

Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин, А.М. Сутормин, С.А. Турчинович

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ФОТОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МОРСКОЙ АТМОСФЕРЫ

Дано описание и основные технические характеристики многоволнового (14 спектральных каналов) солнечного фотометра для исследований оптической толщины атмосферы в диапазоне спектра 0,4–12 мкм с борта судна. В состав комплекса кроме двух измерительных каналов входят автоматическая система слежения за Солнцем и телевизионная система контроля. Управление и регистрация сигналов в цифровом виде осуществляются с пульта управления или автоматизированно на мини-ЭВМ ДВК-3М.

Метод солнечной спектрофотометрии атмосферы (определения оптической толщины) является одним из немногих, применение которого возможно и корректно при исследовании оптических характеристик аэрозоля с борта корабля. Реализация даже этого сравнительно простого метода в морских условиях затруднена специфическими условиями корабельных измерений: качка и вибрация судна, необходимость точного контроля изменения координат, ограниченное поле обзора из-за мачт и надстроек, необходимость использования длинных линий связи. Дополнительные трудности возникают при организации измерений в широком диапазоне спектра, требующих нескольких измерительных каналов. По литературным данным указанные разработки и исследования ограничивались только коротковолновым диапазоном спектра 0,4–1 мкм (см., например, [1]) либо, в единственном случае, диапазоном спектра 2–14 мкм [2].

С учетом специфики оптических исследований на борту судна в Институте оптики атмосферы СО РАН был разработан автоматизированный морской солнечный фотометр (АМСФ) на диапазон спектра 0,4–12 мкм. В процессе разработки фотометра был учтен опыт эксплуатации аналогичной аппаратуры (коротковолнового фотометра) на НИС <Академик Вернадский> в 1989 г. [3]. После трехмесячного цикла испытаний АМСФ и исследований оптической толщины атмосферы во время 43-го рейса НИС <Академик Вернадский> в 1991 г. была проведена доработка солнечного фотометра, и его последний вариант приведен в настоящей работе.

Основным назначением фотометра АМСФ является измерение оптической толщины атмосферы в интересах развития методов спутникового зондирования и решения климатических и экологических задач. В частности, во время комплексной экспедиции SATOR (Томск, 1992г.) с помощью прибора АМСФ кроме аэрозольной оптической толщины проводились измерения и интегрального содержания воды (полоса поглощения 0,94 мкм) и озона (полоса поглощения 9,5 мкм).

Общая схема АМСФ (рис. 1) включает в себя четыре самостоятельных оптико-электронных тракта, оптические оси которых съюстированы в одном направлении:

- коротковолновый измерительный канал (I);
- длинноволновый измерительный канал (II);
- система наведения и автоматического слежения за Солнцем (III);
- телевизионное устройство контроля наведения (IV).

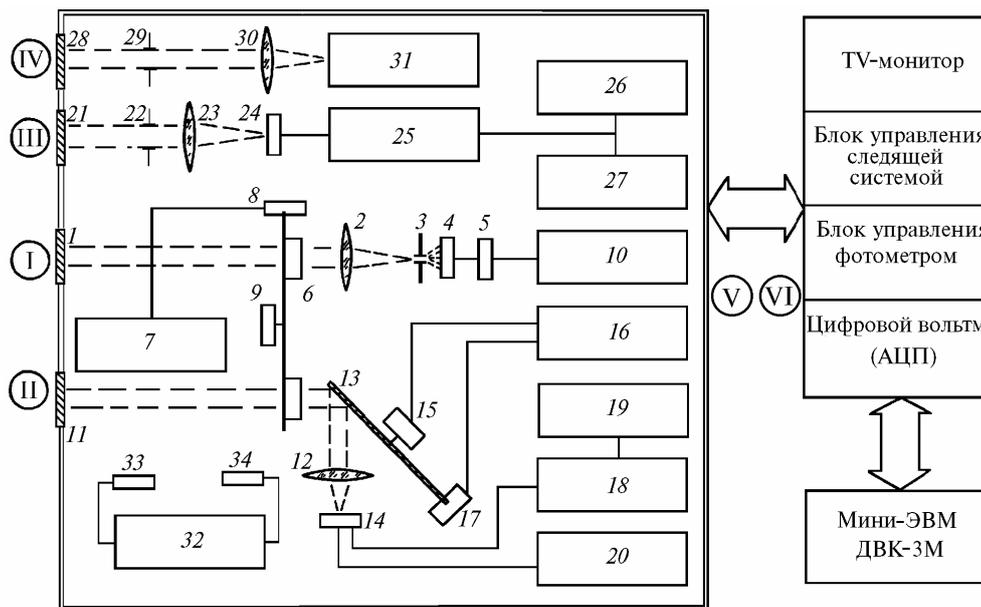


Рис. 1. Блок-схема солнечного фотометра: 1, 11, 21, 28 – входные окна; 2, 12, 23, 30 – однолинзовые объективы; 3, 22, 29 – диафрагмы; 4 – матовый рассеиватель; 5, 14, 24 – фотоприемники; 6 – светофильтры; 7 – схема переключения фильтров; 8, 17 – оптронные пары; 9, 15 – электродвигатели; 10, 18 – предварительные усилители; 13 – зеркальный модулятор; 16 – схема стабилизации модулятора; 19 – селективный усилитель; 20 – схема стабилизированного питания фотоприемника; 25 – схема сигналов рассогласования; 26, 27 – зенитный и азимутальный электроприводы; 31 – прикладная телевизионная установка; 32 – схема термостабилизации; 33 – термодатчик; 34 – электронагреватель

Оптико-электронная часть фотометра АМСФ (V) вместе с двухкоординатным поворотным столом выполнена в виде отдельного конструктива (рис. 2) и размещалась (во время 43-го рейса) на пеленгаторной палубе судна. Для предохранения от запотевания и влажного воздуха корпус фотометра изготовлен герметичным с автоматическим обогревом.

Блоки управления АМСФ с приборами аналого-цифрового преобразования (VI) и мини-ЭВМ ДВК-3М располагались в лаборатории судна на расстоянии 15–20 м от выносной части фотометра.

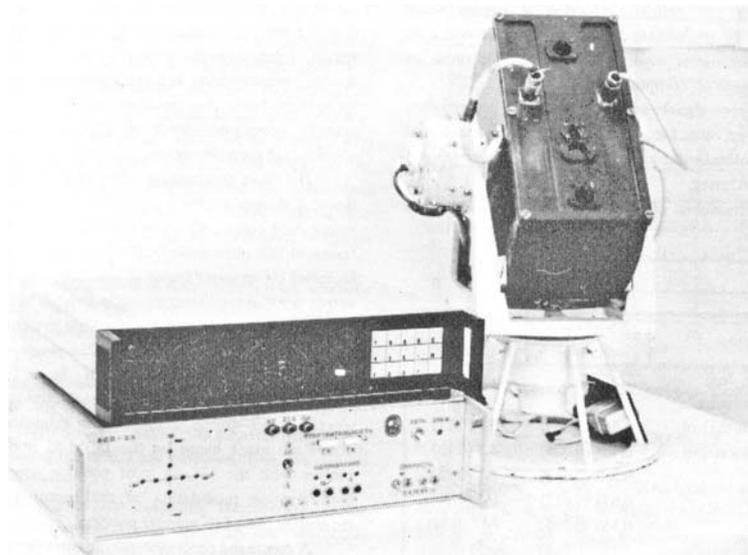


Рис. 2. Внешний вид фотометра АМСФ

Для устранения влияния длинных линий на информационные и управляющие сигналы все электронные платы, подверженные влиянию наводок и шумов, размещены в герметичном экранирующем корпусе фотометра, и обеспечена их электромагнитная совместимость.

Включение в состав АМСФ телевизионной системы было обусловлено необходимостью дистанционного контроля процесса измерений в условиях возможного попадания в поле зрения фотометра облачности и надстроек при маневрировании и качке судна. Указанное обстоятельство особенно важно при автоматизированном режиме регистрации сигналов на ЭВМ.

Большое значение при разработке АМСФ придавалось взаимосвязке углов поля зрения оптических схем с динамическими характеристиками следящей системы (угловые скорости и ускорения). Исходными требованиями при эксплуатации АМСФ были следующие: средние угловые скорости качки судна – до 6 град/с, диапазон угловой качки до $\pm 15^\circ$. При этом погрешность слежения за Солнцем не должна превышать величины $0,2 \div 0,5^\circ$ в рабочем диапазоне углов 180° по азимуту и 85° по углу места. Учитывая эти требования, а также необходимость минимизации влияния рассеянного излучения для коротковолнового канала [4] и фонового излучения неба для ИК-канала, в качестве оптимальных были выбраны углы поля зрения измерительных каналов в пределах $1,5 \div 2^\circ$.

Наибольшие трудности были связаны с разработкой и компоновкой таких оптико-электронных схем четырех каналов АМСФ, которые по своим массогабаритным характеристикам были бы приемлемыми для быстродействующей следящей системы.

Коротковолновый измерительный канал. Оптическая схема коротковолнового канала фотометра (рис. 1) включает входное окно из корректирующего светофильтра 1, однолинзовый объектив 2, полевую диафрагму 3, матовый рассеиватель 4 и кремниевый фотодиод 5 ФД-24 К. Спектральная селекция излучения осуществляется с помощью семи интерференционных фильтров 6, установленных в барабане, который вращается (переключает фильтры) по командам от схемы переключения фильтров 7. Кодовые управляющие сигналы формируются оптронными парами 8, оптически связанными с барабаном фильтров.

Установка заданного фильтра производится остановкой двигателя (9) в соответствующем положении и дублируется от случайных смещений электромагнитным фиксатором. В каждом спектральном канале вместе с интерференционным фильтром установлены цветные стекла для исключения влияния вторичных максимумов пропускания и оптического выравнивания измеряемых сигналов. Переключение фильтров может осуществляться в <ручном> режиме с пульта блока питания и управления фотометром или в автоматическом – по командам от ЭВМ.

Сигналы от фотоприемника усиливаются предварительным усилителем 10 и по кабелю передаются для последующей регистрации на цифровом вольтметре или после десятизарядного аналого-цифрового преобразователя – на магнитных носителях мини-ЭВМ.

Основные технические характеристики измерительных каналов АМСФ приведены в таблице.

| Характеристика | КВ-канал | ДВ-канал |
|---|---------------|--------------|
| Угол поля зрения, град | 1,5 | 1,9 |
| Кол-во спектральных составляющих (каналов) | 7 | 7 |
| Максимумы (и полуширины) пропускания светофильтров, мкм | 0,447 (0,038) | 3,8 (0,11) |
| | 0,484 (0,008) | 4,7 (0,13) |
| | 0,552 (0,010) | 8,1 (0,22) |
| | 0,674 (0,012) | 9,1 (0,24) |
| | 0,869 (0,016) | 9,47 (0,24) |
| | 0,940 (0,011) | 10,55 (0,25) |
| Частота модуляции оптического сигнала, Гц | 1,061 (0,022) | 12,1 (0,35) |
| | 0 | 140 |
| Погрешность измерения, % (не более) | 1 | 5 |
| Время единичной серии измерений, мин | | 1÷2 |

Длинноволновый измерительный канал. Оптическая схема инфракрасного канала состоит из германиевого входного окна 11, просветленной линзы-мениска 12 из оптической керамики ПО-4, зеркального модулятора 13 и пироэлектрического фотоприемника 14 МГ-30.

Две пары плоскостей зеркального модулятора отклонены относительно друг друга на угол 1° , в результате чего при вращении модулятора на фотоприемник поочередно направляется излучение от Солнца и от соседних участков небосвода. Таким образом, в регистрируемом разностном сигнале исключается вклад фонового излучения неба, попадающего в поле зрения ИК-канала.

Стабилизация скорости вращения двигателя модулятора 15 ДМП-25 обеспечивается электронной схемой стабилизации 16 с обратной связью от оптронной пары 17.

Спектральная селекция осуществляется с помощью семи интерференционных и дисперсионных светофильтров, установленных в том же барабане попарно с фильтрами коротковолнового канала. Для оптического выравнивания измеряемых сигналов перед каждым фильтром установлены соответствующие ограничивающие диафрагмы.

Сигнал с фотоприемника после предварительного усилителя 18 поступает в селективный усилитель 19, выполненный на активных фильтрах нижней и верхней частоты, а затем по длинной линии передается на регистрацию.

Система наведения и автоматического слежения за Солнцем. Система слежения предназначена для стабилизации оптических осей АМСФ на центр исследуемого объекта – Солнца. При эксплуатации на борту судна направление визирования на Солнце подвергается существенным пространственным эволюциям, как медленным – за счет вращения Земли и маневрирования судна, так и быстрым – из-за угловой качки. В указанных условиях работа следящей системы играет важную роль, так как непосредственно влияет на погрешность и эффективность измерений.

Основным конструктивным элементом следящей системы является двухкоординатный подвес, на осях которого смонтированы азимутальный и зенитный исполнительные приводы с концевыми выключателями. Герметичный корпус фотометра с четырьмя оптико-электронными трактами установлен на внутренней рамке подвеса и может перемещаться в пределах $\pm 90^\circ$ по углу места и 180° по азимуту.

Выносная часть следящей системы включает входное окно 21, ограничивающую диафрагму 22, однолинзовый объектив 23, датчик направления на Солнце 24, представляющий квадрантный фотоприемник ФД-142, схему сигналов рассогласований 25 и исполнительные безредукторные электроприводы – зенитный 26 и азимутальный 27. Электроприводы выполнены на бесконтактных электродвигателях постоянного тока (ДБМ85) с датчиками положения ротора (ВТ-60), обеспечивающих как позиционную модуляцию фазных токов двигателя, так и измерение его углового положения.

Командно-задающее устройство, усилители мощности, а также панель управления и блок питания системы расположены в автономном корпусе – блоке управления следящей системой. Переключателями, смонтированными на лицевой панели блока управления, осуществляется изменение режимов работы системы (поиск/захват).

В режиме поиска электроприводы замкнуты по угловому положению соответствующих осей подвеса, а в качестве управляющих сигналов на них подается фазомодулированный сигнал, глубина модуляции которого и знак задаются оператором на панели управления и определяют соответственно скорость (включая нулевую) и направление вращения электроприводов. Такой вариант построения дискретно-фазового замкнутого электропривода позволил исключить в командно-задающем устройстве многоразрядные цифровые преобразователи, свойственные цифровым системам управления, а также упростить процедуру обработки сигналов датчиков углового положения.

Поиск объекта осуществляется с помощью телевизионного устройства контроля и по сигналам светодиодного индикатора цели на панели управления. При обнаружении Солнца оператором устанавливается режим <ЗАХВАТ>, по которому обратные связи электроприводов подключаются к сигналам рассогласования датчика направления на Солнце. Отрабатывая эти рассогласования, приводы стабилизируют оптические оси фотометра на Солнце. Угловая зона синхронизации системы слежения составляет $\pm 3^\circ$ по обеим осям и является вполне достаточной для гарантированного захвата и автосопровождения объекта наведения.

Усилители мощности работают в режиме двухтактной широтно-импульсной модуляции и обеспечивают регулирование фазных токов электродвигателей в диапазоне амплитуд ± 6 А и полосе рабочих частот до 2 кГц. При этом динамические угловые погрешности следящей

системы не превышают 2 угл. мин при двухкоординатных синусоидальных возмущающих воздействиях амплитудой до 15° и частотой 1 Гц.

Проведенные испытания АМСФ показали надежную работу системы слежения с суммарной погрешностью ± 5 угл. мин при общем поле зрения около 5°.

Телевизионное устройство контроля наведения включает в себя входное окно 28, одноступенчатый объектив 30 с ограничивающей диафрагмой 29, прикладную телевизионную установку <ПТУ-Матрица> 31 и телевизор. Оптическое излучение, поступающее на вход устройства, ослабляется до величины, при которой на фоне наблюдаемого солнечного диска достаточно хорошо различается полупрозрачная облачность. Выбор фокусного расстояния объектива осуществлялся из требований удобства контроля работы следящей системы. Полное поле зрения системы контроля составило $3 \times 4^\circ$, а размер изображения Солнца на экране телевизора 50 мм.

Стабильная работа оптикоэлектронных схем солнечного фотометра обеспечивается электронной схемой термостатирования 32, работающей в круглосуточном режиме от автономного источника питания.

В зависимости от задач эксперимента и внешних условий используются основные режимы регистрации:

1. Регистрация сигналов в <ручном> режиме с помощью цифровых вольтметров; переключение фильтров осуществляется с пульта.

2. Автоматизированная регистрация спектров, заключающаяся в поочередной смене фильтров двух измерительных каналов, усреднении измеряемых сигналов и их регистрации на дискетах. Управление и регистрация сигналов осуществляется по командам от ДВК-3М по специальной программе.

3. Автоматизированная <непрерывная запись> двух выбранных спектральных сигналов с заданным временем усреднения.

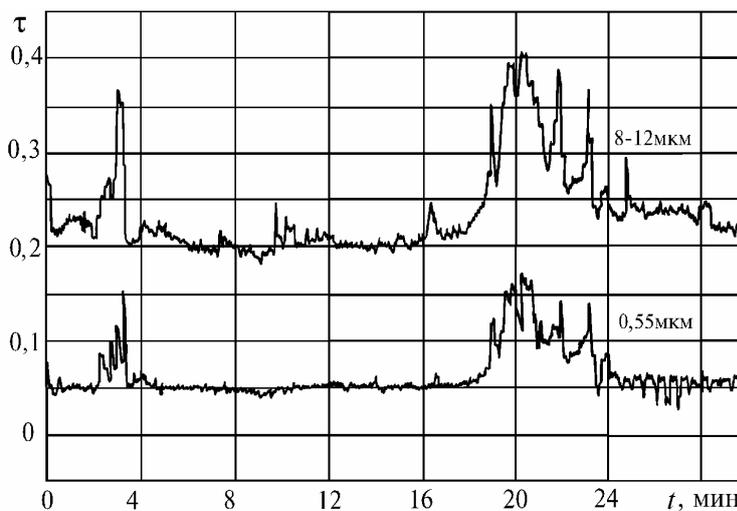


Рис. 3. Пример временной изменчивости оптических толщин атмосферы (8.09.1991 г., полигон <Гольфстрим>)

В качестве примера на рис. 3 приведен тридцатиминутный фрагмент непрерывной записи изменчивости оптических толщин атмосферы, полученный в 43-м рейсе НИС <Академик Вернадский>. В приведенных регистрограммах хорошо просматриваются моменты прохождения слабой полупрозрачной облачности (cirrus).

Эксплуатация фотометра АМСФ в судовых условиях и после модернизации в континентальных показала эффективность его применения в атмосферно-оптических исследованиях и небольшую погрешность, которая оценивается на уровне $0,01 \div 0,02$ для коротковолнового и $0,03 \div 0,05$ для длинноволнового каналов.

В заключение авторы выражают благодарность В.С. Янгулову за разработку механической части следящей системы и полезные обсуждения.

1. Шифрин К.С., Волгин В.М., Волков Б.Н. и др. // Исследование Земли из космоса. 1985. N 4. С. 21–30.
2. Шукуров А.Х., Георгиевский Ю.С., Марченков. А.И., Прохоров Е.И. // ТРОПЭКС–74. Т. 1 Атмосфера. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 614–621.
3. Сакерин С.М., Игнатов А.М., Шибанов Е.Б. Аппаратура и методики определения спектральной прозрачности атмосферы с борта НИС // Океан–Космос: эксперимент <Атлантика-89>. Деп. в ВИНТИ 07.08.90, N 4496–В90. С. 11–35.
4. Керемли У.Т., Кудинов О.А. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 2. С. 219–220.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
30 декабря 1992 г.

D.M. Kabanov, S.M. Sakerin, A.M. Sutormin, and S.A. Turchinovich.
Wideband Solar Photometer for a Marine Atmospheres Studies.

A description of a multiwavelength (14 spectral channels) solar photometer for studying the atmospheric optical thickness in the spectral range from 0,4 to 12 μm onboard a ship is presented. In addition to two measurement channels there are in the photometer an automated solar guide and a TV control system. The system functioning control and recording of signals in a digital form can be done from a key pad or from a micro-computer.