

УДК 528.835

## Исследование возможности использования матричных фотоприемников в сканирующих системах

Ю. М. Гектин<sup>1</sup>, А. А. Зайцев<sup>2</sup>, А. В. Рожнев<sup>3</sup>, А. М. Соловьев, М. Б. Смелянский

<sup>1</sup>к. т. н., АО «Российские космические системы»

<sup>2,3</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

e-mail: <sup>1</sup>petrov\_sv@spacecorp.ru, <sup>3</sup>sasharozhnyov@gmail.com

**Аннотация.** В работе описан принцип построения и функционирования аппаратуры, предназначенной для решения задач дистанционного зондирования открытых акваторий. Исходя из современных требований, предъявляемых к аппаратуре такого типа, проведен анализ различных вариантов построения прибора. Обоснована возможность использования матричного фотоприемника в сканирующей системе в целях повышения радиометрических характеристик аппаратуры. Предложена схема построения сканера с использованием оптико-механической развертки и матричного фотоприемника. Показано, что при использовании матричного фотоприемника с соответствующими характеристиками за счет избыточного числа фотоэлементов достигается необходимое отношение сигнал/шум для модели излучения от водной поверхности в заданных спектральных каналах. Описан интерполяционный алгоритм обработки сигналов от фотоприемника, позволяющий сократить передаваемый информационный поток с минимальными геометрическими искажениями. Результаты моделирования показали эффективность применения описанной системы для решения задач мониторинга мирового океана. Устройство, разработанное согласно предложенной схеме, будет иметь современные метрологические характеристики.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, цветность океана, сканирующая система, матричный фотоприемник, интерполяционный алгоритм

## The Analysis of Matrix Photodetectors Application for Scanning Systems

Yu. M. Gektin<sup>1</sup>, A. A. Zaytsev<sup>2</sup>, A. V. Rozhnev<sup>3</sup>, A. M. Solov'ev, M. B. Smelyanskiy

<sup>1</sup>candidate of engineering science, Joint Stock Company "Russian Space Systems"

<sup>2,3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

e-mail: <sup>1</sup>petrov\_sv@spacecorp.ru, <sup>3</sup>sasharozhnyov@gmail.com

**Abstract.** The paper deals with the design concept of the equipment and its functioning used for remote sensing of water areas. Various constructions of the device have been analyzed according to modern requirements for this class of equipment. The article shows that the usage of matrix photodetectors allows to achieve the required signal-to-noise ratio. A scheme of the apparatus involving optical-mechanical scanning combined with the matrix photodetector is offered. It is demonstrated that the application of matrix photodetectors with relevant characteristics for a scanning system enables the required signal-to-noise ratio for the model of radiation from water surface in defined spectral bands by means of redundant quantity of light-sensitive elements. The interpolation algorithm of signal processing from the photodetector which allows to reduce data flow with minimized geometrical distortion is described. The results of modeling showed that the offered conception of the apparatus will be effective for remote sensing of the World Ocean. A device involving the offered scheme will be sufficient for modern metrological requirements.

**Key words:** Earth remote sensing, ocean colour, scanning system, matrix photodetector, interpolation algorithm

Перед АО «РКС» стоит задача по созданию целевой аппаратуры — сканера цвета открытой морской поверхности, который должен входить в состав космического комплекса, предназначенного для решения задач гидрометеорологического и океанографического обеспечения [1,2]. Для выполнения такого рода задач, в том числе и по мониторингу океана, уже реализованы и проверены сканеры, такие как SeaWiFS, MODIS, VIIRS [3]. Спектральный диапазон работы аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), отвечающий за цветность океана, лежит в пределах от 0,4 до 0,9 мкм (см. табл. 1). Схожими являются параметры орбиты (солнечно-синхронная, высота 700–850 км) и геометрические параметры самой аппаратуры (угол обзора  $> 100^\circ$ , разрешение в надире  $\sim 1$  км).

Таблица 1. Сравнительные характеристики сканеров цветности в диапазоне 0,4–0,9 мкм

SeaWiFS		MODIS		VIIRS	
Спектральный диапазон, нм	Ширина диапазона, нм	Спектральный диапазон, нм	Ширина диапазона, нм	Спектральный диапазон, нм	Ширина диапазона, нм
402–422	20	405–420	15	402–422	20
433–453	20	438–448	10	436–454	18
480–500	20	483–493	10	478–498	20
500–520	20	526–536	10	–	–
545–565	20	546–556	10	545–565	20
–	–	662–672	10	–	–
660–680	20	673–683	10	662–682	20
745–785	40	743–753	10	744–759	15
845–885	40	862–877	10	845–884	39

Поскольку разрабатываемое устройство должно решать задачи мониторинга акваторий мирового океана, то следует рассмотреть так называемую «водную» модель излучения. Разрабатываемая аппаратура должна обеспечивать отношение сигнал/шум  $> 500$  при съемке акваторий. Максимум

спектральной энергетической яркости излучения, восходящего от водной поверхности, расположен на длине волны 410 нм, спектральная плотность энергетической яркости на данной длине волны составляет  $95 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$  (согласно модели, использованной при создании специализированного сканирующего устройства для исследования Мирового океана SeaWiFS [4]). Минимальная яркость восходящего от водной поверхности излучения равна  $\sim 7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$  (спектральный диапазон с центральной длиной волны 860 нм). Выполненные нами расчеты показали, что ни один из известных традиционных подходов к построению аппаратуры ДЗЗ (а именно: использование одно- и многоэлементных приемников излучения в сочетании с оптико-механической разверткой, многоэлементных (линейных) приемников, в том числе и в режиме ВЗН, а также матричных приемников, осуществляющих кадровую съемку подстилающей поверхности) не позволяет удовлетворить указанному требованию при приемлемых массово-габаритных характеристиках. Приведенные выше параметры «водной» модели определяют задачу как съемку объектов малой яркости. В то же время спектральная плотность энергетической яркости от верхних слоев облачной поверхности на границе плотной атмосферы может достигать значения  $660 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$  (см. рис. 2). Поэтому задача разработки сканера, работающего во всем динамическом диапазоне яркостных сцен и обеспечивающего необходимые угол обзора и разрешение, а также отвечающего предъявляемым метрологическим требованиям в части отношения сигнал/шум ( $> 500$  при съемке акваторий), является весьма сложной.

Предлагаемый нами подход к решению поставленной задачи заключается в использовании высокоскоростного малоформатного матричного КМОП-фотоприемника в сочетании с оптико-механической разверткой и накоплением цифрового сигнала. Использование матричного фотоприемника большей размерностью нецелесообразно по двум причинам: во-первых, в выбранной схеме сканирования необходим фотоприемник с высокой кадровой частотой (время на чтение всей матрицы  $\sim 1,92$  мс), во-вторых, с увеличением размерности фотоприемника существенно возрастают геометри-

ческие искажения при проектировании матрицы на поверхность Земли.

Принципиальная схема многоканального устройства, реализующего принцип оптико-механического сканирования с использованием матричного приемника излучения, работающего в режиме цифрового ВЗН (режим временной задержки и накопления сигнала), и геометрия сканирования приведены на рис. 1. Устройство должно производить съемку водной поверхности с разрешением 500 м в надире с высоты 820 км в полосе обзора 2800 км (угол обзора  $110^\circ$ ).

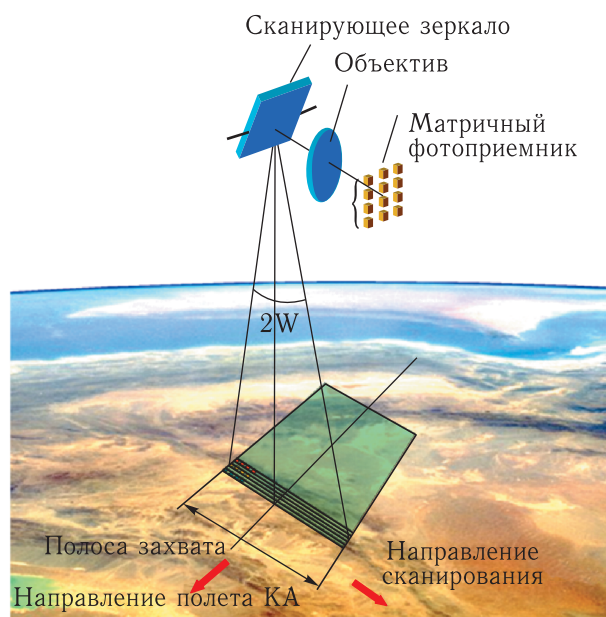


Рис. 1. Принципиальная схема сканирования подстилающей поверхности

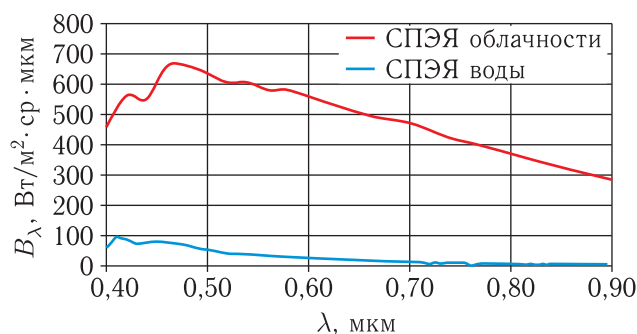


Рис. 2. Абсолютная спектральная плотность энергетической яркости излучения водной поверхности и облачности, использованная разработчиками SeaWiFS

Как показано на рисунке, принципиальная схема разрабатываемого устройства включает плоское сканирующее зеркало, линзовый объектив и матричный фотоприемник. Сканирующее зеркало одностороннее и совершает вращение в одном направлении во время сканирования с последующим реверсом. В фокальной плоскости объектива располагается матричный фотоприемник размерностью  $128 \times 128$ , работающий на частоте 520 кадров/с.

В табл. 2 приведены результаты расчета отношения сигнал/шум для водной поверхности. Видно, что матрица фотоэлементов размером  $128 \times 128$  способна обеспечить необходимое отношение сигнал/шум в заданных спектральных каналах при условии цифрового объединения отсчетов. Если эту операцию выполнять при наземной обработке, то информационный поток с борта составит порядка 820 Мбит/с. Таким образом, возникает необходимость в уменьшении информационного потока, для чего предлагается складывать сигналы, полученные различными фотоэлементами матрицы, интерполяционным методом в блоке обработки сигнала (БОС), входящем в состав аппаратуры [5].

Идея метода сложения сигналов состоит в динамическом отображении геометрических соотношений, имеющих место при сканировании в пространстве объектов съемки, в пространство оперативной памяти бортового устройства обработки сигналов. Отсчеты на выходе алгоритма объединения эквивалентны отсчетам от виртуальной строки, геометрически соответствующей первой строке матрицы. Каждый набор отсчетов от виртуальной строки является суперпозицией полученных в разные моменты времени отсчетов от всех строк матрицы.

Проблема объединения отсчетов заключается в том, что вследствие орбитального движения КА в фокальной плоскости объектива сканирующего устройства имеет место движение изображения поверхности Земли как в направлении сканирования, так и в перпендикулярном к нему. Первое, в принципе, может быть за счет правильного выбора угловой скорости оптико-механической развертки согласовано с частотой опроса матрицы таким образом, что за период опроса матрицы изображение выделенного объекта перемещается ровно на один пиксель. Что касается второго, то сдвиг изображения

Таблица 2. Абсолютная спектральная плотность энергетической яркости  $B_\lambda$  и отношение сигнал/шум модели водной поверхности в диапазоне 0,4–0,9 мкм

$\lambda$ , мкм	$B_\lambda$ , Вт/м <sup>2</sup> ·ср·мкм	Отношение сигнал/шум при однократном считывании	Отношение сигнал/шум при объединении сигналов, полученных за 128 циклов считывания
0,410	95	86	945
0,440	78	81	887
0,490	60	75	821
0,550	36	61	673
0,640	21	50	554
0,670	17	46	510
0,745	11	56	618
0,860	7	51	561

монотонно возрастает от 1-го столбца матрицы до последнего, при этом скорость движения сложным образом зависит от угла визирования [6].

Принцип объединения отсчетов состоит в том, что в каждый столбец матрицы памяти размерностью  $128 \times 128$  ячеек в темпе частоты кадров последовательно записываются отсчеты 1-й, 2-й, ... 128-й строк матрицы фотоприемников, так что в некоторый момент времени 1-я строка записывается в 1-й столбец, 2 в 128, 3 в 127, ... 128 в 2; в следующем цикле опроса 1 в 2, 2 в 1, 3 в 128, ... 128 в 3 и т.д. При этом отсчеты из всех строк, кроме 1-й, умножаются на 2 весовых коэффициента (коэффициента интерполяции) и записываются в последовательные ячейки соответствующего столбца матрицы памяти (суммируются с содержимым этих ячеек). «Готовый» отсчет последовательно считывается из каждого столбца матрицы памяти после записи в него отсчетов от последней, 128-й строки матрицы фотоприемников. Таким образом, результирующий отсчет представляет собой сумму с весами 255 реализаций однократного накопления аналогового сигнала. В процессе описанного алгоритма (в реальном времени) должны вычисляться: текущий сдвиг как функция номера строки и текущего углового положения визирной оси, приращение адреса ячейки как целая часть сдвига и весовые коэффициенты, равные  $(1 - d)$  и  $d$ , где  $d$  — дробная часть сдвига.

Результаты расчета сдвигов координат элементов для нескольких положений визирной оси относительно надира представлены на рис. 3.

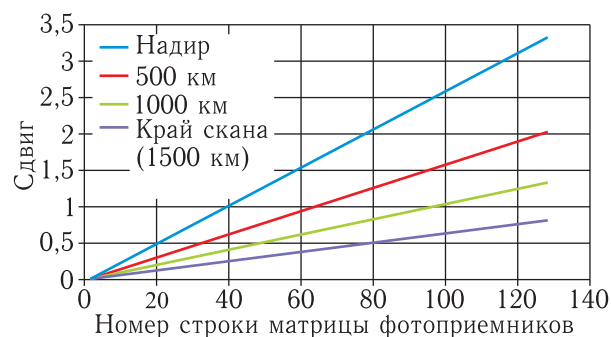


Рис. 3. Величины сдвигов для 4 положений визирной оси относительно надира

Продemonстрированная на рис. 4 зависимость с хорошей точностью (ошибка не более 0,6 %) аппроксимируется двумерной функцией: линейной в зависимости от номера строки матричного фотоприемника (см. рис. 3) и кубической в зависимости от текущего положения визирной оси (см. рис. 4).

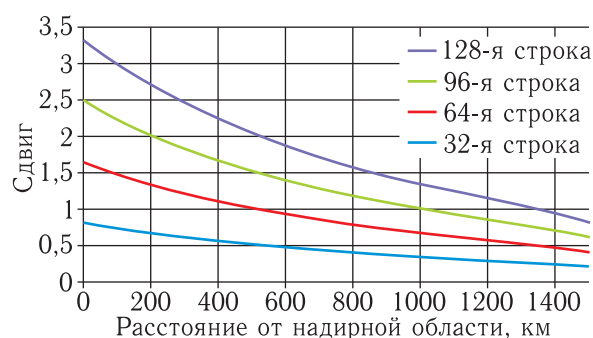


Рис. 4. Зависимость сдвига от расстояния относительно надира для строк с номерами 32, 64, 96 и 128

По этой функции в БОС должны вычисляться адресные сдвиги и коэффициенты интерполяции. На рис. 5 наглядно продемонстрирована суперпозиция 1-й и 24-й строк матричного фотоприемника.

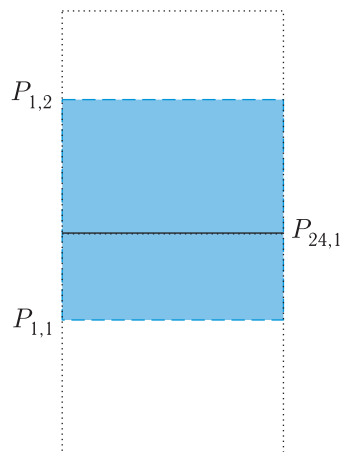


Рис. 5. Элементарный отсчет от 1-го пикселя 24-й строки складывается с отсчетами от 1-го и 2-го пикселей 1-й строки с соответствующими весовыми коэффициентами

Результатом работы алгоритма является уменьшение потока информации в 128 раз, поскольку сигнал на выходе БОС представляет собой свертку по 128 интерполированным строкам матрицы. В результате интерполяции несколько ухудшается полная оптическая передаточная функция (ОПФ) системы, поскольку ОПФ виртуальной строки, полученной в результате операции свертки, совпадает с ОПФ строки матрицы фотоприемников лишь при особых соотношениях скорости и направления движения изображения в фокальной плоскости и значения кадровой частоты опроса матрицы. Кроме того, применение линейного приближения в алгоритме интерполяции также вносит некоторые искажения. Однако поскольку параметры ОПФ системы «объектив-фотоэлемент матрицы» не слишком высоки, означенные искажения допустимы.

Описанная схема построения сканирующей аппаратуры позволяет реализовать современные метрологические требования, предъявляемые к аппаратуре ДЗЗ, предназначенной для определения цветности акваторий мирового океана. Разработанный интерполяционный алгоритм позволяет значительно сократить информационный поток с борта КА без потерь радиометрического разрешения и с минимальными геометрическими искажениями.

## Список литературы

1. Акимов Н. П., Зайцев А. А., Соловьев А. М. Практическая реализация современных метрологических требований, предъявляемых к перспективному сканеру цветности КА «Метеор-М» №3 для исследования акваторий. Сборник трудов VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», 2013.
2. Романов А. А. Основы обработки и анализа данных космического дистанционного зондирования океана: Учеб. пособие. М.: МФТИ, 2003. 272 с.
3. Remote Sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters / Reports of the international ocean-colour coordinating group, IOCCG // Dartmouth, Canada, 2000. № 3. 140 p.
4. NASA. Official site of the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor project. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>
5. Зайцев А. А. Оптимизация характеристик фотоприемной оптико-электронной системы спутниковой аппаратуры, предназначенной для решения задач определения цветности акваторий: выпускная квалификационная работа бакалавра прикладных математики и физики. М., 2012. 45 с.
6. Шовенгерт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.