



ISSN 1607–2855

Том 5 · № 1–2 · 2004 С. 236–241

УДК 535.5:621.38

Модуляторы света для астрономических поляриметров

А.П. Видьмаченко, Е.П. Неводовский, П.В. Неводовский

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины

В статье приводятся основные методы и средства модуляции поляризованного света. Внимание сосредоточено на модуляторах, построенных на базе двигателей с полым ротором.

МОДУЛЯТОРИ СВІТЛА ДЛЯ АСТРОНОМІЧНИХ ПОЛЯРИМЕТРІВ, Видьмаченко А.П., Неводовський Є.П., Неводовський П.В. — В статті наводяться основні методи і засоби модуляції поляризованого світла. Увага зосереджена на модуляторах, побудованих на базі двигунів з порожниним ротором.

LIGHT MODULATORS FOR ASTRONOMICAL POLARIMETERS, by Vidmachenko A.P., Nevodovskiy E.P., Nevodovskiy P.V. — The main methods and ways of modulation of the polarized light are presented in the paper. The main attention is concentrated on modulator built using the electric motors with hollow rotor.

1. ВСТУПЛЕНИЕ

В астрономии традиционными методами исследования небесных тел в оптическом диапазоне являются фотометрия, спектрометрия и поляриметрия. Примеры астрономической аппаратуры, необходимой для таких исследований рассмотрены в [3, 4]. Поляризационный метод среди них является наиболее информативным, но и самым сложным для реализации.

При прохождении света через исследуемую среду изменяется состояние его поляризации. Математически этот процесс может быть описан следующими методами: Джонсона, Мюллера, Стокса, сферы Пуанкаре. Эти методы лежат в основе соответствующих приборов, с помощью которых определяют поляризационную составляющую исследуемой среды. Совокупность довольно жестких требований, которые предъявляются ко всем видам такого рода астрономической аппаратуры (малые габариты и вес, сложность климатических условий, высокая точность в определении параметров) позволяют отнести такие приборы к разряду уникальных.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Приемники света в оптическом диапазоне чувствительны лишь к изменениям интенсивности исследуемого потока света и не реагируют на состояние его поляризации. С другой стороны состояние поляризации потока света полностью описывается набором четырех соответствующих действительных величин — параметров Стокса, которые зависят от интенсивности потока света [8]. Поэтому принцип работы поляриметров и базируются на преобразовании вектора Стокса светового потока в его интенсивность (квадрат амплитуды). Такие преобразования могут выполняться статическим и модуляционным способами [6]. Статический способ базируется на одновременном измерении интенсивности излучения от двух разделенных компонент с взаимно перпендикулярной поляризацией. Модуляционный метод базируется на измерении интенсивности поляризационного излучения, которое принудительно модулируется поляризационным элементом во времени. Первый способ накладывает очень жесткие требования к идентичности обоих приемников света, а второй требует наличия сложного поляризационного модулятора.

Исходя из способа изменения поляризационной зависимости поляризационные модуляторы можно разделить на те, в которых электрический сигнал изменяет оптические параметры среды, то есть модуляторы «электрический сигнал — свет», и на те, в которых оптические параметры изменяются с помощью механической переориентации поляризационного элемента, то есть модуляторы «свет — свет» [2].

К первым принадлежат модуляторы, принцип действия которых основывается на изменении анизотропии среды под действием внешнего электрического или магнитного полей (эффекты Керра, Поггерса, Фарадея, Катона–Мутона). К преимуществам этих модуляторов следует отнести отсутствие механического привода и их безинерционность. Однако эти модуляторы на сегодня еще не очень надежны и как правило недостаточно ахроматичны.

Ко вторым относятся модуляторы, в которых изменение поляризационных свойств происходит благодаря механическому вращению поляризметрических элементов (поляризационных призм, поляроидов, фазовых пластин и др.).

Простейшим и наиболее распространенным является модулятор, который состоит из двух поляроидных элементов, один из которых неподвижен, а другой непрерывно вращается относительно первого. Измерения здесь проводятся в выбранный с большой точностью момент времени. Второй вариант работы такого модулятора «пошаговый»; при этом один поляризметрический элемент относительно неподвижного проворачивается и устанавливается с большой точностью на заранее заданный угол, и только после этого происходит измерение интенсивности. Недостатки этих методов связаны с трудностью обеспечения высокой точности привязки по времени в первом случае, и точности позиционной установке по углу — во втором.

Расчеты модулятора, который состоит из неподвижного поляроида и вращающейся фазовой пластины, показали, что погрешность позиционной остановки фазовой пластинки должна быть меньше 1 угловой минуты, что соответствует точности измерения поляризации 0.1%. Эти расчеты накладывают жесткие требования к точности работы приводов модулятора.

3. СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА

Подвижный элемент модулятора (фазовая пластинка) может вращаться либо благодаря кинематической передаче, либо поляризационный элемент может быть установлен непосредственно на оси вращения в поле отверстия ротора электродвигателя. Иными словами, приводом подвижного элемента модулятора могут быть:

1. *Кинематическое соединение с помощью зубчатых колес, храповиков, плунжеров и других кинематических пар.* Этот классический привод по технологии является наиболее простым и состоит из электрического двигателя постоянного тока или шагового двигателя и редуктора, который передает вращение к поляризационному элементу. Наличие люфтов, мертвого хода, трения за счет довольно длинного пути от двигателя к объекту вращения накапливает существенные погрешности присущие всем механическим редукторам. Поэтому в этом случае реализовать остановку модулятора с точностью меньше, чем 3 угловые минуты проблематично.

2. *Синхронный двигатель* представляет собой двухобмоточную электрическую машину переменного тока, одна из обмоток которой возбуждается переменным током с частотой ω , а вторая — постоянным током. Скорость ротора у таких электродвигателей при постоянной частоте тока сохраняется постоянной и не зависит от нагрузки.

Наши интересы в данной классификации сосредоточены на электрических машинах серии RSN–24, разрабатываемых предприятием «Рухсервомотор».

Преимуществами таких синхронных двигателей являются:

- высокая динамика, точность, жесткость и надежность, обусловленные отсутствием механической трансмиссии;
- широкий диапазон регулирования скорости;
- высокие удельные тяговые характеристики во всем диапазоне скоростей;

- компактная конструкция;
- отсутствие техобслуживания;
- возможность встраиваемого исполнения, в т.ч. поворотные двигатели с полым ротором.

Однако большие габаритные размеры (диаметр 180 мм и более) затрудняют реализацию данного типа двигателей в астрономических поляроидных модуляторах.

Синхронный двигатель типа ДМ-15С был реализован в астрономическом спектрополяриметре [8], где очень хорошо себя зарекомендовал. Однако разработка и изготовление такого двигателя были разовые и сейчас они не изготавливаются. К недостаткам этого двигателя следует отнести их жесткую привязку работы к алгоритму.

3. *Синхронные двигатели серии ДБМ* — это бесконтактные синхронные электрические машины с обмотками на статоре и изготовленными из редкоземельных элементов постоянными магнитами, на роторе. Данные электродвигатели предназначены для работы в локально замкнутой (с датчиками положения ротора) или разомкнутой по углу системах регулирования.

Такие электродвигатели изготавливаются в Российской Федерации и поставляются в виде отдельных сборочных единиц — статора и полого ротора без вала. Их конструкция позволяет создать модулятор с полым ротором для вращения поляризационных элементов. Двигатели серии ДБМ выпускаются в двух исполнениях: с гладким и пазовым статором.

Гладкий статор с двухслойной петлевой обмоткой, расположенной непосредственно в воздушном зазоре, позволяет обеспечить:

- отсутствие реактивного остаточного момента сопротивления и им вызываемых пульсаций вращающего момента;
- малые электромагнитные постоянные времени обмоток.

Пазовый статор с двухслойной петлевой обмоткой, уложенной в пазы сердечника, позволяет обеспечить:

- более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре, чем в двигателях с гладким статором, и соответственно более высокую статическую добротность;
- меньшую электромеханическую постоянную времени, чем у двигателей с гладким статором.

Эти синхронные электрические машины имеют в сравнении с другими видами электродвигателей наибольшее количество функциональных возможностей:

- питание обмоток статора системой синусоидальных напряжений с фазовым сдвигом во времени обеспечивает режим синхронного двигателя;
- питание обмоток статора системой импульсных напряжений обеспечивает режим шагового двигателя;
- обратная связь, которая позволяет обеспечить вентильный режим работы двигателя.

Таким образом, у этих двигателей есть возможность изменять его характеристики, изменяя формы фазовых напряжений или переключая обмотки синхронной машины, то есть обеспечивать программирование требуемых параметров.

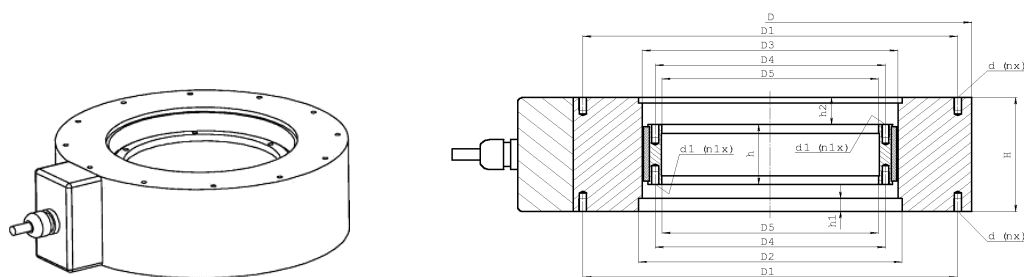


Рис. 1. Синхронный двигатель

Таблица 1. Параметры двигателей серии ДБМ

Условные обозначения двигателей		ДБМ40-0,01-2,5-3	ДБМ40-0,01-5-3	ДБМ50-0,04-3-2	ДБМ50-0,04-6-2	ДБМ63-0,06-3-2
Размеры, мм	Наружный диаметр статора D , мм	40	40	50	50	63
	Внутренний диаметр статора d , мм	12	12	12	12	28
	Осевая длина L , мм, не более	26	26	38	38	28
Число пар полюсов		4	4	4	4	8
Номинальное напряжение питания, В		27	27	27	27	27
Частота вращения при идеальном холостом ходе, об/мин		3900 – 5400	7800 – 10800	2900 – 3900	5800 – 7800	2700 – 3400
Пусковой момент, Н·м, не менее		0.02	0.04	0.066	0.135	0.11
Масса, кг, не более		0.12	0.12	0.18	0.18	0.32

Исходя из астрономических задач, ограничимся рассмотрением следующих двигателей этой серии: ДБМ40-0,01-2,5-3, ДБМ40-0,01-5-3, ДБМ50-0,04-3-2, ДБМ50-0,04-6-2 и ДБМ63-0,06-3-2.

Перечислим основные преимущества двигателей ДБМ:

- они не требуют редуктора и, как следствие, упрощается конструкция привода, уменьшается металлоемкость и трудоемкость, шум, а также сработанность поверхностей трения;
- повышается точность позиционирования механизмов за счет отсутствия люфтов, происходит уменьшение мертвого движения и снижение момента сухого трения и др.;
- многофункциональность двигателей расширяет круг возможных задач.

К недостаткам следует отнести большие массы ротора (применительно к нашим задачам), дрожание ротора относительно статора в моменты покоя (время измерений), и то, что этот электродвигатель не поставляется в виде законченного изделия.

4. *Пьезоэлектрические двигатели* — особая группа двигателей, основанная на преобразовании электрической энергии в механическую за счет пьезоэлектрического эффекта. Статор двигателя содержит пьезокерамическое кольцо, на котором укреплены толкатели, упирающиеся на внутреннюю поверхность ротора, выполненного в виде цилиндрической чашки, закрепленной на валу. На торцевые поверхности пьезокерамического кольца нанесены электроды, подключаемые к генератору ультразвуковых колебаний. Частота генератора соответствует одной из частот собственных механических колебаний пьезокерамического кольца в радиальном направлении (рис. 2).

Процесс преобразования колебаний пьезокерамического кольца в поступательное (вращательное) движение ротора (механическое детектирование) осуществляется следующим образом:

- при включении генератора механические колебания пьезокерамического кольца (2) через толкатели (4) передаются на ротор (3);
- в области фрикционного контакта толкателей с ротором векторы сил, передаваемых толкателями, раскладываются на две составляющие — вдоль радиуса ротора и по касательной к окружности ротора;
- последняя составляющая приводит ротор во вращательное движение; скорость вращения ротора при этом пропорциональна амплитуде механических колебаний кольца.

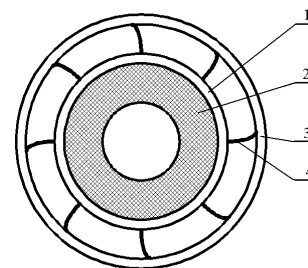


Рис. 2. Схема пьезодвигателя. 1 — тонкая стальная оболочка; 2 — пьезоэлемент; 3 — ротор; 4 — толкатели

Достоинства этих двигателей [9]:

- наличие эффекта самоторможения вала;
- высокая угловая разрешающая способность;
- большой удельный момент;
- широкий диапазон скоростей как в непрерывном, так и в пошаговом режимах работы.
- малое время на разгон и торможение — менее, чем 1 мс при скорости 1.0 об/с.
- широкий диапазон частот вращения (0–300 об./мин);
- возможность малых в пределах оборота вала перемещений (доли угловых секунд);
- широкий диапазон моментов на валу (0.01–100 Н·м);
- высокая надежность и ресурс (более 2000 час);
- экономичность (малое энергопотребление);
- искро-взрыво-безопасность;
- электронное управление (дистанционное ручное или автоматическое);
- отсутствие излучаемых магнитных полей;
- бесшумная работа;
- высокий КПД устройств с их применением;
- простота технологии изготовления;
- малые масса и габариты.

Эти качества ярко демонстрируют преимущества пьезодвигателей над электродвигателями других типов.

К недостаткам следует отнести возможность проскока в зоне контакта осциллятора с ротором, значительные колебания вдоль и по кругу цилиндрической оболочки [8].

4. СХЕМНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ БЛОКА ПОЛЯРОИДНОГО МОДУЛЯТОРА

Как было отмечено выше, требования к угловой точности являются основными показателями при выборе привода для поляризационного модулятора, а точность зависит от организации схемы работы модулятора.

Системы работы блока поляризационных модуляторов могут быть замкнутыми и разомкнутыми. Примеры таких схем представлены на рис. 3.

Разомкнутая система представляет собой совокупность следующих устройств: устройство преобразования электрической энергии во вращение (по определенному закону $W_1(p)$) — электродвигатель, устройство согласования электродвигателя с полезной нагрузкой ($W_2(p)$) и устройство управления этим процессом (входное напряжение). Точностные характеристики этой системы определяются точностью отработки двигателя и суммарной ошибкой всего кинематического пути к полезной нагрузке.

Замкнутая система, помимо перечисленных элементов, подразумевает наличие датчика угла поворота, который охватывает разомкнутую систему обратной связью. Такая следящая система, когда угловое положение вращения выходного элемента отслеживается заданным датчиком угла

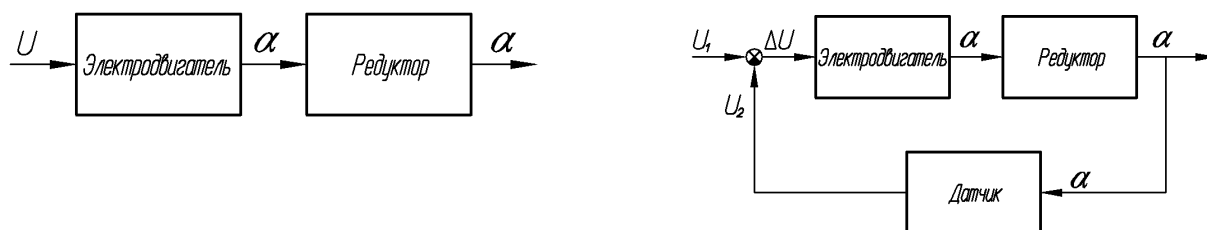


Рис. 3. Схема работы блока поляризационного модулятора. Слева — замкнутая система, справа — разомкнутая система

поворота, требует большого внимания к выбору типа датчика. По принципу работы они могут быть оптические, магнитные, трансформаторные и т.д. Точность работы этих датчиков и будет определять точностные параметры модулятора. Поэтому вращающийся поляризационный элемент модулятора в таких схемах должен быть жестко связан с положением датчика.

5. ВЫВОДЫ

Блок поляризационного модулятора является довольно сложным и важным узлом поляризметрических приборов. От величины неравномерности его вращения зависит точность измерения степени поляризации. Поэтому при разработке такой аппаратуры необходимо уделять внимание как схемному построению, так и конструкции этого блока. На наш взгляд, наиболее перспективными в качестве привода поляризационного модулятора могут быть пьезодвигатели с полым ротором, которые смогут обеспечить требуемые точности и приемлемые значения массо-габарито-весовых соотношений. Универсальность этих двигателей даст возможность оперативно изменять алгоритм работы всего прибора. Малые весо-габаритные соотношения, малое энергопотребление позволит применить эти двигатели при создании поляриметров, устанавливаемых на борту космических летательных аппаратов.

Данная работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Национального Космического Агентства Украины («Астро»).

1. *Бугаенко О.И., Гуральчук А.Л.* Астрономический спектрофотополяриметр. I. Основные принципы работы. // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел. — Киев: Наукова думка, 1985. — С. 160–164.
2. *Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Перфенов А.В.* Пространственная модуляция света. — М.: Радио и связь, 1987. — 320 с.
3. *Видьмаченко А.П., Неводовський П.В., Бардаш О.М.* Астрономічний спектрополяриметр для дистанційного вивчення оптичних та фізичних параметрів тіл Сонячної системи // Вісник НТУУ «КПІ». — 2003. — № 25. — С. 12–18.
4. *Видьмаченко А.П., Делець О.С., Неводовський П.В., Андрук В.М.* Цифровий панорамний поляриметр для дистанційного дослідження оптичних та фізичних параметрів небесних об'єктів // Вісник НТУУ «КПІ». — 2003. — № 26. — С. 12–18.
5. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под общ. ред. М.Г.Чиликина. — М.: Энергия, 1971. — 624 с.
6. *Жевандров Н.Д.* Применение поляризованного света. — М.: Наука, 1978. — 176 с.
7. *Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневский В.С.* Пьезоэлектрические двигатели. — М.: Энергия, 1980. — 112 с.
8. *Мороженко О.В.* Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. — Київ: Наукова думка, 2004. — 648 с.
9. *Петренко С.Ф.* Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. — К.: Корнійчук, 2002. — 96 с.

Поступила в редакцию 11.10.2004