

УДК 52.626+520.85

**В. П. Кузьков¹, В. Н. Недашковский¹,
С. Н. Савенков², С. В. Кузьков²**

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

²Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

**Исследование поляризации лазерного
передающего модуля для коммуникационных
экспериментов с геостационарным спутником
ARTEMIS ESA**

Надійшла до редакції 14.04.05

Для лазерних комунікаційних експериментів з геостационарним супутником ARTEMIS (ESA) необхідно виконати певні вимоги для поляризації лазерного випромінювання. Досліджено лінійну поляризацію лазерного працюючого модуля. Перетворено лінійну поляризацію в необхідну вліво — кругову поляризацію з характеристиками, які задовольняють вимогам бортового лазерного комунікаційного терміналу зв'язку супутника ARTEMIS.

ВВЕДЕНИЕ

Ведущие космические агентства в настоящее время последовательно реализуют программы создания систем лазерной связи в открытом космосе и системы лазерной связи космическое пространство — земная поверхность.

Системы лазерной связи в открытом космосе более перспективны для межспутниковых систем передачи информации, так как они обеспечивают сверх узкую диаграмму направленности при малых габаритах, энергопотреблении и скоростях передачи до нескольких Гбит/с.

При реализации лазерных систем связи между низкоорбитальным спутником и геостационарным спутником появляется возможность длительной передачи больших объемов информации с низкоорбитального спутника на геостационарный спутник с последующей его ретрансляцией на наземную станцию в квазиреальном масштабе времени.

Именно такую систему разработало Европейское космическое агентство (ESA). В 1998 г. ESA

был запущен ДЗЗ спутник SPOT-4 с лазерным терминалом связи для взаимодействия с геостационарным спутником. В продолжение этой программы проведения экспериментов с лазерными каналами связи 12 июля 2001 г. был запущен спутник ARTEMIS (ESA) с лазерным терминалом связи SILEX борту для приема больших объемов информации с низкоорбитального спутника SPOT-4 и проведения экспериментов с Оптической наземной станцией (OGS) ESA. С промежуточной круговой орбиты высотой 31000 км в ноябре 2001 г. впервые в мире была успешно проведена ретрансляция информации со спутника SPOT-4 по лазерному каналу связи на спутник ARTEMIS и с него по радиоканалу на наземную станцию [7]. Были так же впервые в мире проведены эксперименты по передаче информации со спутника ARTEMIS на OGS ESA на Канарских островах [5]. В конце января 2003 г. спутник был выведен в запланированную точку геостационарной орбиты над 21.5° в. д. Планируемый ресурс спутника 10 лет.

В настоящее время регулярно проводятся сеансы связи по передаче информации со спутника SPOT-4 на геостационарный спутник ARTEMIS с использованием лазерных терминалов связи, а так же продолжают исследоваться лазерные коммуникационные эксперименты через земную атмосферу между OGS ESA и спутником ARTEMIS. При этом используется лазерная передающая система OGS с использованием твердотельного лазера на основе титан-сапфирового диэлектрического кристалла и накачкой инверсионного уровня с помощью аргонного лазера [5].

После соответствующих расчетов нами было показано [1—3], что аналогичные эксперименты по приему-передаче информации лазерным каналом связи и исследованию влияния атмосферы на распространение лазерного излучения между геостационарным спутником и наземной станцией можно проводить также с использованием полупроводниковых лазеров и астрономических телескопов. Эти расчеты были проверены и подтверждены специалистами ESA на протяжении их визита в Главную астрономическую обсерваторию НАН Украины летом 2002 г.

Японское космическое агентство также участвует в этой программе ESA. Готовится к запуску низкоорбитальный спутник OICETS с лазерным терминалом связи LUCE для проведения экспериментов, аналогичных экспериментам на спутнике SPOT-4.

В сентябре 2003 г. полетный лазерный терминал связи LUCE с использованием полупроводниковых лазеров также был испытан на OGS ESA. Испытания проводились в основном с поддержкой лазерной передающей системы OGS. Успехом завершились эксперименты по лазерной связи между терминалом LUCE и спутником ARTEMIS как с поддержкой OGS, так и без нее [8].

Результаты экспериментов с лазерным терминалом связи LUCE подтвердили на практике наши расчеты и наши технические решения в разработке аппаратуры для экспериментов со спутником ARTEMIS.

В рамках представленной работы приводятся результаты исследования поляризации лазерного передающего модуля и ее преобразования в необходимую левокруговую поляризацию.

ТРЕБОВАНИЯ К ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩИМ ЛАЗЕРНЫМ КАНАЛАМ

Приемно-передающая система наземной оптической станции (телескопа) должна принять сигнал от сканирующего лазерного маяка спутника в диапазоне $\lambda\lambda = 797...808$ нм и послать ответный лазерный луч в диапазоне $\lambda\lambda = 843...852$ нм по истечении не более 0.3 с. По ответному лучу осуществляется наведение узкого коммуникационного луча со спутника на наземную станцию. При этом лазерный луч наземной оптической станции должен непрерывно сопровождать спутник во время всего процесса его наведения и в дальнейшем. Из-за нештатного режима вывода на орбиту спутник имеет не стабильное положение в точке позиционирования с амплитудой отклонения около 4° .

После наведения спутник начинает излучать узкий (5.5 мкрад) коммуникационный луч в диапазоне $\lambda\lambda = 815...825$ нм со скоростью передачи 2.048 Мбит/с и применением 2PPM-кодировки сигнала. Наземная оптическая станция (телескоп) должна обеспечить наведение ответного коммуникационного луча на спутник со скоростью передачи 50 Мбит/с при NRZ-кодировке сигнала в диапазоне длин волн $\lambda\lambda = 843...852$ нм.

После приема лазерного коммуникационного сигнала с соответствующими параметрами от наземной оптической станции (телескопа) спутник постепенно увеличивает мощность излучаемого сигнала, который должен обеспечить освещенность наземной станции лазерным излучением около 40 нВт/м². Наземная лазерная передающая система должна обеспечивать освещенность спутника лазерным модулированным излучением на уровне более 90 нВт/м². При этом максимально разрешаемая плотность облучения спутника составляет 900 нВт/м².

На всех этапах работы со спутником поляризация лазерного излучения, посылаемого на спутник, должна быть левокруговой (ЛНСП) поляризацией при отклонении от идеальной левокруговой поляризации менее 2.5. Поэтому правильное значение поляризации излучаемого и принимаемого лазерных сигналов очень важно при коммуникационных экспериментах со спутником.

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Поляризационные характеристики лазерного излучения как монохроматического оптического излучения в общем виде определяются параметрами Стокса. Напомним, что вектор Стокса имеет вид $\mathbf{I} = [I, Q, U, V]$, где I, Q, U и V — параметры Стокса, определяющие поляризационные характеристики излучения. Параметры Стокса характеризуют эллипсометрические свойства плоской электромагнитной волны [4]:

$$E_{0\theta} = a_\theta \exp(i\Delta_\theta), \quad E_{0\varphi} = a_\varphi \exp(i\Delta_\varphi),$$

где $E_{0\theta}, E_{0\varphi}$ — компоненты электрического поля, a_θ, a_φ — позитивные компоненты во взаимно ортогональных направлениях θ, φ , имеющие реальные фазы колебаний $\Delta_\theta, \Delta_\varphi$. Параметры Стокса плоской электромагнитной волны связаны соотношением $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$.

В общем виде параметры Стокса определяются выражениями

$$\begin{aligned} I &= 1/2\sqrt{(\varepsilon/\mu)}(a_\theta^2 + a_\varphi^2), \\ Q &= 1/2\sqrt{(\varepsilon/\mu)}(a_\theta^2 - a_\varphi^2), \\ U &= -1/2\sqrt{(\varepsilon/\mu)}a_\theta a_\varphi \cos\Delta, \\ V &= \sqrt{(\varepsilon/\mu)}a_\theta a_\varphi \sin\Delta, \end{aligned}$$

где ε, μ — диэлектрические и магнитные составляющие среды распространения, $\Delta = \Delta_\theta - \Delta_\varphi$.

В общем случае степень поляризации P излучения, а также степени линейной и круговой поляризации P_L, P_C определяются выражениями:

$$\begin{aligned} P &= \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}, \\ P_L &= \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \\ P_C &= \frac{V}{I}. \end{aligned}$$

После прохождения излучением поляризатора или анализатора параметры Стокса преобразуются: $\mathbf{I}' = \mathbf{P} \cdot \mathbf{I}$, де \mathbf{P} — так называемая матрица Мюллера:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (p_\theta)^2 + (p_\varphi)^2 & (p_\theta)^2 - (p_\varphi)^2 & 0 & 0 \\ (p_\theta)^2 - (p_\varphi)^2 & (p_\theta)^2 + (p_\varphi)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2p_\theta p_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2p_\theta p_\varphi \end{bmatrix}$$

Идеальный линейный поляризатор пропускает только одну из ортогональных составляющих, например θ . Тогда матрица Мюллера приобретает вид

$$\mathbf{P} = \frac{(p_\theta)^2}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Ослабляющий нейтральный фильтр описывается матрицей

$$\mathbf{P}_n = (p_\theta)^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

а фазовая пластинка —

$$\mathbf{R}(\xi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\xi & \sin\xi \\ 0 & 0 & -\sin\xi & \cos\xi \end{pmatrix}.$$

В общем случае при использовании поляризатора, нейтрального фильтра и фазовой пластинки результирующий вектор Стокса примет вид

$$\mathbf{I}' = \mathbf{P}(\eta) \cdot \mathbf{P}_n \cdot \mathbf{R}(\xi) \cdot \mathbf{I}.$$

При повороте поляризатора на угол η поляризационная матрица Мюллера будет иметь вид:

$$\mathbf{P}(\eta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\eta & -\sin 2\eta & 0 \\ \cos 2\eta & \cos^2 2\eta & -\cos 2\eta \sin 2\eta & 0 \\ -\sin 2\eta & -\cos 2\eta \sin 2\eta & \sin^2 2\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Интенсивность результирующего лазерного луча как функция η и ξ определяется выражением

$$\begin{aligned} I'(\eta, \xi) &= \\ &= 0.5(I + Q\cos 2\eta - U\sin 2\eta \cos \xi - V\sin 2\eta \sin \xi). \end{aligned}$$

По этой формуле на основе измерений интенсивности результирующего пучка и различных комбинаций η и ξ можно определить параметры Стокса [4, 6]:

$$\begin{aligned} I &= I'(0^\circ, 0^\circ) + I'(90^\circ, 0^\circ), \\ Q &= I'(0^\circ, 0^\circ) - I'(90^\circ, 0^\circ), \\ U &= -2I'(45^\circ, 0^\circ) + I, \\ V &= I - 2I'(45^\circ, 90^\circ). \end{aligned} \tag{1}$$

Для идеальной линейной поляризации, когда $\eta = 0^\circ$ или 90° , параметр Стокса $U = 0$, а $Q = I$

или $-I$. Для круговой поляризации $Q = U = 0$ и $V = -I$ или I для левой и правой круговой поляризации соответственно.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ, ЛИНЕЙНОСТИ И ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для проведения прецизионных фотометрических измерений необходимо достигнуть соответствующей стабильности, линейности лазерного излучения и фотоизмерительной схемы. Измерения показали, что разработанный нами блок стабильного тока для лазерного диода обеспечивает стабильный ток в диапазоне 0—350 мА со средним квадратичным отклонением меньше чем 0.07 мА, что должно обеспечивать достаточную стабильность мощности излучения лазера во время лабораторных исследований и преобразования линейной поляризации в необходимую левую круговую поляризацию. При этом мощность когерентного излучения лазера линейно зависит от проходящего через него тока при превышении порогового уровня генерации (рис. 1).

Измерения стабильности мощности излучения 200-мВт лазерного GaAlAs-диода с двойным гетеропереходом на протяжении 120 мин показали, что даже пиковое изменение мощности излучения лазера не превышает 0.2 %. Этой величины вполне достаточно для исследовательских и системных работ по прецизионному преобразованию линейной поляризации лазерного излучения в необходимую круговую поляризацию.

Зависимость тока $I_{\text{фд}}$ измерительной фотометрической схемы, а следовательно, и мощности излучения лазера от тока $I_{\text{д}}$ через диод показана на рис. 1. Видно, что излучаемая мощность имеет линейный характер в диапазоне токов 180—350 мА, что типично для полупроводниковых лазеров. Следовательно, используемая нами фотоизмерительная система также линейна.

При фиксированном токе через лазерный диод излучаемая им мощность зависит от температуры. Измерения проводились при фиксированной температуре среды 23 °С. Охлаждающий радиатор диаметром 80 мм был использован для уменьшения локальной температуры лазерного диода и пассивной компенсации температурных флуктуаций окружающей среды.

Общая схема измерения поляризации лазерного излучения представлена на рис. 2. Использовался разработанный нами прецизионный источник тока. В качестве четвертьволновых преобразователей использовались изготовленные на необходимый спектральный диапазон кварцевые четвертьволновые пластинки. Использовался стандартный анализатор и набор нейтральных ослабляющих светофильтров. Информация с измерительной схемы через интерфейс RS-232 выводилась и записывалась на компьютер. Измерение линейной поляризации излучения лазерного диода проводилось без четвертьволновых преобразователей 3 и 4.

Измерения параметров Стокса Q и U линейной поляризации излучения лазерного диода в соответствии с формулами (1) показали, что линейная поляризация лазерного диода составляет $P_L = 99\%$, когда мощность лазерного диода максимальна. Некогерентная часть мощности лазерного диода составляет менее 1 %, и она не может существенно повлиять на результаты дальнейших преобразований этого излучения в поляризованное по кругу.

Результаты исследования линейной поляризации излучения нашего лазера представлены на

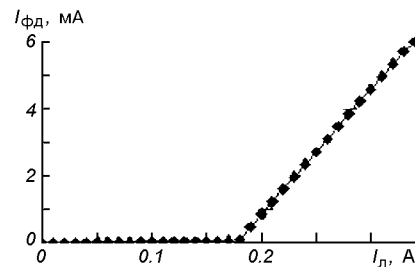


Рис. 1. Зависимость мощности излучения лазерного диода (ток $I_{\text{фд}}$ фотоизмерительной схемы) от тока $I_{\text{д}}$, проходящего через диод

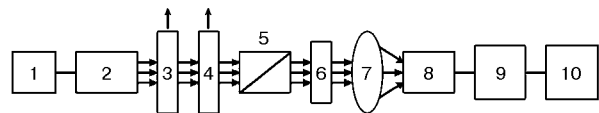


Рис. 2. Блок-схема измерения и преобразования поляризации: 1 — источник стабильного тока, 2 — лазерный диод, 3 — первый четвертьволновой преобразователь, 4 — второй четвертьволновой преобразователь, 5 — анализатор излучения, 6 — нейтральный фильтр, 7 — фокусирующая система, 8 — фотоприемное устройство, 9 — измерительная схема, 10 — компьютер

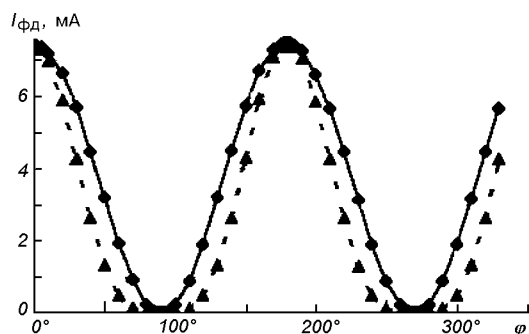


Рис. 3. Зависимость тока фотоизмерительной схемы от угла поворота анализатора излучения: сплошная линия — результаты измерений, штрихи — закон Малюса

рис. 3 сплошной линией. Штриховой линией показана теоретическая зависимость согласно закону Малюса $I = I_0 \cos^2 \varphi$. Отклонение объясняется особенностями конструкции применяемого полупроводникового лазера и наличием поперечной моды TEM_{01} в его излучении. Поперечные моды излучения имеют одинаковую плоскость поляризации, и их наличие не влияет на результаты преобразования линейной поляризации в круговую.

ИЗМЕРЕНИЕ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Преобразование линейной поляризации излучения в левую и правую круговую проводилось путем введения первой четвертьволновой фазовой пластинки и ее поворота на углы $\pm 45^\circ$ относительно линейной поляризации. Для этой цели использовался узел прецизионного вращения поляризатора с точностью позиционирования положения четвертьволновой фазовой пластинки $\pm 6'$.

В общем случае получается эллиптическая поляризация с параметрами Стокса Q, U, V , отличными от нуля. Лишь для идеальной круговой поляризации параметры Q, U вектора Стокса равны нулю. Была измерена степень отклонения от круговой поляризации (эллиптичность) путем вращения анализатора излучения. На рис. 4 представлена зависимость тока $I_{фд}$ фотоизмерительной схемы от угла Φ поворота анализатора излучения. Эллиптичность поляризации вычислялась из соотношения

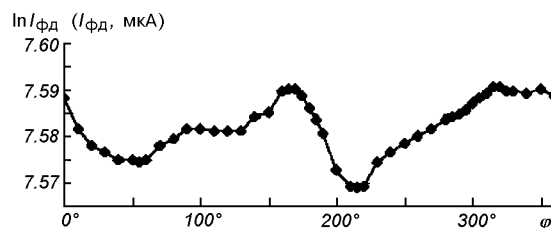


Рис. 4. Зависимость тока $I_{фд}$ фотоизмерительной схемы от угла Φ поворота анализатора излучения при измерении левой круговой поляризации

$$P_D = (P_{\min} - P_{\max}) / (P_{\min} + P_{\max}),$$

где P_{\min} и P_{\max} — минимальные и максимальные отсчеты показаний измерительной схемы при вращении анализатора излучения. Оказалось, что отклонение от идеальной круговой поляризации составляет $P_D = 1.8 \%$. При этом средняя мощность левополяризованного лазерного излучения порождает ток $I_{фд} \approx 1960$ мкА.

По спецификации ботовой аппаратуры спутника принимаемое лазерное излучение должно быть левым циркулярно поляризованным с деполяризационным отношением [5]

$$D = P_n / P_l,$$

где P_n и P_l — степени правой и левой круговой поляризации. Согласно спецификации спутника ARTEMIS деполяризационное отношение должно составлять $D < 2.5 \%$.

Для измерения деполяризационного отношения ввели в оптическую измерительную схему (рис. 2) вторую пластинку $\lambda/4$. При этом влево и вправо поляризованное по кругу излучение обратно преобразуется во взаимно ортогональные линейные поляризации. В соответствии с формулами (1) в идеальном случае параметры вектора Стокса принимают значения $Q = -I, U = 0$ после преобразования правой круговой поляризации и $Q = I, U = 0$ после преобразования левой поляризации. В этом случае измерение D сводится к измерению отношения Q/I с учетом знака и типа круговой поляризации.

Измеренное таким образом деполяризационное отношение оказалось равным $D = 1.7 \%$ и удовлетворяет требованиям к поляризации лазерного излучения, предъявляемым аппаратурой спутника ARTEMIS.

