

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.508.953:621.384.3

М.Л. Байбаков, Д.М. Кабанов, А.Д. Мартынов, С.М. Сакерин, Ю.С. Трофимов

ПРОГРАММИРУЕМЫЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ

Описан автоматизированный спектрофотометрический комплекс для самолета-лаборатории Ан-30, позволяющий проводить регистрацию и обработку сигналов фона уходящего излучения атмосферы и подстилающей поверхности в коротковолновом (0,44–1,6 мкм) и инфракрасном (8–15 мкм) диапазонах спектра при различных углах визирования с учетом поправок на текущее значение углов крена и тангажа борта самолета. Рассмотрен ряд программируемых режимов работы комплекса.

Особенностью пассивных методов зондирования атмосферы является получение и использование информации о закономерностях пространственного (углового) и (или) спектрального распределения яркости фонового излучения атмосферы и подстилающей поверхности, т. е. методически пассивное зондирование практически совпадает с экспериментальными исследованиями фонов уходящего и нисходящего излучений атмосферы и подстилающей поверхности.

При реализации пассивных методов с подвижных носителей (например с борта самолета) дополнительно необходим контроль или учет пространственного положения направления зондирования. Кроме того, быстроизменяющиеся условия наблюдения и трудности возобновления пространственного положения фотоприемной системы и ее наведения на объект наблюдения предъявляют повышенные требования к оперативности управления экспериментом и надежности работы бортовой аппаратуры. С учетом этого в НТК «Институт оптики атмосферы» для самолета-лаборатории Ан-30 был разработан программно-управляемый спектрофотометрический комплекс (ПУСК) для:

- исследования пространственных характеристик яркости уходящего излучения;
- определения оптической толщи и вертикальных профилей прозрачности атмосферы методами пассивного зондирования;
- проведения синхронных подспутниковых контрольно-калибровочных измерений радиационной температуры.

Основой создания комплекса ПУСК послужил опыт разработки и эксплуатации полуавтоматического бортового комплекса [1], смонтированного на самолете-лаборатории Ил-14.

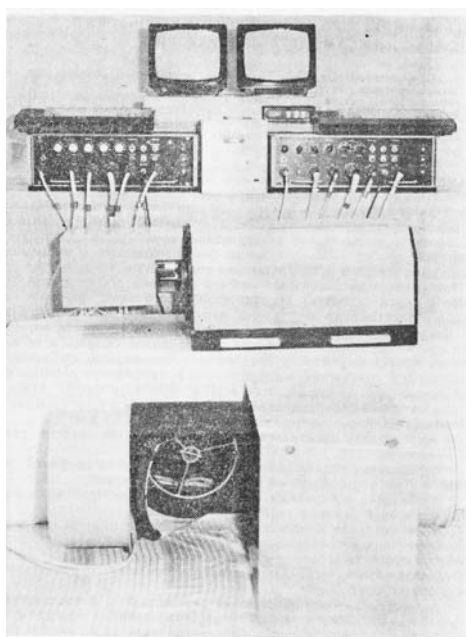


Рис. 1. Внешний вид измерительного комплекса

Отличительными требованиями, предъявленными к новому комплексу, были следующие:

- полностью автоматизированный режим работы и предварительной обработки сигналов по одной из заранее заданных программ;
- регистрация информации в цифровом виде на магнитном носителе с предварительным визуальным контролем на телевизионном мониторе;
- использование гировертикали для точного контроля углового положения наведения фотоприемной системы.

Как и ранее созданная аппаратура [1], комплекс ПУСК (рис. 1) включает в себя два самостоятельных и функционально идентичных прибора – фильтровый спектрофотометр коротковолнового диапазона $\lambda = 0,4 - 1,6$ мкм) и ИК-радиометр, работающий в диапазоне спектра 8–15 мкм. Техническое решение комплекса предусматривает как автономную эксплуатацию каждого прибора, так и одновременную их работу по заданным программам. Угловое сканирование фотометра и радиометра осуществляется с помощью съемных блоков сканирования (сканеров), состоящих из поворотных зеркал, установленных перед объективами приборов под углом 45° к их оптической оси.

ИК-радиометр, структурная схема которого приведена на рис. 2, конструктивно разделен на четыре части: сканер *СК*, собственно фильтровый радиометр *ФР*, блок аналоговой обработки сигнала и управления *АБ* и цифровой блок управления и обработки *ЦБ*.

Работа радиометра осуществляется следующим образом. Оптическое излучение из заданного направления пространства отражается поворотным зеркалом *ППЗ* (диаметром 45 мм) на вход радиометра *ФР*. Электромеханический модулятор *ЭМ*, установленный на входе, осуществляет амплитудную модуляцию принимаемого излучения с частотой 200 Гц. Модулятор представляет собой металлический диск с отверстиями, приводимый в движение двигателем постоянного тока типа ДПМ-25, причем непрозрачные черенные части диска модулятора задают опорный уровень теплового излучения, относительно которого и проводится измерение.

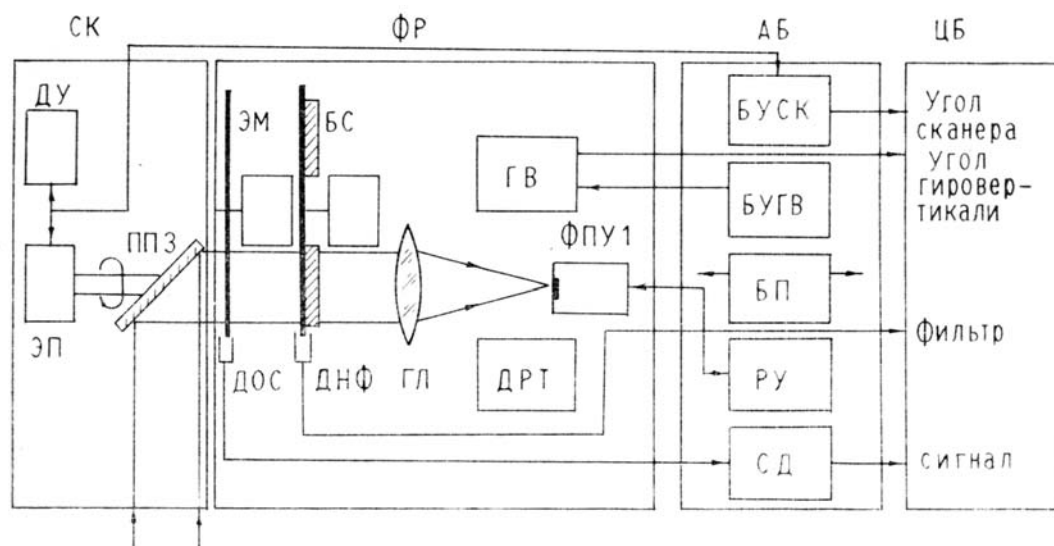


Рис. 2. Структурная схема ИК-радиометра: *ППЗ* – плоское поворотное зеркало; *ЭП* – электро-механический привод; *ДУ* – датчик углового положения поворотного зеркала; *ЭМ* – электро-механический модулятор измеряемого излучения; *ДОС* – датчик опорного сигнала; *БС* – барабан сменных светофильтров; *ДНФ* – датчик номера фильтра; *ГЛ* – германиевая менисковая линза; *ФПУ1* – фотоприемное устройство на основе пироэлектрического приемника; *ГВ* – малогабаритная авиационная гировертикаль типа МГВ-1СК; *ДРТ* – датчик-регулятор температуры; *БУСК* – блок управления сканером на основе блока управления шаговым двигателем БУ-12 и модуля управления; *БУГВ* – блок управления гировертикали; *РУ* – регулируемый усилитель; *СД* – синхронный детектор; *БП* – блок питания электронных схем и приборов

Пара «фотодиод – светодиод», входящая в состав датчика опорного сигнала *ДОС*, расположена около модулятора *ЭМ* таким образом, что при вращении диска фотодиодом формируется опорный сигнал, необходимый для работы синхронного детектора *СД*.

Спектральная селекция оптического излучения осуществляется полосовыми дисперсионными светофильтрами, установленными в барабане *БС* перед собирающей линзой-объективом *ГЛ*. Контроль установки необходимого фильтра производится электронной схемой, выполненной на основе трех оптронных пар «светодиод – фотодиод», разделенных кодовыми отверстиями в барабане *БС*. Код заданного фильтра сравнивается в схеме совпадения с кодом, вырабатываемым оптронными парами (датчиком кода фильтра *ДКФ*), и при их совпадении формируется сигнал для остановки двигателя.

Далее оптическое излучение фокусируется германиевой линзой *ГЛ* на фотоприемное устройство *ФПУ* на основе пироэлектрического приемника.

После предварительного усиления в *ФПУ* измеряемый сигнал поступает на вход регулируемого усилителя, состоящего из активного фильтра верхних частот и цифроаналогового преобразователя с переключателем усиления, которые с дискретностью, равной двум, обеспечивают переключение коэффициента усиления.

Информационный сигнал с выхода регулируемого усилителя поступает в блок синхронного детектирования, состоящий из синхронного резонансного фильтра, фильтра нижних частот, фазоинвертора и собственно синхронного детектора. Синхронизация работы резонансного фильтра и детектора обеспечивается задающим генератором со схемой фазовой автоподстройки частоты. Необходимое фазовое соотношение между опорным сигналом (от *ДОС*) и информационным устанавливается переключателями «*ФАЗА ГРУБО*» (дискрет 45°) и «*ФАЗА ПЛАВНО*» (дискрет $5,6^\circ$).

Точность пространственного наведения и гибкость в управлении сканирования достигается тем, что сканер выполнен на основе шагового электродвигателя ШДР-711В с редуктором 1/60 (шаг выходного вала $3'$), а датчик углового положения выходного вала *ДУ* и гировертикаль *ГВ* полностью обеспечивают контроль направления визирования относительно истинного вертикального направления. Датчик *ДУ* представляет собой пару «светодиод—четырёхсекторный фотодиод», оптически связанную зеркалом, установленным на втором торце выходного вала привода *ЭП*. Сигналы, вырабатываемые фотодиодом, служат для получения в модуле управления блока *БУСК* сигналов углового положения и направления сканирования.

Угловое положение всего измерителя (и носителя—самолета, судна) контролируется гировертикалью *ГВ*, которая вырабатывает аналоговые сигналы углов тангажа и крена для последующей корректировки истинного направления визирования.

Основные технические характеристики радиометра:

Световой диаметр объектива, мм	28
Фокусное расстояние, мм	56
Угол поля зрения, угл. град	1
Рабочий спектральный диапазон, мкм	2—15
Число светофильтров	6
Скорость углового сканирования, град/с	0—20
Диапазон сканирования по углу места, град	0—90
Погрешность выдерживания вертикали (контроля истинного углового положения), угл. мин	до ± 15
Диапазон измеряемых радиационных температур, $^\circ\text{К}$	250—320
Пороговая чувствительность по температуре, град	0,2
Постоянная времени измерителя, с	1

Фильтровый спектрометр (рис. 3), также как и радиометр, конструктивно включает следующие основные части: сканер *СК*, собственно спектрометр *СФ* и блоки аналоговой *АБ* и цифровой *ЦБ* обработки сигналов и управления.

У сканера отличие состоит в том, что плоское поворотное зеркало имеет существенно большие размеры (200×300 мм).

Объектив спектрофотометра выполнен по схеме Ньютона со сферическим зеркалом *СЗ* диаметром 200 мм и плоским зеркалом *ПЗ*, установленным под углом 45° к оптической оси. Принимаемое оптическое излучение направляется поворотным зеркалом *ППЗ* на вход объектива Ньютона (*СЗ/ПЗ*), далее модулируется электромеханическим прерывателем *ЭМ* с частотой 1000 Гц и через интерференционный светофильтр, находящийся в барабане *БС*, поступает на фотодиод типа *ФД-7Г* (*ФД-10Г*). В отличие от радиометра регулировка температуры в спектрометре не осуществляется. Работа остальных блоков спектрофотометра идентична работе блоков *ИК*-радиометра.

Основные технические характеристики спектрофотометра:

Световой диаметр объектива, мм	200
Фокусное расстояние, мм	400
Угол поля зрения, град	0,4
Рабочие длины волн, мкм	0,44; 0,55; 0,63; 0,87; 1,06; 1,2; 1,6
Число светофильтров	7

(Остальные технические характеристики аналогичны характеристикам *ИК*-радиометра).

При проведении исследований с борта самолета Ан-30 оптикоэлектронные части приборов (сканеры *СК*, радиометр *ФР* и спектрофотометр *СФ*) располагаются над иллюминатором в нишах первого и второго фотолюков. Аналого-цифровые блоки *АБ* и *ЦБ* измерительного комплекса *ПУСК* смонтированы в общей приборной стойке.

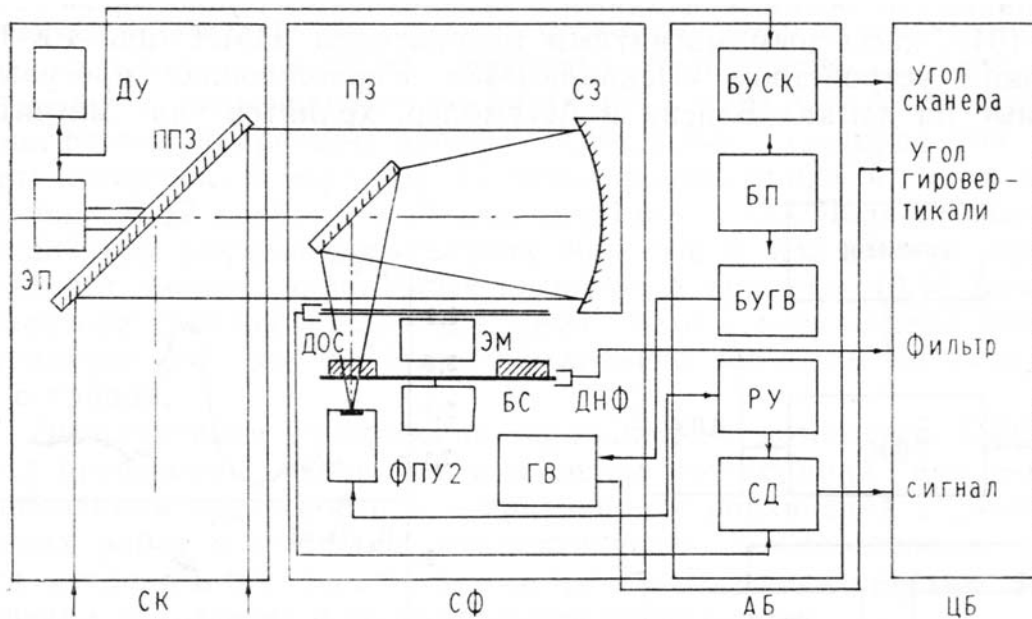


Рис. 3. Структурная схема спектрофотометра: СЗ — сферическое зеркало; ПЗ — плоское зеркало; ФПУ2 — фотоприемное устройство на основе германиевого фотодиода. Остальные обозначения те же, что и в подрисуночной подписи к рис. 2

Для реализации программно-управляемого режима работы комплекса необходимо управление следующими функциями и информационными потоками:

- пространственным (угловым) сканированием в заданном диапазоне углов с заданной скоростью;
- спектральной селекцией (сменой длин волн);
- введением поправок тангажа и крена на текущее угловое положение борта самолета;
- организацией «паспорта эксперимента» с указанием условий его проведения, текущего времени;
- измерением сигнала с заданной дискретностью и временем усреднения;
- управлением внешними устройствами (магнитофоном, телевизионным монитором и ЦПУ);
- предварительной обработкой сигналов.

Вместе с необходимостью выполнения перечисленных функций очевидно, что для обеспечения большей надежности и меньших массогабаритных характеристик блоки управления ЦБ должны быть оптимизированы по сложности. С учетом этого блоки ЦБ были реализованы на основе микроЭВМ «Электроника-БК 0010», имеющей возможности для подключения стандартного телевизора и накопителя на магнитной ленте. Программная поддержка микроЭВМ обеспечивается размещенным в трех микросхемах съемного ПЗУ компилятора языка Бэйсик.

Функционально цифровой блок обработки и управления состоит из двух идентичных каналов, каждый из которых содержит следующие блоки (рис. 4): трехканальный десятиразрядный аналого-цифровой преобразователь АЦП, служащий для подготовки аналоговых сигналов с синхронного детектора и гировертикали для последующей обработки на ЭВМ; блок сопряжения, предназначенный для управления блоком сканирования (путем формирования сигнала задающего кода скорости и команды направления вращения зеркала), а также барабаном сменных светофильтров; непосредственно блок вычисления «Электроника-БК 0010», связанный с телевизионным монитором «Электроника-404», кассетным магнитным накопителем НМЛ типа РК-1 и печатающим устройством «Искра-001 -45». Управляющие программы, написанные на языках Бэйсик и Ассемблер, хранятся на магнитной ленте.

Разработанные в настоящее время программы, которые, естественно, не исчерпывают всего многообразия имеющихся возможностей, можно разбить на три основных вида по характеру получаемых зависимостей и типу решаемых задач. Во-первых, это программы, позволяющие получать угловое распределение яркости для различных длин волн с учетом поправок, снимаемых с гировертикали, на текущее угловое отклонение борта самолета. Результаты измерений в этом случае хранятся на магнитной ленте либо распечатываются на ЦПУ для последующего анализа и обработки. Другой вид программ позволяет пространственно-временные зависимости яркости фона подстилающей поверхности (ПП) с заданным временем усреднения регистрируемого сигнала и подготавливать массивы данных для дальнейшей статистической обработки. К третьему виду относятся программы, предназначенные для извлечения информации о вертикальной прозрачности атмосферы по измерениям яркостных контрастов подстилающей поверхности при различных углах визирования относительно надирного направления. В этом режиме оператор имеет возможность помимо визуального контроля регистрируемого сигнала на экране монитора оперативно переводить поворотное зеркало в следующее заданное угловое положение и тем самым проводить измерение яркости интересующего участка ПП (например границы раздела «суша—море») вторично. Программа обработки для этого режима позволяет оператору

производить сравнительный анализ массивов данных, полученных при двух различных углах визирования, представленных в графическом виде на экране телевизора, а также выделить необходимые участки для дальнейшего расчета коэффициента ослабления в атмосфере по известному алгоритму [2].



Рис. 4. Функциональная схема цифрового блока обработки и управления

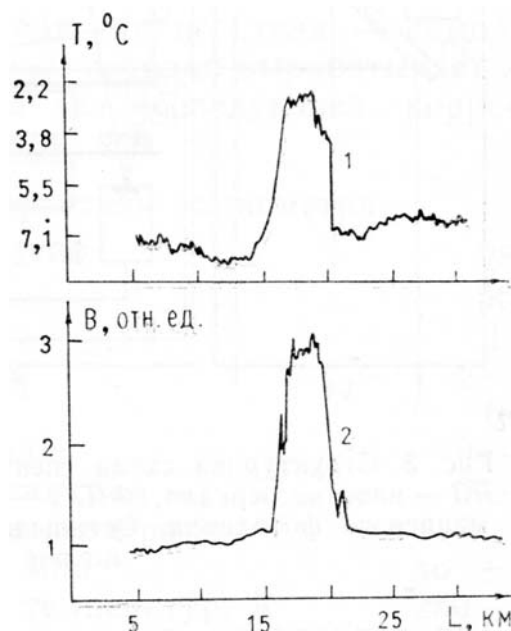


Рис. 5. Фрагмент сигналов яркости фона B и радиационных температур T , зарегистрированных 24.12.1988 г. над Каспийским морем с высоты полета 300 м в надирном направлении: 1 — по данным ИК-канала; 2 — по данным спектрофотометра

Описанный спектрофотометрический комплекс использовался при проведении комплексного под-спутникового эксперимента, целью которого являлось проведение контрольно-калибровочных измерений ИК-радиометра, размещенного на спутнике, а также уточнение алгоритмов атмосферной коррекции данных спутникового зондирования температуры поверхности моря [3]. Полеты производились на самолете АН-30 в период с 17 ноября по 24 декабря 1988 г. над Черным, Аральским и Каспийским морями на высотах 300–500 м. На рис. 5 представлен фрагмент зарегистрированных сигналов в видимом (0,55 мкм) и ИК-диапазоне спектра (10,2–12,4 мкм). Резкое возрастание сигналов по амплитуде (см. рис. 5) было обусловлено лежащим по курсу самолета островом.

Эксплуатация программно-управляемого комплекса ПУСК в период проведения эксперимента в целом подтвердила его соответствие требованиям надежности и оперативности управления в различных режимах работ и показала перспективность использования комплекса для исследований спектрофотометрических характеристик фонов излучения атмосферы и подстилающей поверхности.

1. Волков А. Н., Кабанов Д. М., Сакерин С. М., Турчинович С. А. // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 71–81.
2. Кабанов М. В., Кабанов Д. М., Сакерин С. М. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 1. С. 107–113.
3. Зуев В. Е., Селиванов А. С., Фомин В. В. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 11. С. 76–80.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
7 июня 1989 г.

M. L. Baibakov, D. M. Kabanov, A. D. Martynov, S. M. Sakerin,
Yu. S. Trofimov. **Programmable Spectrophotometric Complex for Airborne Laboratory.**

The paper presents a description of the airborne spectrophotometric complex installed on board AN-30 airplane. The complex enables one to measure the intensity of outgoing radiation of the atmosphere and underlying surface in the spectral regions 0,44 to 1,6 μm and from 8 to 15 μm at different viewing angles. The corrections of the viewing angle for the current values of bank and pitching angles are allowed for in the complex. Several programmable modes of the complex operation are discussed in the paper.