

УДК 543.424  
END: HWTELZ

PACS: 85.60.+g

## Схемотехнические решения устройств поляризационной визуализации

С. М. Борзов, П. Е. Котляр, О. И. Потатуркин

*Представлены результаты аналитического исследования схемотехнических решений устройств поляризационной визуализации, предназначенных для обнаружения искусственных объектов на естественном фоне. Выполнен анализ технических характеристик нового класса оптических приборов – поляриметров фокальной плоскости, обеспечивающих значительное повышение информативности за счет организации пиксельной структуры поляризационных сенсоров. Показана перспективность совместного применения пространственной, спектральной и поляризационной информации для улучшения качества описания реальных сцен и, как следствие, повышения эффективности обнаружения и классификации объектов в поле наблюдения.*

*Ключевые слова:* поляризация, параметры Стокса, поляризационные изображения, поляриметры, поляризационные фильтры.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-105-113

### Введение

При решении научных и прикладных задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на протяжении многих лет, наряду с пространственной, широко используется спектральная информация. Применение многоспектральных приборов обеспечивает регистрацию высокодетальных изображений

наблюдаемых сцен в большом количестве относительно узких участков спектра. Этот подход, получивший название гиперспектральной визуализации, обладая всеми преимуществами панхроматических оптико-электронных средств, даёт возможность дополнительно получать высокоинформативные признаки, позволяющие использовать их при обнаружении и классификации объектов [1, 2]. Он основан на том, что различные природные и антропогенные объекты по-разному отражают и поглощают электромагнитное излучение в том или ином диапазоне длин волн. Это обеспечивает принципиальное увеличение количества регистрируемых признаков и, как следствие, повышает эффективность решения широкого круга научных, экологических, хозяйственных и других задач. Однако регистрация пространственных и спектральных свойств объектов не всегда позволяет обнаруживать и классифицировать их на сложном фоне при разнообразных условиях наблюдения. Для дальнейшего повышения эффективности решения

---

**Борзов Сергей Михайлович**, зав. лаб., к.т.н.

E-mail: borzov@iae.nsk.su

**Котляр Петр Ефимович**, в.н.с., д.г.-м.н., профессор.

E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su

**Потатуркин Олег Иосифович**, гл.н.с., д.т.н., профессор.

E-mail: potaturkin@iae.nsk.su

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

Статья поступила в редакцию 2.07.2024

Принята к публикации 29.07.2024

---

© Борзов С. М., Котляр П. Е., Потатуркин О. И., 2024

этих задач в последние годы активно развивается ещё одно направление – оптическая поляризационная визуализация [3] в широком частотном диапазоне от рентгеновских и  $\gamma$ -лучей до радиоволн. Поскольку электромагнитное излучение имеет векторный характер, для его полного описания кроме частоты, амплитуды и фазы необходимо определение ориентации электрического  $E$  и магнитного  $H$  векторов, то есть состояния поляризации.

Чрезвычайно важно, что спектральные и поляризационные данные независимы друг от друга и их совместное применение позволит получить всю доступную оптическим методам измерения информацию об объектах наблюдения и, как следствие, существенно повысить эффективность обработки данных ДЗЗ.

### Регистрация поляризационных изображений

Принцип поляриметрических измерений состоит в числовой оценке угла поворота плоскости поляризации излучения при его отражении природными и антропогенными объектами. Спектральные данные в основном дают информацию о материале и составе объекта, а поляризационные о свойствах и форме поверхностей. В настоящее время реализовано несколько фундаментальных исследовательских программ по пассивному измерению поляризации отраженного излучения природными и антропогенными объектами. Было продемонстрировано, что измерение поляризующей способности природных и антропогенных объектов, осуществляемое в дополнение к измерениям отражательной способности, обеспечивает решение задач обнаружения малоконтрастных объектов на различных подстилающих поверхностях [4].

Излучение Солнца и звезд не поляризовано. Поляризация естественного света возникает при его отражении от объектов сцены и, к сожалению, при взаимодействии с атмосферными аэрозолями. Она обусловлена выделением волн с определенной ориентацией колебаний электрического вектора. Человеческий глаз может различать объекты, если они отличаются от фона яркостью, цветом, насыщенностью и удалённостью, однако он не способен воспринимать поляризацию, не способен

воспринимать поляризацию и все существующие фотоприемные устройства.

Определение параметров неполяризованного, частично поляризованного и полностью поляризованного излучения возможно через измерение четырех параметров Стокса, которые объединяются следующим образом:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{135} - I_{45} \\ I_L - I_R \end{bmatrix},$$

где  $I$  – это полная интенсивность, сумма поляризованных изображений ( $0^\circ$  и  $90^\circ$ );  $Q$  – разница между  $I_0$  и  $I_{90}$ ;  $U$  представляет собой разницу между поляризованными изображениями в  $45^\circ$  и  $135^\circ$ ;  $V$  – это разность между левосторонним круговым поляризованным изображением ( $I_L$ ) и правосторонним круговым поляризованным изображением ( $I_R$ ). Так как на практике круговая поляризация встречается редко, далее параметры Стокса обозначаться как  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ , а компонент  $V$  опускается. Поскольку фотоприемник может измерять только интенсивность, которая является первым компонентом вектора Стокса, четыре значения интенсивности могут быть получены путем выбора первого компонента в каждом векторе Стокса для  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $135^\circ$  ориентации. После нахождения параметров Стокса вычисляются степень линейной поляризации ( $DOLP$ ) и угол линейной поляризации ( $A_0LP$ ) согласно

$$DOLP = \sqrt{\frac{Q^2 + U^2}{I}},$$

$$A_0LP = \frac{1}{2} \arctg \frac{U}{Q}.$$

Таким образом, для получения исчерпывающей информации о поляризации света необходимо провести четыре самостоятельных измерения, а затем обработать полученные данные [5].

### Схемотехнические решения

Существующие различные схемотехнические решения устройств поляризационной

визуализации обеспечивающих определение параметров Стокса представлены классификационной таблицей на рисунке 1 [6]. К ним от-

носятся: временное разделение, амплитудное разделение, апертурное разделение и разделение в фокальной плоскости.

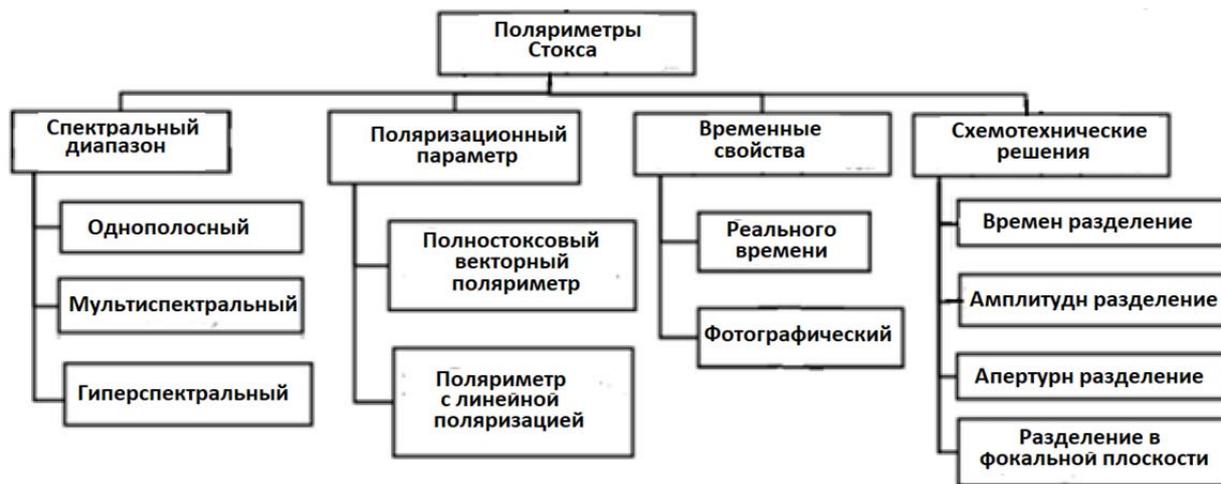


Рис. 1. Классификационная таблица поляриметров Стокса

Обычные методы определения поляризации по изображениям основаны на использовании одного поляризатора, закрывающего все поле зрения приемника. В этом случае последовательность из четырех изображений получается при последовательном повороте линейного поляризатора на углы 0, 45, 90 и 135 градусов. Затем вычисляются компоненты вектора Стокса. Параметры Стокса достаточно просто могут быть преобразованы в степень поляризации  $DOLP$  и угол поляризации  $A_0LP$ . Измерение параметра круговой поляризации  $V$  требует наличия четвертьволновой пластинки.

**Поляриметры Стокса с делением времени (SoP)** представляют собой устройства с одним поляризатором, который последовательно поворачивается на заданный набор азимутов, набором переключаемых поляризационных элементов (рис. 2а); или с поляризационным элементом, который постоянно вращается. Вращающийся поляризационный элемент представляет собой линейный поляризатор или фазовый замедлитель. Преимущество этого решения – простота как реализации, так и обработки данных для определения параметров Стокса. Существенным недостатком является ограниченная скорость ре-

гистрации. Частота вывода изображения образцового современного поляриметра с матрицей микроболометрических детекторов составляет порядка нескольких герц [7]. Этот метод предполагает, что состояние поляризации не меняется в течение как минимум половины времени вращения поляризационного элемента; если этого условия не выполняется на изображении, то появляется ложный поляризационный сигнал. Вращающийся элемент должен быть идеально плоскопараллельным. В случае, когда поляризационный элемент непрерывно вращается, его вращение должно быть синхронизировано с детектором с помощью контура фазовой синхронизации. Вращение поляризационных элементов вызывает вибрации устройства, являющиеся источником дополнительных погрешностей. Полностью исключить подвижные элементы в поляриметрах с разделением времени удалось заменив механическое вращение (или замену) поляризаторов на вращение плоскости поляризации входного изображения в жидкокристаллической ячейке (LCVR). Поляриметру с двойным полем зрения на основе LCVR требуется всего 0,4 с для получения полнополяризационных изображений [8].

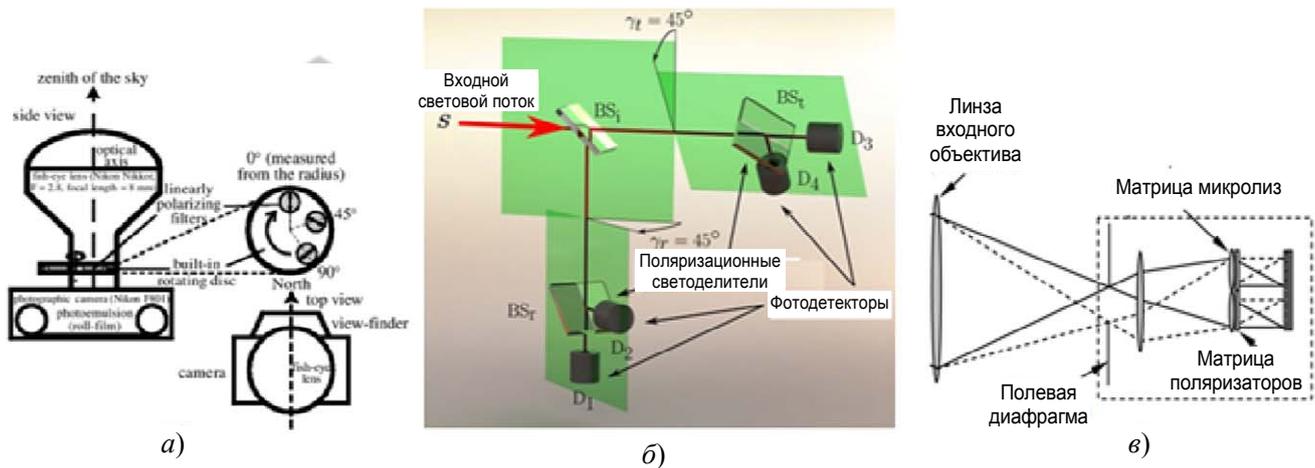


Рис. 2. Схематические решения поляриметров: а) – с разделением времени [7], б) – с разделением амплитуд [10] и в) – с апертурным разделением [11]

### Поляриметры с разделением амплитуд (DoAmP)

Архитектура поляриметра DoAmP основана на системе четырех отдельных поляризационных камер, которые коаксиально откалиброваны и оснащены различно ориентированными поляризационными элементами. Таким образом, изображения с различной модуляцией могут быть получены из нескольких каналов одновременно [9]. Эти поляриметры характеризуются большими размерами и высокими затратами, так как они требуют четырех входных объективов и четырех фотоприемных матриц. В [10] предложена схема, в которой используется один входной объектив, а разделение входного потока на четыре канала с фотоприемными матрицами осуществляется последовательно поляризационных светоделителей (рис. 2б). Количество энергии, достигающей каждого детектора меньше, чем в других решениях из-за потерь излучения на светоделительных элементах. Достоинством является их способность одновременно определять три параметра Стокса ( $S_0$ ,  $S_1$  и  $S_2$ ), то есть работа в реальном времени с полным разрешением фотоприемных матриц. Для совместной регистрации четырех изображений требуется постобработка. Одним из главных недостатков является необходимость жесткой фиксации фокальных плоскостей и оптических элементов схемы.

### Поляриметры с разделением апертуры (DoApP)

Они сконструированы на принципе деления апертуры, когда лучи, попадающие в объектив, разделяются и затем сводятся в фокальной плоскости системой элементарных линз. В частности, на представленной схеме массив элементарных линз создает 4 идентичных мини-сцены, каждая из которых проецируется на один из квадрантов фотоприемной матрицы (рис. 2в). В результате получаются четыре одинаковых оптических канала. Лучи в каждом из них преобразуются линейными поляризаторами. Поляризаторы ориентированы под углами  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  или  $135^\circ$  по отношению к вертикальной оси [11]. Особое внимание уделяется оптимальной настройке всей оптики для получения наилучшего изображения в каждом из четырех квадрантов с дальнейшей программной обработкой. Очевидным преимуществом подхода DoApP является одновременное получение всех изображений для вычисления параметров Стокса, что позволяет проводить поляриметрическое изучение высокодинамических сцен. Конструкция является достаточно жесткой и детекторы менее подвержены ошибкам, вызванным движением или вибрацией. Кроме того, четыре поляризатора могут быть удалены и заменены на полосовые спектральные фильтры или комбинацию таких фильтров с поляриметрическими

фильтрами, переводя устройство в режим многоцелевого поляриметрического много-спектрального сенсора. Принципиальным недостатком такого подхода является то, что разрешение изображения с набором оптических каналов снижается.

### Поляриметры с делением в фокальной плоскости (DoFP)

С развитием микро- и нанотехнологий микрооптические поляризационные элементы были непосредственно интегрированы в матрицу в фокальной плоскости для модуляции свойств поляризации в масштабе пикселей, образуя новый класс приборов – поляриметр фокальной плоскости (DoFP). В декабре 2016 года состоялось событие, которое можно считать революцией в поляризационной визуализации. Фирма Sony Semiconductor Solutions (Япония) сообщила о том, что впервые в истории ей удалось встроить поляризационный фильтр прямо в оптический сенсор. В разработанном сенсоре впервые реализуется регистрация полного объема данных – спектральных и четырех поляризационных координат в каждом пикселе анализируемой сцены. Уникальность данной разработки заключается в том, что в сенсоре используется матрица микрополяризаторов, ориентированных под углами 0, 45, 90 и 135 градусов. Массивы микрополяризаторов размером 7,4 микрона в 5 мегапиксельной матрице фотоприемников были изготовлены для использования во всем видимом спектре. Пиксельная поляризационная камера регистрирует четыре ориентации поляризации в одном видеокadre, что позволяет мгновенно измерять линейные параметры Стокса. Значения интенсивности четырех пикселей позволяют вычислить интенсивность и направление поляризации излучения в каждом пространственном пикселе по аналогии с байеровским фильтром на цветных сенсорах. Вместо одного изображения камера получает четыре, что позволит пользователю выбирать изображение с необходимым углом поляризации. Построенные на базе поляриметрических сенсоров Sony камеры способны выполнять количественные поляриметрические измере-

ния. В них используется псевдоцветовая кодировка для визуализации степени и угла линейной поляризации [12].

Всего за 4 года фирма Sony разработала и организовала серийный выпуск 6 разновидностей поляризационных оптических сенсоров нового поколения, которые в настоящее время используются в 11 поляризационных камерах 9 фирм производителей. Первые два сенсора с поляризационными фильтрами выполнены на кристаллах IMX250MZR (монокромный) и IMX250MYR (цветной). Сенсоры построены на основе 5 мегапиксельной CMOS матрицы с фронтальной подсветкой (FSI) размером пикселя 3,45 мкм, разрешением 2464×2056 пикселей, спектральной чувствительностью 0,4–0,75 мкм, и кадровой частотой 163 кадр/с и кадровым затвором (Global-Shutter). В июне 2019 года Sony сообщила о выпуске двух новых моделей сенсоров с поляризационными фильтрами IMX253MZR и IMX253MYR. Сенсоры построены на основе 12 мегапиксельной CMOS матрицы с фронтальной подсветкой (FSI) размером пикселя 3,45 мкм, разрешением 4112×3000 пикселей, расширенной спектральной чувствительностью VIS (0,4–0,75 мкм) / NIR (0,75–1,1 мкм) и кадровой частотой 68 кадр/с. В ноябре 2020 Sony сообщила о выпуске двух новых моделей сенсоров с поляризационными фильтрами IMX264MZR и IMX264MYR, которые позволили расширить спектр применения технологии поляризационной визуализации [13].

Ключевым элементом всех 6 сенсоров является матричный поляризационный фильтр, встроенный непосредственно в фотоприемную матрицу. Фильтр представляет собой тончайшую металлическую решетку, прутья которой расположены под четырьмя разными углами: 0, 45, 90 и 135 градусов. Технология изготовления матричного поляризационного фильтра в открытых источниках отсутствует, а единственная обнаруженная микрофотография фрагмента решетки представлена на рис. 3б. Структура поляризационного сенсора серии IMX250MZR представлена на рис. 3а и 3в.

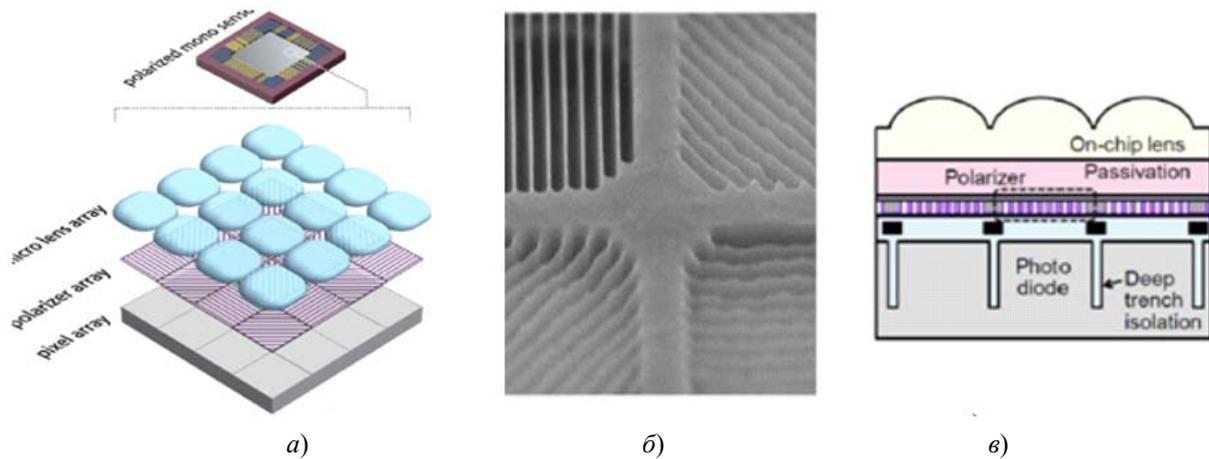


Рис. 3. Внутренняя структура поляризметрического сенсора IMX250 MZR фирмы Sony [12]: а) – структурная организация сенсора; б) – микрофотография фрагмента поляризационного фильтра фирмы Sony; в) – схематическое изображение структурной организации поляризационного сенсора

Во всех 6 сенсорах поляризационный фильтр формируется на кристалле фотодиодной матрицы, предназначенной для преобразования света в электрические сигналы, под слоем микролинзового раstra (рис. 3в). Поскольку поляризатор (рис. 3б) формируется в литографической технологии, обеспечиваются постоянство геометрии поляризатора, однородность, массовая производительность и долговечность. Кроме того, датчик поляризации Sony покрыт антибликовым слоем, который позволяет уменьшить коэффициент отражения и избежать появления паразитных бликов и ореолов. Более короткое расстояние между поляризатором и фотодиодом улучшает коэффициент экстинкции и зависимость угла падения. В поляризационных камерах используются очень светосильные объективы,

что обусловлено низкой чувствительностью таких устройств. На рис. 4 представлена структурная организация монохромного MZR и цветного MYR поляризационных сенсоров фирмы Sony [14].

Входная сцена может быть представлена в изображение RGB для каждого канала поляризации. Процесс обратного перемещения вместе с данными о поляризации позволяет визуализировать поляризацию цветного объекта. Технология дебаеризации позволяет сохранить исходно высокое разрешение матрицы, а технология цветокодирования позволяет визуализировать поляризацию цветного объекта. Улучшение контрастности изображения и детализация контура объекта, достигаемое пиксельной поляриметрической визуализацией, демонстрируется рис. 5 [15].

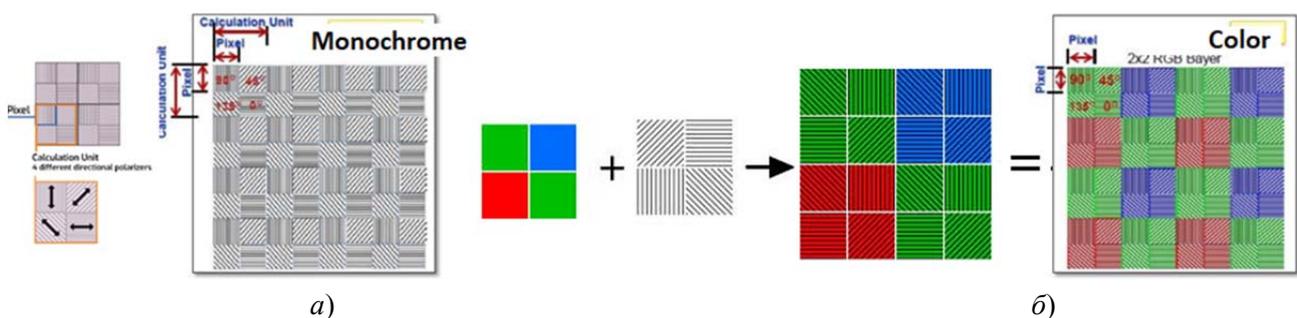
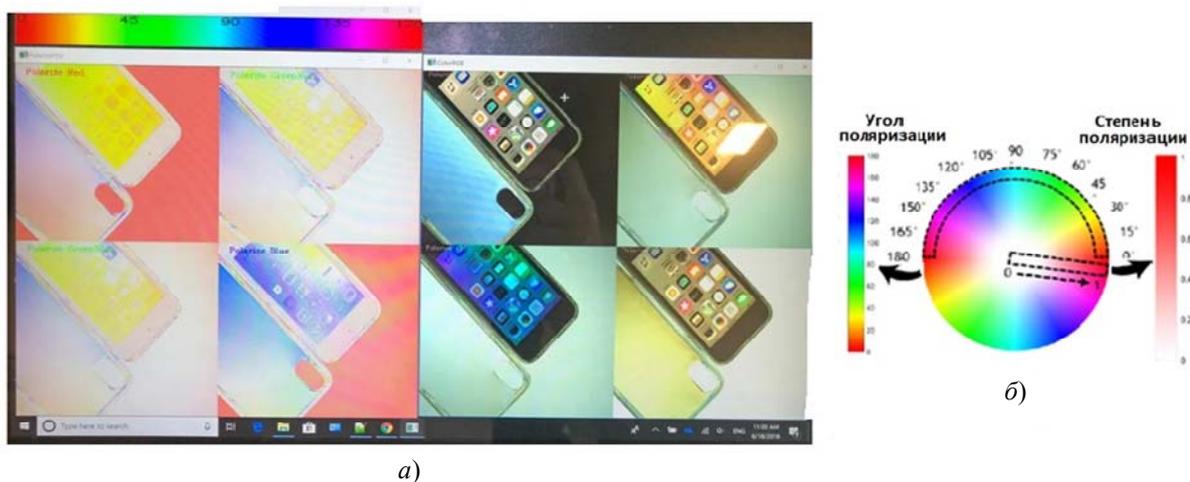


Рис. 4. Структурная организация монохромного а) и цветного б) поляризационных сенсоров: а) – Монохромный вариант. Поляризационный фильтр, состоящий из блоков 2×2 с ориентациями под четыремя разными углами: 0, 45, 90 и 135 градусов выполняется непосредственно на фотоприемной матрице; б) – Цветной вариант. Блок поляризационного фильтра 2×2 с ориентациями под углами: 0, 45, 90 и 135 градусов выполняется непосредственно на каждом RGB элемент интерференционного фильтра Байера, нанесенного непосредственно на кристалл фотоприемной матрицы, образуя 16-пиксельный вычислительный блок. Вектор Стокса вычисляется независимо для каждого пикселя



**Рис. 5.** Тестовое изображение, полученное с помощью цветной поляризационной камеры с сенсором фирмы Sony: а) – визуализация в системе HSV – слева, в системе RGD – справа; б) – цветокодирование поляризационной информации

Более подробное описание современного состояния систем пассивной поляризационной визуализации представлено в обзоре [16].

### Заключение

В работе рассмотрены методы и системы формирования поляризационных изображений на основе временного, амплитудного, апертурного разделения и разделения в фокальной плоскости. Представлены их принципиальные возможности, приведены основные параметры и технические характеристики. Показано, что благодаря последним достижениям нанотехнологий и микроэлектроники фирме **Sony** удалось создать линейку мегапиксельных поляриметрических сенсоров видимого и ближнего ИК-диапазонов, ключевым элементом которых является матричный поляризационный фильтр, встроенный непосредственно в фотоприемную матрицу. В разработанном сенсоре впервые реализуется совместная регистрация полного объема данных об анализируемой сцене в пространственных, спектральных и четырех поляризационных координатах.

Применение подобной аппаратуры перспективно для решения многих практических задач дистанционного зондирования, в первую очередь таких, как обнаружение и классификация антропогенных объектов (машин, техники, строений), поскольку наличие поляризации говорит об их искусственном происхождении, в отличие от природного фо-

на, когда отраженное излучение, как правило, не поляризовано. При этом, поляризационные характеристики подстилающих поверхностей и расположенных на них объектов зависят от геометрии наблюдений, взаимного расположения источников освещения сцены и наблюдателя, а также от состояния атмосферы (наличия или отсутствия облаков, пылевых частиц, дыма). Малая поляризующая способность большинства природных образований и искажающее влияние рассеяния в атмосфере обуславливают деполяризацию отраженного от исследуемой поверхности излучения и приводят к появлению значительной аддитивной поляризационной помехи. Для ее снижения необходимо вводить поправку на прохождении излучения сквозь атмосферу на основе модельных представлений и трассовых корректирующих измерений.

Значительный интерес при разработке поляризационной аппаратуры в настоящее время представляют исследования возможности ее комплексирования с инфракрасными системами наблюдения, а также создание баз данных и библиотек поляризационных характеристик объектов интереса и подстилающих фонов.

*Работа выполнена при поддержке  
Министерства науки и высшего образования РФ  
в рамках выполнения работ по проекту  
124041700103-1 Государственного задания  
ИАиЭ СО РАН на 2024–2026 гг.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Goetz A. F. H., Vane G., Soloman J. E., Rock B. N. / Science. 1985. Vol. 228. № 4704. P. 1147–1153.
2. Борзов С. М., Котляр П. Е., Потатуркин О. И. / Автометрия. 2023. Т. 59. № 6. С. 113–123.
3. Селиванов В. А., Гектин Ю. М., Будаков В. П. / Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3. Вып. 3. С. 35–45.
4. Алексеев С. А., Кононов С. А., Секарин К. Г., Трофимов В. А. / Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 10. С. 52–56.
5. McMaster William H. / Am. J. Phys. 1954. Vol. 22. P. 351. doi: 10.1119/1.1933744
6. Bieszczad G., Gogler S., Świdorski J. / Opto-Electronics Review. 2021. Vol. 29. P. 5–12.
7. Garlick G. F. J., Steigmann G. A., Lamb W. E. U.S. patent 3,992,571 (16 November 1976).
8. Pust N. J., Shaw J. A. / Appl. Opt. 2006. Vol. 45. P. 5470–5478.
9. Fan C., Hu X., He X. et al. / Opt. Eng. 2018. Vol. 57. P. 1.
10. Negara C., Li Z., Längle T., Beyerer J. / Science. 2019. Vol. 111441B. <https://doi.org/10.1117/12.2532399>
11. Pezzaniti L. J., Chenault D. B. / Proc. SPIE. 2005. Vol. 5888. P. 58880. <https://doi.org/10.1117/12.623543>
12. Поляризационные DoFP датчики Sony. Окт. 2, 2018. <https://photar.ru/polyarizacionnyye-datchiki-sony/>
13. Polarization Image Sensor Technology Polarsens <https://www.sony-semicon.com/en/technology/industry/polarsens.html>
14. Polarization Explained: The Sony Polarized Sensor – LUCID... <https://thinklucid.com/tech-briefs/polarization-explained...>
15. Polarization Cameras Get Ready for Prime Time//Photonics spectra August 2021. <https://www.photonics.com/Time/a67259>
16. Li Q., Dong L., Hu Y. et al. / Qianhui Remote Sens. 2023. Vol. 15. P. 3518.

PACS: 85.60.+g

## Circuit solutions for polarized visualization devices

S. M. Borzov, P. E. Kotlyar and O. I. Potaturkin

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Science  
1 Koptug Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received 2.07.2024; accepted 29.07.2024

*The article presents the results of an analytical study of circuit solutions for polarization visualization devices designed to detect artificial objects against a natural background. The analysis of the technical characteristics of a new class of optical devices – focal plane polarimeters, providing a significant increase in information content due to the organization of the pixel structure of polarization sensors, is performed. The article shows the potential of combined use of spatial, spectral, and polarization information to improve the quality of description of real scenes and, as a consequence, to increase the efficiency of detection and classification of objects in the observation field.*

*Keywords:* polarization, Stokes parameters, polarization images, polarimeters, polarization filters.

## REFERENCES

1. Goetz A. F. H., Vane G., Soloman J. E. and Rock B. N., Science **228** (4704), 1147–1153 (1985).
2. Borzov S. M., Kotlyar P. E. and Potaturkin O. I., Autometry **59** (6), 113–123 (2023).
3. Selivanov V. A., Gektin Yu. M. and Budakov V. P., Rocket and space instrumentation and information systems **3** (3), 35–45 (2016).

4. Alekseev S. A., Kononov S. A., Sekarin K. G. and Trofimov V. A., *Izv. Universities. Instrument Making* **51** (10), 52–56 (2008).
5. McMaster William H., *Am. J. Phys.* **22**, 351 (1954). doi:10.1119/1.1933744
6. Bieszczad G., Gogler S. and Świdorski J., *Opto-Electronics Review* **29**, 5–12 (2021).
7. Garlick G. F. J., Steigmann G. A. and Lamb W. E. U.S. patent 3,992,571 (16 November 1976).
8. Pust N. J. and Shaw J. A., *Appl. Opt.* **45**, 5470–5478 (2006).
9. Fan C., Hu X., He X. et al., *Opt. Eng.* **57**, 1 (2018).
10. Negara C., Li Z. and Längle T., *Science* **111441B** (2019). <https://doi.org/10.1117/12.2532399>
11. Pezzaniti L. J. and Chenault D. B., *Proc. SPIE* **5888**, 58880 (2005). <https://doi.org/10.1117/12.623543>
12. Sony polarizing DoFP sensors. Oct. 2, 2018. // <https://photar.ru/polyarizacionnye-datchiki-sony/>
13. Polarization Image Sensor Technology Polarsens <https://www.sony-semicon.com/en/technology/industry/polarsens.html>
14. Polarization Explained: The Sony Polarized Sensor – LUCID... [thinklucid.com/tech-briefs/polarization-explained-sony-polarized-sensor/](https://thinklucid.com/tech-briefs/polarization-explained-sony-polarized-sensor/)
15. Polarization Cameras Get Ready for Prime Time//*Photonics spectra* August 2021. <https://www.photonics.com/Time/a67259>
16. Li Q., Dong L., Hu Y. et al., *Qianhui Remote Sens.* **15**, 3518 (2023).