ$  этот угол будет равен  $90^\circ$ .

Аналогичный результат получится и в том случае, если линейно – поляризованная волна проходит через решетку толщиной  $\frac{\lambda_0}{2}$ , отражается от металлической плоскости и снова проходит через ту же поляризационную решетку. Следовательно, если между излучателем с линейной поляризацией и металлическим экраном поместить поляризационную решетку, преобразующую поле линейной в поле круговой поляризации, т.е.  $\varphi = 45^\circ$ , то излучатель не «увидит» экрана, т.к. плоскость поляризации отраженной волны оказывается ортогональной поляризации излучателя и он не реагирует на неё.

Подобное явление происходит при отражении от сферических элементов, например, дождевых капель.

### 3. Расчетное задание

**3.1.** Определить рабочую длину волны в свободном пространстве и рабочую частоту, если параметр поляризационной решетки  $L$  задан для каждой бригады таблицей 3.1.

**3.2.** Определить размер между пластинами поляризационной решетки  $d$  для заданной длины волны, поставить его в таблицу 3.1.

**3.3.** Определить длину волны (2.13) в поляризационной решетке и фазовую скорость по данным таблицы 3.1, внести результат расчета бригады в таблицу 3.1.

**3.4.** Определить сдвиг фазы  $\Phi$  (2.12) при распространении волны в поляризационной решетке, результат расчета внести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

№ бригады		1	2	3	4	5	6
Размер $L$ решетки	см	<b>2,5</b>	<b>2,7</b>	<b>2,9</b>	<b>3,1</b>	<b>3,3</b>	<b>3,5</b>
Рабочая частота $f_{раб}$	ГГц						
Размер $a$ , <b>n.3.2</b>	см						
Величина $\lambda_b$	см						
Сдвиг фазы $\Phi$	В градусах						
Параметры волны: $E_{my} e^{\varphi_y} \cdot E_{mx}$	$\varphi_y$ в градусах	<b>90</b> $E_{my} =$ $E_{mx}$	<b>45</b> $E_{my} =$ $E_{mx}$	<b>135</b> $E_{my} =$ $0,5 E_{mx}$	<b>180</b> $E_{my} =$ $0,5 \cdot E_{mx}$	<b>0</b> $E_{my} =$ $E_{mx}$	<b>90</b> $E_{my} =$ $0,5 \cdot E_{mx}$

**3.5.** Определить тип поляризации волны, заданной следующим соотношением  $\vec{E} = \vec{x}_0 E_{mx} + \vec{y}_0 E_{my} e^{\varphi_y}$ , и величинами амплитуд и фаз в таблице 3.1.

## 4. Экспериментальная часть

### 4.1. Схема и принцип работы установки.

Экспериментальная установка для исследования поляризационных характеристик электромагнитных волн приведена на рис. 5 и работает в 3-х сантиметровом диапазоне. Передающий тракт установки включает следующие элементы и устройства СВЧ диапазона:

Прибор P2M-18 – является источником сигналов;

- 1 - волноводно - коаксиальный переход;
- 2 - излучающая рупорная антенна;

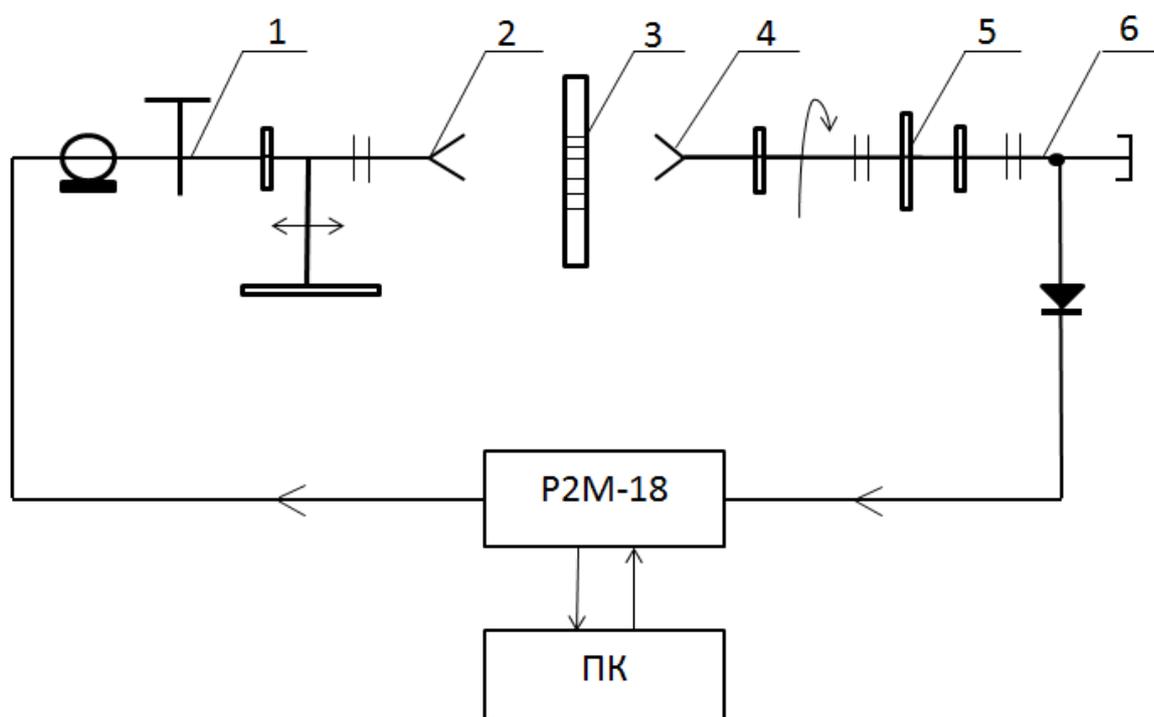


Рис.5. Схема установки для исследования поляризационных характеристик электромагнитных волн.

3 – поляризационная решетка, расположена перпендикулярно направлению распространения волны, движущейся от передающей антенны к приемной, решетка может поворачиваться вокруг оси распространения волны (оси  $z$ ) на угол  $\Psi$  (угол  $\Psi$  изменяется ступенчато в пределах от 0 до  $\pm 90^\circ$  через  $15^\circ$ );

4 – приемная рупорная антенна, может вручную вращаться вокруг оси  $z$  на любой угол  $\Theta$  в пределах от 0 до  $\pm 90^\circ$  (при вращении приемной антенны детекторной секцией измеряется амплитуда принимаемых сигналов);

5 – транспортер для определения угла поворота приемной антенны;

6 – настраиваемая на рабочую частоту детекторная камера с детектором;

Сигнал с детекторной камеры поступает на прибор P2M-18, который сравнивает мощности двух сигналов:

а) – сигнала, поступившего на вход экспериментальной установки (обычно это откалиброванный по мощности сигнал, равный 1мВт) и

б) – сигнала, пришедшего на детекторную камеру;

Сравнительный результат выдается в виде относительной величины  $L$ , равной

$$L = 10 \lg \frac{P_{\text{дд}}}{P_{\text{д}}} \quad \text{«дБм»};$$

Результат при помощи онлайн калькулятора (<http://profi-radio.ru/online-raschet.html>) может быть переведен из дБм в Вт, а затем нормирован. Все снимаемые числовые значения (частота, величины  $L$  при поставленных углах  $\Theta, \varphi$ ) поступают на персональный компьютер.

ПК - компьютер необходим для управления прибором Р2М-18 с помощью программы Graphit (установления рабочих частот и получения результатов измеряемых характеристик).

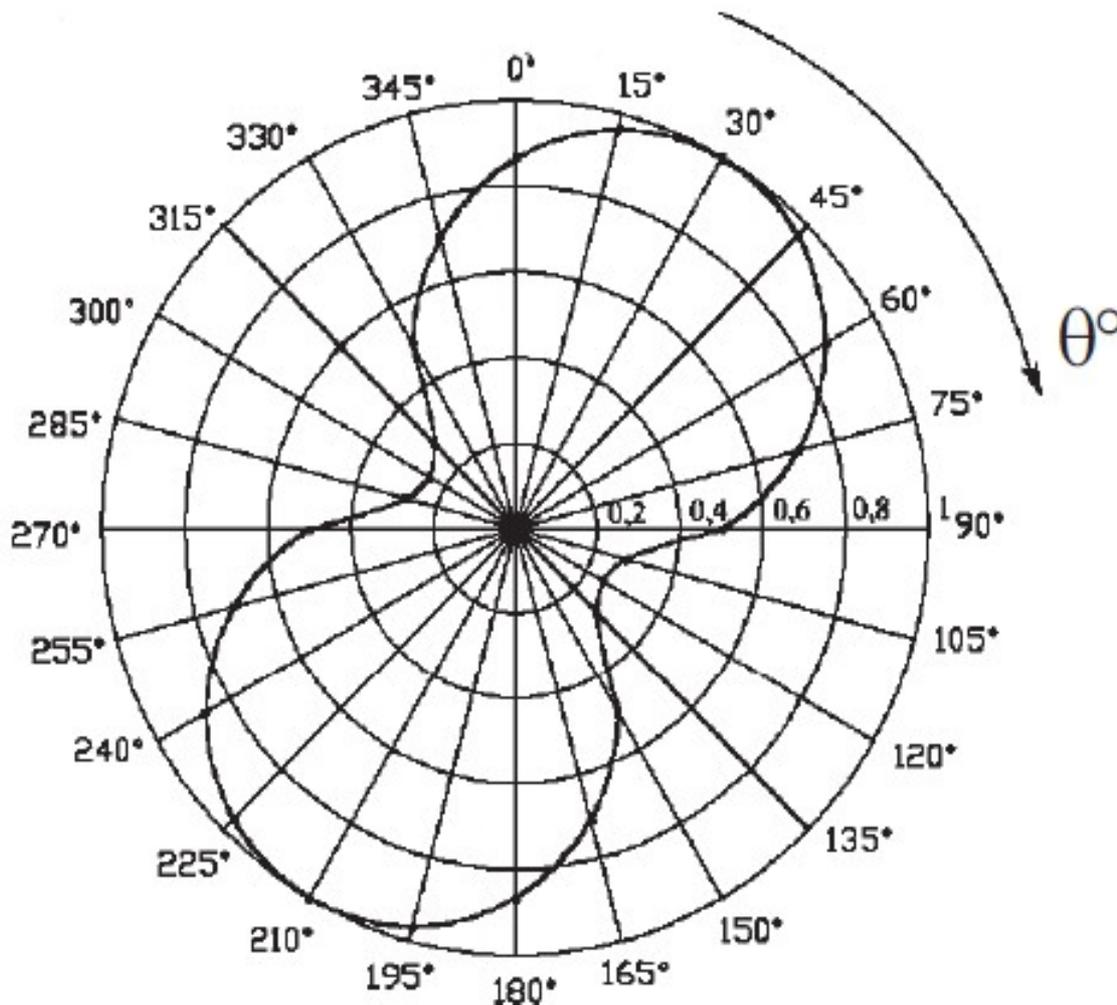


Рис. 6. Поляризационная диаграмма решетки (гантельная кривая)

По результатам измерений строится поляризационная диаграмма, представляющая зависимость (в полярных координатах) амплитуды сигналов от углового положения приемной антенны. Затем определяется коэффициент эллиптичности поляризационного эллипса (пример на рис.6).

Кроме того, можно провести экспериментальное определение относительного затухания линейно поляризованных электромагнитных волн с ортогональными плоскостями поляризации, связанных с составляющими  $E_n$  и  $E_r$  вектора  $\vec{E}$ , которые распространяются внутри поляризационной решетки, и измерить разность фаз ( $\Delta\varphi$ ) этих гармонических волн на выходе поляризационной решетки. Эту разность фаз следует рассчитать в ходе проведения экспериментальных исследований помня, что в данной исследовательской установке угол наклона поляризационного эллипса  $\Psi$   $\xi$  равен углу поворота поляризационной решетки  $\Theta$ .

## 4.2.Методика проведения эксперимента

### 4.2.1. Настройка установки

Подать питание на прибор P2M-18 и компьютер.

Для входа в систему получить у преподавателя пароль и логин.

Запустите на ПК программу **Graphit** по управлению прибором P2M-18.

#### Пуск-Программы-Приборы-Микран-Graphit2.3b1-Graphit P2M

В появившемся окне, выберите прибор **P2M-18 06070217** с IP-адресом 192.168.1.247 и нажмите «Подключиться».

Выставите в окне ПК справа параметры частоты, центральная частота: 7604,56 МГц, количество точек: 1.

В окне «усреднение», установите степень усреднения пока изображение не стабилизируется, обычно не более 16. Нажать Enter.

Запустить режим «измерения» нажав кнопку .

Включить аппаратуру и дать ей стабилизировать режим работы в течение 5 минут. Настроить СВЧ генератор на заданную таблицей 3.1. бригаде рабочую частоту ГГц.

#### **4.2.2. Исследование электромагнитной волны с круговой поляризацией**

Установить поляризационную решетку в положения  $\Psi = +45^\circ$ .

Изменяя положение **передающего** рупора (вдоль направления  $z$ ) относительно решетки, добиться максимального значения коэффициента эллиптичности  $\tau$ . Зафиксировать показания индикаторного прибора приемной антенны для двух углов поворота  $\Theta$ . Следует иметь ввиду, что при  $\Theta = +45^\circ$  плоскость поляризации приемной антенны должна быть параллельна пластинам поляризационной решетки, а при  $\Theta = -45^\circ$  плоскость поляризации приемной антенны должна быть перпендикулярна пластинам поляризационной решетки.

#### **4.2.3. Снятие частотной зависимости коэффициента эллиптичности**

В интервале частот  $f_{раб} \pm 150$  МГц, заданный таблицей 3.1, при ориентации пластин решетки под углом  $\Psi = 45^\circ$  снять и построить частотную зависимость  $\tau = \tau(f_{раб})$ . Из графика определить уточненную рабочую частоту по максимальному значению коэффициента эллиптичности  $\tau$ .

#### **4.2.4. Исследование линейно поляризованной электромагнитной волны**

1. Установить поляризационную решетку в положение  $\Psi = 0^\circ$ .

Вращая приемную антенну в пределах от  $\Theta = 0^\circ$  до  $\Theta = 180^\circ$  с шагом  $15^\circ$ , зафиксировать показания стрелочного индикаторного прибора  $\alpha$  и занести их в таблицу 4.1.

2. Установить поляризационную решетку в положение  $\Psi = 90^\circ$ .

Вращая приемную антенну в пределах от  $\Theta = 0^\circ$  до  $\Theta = 180^\circ$  с шагом  $15^\circ$ , зафиксировать показания стрелочного индикаторного прибора  $\alpha$  и занести их в таблицу 4.1. Таблицу 4.1. рекомендуется развернуть в отчете на  $90$  градусов

Таблица 4.1

$\Theta$		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	....	$165^\circ$	$180^\circ$
$\Psi = 0^\circ$	$\alpha$ (дел)						
	$\alpha / \alpha_{max}$						
$\Psi = 90^\circ$	$\alpha$ (дел)						
	$\alpha / \alpha_{max}$						

3. Построить поляризованные диаграммы по результатам таблицы 4.1. Определить максимальный коэффициент эллиптичности.

#### 4.2.5. Исследование электромагнитной волны эллиптической поляризации

Установить поляризационную решетку в положение  $\Psi = \pm 30^\circ$ .

Вращая приемную антенну в пределах углов  $\Theta$  от  $\Theta = 0^\circ$  до  $\Theta = 180^\circ$  с шагом  $15^\circ$ , зафиксировать показания стрелочного индикаторного прибора  $a$  и занести их в таблицу 4.2, подобную таблице 4.1.

**4.2.6. Измерение коэффициента эллиптичности волны.** Установить поляризационную решетку последовательно в положения  $\Psi = \pm 15^\circ$ ,  $\Psi = \pm 45^\circ$ ,  $\Psi = \pm 60^\circ$ . Измерить коэффициент эллиптичности волны. Для этого, установив решетку в требуемое положение, вращать приемный рупор в пределах от  $\Theta = 0^\circ$  до  $\Theta = 180^\circ$  и фиксировать минимальное и максимальное показания индикаторного прибора ( $\alpha_{max}$  и  $\alpha_{min}$ ). Результаты измерений и расчета  $\tau$  занести в таблицу 4.3.

Таблица 4.2

$\Theta$		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	....	$330^\circ$	$345^\circ$
$\Psi = 30^\circ$	$a$ (дел)						
	$a / a_{max}$						
$\Psi = -30^\circ$	$a$ (дел)						
	$a / a_{max}$						

Таблица 4.3

$\Psi$	$a_{min}$	$a_{max}$	$\tau$
0			
+15°			
+30°			
+45°			
+60°			
90°			
-60°			
-45°			
-30°			
-15°			

Переведите мощность дБм в Вт при помощи онлайн калькулятора (<http://profi-radio.ru/online-raschet.html>), затем проведите нормировку результатов эксперимента.

По результатам измерений сделать подробные выводы.

#### 4.2.7. Завершение эксперимента.

Остановить программу, нажав кнопку . Закрывать программу и выключить из сети прибор P2M. Отключить компьютер.

### 5. Контрольные вопросы

- 5.1. Дать определение поляризации электромагнитной волны.
- 5.2. Как получить круговую поляризацию волн?
- 5.3. Как получить линейную поляризацию волн?
- 5.4. Как получить поляризационный эллипс?
- 5.5. Что такое коэффициент эллиптичности?
- 5.6. Зачем необходимо точно устанавливать разность фаз между плоскими

волнами и волнами, проходящими по волноводу?

5.7. Если пластины поляризационной решетки имеют разброс по ширине и расстоянию между пластинами, то на чем это сказывается?

5.8. Как можно добиться круговой поляризации при использовании решетки с параметрами  $L$  и  $a$  не всегда одинаковыми?

5.9. Как будет изменяться коэффициент эллиптичности от частоты (с ростом последней), если изменять рабочую частоту в пределах  $f_0 \pm 150 \text{ МГц}$ ?

5.10. Как определяется угол ориентации эллипса?

5.11. Какая волна называется плоской?

5.12. Какая волна называется волной типа  $\bar{H}_{10}$ ?

5.13. Что называют коэффициентом эллиптичности волны?

5.14. Как измерить коэффициент эллиптичности волны?

5.15. Зачем перемещают передающий рупор по отношению решетки?

## 6. Содержание отчета

Отчет должен включать:

1. Схему измерительной установки;
2. Таблицы с экспериментальными данными и результатами их обработки;
3. Поляризационные диаграммы, подобные рис. 5;
4. Результаты измерений и расчета коэффициентов эллиптичности  $\tau$ ;
5. Графики зависимости коэффициента эллиптичности от частоты, угла поворота поляризационной решетки по данным таблицы 4.3.
6. Результаты расчета фазового сдвига  $\Phi$ , который должен создаваться поляризационной решеткой (2.12). Исходные данные для расчета:  $a = 20,1$  мм,  $l = 242,5$  мм,  $f = 10$  ГГц.
7. Результаты расчета измеренных значений фазового сдвига  $\Phi$  для углов поворота поляризационной решетки  $\Psi = \pm 15^\circ$  и  $\Psi = \pm 30^\circ$ , которые следует определять с помощью (2.12) и данным таблицы 4.3
8. Значение коэффициента эллиптичности  $\tau$ .
9. Выводы и объяснение результатов

## **Литература**

1. Л.А.Боков, В.А. Замотринский, А.Е.Мандель Электродинамика и распространение радиоволн: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2013-410 с. (44)
2. А. С. Завьялов, А. В. Сулакшина, Измерение поляризационных характеристик радиоволн.- Т: ТГУ, 1987, 14 с.
3. В.С. Калашников, Л. А. Федорова: Исследование поляризационных характеристик электромагнитных волн. - С-П: СГУАП, 2005, 23 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### 1.1 Описание P2M и принципов его работы.

Назначение:

P2M предназначен для измерения в коаксиальном тракте модуля коэффициента передачи (ослабления и усиления) и модуля коэффициента отражения или коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН); одновременного измерения модулей коэффициента передачи и отражения.

P2M может использоваться в качестве синтезатора частот для генерирования электрических синусоидальных колебаний с низким уровнем фазовых шумов в широком диапазоне частот и мощностей и в качестве измерителя мощности.

P2M работает в составе с компьютером (ПК), который осуществляет функции управления P2M и отображение результатов измерений. Для управления P2M предназначено программное обеспечение Graphit, работающее в операционной системе Windows® 2000 (SP 4), Windows® XP (SP 2), Windows® Vista. Для связи с ПК используется интерфейс Ethernet.

P2M может эксплуатироваться в лабораторных условиях, в цехах и ремонтных мастерских.

### 1.2 Функциональные возможности

Режим измерений, работы	Краткое описание
-------------------------	------------------

<p>Модуль коэффициента передачи</p>	<p>Отношение прошедшей через исследуемое устройство мощности к падающей:</p> $K_p = 10 \cdot \log(P_{\text{пр}}/P_{\text{пад}}), \text{дБ}$ <p>Единицы измерений <math>K_p</math> (формат отображения результата измерения ): дБ, раз</p> <p>Для определения ослабления/усиления, вносимого исследуемым устройством.</p>
<p>Модуль коэффициента отражения, КСВН</p>	<p>Отношение отраженной от исследуемого устройства мощности к падающей:</p> $\Gamma = 20 \cdot \log(P_{\text{отр}}/P_{\text{пад}}), \text{дБ}$ $\text{КСВН} = (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$ <p>Единицы измерений <math>\Gamma</math>: раз, дБ</p> <p>Для исследования качества согласования сопротивлений и эффективности применения устройств радиоизмерительного тракта.</p>
<p>Синтезатор частот</p>	<p>Для генерирования электрических синусоидальных колебаний с низким уровнем</p>

	фазовых шумов в широком диапазоне частот и мощностей.
* Указанные режимы являются дополнительными, метрологические характеристики в них не нормируются.	

Диапазон рабочих частот:

P2M-04 0,01 ... 4 ГГц

P2M-04A 0,01 ... 4 ГГц

P2M-18 0,01 ... 20 ГГц

P2M-18/2 0,01 ... 18 ГГц

P2M-18A 0,01... 20 ГГц

P2M-40 0,01 ... 40 ГГц

### 1.3 Расположение органов настройки и включения P2M

Вид передней панели P2M представлен на рисунке 4.2.

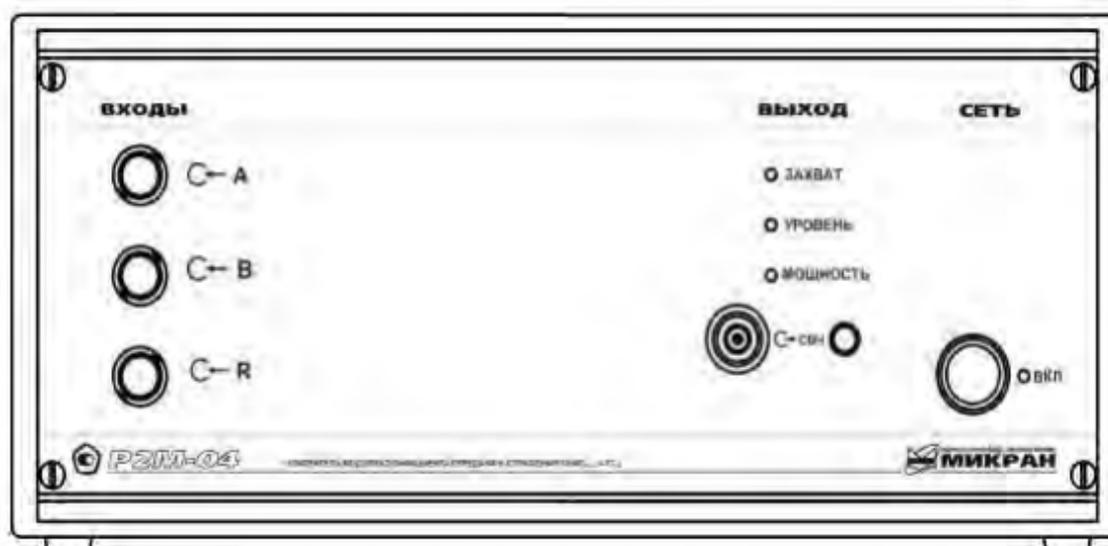


Рисунок 1.1– Передняя панель P2M

На передней панели расположены следующие разъемы, органы управления и поясняющие надписи:

- «C←A» – измерительный вход А;

- «C← В» – измерительный вход В;
- «C← R» – измерительный вход R;
- «Захват» – индикатор работы системы ФАПЧ (система автоматической подстройки частоты);
- «Уровень» – индикатор работы системы АРМ (автоматическая регулировка мощности);
- «Мощность» – индикатор наличия колебаний на выходе «СВЧ»;
- «СВЧ» – выход «СВЧ» и кнопка включения/выключения генерации СВЧ колебаний;
- «Вкл.» – включатель и выключатель электропитания и индикатор состояния.

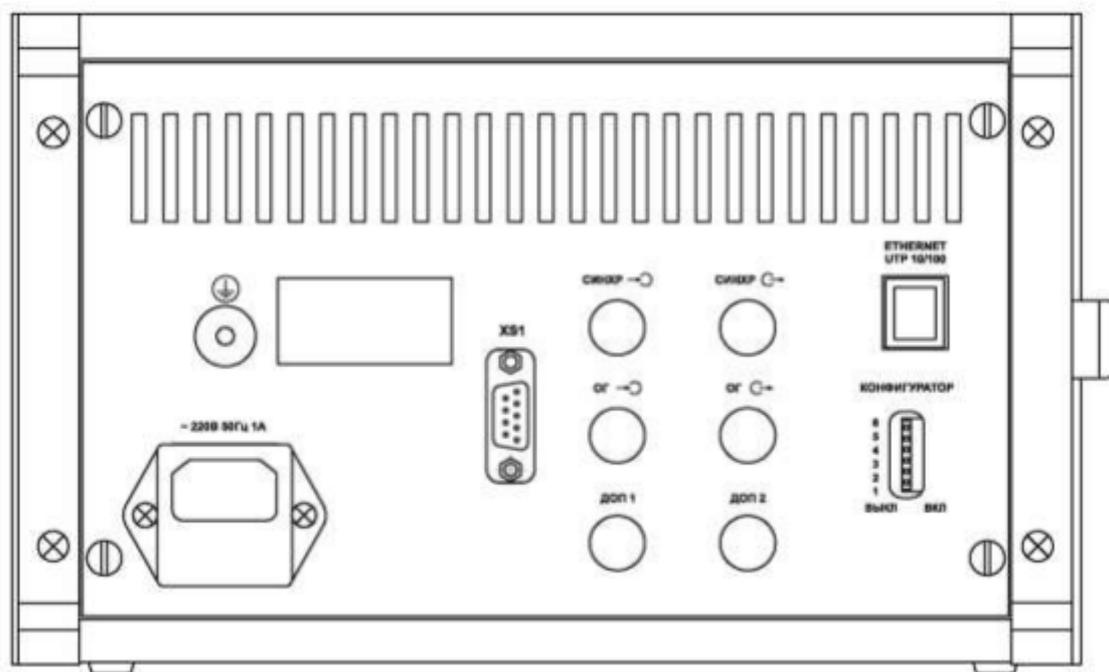


Рисунок 1.2- Задняя панель P2M.

На задней панели расположены следующие разъемы и органы управления:

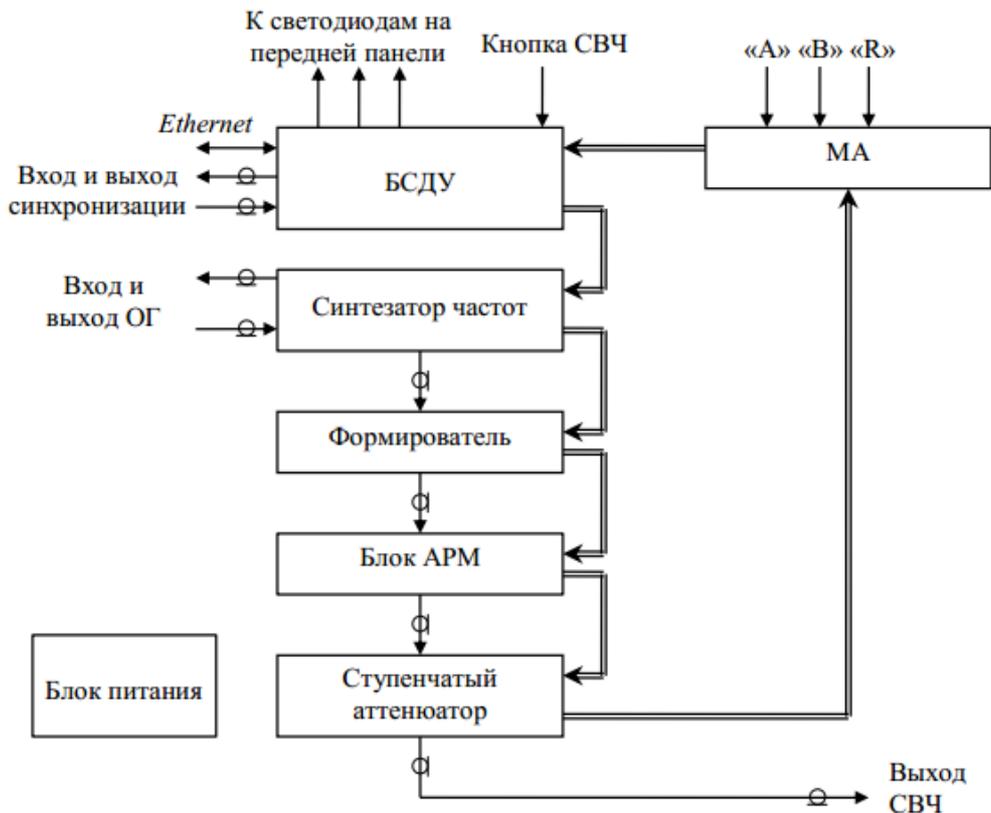
- «~220 В 50 Гц 1 А» – разъем подключения сетевого шнура, совмещенный с предохранителем;
- «Программатор» – сервисный разъем для программирования;
- «» – разъем защитного заземления;
- «Синхр » – вход сигнала синхронизации;
- «Синхр » – выход сигнала синхронизации;
- «ОГ » – вход опорного генератора;
- «ОГ » – выход опорного генератора;
- «ДОП1» и «ДОП2» – входы зарезервированы для дальнейших разработок;
- «Ethernet UTP 10/100» – разъем для подключения Р2М к ПК;
- «Конфигуратор» – панель переключателей «Конфигуратор».

#### 1.4 Устройство и работа Р2М

Р2М построен по архитектуре виртуальных приборов и включает в себя аппаратную и программную части. Аппаратная часть выполняет набор базовых функций, определяющих режимы измерений.

Программная часть обеспечивает реализацию выбранного пользователем режима измерений, управление и отображение результатов измерений.

Структурная схема Р2М приведена на рисунке 4.4.



### 1.3- Структурная схема P2M.

БСДУ(блок сбора данных и управления) подключается к ПК через интерфейс Ethernet. БСДУ связан шиной передачи данных (на рисунке 4.4 шина показана двойными линиями со стрелками) с синтезатором частот, формирователем, блоком АРМ (автоматическая регулировка мощности), ступенчатым аттенюатором и МА(модуль аналого-цифрового преобразователя). Шина передачи данных состоит из однонаправленных LVDS-соединений (Low Voltage Digital Signal), объединяющих в кольцо указанные блоки.

БСДУ предназначен для сбора данных о текущем состоянии блоков P2M (частота, мощность, положение переключателей, настройки фильтров и

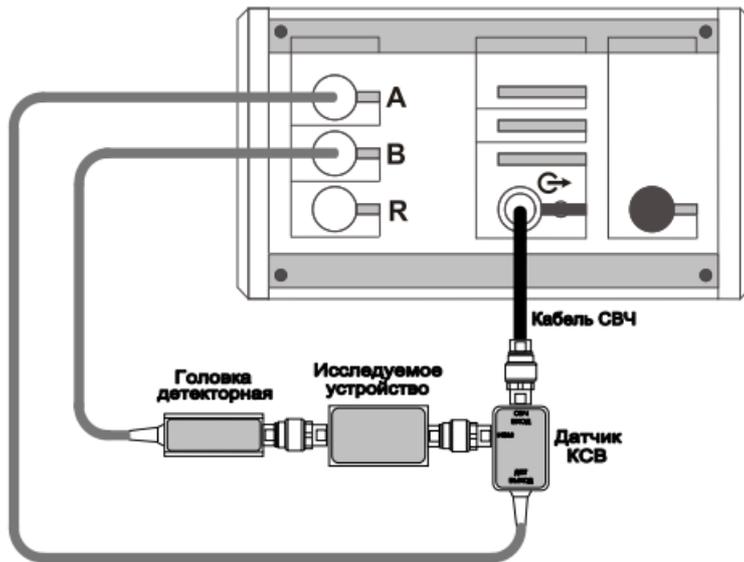
т.д.) и управления этими блоками в зависимости от их текущего состояния.

БСДУ может синхронизироваться от внешних устройств, управляя, таким образом, запуском измерений, началом перестройки по частоте и другими параметрами.

Синтезатор частот предназначен для формирования низкочастотного диапазона.

Формирователь предназначен для формирования высокочастотного диапазона путем различных преобразований (сложений и умножений) сигналов синтезатора частот. В блоке АРМ происходит усиление сигнала до заданного уровня и стабилизация уровня выходной мощности, после чего сигнал поступает на выход «СВЧ».

Сформированный высокочастотный сигнал, стабилизированный системами фазовой автоподстройки частоты и автоматической регулировки мощности, после прохождения радиоизмерительного тракта и преобразования с помощью детектора или датчика КСВ (коэффициент стоячей волны) в информационный низкочастотный сигнал, пропорциональный измеряемой величине, подается на входы Р2М (рисунок 4.5).



#### 1.4- Типичная схема измерения .

Входной сигнал оцифровывается в МА(модуль аналого-цифрового преобразователя.), затем результаты передаются в БСДУ. В БСДУ происходит преобразование данных и передача их в ПК.

Для компенсации влияния амплитудно-частотной характеристики радиоизмерительного тракта на результат измерений применяется калибровка. Для уменьшения рассогласования между выходом «СВЧ» измерительного блока и исследуемыми устройствами радиоизмерительного тракта, уменьшения влияния нестабильности выходной мощности на результаты измерений применяются режимы «A/R» и «B/R», в которых используется дополнительный НО(направленный ответвитель) и детектор. Калибровка в этом случае исключает неравномерность трактов передачи и неидентичность частотных характеристик детекторов.

Датчик КСВ содержит в своем составе широкополосный направленный мост и детектор. Направленный мост представляет собой резистивный

делитель (6 дБ), образованный тремя резисторами, сопротивление каждого из которых равно волновому сопротивлению коаксиальной линии. Резисторы соединены в треугольник, а к вершинам треугольника подключены три выходные коаксиальные линии.

Одна линия подключена к выходу P2M, вторая нагружена согласованной нагрузкой, а третья линия оканчивается измерительным разъемом, к которому подключается исследуемому устройству.

Напряжение разбаланса снимается между второй и третьей линией с помощью симметрирующей цепи со встроенным детекторным диодом. Абсолютная величина этого напряжения пропорциональна модулю коэффициента отражения исследуемого устройства.

В P2M предусмотрены вход и выход синхронизации для работы в комплексе с другими приборами. Импульс, поступающий на вход синхронизации, может инициировать начала развёртки по частоте, измерений или переход к следующей частотной точке. Импульс с выхода синхронизации сигнализирует о начале развёртки, переходе к следующей точке, захвате ФАПЧ. Кроме этого, в состав P2M дополнительно входит генератор синхроимпульсов. Длительность и полярность любого генерируемого импульса синхронизации задаётся программно.

На задней панели P2M размещены разъемы входа и выхода ОГ(опорный генератор).

Вход ОГ предназначен для синхронизации частоты внутреннего опорного генератора от внешнего источника. Выход ОГ используется для синхронизации по частоте других устройств или контроля сигнала внутреннего опорного генератора.

## Литература

1. Руководство по эксплуатации прибора серии Р2М,- Микран, 2012.
2. <http://www.micran.ru/productions/instrumentation/p2m/>.