

## ЭНЕРГЕТИКА ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КВАЗИОПТИЧЕСКИМИ ФАЗОВРАЩАТЕЛЯМИ И СДВИГАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ

В. Н. Полупанов, П. К. Нестеров, М. С. Яновский, В. И. Безбородов

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: polupan@ire.kharkov.ua*

С учётом квантовой природы электромагнитного излучения рассмотрено преобразование его параметров квазиоптическими непрерывными фазовращателями (поляризационными) и квазинепрерывными (доплеровскими) сдвигателями частоты. Ил. 4. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, фотон, квазиоптические сдвигатели частоты.

В квазиоптических непрерывных фазовращателях и сдвигателях частоты, созданных в отделе квазиоптики ИРЭ НАН Украины, используется квазиплоская волна  $EH_{11}$  в полом диэлектрическом лучевом [1], обладающая осесимметричным амплитудным распределением с максимумом на оси пучка, спадающим к краям лучевого канала по закону функции Бесселя  $J_0(2,4x/r)$ , где  $r$  - радиус лучевода;  $x$  - расстояние от оси лучевода. Работа таких приборов может быть объяснена как на основе представлений классической электродинамики, так и на языке квантовой механики с учётом корпускулярной, фотонной структуры излучения [2]. При этом квантовое описание процессов преобразования излучения в фазовращателях и сдвигателях частоты оказывается простым и наглядным.

Состояние кванта излучения (фотона) полностью характеризуется его импульсом  $\vec{p}$  и квантовым числом  $m = \pm 1$ , определяющим ориентацию его спина. Импульс однозначно определяет частоту  $\nu_0$ , энергию  $\varepsilon_0$ , длину волны  $\lambda_0$  и направление распространения фотона, а квантовое число  $m$  - поляризацию. Состояние с  $m = +1$  соответствует правокруговой поляризации электромагнитной волны, а с  $m = -1$  - левокруговой поляризации или соответственно левому (правому) направлению вращения момента количества движения (спина) фотона, равного постоянной Планка  $\pm\hbar$ .

Линейное изменение фазы  $\varphi$  волны со временем на выходе фазовращателя выражается в сдвиге её частоты на величину  $\Delta\nu = \pm d\varphi/dt$ . Если в системе отсутствует диссипация энергии, то все фотоны при прохождении излучения через непрерывный фазовращатель меняют свою энергию. Поскольку энергия фотона равна  $\varepsilon_0 = h\nu_0$ , то мощность излучения на выходе фазовращателя отлична от мощности на входе. Это можно объяснить обменом энергией между фотоном и дви-

жущимся элементом фазовращателя, который совершает работу (положительную или отрицательную), взаимодействуя с пондеромоторными силами, действующими на него со стороны волны. В случае доплеровского сдвигателя частоты это сила давления электромагнитного излучения, в случае поляризационного - крутящий момент, возникающий при изменении поляризации и, следовательно, момента количества движения (спина) фотона.

Энергетика работы поляризационного фазовращателя подробно рассмотрена нами ранее [4]. В таком фазовращателе поляризация фотонов  $\pm\hbar$  меняется на ортогональную, т. е. меняется направление момента количества движения, а число прошедших фотонов не зависит от скорости  $\Omega$  вращения активного элемента. Такой сдвигатель частоты в режиме повышения частоты является параметрическим усилителем с коэффициентом усиления  $K$  по мощности

$$K = (\nu + 2\Omega) / \nu. \quad (1)$$

**Динамика эффекта Доплера.** В доплеровском фазовращателе движущееся зеркало меняет величину и направление импульса отражающегося фотона. Если импульс фотона  $p_0$  и скорость  $\pm v$  зеркала перпендикулярны плоскости зеркала, то при отражении импульс фотона меняется на величину

$$\Delta p = p_0 + p_r = \frac{h\nu_0}{c} \left[ 1 + \frac{1 - \beta^2}{(1 \mp \beta)^2} \right] = \frac{2h\nu_0}{c(1 \mp \beta)}, \quad (2)$$

где  $p_r$  - импульс отражённого фотона;  $c$  - скорость света;  $\beta = v/c$ . Величине  $\Delta p$  соответствует пондеромоторная сила  $F$  давления на зеркало в течение времени  $\tau$

$$F\tau = \Delta p. \quad (3)$$

За время  $\tau$  зеркало пройдёт путь

$$\Delta s = \pm v\tau, \quad (4)$$

выполнив при этом работу

$$A_m = F \Delta s = \pm 2\beta h\nu_0 / (1 \mp \beta). \quad (5)$$

При отражении энергия фотона меняется на величину

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_r - \varepsilon_0 = h\nu_0 \left( \frac{1 - \beta^2}{(1 \mp \beta)^2} - 1 \right) = \pm 2\beta h\nu_0 / (1 \mp \beta), \quad (6)$$

где  $\varepsilon_r$  - энергия отражённого фотона. Равенство (5) и (6) подтверждает, что эффект Доплера - это процесс изменения энергии электромагнитного поля при взаимодействии последнего с активным элементом. Таким активным элементом, кроме движущегося зеркала-отражателя или вращающегося преобразователя поляризации, может быть также участок линии передачи, параметры которого меняются в течение времени распространения энергии, например, активные элементы известных ферритовых или плазменных модуляторов.

В квазиоптических непрерывных поляризационных фазовращателях, рабочим элементом которых является поворотный трёхзеркальный [5] либо пятизеркальный [6] вращатель фазы поляризованной по кругу волны (рис. 1, 2), поляризация фотонов меняется на противоположную вследствие нечётного числа отражений проходящей волны, т. е. проекция собственного момента количества движения каждого фотона на направление движения меняется на  $2h$ .

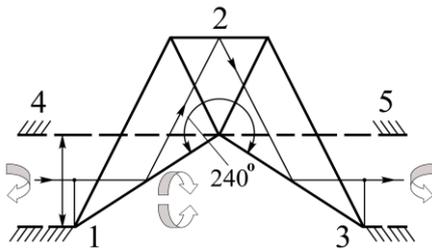


Рис. 1. Схема прохождения лучей в трёхзеркальном вращателе фазы: 1, 3 - входное и выходное зеркала; 2 - возвратное зеркало; 4, 5 - полный диэлектрический лучевод

Полная схема поляризационного фазовращателя линейно поляризованной волны включает также неподвижные преобразователи: линейной поляризации в круговую на входе и круговой поляризации в линейную на выходе фазовращателя.

При вращении рабочего элемента совершается работа против пондеромоторного крутящего момента, сопровождающаяся передачей энергии от рабочего элемента циркулярно поляризованной волне, или отбором энергии от неё, в зависимости от знака угловой скорости рабочего элемента. При поступлении на рабочий элемент линейно или эллиптически поляризованной волны составляющие её циркулярно поляризованные волны в силу линейности системы изменяются

независимо друг от друга, что выглядит как поворот осей эллипса поляризации.

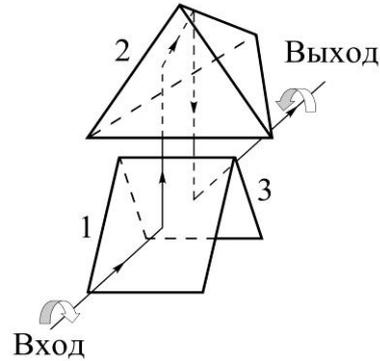


Рис. 2. Взаимное расположение основных элементов вращателя фазы с трёхзеркальным возвратным отражателем (пятизеркальный вращатель плоскости поляризации): 1, 3 - входное и выходное зеркала; 2 - возвратный уголкового отражателя

В доплеровских фазовращателях фаза излучения меняется в результате его отражения от перемещающегося зеркала, при этом в сдвигателе частоты проходного или отражательного типа обеспечивается пилообразное квазинепрерывное изменение фазы излучения.

Схема доплеровского сдвигателя частоты проходного типа [7] приведена на рис. 3.

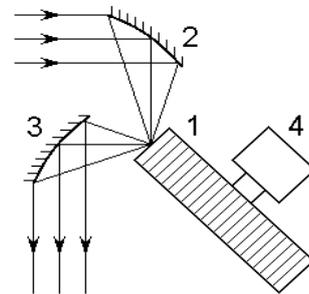


Рис. 3. Доплеровский сдвигатель частоты проходного типа: 1 - зубчатый диск; 2, 3 - параболические зеркала; 4 - электродвигатель

Излучение фокусируется параболическим зеркалом на зубчатую поверхность вращающегося диска. Отраженная от зубчатой поверхности волна преобразуется вторым параболическим зеркалом в волну с плоским фазовым фронтом. Сигнал, отраженный от зубьев, вследствие эффекта Доплера оказывается сдвинутым по частоте относительно падающего сигнала. Для того, чтобы не было скачков фазы волны при отражении от каждого зуба, параметры зубьев выбираются так, чтобы разность хода лучей, отраженных от двух соседних зубьев, была равна целому числу волн.

Пример доплеровского сдвигателя частоты отражательного типа [8] приведен на рис. 4.

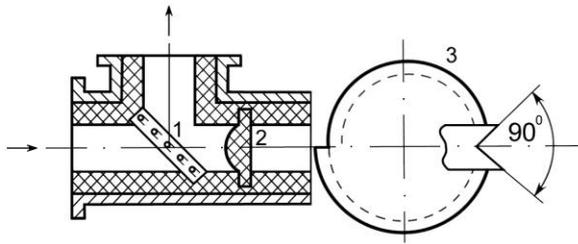


Рис. 4. Доплеровский сдвигатель частоты отражательного типа: 1 - поляризационный селектор; 2 - фокусирующая линза; 3 - вращающийся диск

Боковая поверхность диска выполнена в виде одного витка спирали Архимеда. В поперечном сечении боковая поверхность представляет собой двугранный угол с углом при вершине  $90^\circ$ . Излучение проходит через поляризационный селектор 1 и фокусируется линзой 2 на боковую поверхность вращающегося диска 3, причем вектор поляризации излучения составляет с ребром двугранного уголка угол  $45^\circ$ . В этом случае вектор поляризации излучения, отраженного от боковой поверхности диска, оказывается повернутым на  $90^\circ$  относительно вектора поляризации падающего излучения, и отраженное излучение ответвляется решеткой поляризационного селектора в выходное плечо. Частота отраженного излучения, как и в предыдущем случае, отличается от частоты падающего излучения на величину доплеровского сдвига. Для обеспечения квазинепрерывного изменения фазы отраженного излучения шаг спирали Архимеда (высота ступеньки) выбирается так, чтобы приращение фазы сигнала за оборот диска составляло  $2\pi n$ , где  $n$  - целое число.

С учетом квантовой природы излучения у доплеровских фазовращателей и сдвигателей частоты происходит взаимодействие зеркала с фотоном: фотон, отражаясь от зеркала, меняет направление своего импульса, «давит» на зеркало, выполненное, например, в виде зубчатого диска. При движении зеркала так же, как и в поляризационном фазовращателе, происходит обмен энергией между фотоном и зеркалом, что сопровождается изменением частоты излучения.

Особенностью доплеровского фазовращателя является то, что в отличие от поляризационного в процессе его работы меняется число фотонов  $n_r$ , прошедших через него

$$n_r = n_0(1 \pm \beta), \quad (7)$$

где  $n_0 = E_0 / h\nu_0$  - число фотонов отражаемых неподвижным зеркалом;  $E_0$  - плотность потока энергии излучения. Изменение числа фотонов обусловлено изменением объема между источником и приёмником, занимаемого излучением, так как некоторая часть энергии расходуется на пе-

риодическое заполнение увеличившегося объема. Либо, наоборот, часть фотонов вытесняется, если этот объем уменьшается как, например, в случае квазинепрерывного сдвигателя частоты, работающего в режиме увеличения частоты, когда зеркало движется навстречу излучению. В результате плотность потока энергии  $E_r$  излучения, отраженного зеркалом, равна

$$E_r = n_r \varepsilon_r = E_0(1 \pm \beta)^2 / (1 \mp \beta). \quad (8)$$

Энергетическая модель взаимодействия излучения с рабочим элементом особенно удобна для объяснения работы поляризационного сдвигателя частоты [9,10], рабочий элемент которого - поворотная одномерная решетка. В отличие от отражательных поляризационных приборов в этом случае исключено возможное паразитное изменение направления пучка, прошедшего излучения при повороте рабочего элемента. При падении на такую решетку поляризованной по кругу волны прошедшая и отраженная волны имеют линейную взаимно ортогональную поляризацию, направление которой определяется ориентацией проволок решетки и следует за поворотом решетки.

Анализ [10] показывает, что как в прошедшей, так и в отраженной волне имеются две круговые составляющие. При этом частота «вновь возникших» при взаимодействии с вращающейся решеткой круговых составляющих оказывается сдвинутой, а частота волн, отразившихся от решетки как от зеркала или прошедших через неё без изменения направления вращения поляризации, остаётся прежней. Согласно квантовым представлениям это значит, что падающие на решетку фотоны с одинаковой ориентацией спина в результате взаимодействия с решеткой обмениваются с ней моментом количества движения и переходят в новое спиновое состояние с равной вероятностью исходной или обратной ориентацией спинов. Изменение спинового состояния сопровождается соответствующим обменом энергии между фотоном и вращающейся решеткой. В этом случае энергия фотона отличается от первоначальной на величину  $2\hbar\Omega$ , где  $\Omega$  - угловая скорость вращения решетки.

**Выводы.** Анализ преобразования параметров излучения с учетом его квантовой структуры показывает, что чисто кинематическая трактовка эффекта Доплера является физически неполной. Так, например, в доплеровских сдвигателях частоты, где активный элемент взаимодействует с импульсом фотона, число фотонов, отраженных зеркалом, увеличивается или уменьшается в зависимости от направления его движения. В то же время в поляризационных фазовращателях активный элемент взаимодействует со спином фотона, а число фотонов не меняется. Динамическое описание процессов изменения фазы (часто-

ты) поляризационными и доплеровскими квази-оптическими устройствами позволяет, в отличие от геометрического яснее понять физические особенности происходящих явлений.

Авторы благодарят Е. М. Кулешова и В. К. Киселева за поддержку и интерес к работе, а также Ю. В. Корниенко за плодотворные дискуссии.

1. А.с. 302054 СССР, МКИ Н 01р 3/00. Диэлектрический лучевод субмиллиметрового диапазона волн / А. Н. Ахиезер., А. И. Горошко, Б. Н. Князьков и др. // Открытия. Изобретения. - 1972, - №8. - 235 с.
2. *От Д. К.* Эквивалентность классического доплеровского и квантового подхода при определении сдвига частоты в ячейке Брэгга // Тр. ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон. - 1971, - 59, №3. - С.83-85.
3. Физическая энциклопедия. - М.: Сов. энциклопедия, 1990. - 2. - 15 с.
4. *Полупанов В. Н., Яновский М. С., Князьков Б. Н.* О физических принципах работы поляризационного фазовращателя // Радиотехника. - 1979, - 51, - С.71-75.
5. *Яновский М. С., Князьков Б. Н.* Регулируемый делитель пучка для квазиоптической линии передачи // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1976, - 19, №2. - С.112-113.
6. А.с. 741721 СССР, МКИ Н 01 Р 1/165. Вращатель плоскости поляризации / В. Н. Полупанов, М. С. Яновский, Б. Н. Князьков // Открытия. Изобретения. - 1986, - №12. - 280 с.
7. *Щербов В. А., Нестеров П. К.* Доплеровские двигатели частоты субмиллиметрового диапазона волн // Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн. - Киев: Наук.думка, 1983. - С.251-256.
8. А.с. 381122 СССР, МКИ Н 01 Р 1/16. Модулятор одной боковой частоты субмиллиметрового диапазона / В. А. Щербов, А. И. Горошко // Открытия. Изобретения. - 1973, - №21. - 179 с.
9. А.с. 762071 СССР, МКИ Н 01 Р 1/65. Устройство для поворота плоскости поляризации / В. К. Киселев, Д. Д. Литвинов // Открытия. Изобретения. - 1980, - №33. - 257 с.
10. *Полупанов В. Н., Кулешов Е. М., Князьков Б. Н., Яновский М. С.* Поляризационно-спектральные характеристики

вращающегося линейного поляризатора // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1999, - 4, №2. - С.42-45.

## ENERGY OF PROCESSES OF ELECTROMAGNETIC RADIATION PARAMETERS TRANSFORMATION BY QUASI-OPTICS PHASE CHANGERS AND FREQUENCY SHIFTERS

V. N. Polupanov, P. K. Nesterov,  
M. S. Yanovsky, V. I. Bezborodov

The transformation of the electromagnetic radiation parameters by continuous (polarizable) phase changers and quasicontinuous (Dopler's) frequency shifter has been considered with regard to quantum native of EMR.

**Key words:** electromagnetic radiation, photon, quasi-optics frequency shifters.

## ЕНЕРГЕТИКА ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ КВАЗІОПТИЧНИМИ ФАЗОЗСУВАЧАМИ ТА ЗСУВАЧАМИ ЧАСТОТИ

В. Н. Полупанов, П. К. Нестеров,  
М. С. Яновський, В. І. Безбородов

З урахуванням квантової природи електромагнітного випромінювання розглянуто перетворення його параметрів квазіоптичними безперервними фазозсувачами (поляризаційними) та квазібезперервними (доплерівськими) зсувачами частоти.

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання, фотон, квазіоптичні зсувачі частоти.

*Рукопись поступила 4 июля 2006 г.*