

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МНОГОЗОНАЛЬНОГО СКАНИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА «РОСС-1» ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ВОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.М. Соловьев

(ОАО «Российские космические системы»)

Для проведения исследований природы Мирового океана и основных климатоформирующих факторов разрабатывается новый научный прибор (усовершенствованный сканер цвета), предназначенный для биологического и экологического мониторинга морей и океанов, исследования физических процессов в их поверхностном слое. Особенностью разрабатываемого прибора является то, что получаемый с его помощью объём полезной информации складывается за счёт квазиодновременного поперечного и продольного сканирования. Это позволяет в дальнейшем, при обработке полученных данных, повысить информативность получаемых данных и точность проведения атмосферной коррекции. В данной статье представлены основные результаты, полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований разрабатываемого сканера.

Ключевые слова: сканер цвета, наблюдение акваторий, атмосферная коррекция.

К настоящему времени за рубежом (США, Япония, Индия, Южная Корея, Европейское сообщество, Китай) создано уже более десятка специализированных сканирующих устройств, получивших название сканеры цвета [1, 3], и постоянно ведутся работы по их усовершенствованию. В России аппаратура такого класса отсутствует.

По классификации сканеры цвета относятся к многозональной широкозахватной аппаратуре малого разрешения, но по сравнению с аналогичной природно-ресурсной или гидрометеорологической аппаратурой имеют ряд принципиальных отличий:

- широкий набор спектральных каналов в спектральном диапазоне от 0,4 до 1,0 мкм (не менее 8);
- узкие спектральные диапазоны (от 10 до 20 нм);
- высокое отношение сигнал/шум (не менее 500) при наблюдении объектов водной поверхности.

Информация со сканеров цвета имеет важное научное и практическое значение, так как используется для

изучения явлений и процессов, происходящих в биосфере океана и влияющих на изменения окружающей среды и климата, возникновения природных катастроф. Спутниковые системы наблюдения со сканерами цвета дают возможность накопления временных рядов данных для решения фундаментальных научных задач физики взаимодействия океана и атмосферы, состояния и динамики энергоактивных зон, а также для разработки прогностических моделей средне- и долгосрочных изменений климата, повышения достоверности прогнозов погоды [2 – 4].

В 2006 г. в ОАО «Российские космические системы» была начата работа по созданию российского спутникового сканера цвета. Проект получил название «РОСС-1». Технические характеристики сканера цвета приведены в табл. 1.

Особенностью отечественного сканера цвета является возможность получения дополнительной

Таблица 1

Технические характеристики сканера цвета «РОСС-1»

Количество информационных каналов	11
Количество спектральных каналов	8
Границы спектральных диапазонов, мкм	0,402 ± 0,015 – 0,422 ± 0,015
	0,433 ± 0,015 – 0,453 ± 0,015
	0,480 ± 0,015 – 0,500 ± 0,015
	0,500 ± 0,015 – 0,520 ± 0,015
	0,545 ± 0,015 – 0,565 ± 0,015
	0,660 ± 0,015 – 0,680 ± 0,015
	0,745 ± 0,015 – 0,785 ± 0,015
	0,845 ± 0,015 – 0,885 ± 0,015
Угол сканирования, град	66 (±33)
Полоса захвата (при съёмке с орбиты 800 км), км	более 900
Угловое разрешение, мрад	0,65 ± 0,05
Пространственное разрешение в надире (орбита 800 км), км	0,5 ± 0,1

информации (кроме стандартной съёмки) – яркости восходящего излучения под разными углами визирования вдоль трассы полёта спутника, что даёт возможность увеличить информативность получаемых данных и повысить точность измерений при наземной обработке информации.

При разработке сканера было принято решение использовать принцип оптоэлектронной съёмки без механического сканирования (pushbroom imaging), а для формирования информационных каналов – модульный принцип (каждый спектральный канал формируется индивидуальной оптоэлектронной системой). Использование оптоэлектронного сканирования в устройствах дистанционного зондирования позволяет существенно увеличить время накопления заряда на приёмнике излучения, а значит либо увеличить отношение сигнал/шум, либо качественно изменить тактико-технические характеристики аппаратуры (повысить пространственное разрешение, уменьшить ширину спектрального диапазона и т. д.). Отсутствие сканирующего элемента с приводом развертки также является позитивным моментом, так как повышает надёжность устройства при его эксплуатации.

В соответствии с выбранным принципом построения устройство «РОСС-1» содержит 11 идентичных оптико-электронных систем, визирные оси которых параллельны. Они отличаются только фильтрами, формирующими спектральный диапазон информационного канала. Приёмники излучения восьми оптико-электронных систем ориентированы перпендикулярно направлению полёта космического аппарата (КА) и при работе аппаратуры формируют восемь трассовых изображений в диапазонах 402 – 422, 433 – 0,453, 480 – 0,500, 500 – 520, 545 – 565, 660 – 680, 745 – 785, 845 – 885 нм. В трёх системах приёмники излучения ориентированы вдоль направления полёта КА. Эти дополнительные системы предназначены для формирования массивов данных в диапазонах 433 – 453, 545 – 565, 845 – 885 нм. На основе данных этих систем при наземной обработке можно построить индикатрисы отражения для объектов, расположенных по линии полёта КА в угле $\pm 35^\circ$.

Разработка аппаратуры «РОСС-1» включала следующие этапы работ:

- уточнение технических требований к аппаратуре в целом и её элементной базе;
- разработку и изготовление широкоугольного объектива на спектральный диапазон 0,4 – 0,9 мкм;
- разработку и технологическую обработку узкополосных интерференционных фильтров;
- изготовление лабораторного образца аппаратуры;

- проработку метрологического обеспечения (стендовой базы и требований к ней);

- измерение основных выходных параметров (спектральных характеристик диапазонов, частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) на рабочей чёткости, отношение сигнал/шум и т. д.) [1].

На основе сформулированных технических требований к разрабатываемому устройству был проанализирован широкий перечень объективов, разработанных российской оптико-механической промышленностью, но не один из них не соответствовал требуемым параметрам. Это потребовало разработки и изготовления специализированного широкоугольного объектива с фокусным расстоянием $f = 20,9$ мм, относительным отверстием 1:5 и угловым полем $2W \approx 70^\circ$.

Измерение КПК коэффициентов передачи контраста объектива проводились на рабочей чёткости 36 лин/мм в составе лабораторного образца. Полученные результаты показали, что разработанный объектив соответствует предъявляемым техническим требованиям.

В сканерах цвета предъявляются высокие требования не только к отклонению границ спектральных диапазонов от номинальных (не более 2 нм), но и к временной и пространственной стабильности положения этих границ. В лабораторном образце сканера «РОСС-1» эта задача была решена не только технологическим процессом при изготовлении фильтров, но и применением оригинальной конструкции самого фильтра.

Фильтр выполнен из двух линз – плосковогнутой и плосковыпуклой, на сферические поверхности которых нанесено интерференционное покрытие, формирующее заданный спектральный диапазон. Радиусы кривизны сферических поверхностей линз равны, а сами линзы выполнены из одного материала. Предложенная комбинация линз эквивалентна плоскопараллельной пластине и соответственно вносит аналогичные aberrации. При установке фильтра перед объективом центр радиуса кривизны сферической поверхности плосковогнутой линзы совмещается с входным зрачком объектива, что позволяет стабилизировать границы пропускания в широком угле поля зрения.

Однако отработка фильтра в лабораторном образце сканера показала, что данный фильтр не позволяет стабилизировать границы пропускания в требуемых углах поля зрения с необходимой точностью (табл. 2). В связи с этим предлагается в дальнейшем в устройстве использовать телецентрический объектив. Особенностью данного типа

объектива является то, что его апертурная диафрагма располагается в пространстве изображения. При использовании телецентрического объектива интерференционный фильтр наносится на плоскопараллельную пластину, т. е. изготавливается по традиционной технологии, и помещается перед приёмником излучения. Данная схема

реализована в аппаратуре POLDER. Поскольку полевые лучи на выходе объектива параллельны, при такой схеме может быть достигнута более высокая стабильность положения спектральных границ по сравнению с вариантом схемы, в которой покрытие наносится на сферическую поверхность.

В табл. 3 приведены результаты предварительного

Таблица 2

Положение границ пропускания фильтра в зависимости от угла падения лучей

α, град	Коротковолновая граница по уровню 0,5, нм	Длинноволновая граница по уровню 0,5, нм	Смещение коротковолновой границы, нм	Смещение длинноволновой границы, нм	Среднее смещение границ, нм	Ширина диапазона, нм
0	740	776	–	–	–	36
10	739	775	1	1	1	36
20	736	770	4	6	5	34
30	728	765	12	11	11,5	37

Таблица 3

Результаты лабораторных измерений отношения сигнал/шум

Спектральный диапазон, мкм	Отношение сигнал/шум теоретическое	Отношение сигнал/шум измеренное
0,402 – 0,422	400	410
0,433 – 0,453	440	435
0,480 – 0,500	1090	1045
0,500 – 0,520	1050	980
0,545 – 0,565	1185	1060
0,660 – 0,680	730	700
0,745 – 0,785	710	695
0,845 – 0,885	280	290

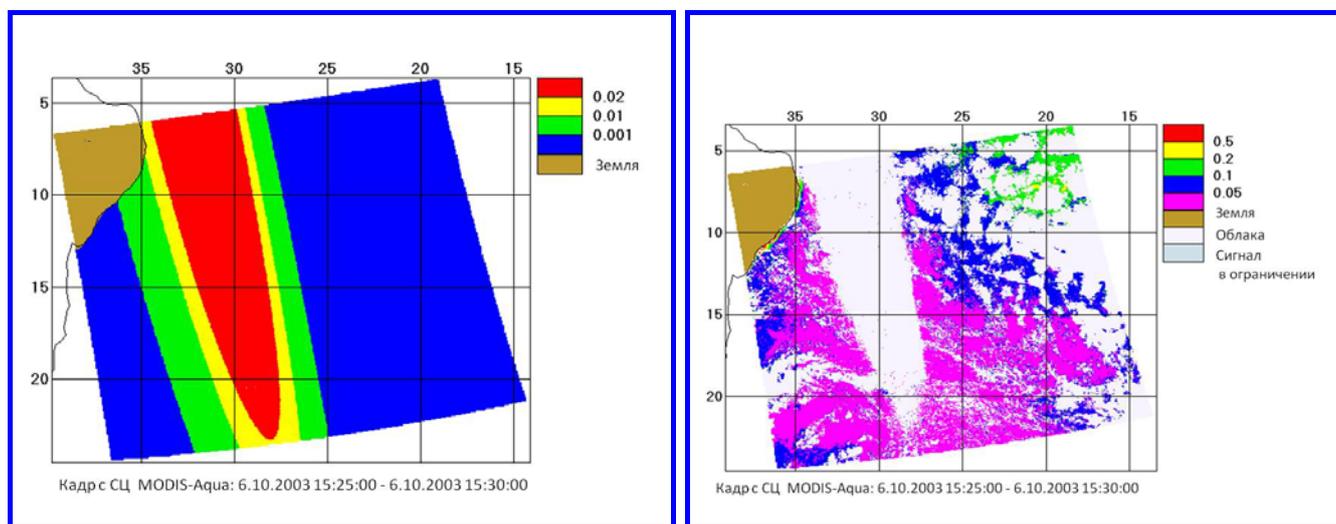


Рис. 1. Пространственное распределение солнечного блика, рассчитанного для радиометра MODIS-Aqua

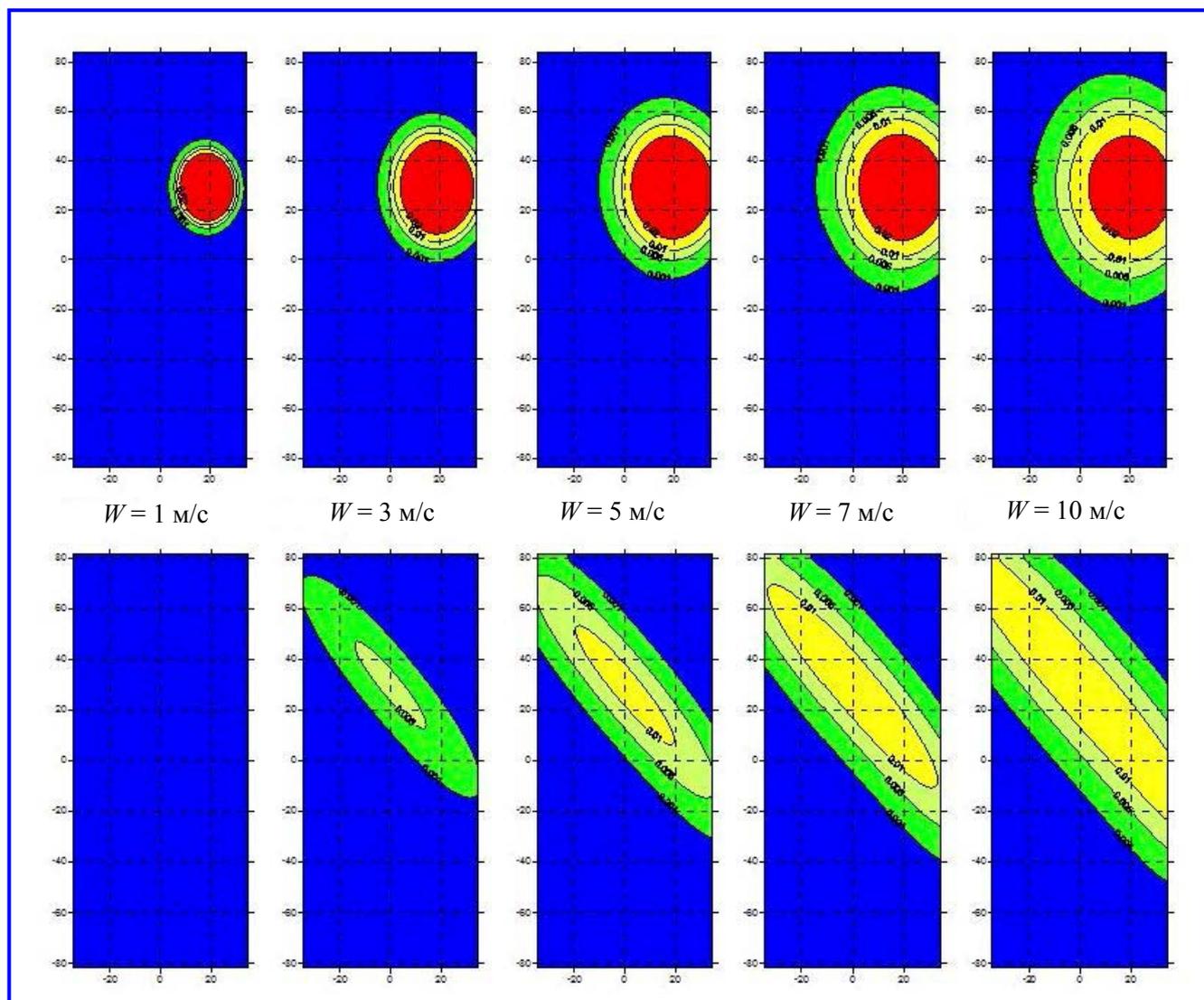


Рис. 2. Распределение солнечного блика при сканировании вдоль (верхние изображения) и поперёк (нижние изображения) трассы полёта «РОСС-1» в зависимости от скорости ветра

Таблица 4

Изменение коэффициента аэрозольной яркости $\rho_a(\lambda)$

Угол, град	Угол наблюдения λ , нм							
	412	443	490	510	555	670	765	865
-35	2,39	2,36	2,23	2,16	1,99	1,6	1,34	1,14
-20	1,96	1,91	1,8	1,74	1,61	1,31	1,12	0,98
0	1,77	1,73	1,64	1,59	1,5	1,29	1,15	1,03
20	1,82	1,77	1,68	1,64	1,55	1,37	1,24	1,13
35	2,03	1,95	1,81	1,74	1,61	1,36	1,21	1,09

теоретического расчёта значений отношения сигнал / шум и результаты лабораторных измерений.

Как следует из табл. 3, значения сигнал/шум близки к расчётным и соответствуют значениям, реализованным в зарубежных аналогах.

Выполненные работы позволили не только создать работающий образец сканера цвета с характеристиками, приведёнными в табл. 1, но и скорректировать ряд технических решений для его усовершенствования.

При разработке сканера цвета «РОСС-1», для определения эффективности предложенного метода многоуглового сканирования на основе разработанного в ИО РАН специального алгоритма, использующего в совокупности данные как от поперечного, так и продольного сканирования, было проведено цифровое моделирование.

Тестирование проводилось на основе данных сканера цвета SeaWiFS и радиометра MODIS-Aqua. Эта частичная контрольная проверка алгоритма по данным только поперечного сканирования позволила считать приемлемым и алгоритм, учитывающий данные как от поперечного, так и продольного сканирования. Обратная задача при этом не решалась, но определялось увеличение объёма достоверных данных, получаемых с КА за счёт более корректной их обработки в области солнечного блика.

На рис. 1 показано сравнение пространственного распределения солнечного блика (левое изображение), рассчитанного для радиометра MODIS-Aqua при скорости ветра 6 октября в 15:30 (2003 г.) с реальной потерей данных из-за блика (на правом изображении).

Из анализа данных, представленных на рисунках, следует, что атмосферная коррекция невозможна при величине коэффициента яркости в зоне блика больше 0,02 (красная область), так как при этом сигнал находится в ограничении (белый эллипс на правом изображении). При этом измеряемая яркость на верхней границе атмосферы полностью определяется бликом. Блик меньше 0,01 можно считать пренебрежимо малым. При использовании данных измерений вдоль трассы полёта, объём данных существенно возрастёт, в частности в местах близких к зоне солнечного блика, что, соответственно, позволит провести атмосферную коррекцию.

В дальнейшем для моделирования было предложено использовать массивы данных, полученные с других сканеров цвета, в которых реализованы отдельные элементы многоуглового сканирования, в частности, MISR и CHRIS, что позволило создать

модель виртуального сканера «РОСС-1», что в условиях неопределённости сроков его создания, было крайне важным для верификации предложенного усовершенствованного метода многоуглового сканирования [4, 5].

Разработанная модель позволила выполнить контрольные расчёты для «РОСС-1» с учётом орбитальных данных океанографического КА «Метеор-М» № 3.

Результаты моделирования представлены на рис. 2 и наглядно показывают, что при скорости ветра от 3 до 10 м/с влияние блика приводит к значительным потерям информации (красная зона – сигнал в ограничении), но при использовании данных, полученных вдоль трассы полёта, они сводятся к минимуму.

Моделирование показало, что коэффициент аэрозольной яркости заметно изменяется при сканировании вдоль трассы. Так для длин волн в диапазоне 443 – 555 нм при изменении угла наблюдения от 0 до $\pm 35^\circ$ (табл. 4) изменения составляют более 30%.

Результаты проведённых работ подтверждают возможность создания отечественной многозональной сканирующей системы для исследования акваторий. Разработанные технологии, используемые при его изготовлении, позволяют в полной мере реализовать все преимущества многоуглового сканирования и обеспечения требуемой радиометрической точности. Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность использования предлагаемых методических решений и расширяют возможности применения космических средств для мониторинга акваторий Мирового океана.

Литература

1. Перспективный российский сканер цвета океана / М. Т. Смирнов, Ю. Г. Тищенко, Ю. М. Гектин [и др.] // Исследование Земли из космоса. – М. : Наука, 2010. – № 1. – С. 48 – 51.
2. Исследование условий съёмки поверхности океана в спектральном диапазоне 0,4-1,1 мкм / А. С. Селиванов, Ю. М. Гектин, А. С. Панфилов [и др.] // Исследование Земли из космоса. – М. : Наука, 1981. – № 5. – С. 82 – 89.
3. Романов А. А. Основы обработки и анализа данных космического дистанционного зондирования океана: учебное пособие / А. А. Романов. – М. : МФТИ, 2003 – 272 с.
4. James A. Yorder (URI). «Status and plans for Satellite Ocean-Colour Missions: Considerations for Complementary Missions» IOCCG Report Number 2, 1999, Dart

mouth, Canada.

5. Improvements in aerosol optical depth estimation using multiangle CHRIS/PROBA images IEEE Trans /

W. H. Davis, R. J. North Peter, M. F. Grey William, M. J. Barnsley // Geosci. and Remote Sens. – 2010. – № 1 – P. 18 – 24.

Поступила в редакцию 30.10.2012

*Алексей Михайлович Соловьев, инженер-исследователь,
т. 8(929)925-99-31, email:my_post1@mail.ru.*