

ДИСКРЕТНЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ МОДУЛЯТОРЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

© 2021 г. Е. Л. Шошин*

Сургутский государственный университет

Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, 628400, Сургут, просп. Ленина, 1, Россия

**e-mail: shoshin_el@surgu.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 28.04.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

Рассмотрен метод формирования неполяризованных электромагнитных волн. Проведен анализ погрешности измерения параметров Стокса рассеянной радиоволны при внешней калибровке радиолокационного поляриметра с использованием неполяризованных зондирующих радиосигналов. Описана конструкция диодного волноводно-планарного формирователя, обладающего быстродействием переключения 1 мкс при реализации дискретной поляризационной модуляции зондирующих радиосигналов в 3-см диапазоне. Описана конструкция коммутируемого волноводного модулятора, формирующего мощные неполяризованные радиолокационные сигналы. Приведены рабочие характеристики поляризационных модуляторов при подключении к импульсному сверхвысокочастотному генератору с пиковой мощностью 9 кВт.

DOI: 10.31857/S0032816221050244

ВВЕДЕНИЕ

При измерении поляризационных характеристик рассеяния радиолокационных объектов в состав радиолокационных станций вводят векторный формирователь, с помощью которого задается вид поляризационной модуляции (п.м.) зондирующих сигналов [1, 2]. Конструктивно устройства п.м. в сверхвысокочастотном (с.в.ч.) диапазоне могут представлять собой отрезок квадратного или круглого волновода, вдоль продольной оси которого размещена тонкая фазовая пластина [2]. В других известных конструкциях поляризационные модуляторы реализуют на основе фазосдвигающих устройств, формирующих ортогонально поляризованные компоненты радиолокационных сигналов [3, 4].

Различают непрерывную и дискретную п.м. Непрерывная п.м. может быть реализована с помощью вращающейся фазовой пластины. Так, при вращении полуволновой фазовой пластины формируемый с.в.ч.-сигнал характеризуется линейной вращающейся поляризацией, а в случае вращающейся четвертьволновой фазовой пластины – принимает состояния линейной, эллиптической и круговой поляризации, динамически изменяющейся во времени. Дискретную п.м. реализуют с помощью фазовращателей с ограниченным набором значений фаз, позволяющих формировать электромагнитные волны линейной и круговой

поляризации [3]. Выбор вида п.м. связывают с реализацией того или иного алгоритма измерения поляризационных характеристик радиолокационной цели [4, 5].

В настоящее время отсутствуют разработанные устройства дискретной п.м., способные формировать неполяризованные радиосигналы. Необходимость в таких устройствах связана с тем, что неполяризованные электромагнитные волны могут использоваться при проведении внешней калибровки поляриметрической радиолокационной станции и для устранения искажений, вносимых антенно-фидерным трактом при измерении поляризационных характеристик рассеяния радиолокационных объектов [6].

Целями данной работы являются разработка метода формирования неполяризованной электромагнитной волны, анализ погрешности измерения параметров Стокса при внешней калибровке поляриметрической радиолокационной станции с использованием неполяризованных зондирующих радиосигналов, создание конструкции и измерение рабочих характеристик дискретных поляризационных модуляторов, формирующих поляризованные и неполяризованные радиолокационные сигналы.

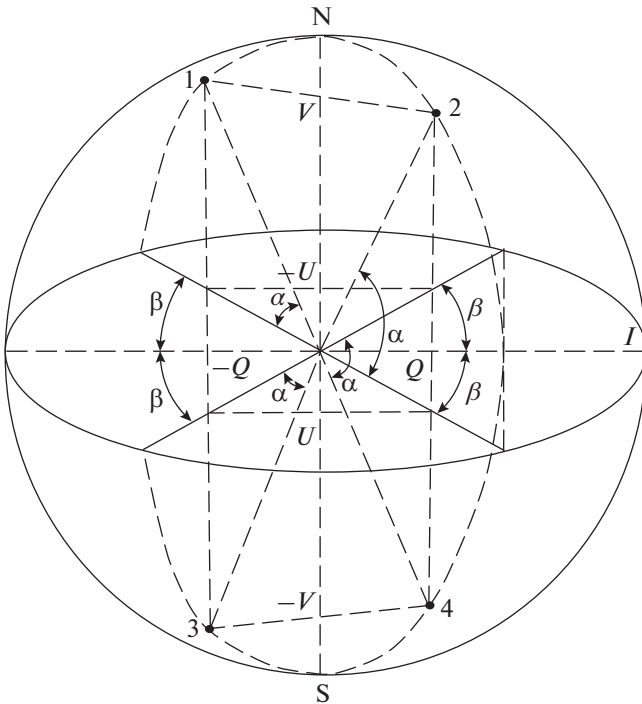


Рис. 1. Представление неполяризованной электромагнитной волны на сфере Пуанкаре. V, Q, U – координаты поляризационных состояний 1, 2, 3, 4 в прямоугольной системе координат; α – угол эллиптичности; β – угол ориентации.

ФОРМИРОВАНИЕ НЕПОЛЯРИЗОВАННЫХ РАДИОВОЛН

Поляризация электромагнитной волны может быть описана через параметры Стокса:

$$\begin{aligned} I &= E_x^2 + E_y^2; & Q &= E_x^2 - E_y^2; \\ U &= 2E_x E_y \cos \varphi; & V &= 2E_x E_y \sin \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

где E_x и E_y – интенсивности x - и y -компоненты электромагнитного поля, φ – фазовый сдвиг между компонентами поля.

Вектор Стокса, составленный из параметров Стокса, имеет вид:

$$\text{St} = (I, Q, U, V)^T. \quad (2)$$

Нормированный вектор Стокса электромагнитной волны единичной интенсивности равен [1]:

$$\begin{aligned} \text{St} &= (1, \cos(2\alpha)\cos(2\beta), \\ &\cos(2\alpha)\sin(2\beta), \sin(2\alpha))^T, \end{aligned} \quad (3)$$

где α – угол эллиптичности эллипса поляризации, β – угол ориентации большой полуоси.

Электромагнитную волну можно считать полностью неполяризованной, если ее вектор Стокса равен [7]

$$\text{St} = (I, 0, 0, 0)^T. \quad (4)$$

Покажем возможность формирования неполяризованной электромагнитной волны путем векторного сложения поляризованных радиоволн. Для этого поляризованные радиоволны одинаковой интенсивности должны различаться между собой углами эллиптичности α и ориентации β , так чтобы выполнялось равенство:

$$\begin{pmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 0.25 \left\{ \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ Q \\ -U \\ -V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ -Q \\ U \\ -V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \\ -Q \\ -U \\ V \end{pmatrix} \right\}. \quad (5)$$

На рис. 1 приведены сфера Пуанкаре и набор из четырех поляризационных состояний электромагнитных волн, отвечающих условию (5).

Параметры Q, U, V на сфере Пуанкаре представляют собой координаты поляризационных состояний 1, 2, 3, 4 в прямоугольной системе координат, углы эллиптичности α и ориентации β характеризуют поляризацию электромагнитной волны в сферической системе координат, а радиус сферы равен I . Из геометрии, представленной на рис. 1, можно определить векторы Стокса единичной интенсивности поляризационных состояний 1, 2, 3, 4, выражая их через углы эллиптичности и ориентации:

$$\begin{aligned} (1, Q, U, V)^T &= (1, \cos(2\alpha)\cos(2\beta), \\ &\cos(2\alpha)\sin(2\beta), \sin(2\alpha))^T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1, Q, -U, -V)^T &= (1, \cos(2(-\alpha))\cos(2(-\beta)), \\ &\cos(2(-\alpha))\sin(2(-\beta)), \sin(2(-\alpha)))^T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1, -Q, U, -V)^T &= (1, \cos(2(-\alpha))\cos(2(-\beta + 90^\circ)), \\ &\cos(2(-\alpha))\sin(2(-\beta + 90^\circ)), \sin(2(-\alpha)))^T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1, -Q, -U, V)^T &= (1, \cos(2\alpha)\cos(2(\beta + 90^\circ)), \\ &\cos(2\alpha)\sin(2(\beta + 90^\circ)), \sin(2\alpha))^T. \end{aligned}$$

Электромагнитные волны, различающиеся параметрами Стокса, согласно формуле (5), чередуются во времени, что позволяет выполнить усреднение параметров Стокса на интервале времени, равном периоду $L = 4t$, где t – временной интервал формирования волны фиксированной поляризации. Уравнение (5) позволяет использовать электромагнитные волны произвольной поляризации – линейной, круговой, эллиптической.

Формирование неполяризованной электромагнитной волны на интервале времени $>L$ может быть выполнено с использованием радиоволн, число поляризационных состояний которых >4 . При этом ограничивающим фактором является кратность интервала времени, в течение которого формируется неполяризованная элек-

тромагнитная волна, значению L . Вектор Стокса неполяризованной электромагнитной волны на интервале времени NL имеет вид:

$$St = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^N \{I_k, Q_k, U_k, V_k\}^T + (I_k, Q_k, -U_k, -V_k)^T + (I_k, -Q_k, U_k, -V_k)^T + (I_k, -Q_k, -U_k, V_k)^T \}, \quad (6)$$

где k – индекс временного интервала L_k , N – количество интервалов L .

На рис. 2 приведена структурная схема модулятора неполяризованной электромагнитной волны.

Формирователь поляризованной электромагнитной волны $\Phi ПВ$ задает вид поляризации сигнала (линейная, круговая, эллиптическая). На интервале времени, равном L_k ($k = 1, 2, \dots, N$), поляризация электромагнитной волны в общем случае отличается от поляризации сигналов на других интервалах времени. В частном случае задаваемая поляризация электромагнитной волны может оставаться неизменной на всем интервале времени формирования неполяризованной электромагнитной волны. Поляризационный разделитель $ПР$ выделяет ортогонально поляризованные компоненты, а фазосдвигающие устройства $\Phi У$ формируют отдельно во времени четыре компоненты волны: 1, 2, 3, 4 (см. рис. 1), для которых выполняется равенство (5). На выходе суммирующего устройства $СУ$ формируется неполяризованная электромагнитная волна, вектор Стокса которой определяется выражением (6).

ВНЕШНЯЯ КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ РАДИОСИГНАЛОВ

Погрешность измерения параметров Стокса рассеянной волны влияет на точность формируемых поляризационных параметров радиолокационного объекта. Для повышения точности поляризационных измерений используют различные методы калибровки. Определим погрешность измерения параметров Стокса рассеянной волны при использовании неполяризованных зондирующих радиосигналов и эталонного радиолокационного отражателя.

Будем использовать приборный вектор Стокса $St^e = (I^e, Q^e, U^e, V^e)^T$, в котором параметр I^e определяет мощность зондирующих радиосигналов, а параметры Q^e, U^e, V^e характеризуют поляризационное состояние радиосигналов, согласно (5). Вектор Стокса рассеянного радиосигнала

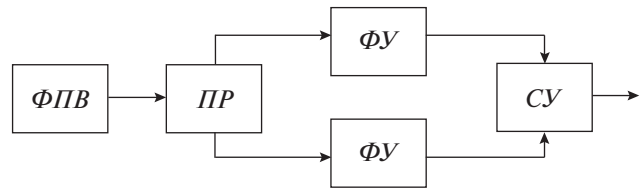


Рис. 2. Структурная схема модулятора неполяризованной электромагнитной волны. $\Phi ПВ$ – формирователь поляризованной волны; $ПР$ – поляризационный разделитель; $\Phi У$ – фазосдвигающее устройство; $СУ$ – суммирующее устройство.

$St^r = (I^r, Q^r, U^r, V^r)^T$ связан с приборным вектором Стокса соотношением:

$$St^r = hMSt^e. \quad (7)$$

Здесь M – матрица Мюллера эталонного отражателя; $h = \frac{\sigma_0}{(4\pi)^2 R^4}$, где σ_0 и R – соответственно эффективная поверхность рассеяния эталонного отражателя и его расстояние до поляриметра.

В качестве эталонного отражателя будем использовать трехгранный уголкоый отражатель, матрица рассеяния которого имеет вид [8]:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Матрица рассеяния связана с матрицей Мюллера преобразованием вида [1]:

$$M = \Lambda[S \otimes S^*]\Lambda^{-1}, \quad (9)$$

где выражение в квадратных скобках – кронекеровское произведение матрицы рассеяния на комплексно-сопряженную с ней матрицу, а

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -i & i & 0 \end{pmatrix}$$

есть матрица преобразования.

Подставляя равенство (8) в (9) и (7), получим вектор Стокса рассеянной радиоволны, усредненный на интервале времени, равном L :

$$St^r = (hI^e, 0, 0, 0)^T. \quad (10)$$

Таким образом, отраженная радиоволна, согласно (10), является неполяризованной. При этом временные диаграммы параметров Q, U и V представляют собой последовательности разнополярных импульсов, которые формируются в моменты времени $t, 2t, 3t, 4t$ и имеют нулевое среднее значение. Различия амплитудных значений параметров Q, U, V определяют относительные погрешности измерения параметров Стокса:

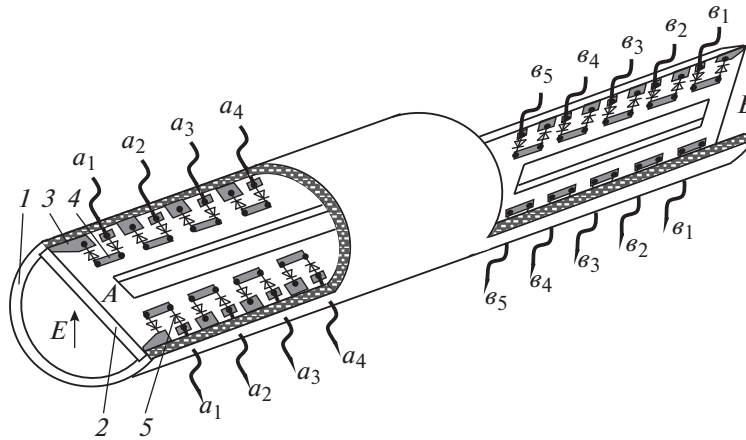


Рис. 3. Конструкция диодного волноводно-планарного поляризатора. 1 – волновод; 2 – полосковая плата; 3 – пластины заземления; 4 – управляющие полоски; 5 – *p-i-n*-диоды; a_1 – a_4 , b_1 – b_5 – управляющие выводы *p-i-n*-диодов; *A* – первая секция; *B* – вторая секция; *E* – напряженность поля возбуждающего источника.

$$\delta_Q = \frac{Q_t^r + Q_{2t}^r - Q_{3t}^r - Q_{4t}^r}{I^r}; \quad (11)$$

$$\delta_U = \frac{U_t^r - U_{2t}^r + U_{3t}^r - U_{4t}^r}{I^r}; \quad (12)$$

$$\delta_V = \frac{V_t^r - V_{2t}^r - V_{3t}^r + V_{4t}^r}{I^r}. \quad (13)$$

Нормировка величин δ_Q , δ_U , δ_V относительно параметра I^r связана с тем, что для неполяризованных рассеянных радиоволн I^r – величина постоянная.

Таким образом, использование неполяризованных зондирующих радиосигналов позволяет определить погрешность измерения параметров Стокса рассеянной радиоволны, согласно формулам (11)–(13).

ДИСКРЕТНЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Известные методы внешней калибровки и измерения поляризационных характеристик радиолокационных объектов используют зондирующие радиосигналы линейной, круговой и эллиптической поляризации [2, 4, 5]. Механические и ферритовые управляемые поляризаторы обладают низким быстродействием, термостабильностью и технологичностью. Рассмотрим конструкцию диодного волноводно-планарного поляризатора, построенного на полосковых фазосдвигающих структурах. Диодный поляризатор представляет собой круглый волновод, внутри которого размещены две секции *A* и *B*. Каждая секция выполнена из двух одинаковых односторонних полосковых плат по печатной технологии на фольгиро-

ванном фторопласте толщиной 1.5 мм (рис. 3). Секция *A* в круглом волноводе ориентирована под углом 45° к *E*-плоскости возбуждающего прямоугольного волновода, а секция *B* расположена в круглом волноводе перпендикулярно секции *A*. Топология проводящего слоя плат обладает осевой симметрией. Плата содержит два ряда металлических пластин, каждая из которых имеет сильную емкостную связь со стенкой волновода (рис. 4). Вдоль пластин расположены управляющие полоски, отделенные от пластин зазорами. Между каждой управляющей полоской и металлической пластиной включены бескорпусные *p-i-n*-диоды.

Принцип управления поляризатором основан на изменении эквивалентного сечения волновода при коммутации каждого из диодов, а также на трансформации с.в.ч.-волн на управляемых распределенных неоднородностях [9]. В каждой секции реализованы 20 управляющих полосок и размещены 40 *p-i-n*-диодов. Управлением состояния *p-i-n*-диодов с помощью выводов a_1 – a_{10} и b_1 – b_{10} (на рис. 3 выводы a_5 – a_{10} и b_6 – b_{10} не показаны) обеспечивают внесение дискретного значения фазового сдвига секциями *A* и *B*. Для формирования электромагнитной волны линейной поляризации все переключательные диоды нужно перевести в закрытое состояние. Для формирования электромагнитной волны эллиптической поляризации с углами $\alpha = \pm 22.5^\circ$ и $\beta = 0^\circ$ необходимо перевести в открытое состояние диоды с управляющими выводами a_1 – a_5 или b_1 – b_5 . Для формирования электромагнитной волны круговой поляризации правого направления вращения необходимо перевести в открытое состояние диоды с выводами a_1 – a_{10} , а для формирования волны круговой поляризации левого направления вращения – диоды с выводами b_1 – b_{10} . Ток прямого смещения на *p-i-n*-диоде 2A546A-5 составляет

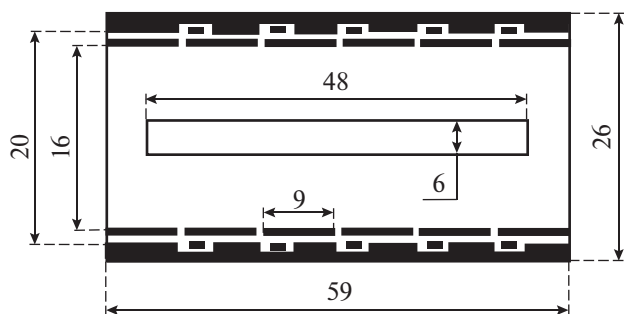


Рис. 4. Схема полосковой платы. Размеры указаны в миллиметрах.

100 мА при напряжении 0.875 В, величина напряжения обратного смещения выбрана равной 100 В [10]. На рис. 5 приведены частотные зависимости управляемого фазового сдвига между ортогональными компонентами электромагнитной волны на выходе поляризатора.

Для исследования рабочих характеристик был создан опытный образец диодного поляризатора, который прошел испытание при подключении к выходу импульсного с.в.ч.-генератора, развивающего на частоте 9.37 ГГц пиковую мощность 9 кВт при частоте посылки импульсов 400 Гц и длительности импульса 3.5 мкс.

Технические характеристики диодного волноводно-планарного поляризатора представлены ниже:

- полоса рабочих частот 9.0–9.4 ГГц;
- тип переключаемых с.в.ч.-диодов 2A546A-5;
- диапазон регулировки разности фаз для преобразования поляризации от -90° до 90° ;
- минимальная вносимая разность фаз для преобразования поляризации 9° ;
- число поляризационных состояний 21;
- вносимые потери 0.5–1.6 дБ;
- коэффициент стоячей волны ≤ 1.4 ;
- время переключения 1 мкс;
- импульсная мощность 9 кВт;
- средняя с.в.ч.-мощность 13 Вт;
- размеры волновода $\varnothing 22 \times 240$ мм.

Приведенные характеристики свидетельствуют о том, что диодный волноводно-планарный поляризатор можно использовать при проведении радиолокационных измерений или в составе модулятора неполяризованных радиосигналов.

ДИСКРЕТНЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ НЕПОЛЯРИЗОВАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Формирование неполяризованных радиолокационных сигналов, согласно (6), может быть

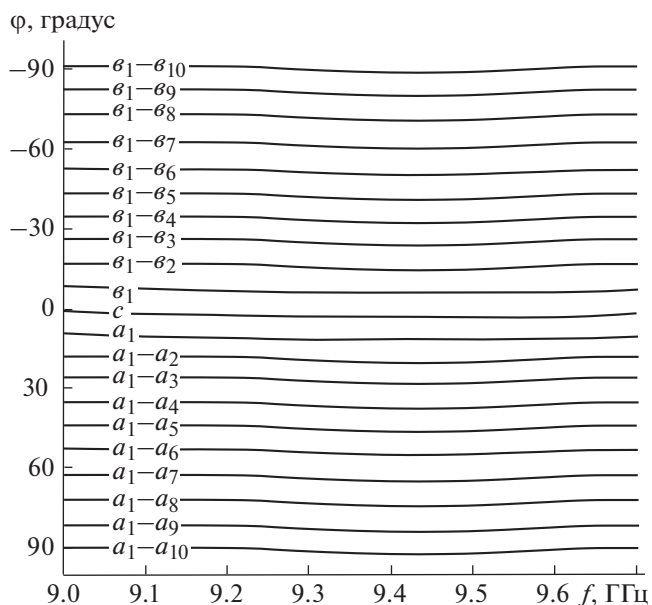


Рис. 5. Зависимость фазового сдвига от частоты. c – закрытое состояние $p-i-n$ -диодов; a_1-a_{10} , $\varphi_1-\varphi_{10}$ – открытое состояние $p-i-n$ -диодов.

обеспечено с помощью коммутируемого волноводного устройства, обладающего необходимым быстродействием при переключении и способного пропустить мощный с.в.ч.-сигнал, поступающий от передатчика. На рис. 6 приведена электрическая схема коммутируемого волноводного поляризационного модулятора, на вход которого поступает поляризованный сигнал, сформированный диодным волноводно-планарным поляризатором.

Входящий в состав модулятора поляризационный разделитель S_1 конструктивно представляет собой отрезок круглого волновода с двумя прямоугольными фланцами, на выходе которых формируются ортогонально поляризованные x - и y -компоненты радиосигнала передатчика. Дискретные управляемые фазосдвигатели построены на основе волноводных Y -циркуляторов C_1-C_4 высокого уровня мощности, переключаемых диодов D_1-D_3 , закороченных стенок прямоугольного волновода. Суммирующее устройство S_2 по своей конструкции аналогично поляризационному разделителю. Управляющие сигналы g_1-g_3 изменяют состояние переключаемых диодов, согласно табл. 1. Ток прямого смещения на с.в.ч.-диоде равен 100 мА, напряжение обратного смещения 100 В.

С.в.ч.-диоды вмонтированы перпендикулярно к широкой стенке прямоугольного волновода, при этом диоды D_1 и D_2 подключены к точкам d и f волноводной линии, удаленным от короткозамкнутой стенки волновода на расстояние $\lambda/4$ (λ –

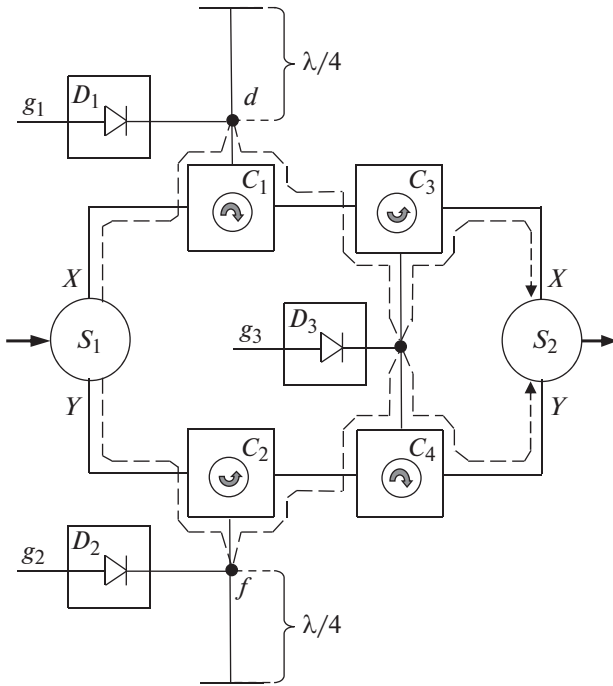


Рис. 6. Электрическая схема коммутируемого волноводного поляризационного модулятора неполяризованных радиосигналов. S_1 – поляризационный разделитель; S_2 – сумматор; C_1 – C_4 – Y -циркуляторы; D_1 – D_3 – переключаемые диоды; X, Y – выходы поляризационного разделителя и входы сумматора; g_1 – g_2 – управляющие входы диодов.

длина волны в волноводе). При изменении состояния диодов D_1 и D_2 x - и y -компоненты поступающей радиоволны отражаются либо от точек d и f , либо от короткозамкнутых стенок волновода, приобретая при этом регулируемый фазовый сдвиг. При открытом диоде D_3 x -компонента поступающей радиоволны проходит на X -вход сумматора, а y -компонента – на Y -вход сумматора. При закрытом диоде D_3 x -компонента поступающей радиоволны проходит на Y -вход сумматора, а y -компонента – на X -вход сумматора. Длина волноводной линии, соединяющей X -выход разделителя и X -вход сумматора, в случае отражения x -компоненты радиоволны от точки d кратна λ и равна длине волноводной линии, соединяющей

Y -выход разделителя и Y -вход сумматора, в случае отражения y -компоненты радиоволны от точки f .

В первом режиме модуляции (см. табл. 1) с X -выхода поляризационного разделителя на X -вход сумматора проходит x -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки d , а с Y -выхода поляризационного разделителя на Y -вход сумматора – y -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки f . При этом на выходе сумматора формируется электромагнитная волна, состояние поляризации которой описывает вектор Стокса $(I, Q, U, V)^T$.

Во втором режиме модуляции с X -выхода поляризационного разделителя на X -вход сумматора проходит x -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки d , а с Y -выхода поляризационного разделителя на Y -вход сумматора – y -компонента электромагнитной волны, приобретая фазовый сдвиг 180° при отражении от закороченной стенки волновода. При этом на выходе сумматора формируется электромагнитная волна, состояние поляризации которой описывает вектор Стокса $(I, Q, -U, -V)^T$.

В третьем режиме модуляции с X -выхода поляризационного разделителя на Y -вход сумматора проходит x -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки d , а с Y -выхода поляризационного разделителя на X -вход сумматора – y -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки f . При этом на выходе сумматора формируется электромагнитная волна, состояние поляризации которой описывает вектор Стокса $(I, -Q, U, -V)^T$.

В четвертом режиме модуляции с X -выхода поляризационного разделителя на Y -вход сумматора проходит x -компонента электромагнитной волны, приобретая нулевой фазовый сдвиг при отражении от точки d , а с Y -выхода поляризационного разделителя на X -вход сумматора – y -компонента электромагнитной волны, приобретая фазовый сдвиг 180° при отражении от закороченной стенки волновода. При этом на выходе сумматора формируется электромагнитная волна, состояние поляризации которой описывает вектор Стокса $(I, -Q, -U, V)^T$.

За интервал времени, равный L , коммутируемый волноводный поляризационный модулятор формирует неполяризованный радиосигнал, согласно (5). За интервал времени NL ($N = 1, 2, \dots, 21$) модулятор с подключенным к входу управляемым диодным волноводно-планарным поляризатором формирует неполяризованный радиосигнал, со-

Таблица 1. Режимы управления поляризационным модулятором

Режим	D_1	D_2	D_3
1	Открыт	Открыт	Закрыт
2	Открыт	Закрыт	Закрыт
3	Открыт	Открыт	Открыт
4	Открыт	Закрыт	Открыт

Таблица 2. Поляризационные параметры входного и выходного радиосигналов

Поляризация входного радиосигнала	Параметры Стокса выходных радиосигналов, кВт			
	$I_{\text{ср}}$	$Q_{\text{ср}}$	$U_{\text{ср}}$	$V_{\text{ср}}$
Линейная	5.11	0.18	0.16	0.13
Эллиптическая с $\alpha = -22.5^\circ$ и $\beta = 0^\circ$ левого направления вращения	5.03	0.16	0.12	0.15
Круговая поляризация правого направления вращения	4.94	0.13	0.17	0.14

гласно (6). В зависимости от вида электромагнитной волны, генерируемой передатчиком, создаваемый неполяризованный радиосигнал будет иметь непрерывный или импульсный характер. Управляя одновременно состоянием диодов D_1 и D_2 , возможно формирование неполяризованного радиосигнала с учетом его фазовых характеристик, что можно использовать при измерении фазовых свойств радиолокационных объектов.

С целью исследования рабочих характеристик создан опытный образец коммутируемого волноводного поляризационного модулятора на основе типовых волноводных приборов. С помощью диодного волноводно-планарного поляризатора задавались линейная и эллиптическая поляризация левого направления вращения и круговая поляризация правого направления вращения импульсов с.в.ч. Для этого диодный поляризатор был подключен к выходу импульсного с.в.ч.-генератора, развивающего на частоте 9.37 ГГц пиковую мощность 9 кВт при частоте посылки импульсов 400 Гц и длительности импульса 3.5 мкс. К выходу диодного поляризатора подключен коммутируемый волноводный модулятор. В табл. 2 приведены значения параметров Стокса радиосигналов на выходе модулятора, полученные при усреднении результатов измерений на интервале времени, равном интервалу четырех посылок импульсов с.в.ч.-генератором.

Полученные данные свидетельствуют о том, что нормированные значения параметров Стокса выходного радиосигнала в зависимости от поляризации входного радиосигнала составляют: $I_{\text{ср}} = 1$, $Q_{\text{ср}} = 2.6-3.5\%$, $U_{\text{ср}} = 3.1-3.4\%$, $V_{\text{ср}} = 2.5-2.8\%$.

Технические характеристики коммутируемого волноводного поляризационного модулятора приведены ниже:

- полоса рабочих частот 9.2–9.5 ГГц;
- тип переключаемых с.в.ч.-диодов: 2A523A-4;
- тип Y-циркуляторов ФВЦН2-60А;
- формируемые радиосигналы – неполяризованные;
- коэффициент стоячей волны ≤ 1.2 ;
- время переключения 1.3 мкс;
- импульсная мощность 9 кВт;

- средняя с.в.ч.-мощность 13 Вт;
- диаметр и сечение волновода: $\varnothing 22$ мм, 23×10 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неполяризованные электромагнитные волны можно представить в виде векторной суммы поляризованных волн одинаковой интенсивности, формируемых раздельно во времени и различающихся значениями углов эллиптичности и ориентации. Использование неполяризованных зондирующих радиосигналов при внешней калибровке радиолокационного поляриметра позволяет определить погрешность измерения параметров Стокса рассеянной радиоволны. Диодный волноводно-планарный поляризатор обладает скоростью переключения 1 мкс при реализации дискретной поляризационной модуляции радиосигналов из пространства 21 поляризационного состояния и может использоваться при проведении радиолокационных измерений или в составе модулятора неполяризованных радиосигналов. Коммутируемый дискретный волноводный модулятор способен формировать мощные неполяризованные радиосигналы, для которых значения параметров Q , U , V составляют 2.5–3.5% от уровня параметра I .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Татаринов В.Н., Татаринов С.В., Лигтхарт Л.П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1. Поляризация плоских электромагнитных волн и ее преобразование. Монография. Томск: Томский государственный университет, 2006.
2. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966.
3. Гусев К.Г., Филатов А.Д., Сополов А.П. Поляризационная модуляция. М.: Сов. радио, 1974.
4. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн. 3. Радиополяриметрия сложных по структуре сигналов. М.: Радиотехника, 2008.

5. *Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.* Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия. М.: Радиотехника, 2007.
6. *Шошин Е.Л.* // Измер. техника. 2021. № 3. С. 45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-3-45-52>
7. *Козлов А.И., Татаринов В.Н., Татаринов С.В.* Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 2. Статистическая теория поляризации. Монография. Томск: Томский государственный университет, 2007.
8. *Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1975.
9. *Сычев А.Н.* Управляемые СВЧ-устройства на многомодовых полосковых структурах. Томск: Томский государственный университет, 2001.
10. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник / Под ред. Б.А. Наливайко. Томск: МГП "Раско", 1992.