

УДК 681.785:681.7.069.3:621.382

Специальные быстродействующие спектрометры и телерадиометры с полупроводниковыми приемниками излучения

Ю. М. Лотошников, Ю. Н. Журавлева

Государственное унитарное предприятие «НПО «Орион», Москва, Россия

Дано обоснование разработки специальных быстродействующих спектрометров и телерадиометров с использованием полупроводниковых приемников излучения для исследования спектроэнергетических характеристик оптического излучения летательных аппаратов и факелов ракет в натуральных условиях. Представлены оптические схемы и конструктивные особенности быстродействующих дифракционных спектрометров типа БРС-6 и телерадиометров типа ИБР, разработанных и изготовленных в ГУП «НПО «Орион»». Приведено краткое описание двух летающих лабораторий (л/л), оборудованных приборами БРС и ИБР и используемых для исследования ИК-излучения самолетов, вертолетов, тепловых ловушек (л/л Ан-12) и факелов баллистических ракет (л/л Ту-16).

На рубеже 50—60-х гг. в нашей стране были развернуты работы по созданию космического тепlopеленгатора для обнаружения пусков баллистических ракет [1], а также тепlopеленгаторов обороны самолетов. Эта достаточно сложная задача затруднялась отсутствием данных о спектроэнергетических характеристиках ИК-излучения факелов ракет и реактивных струй самолетов.

Результаты натуральных исследований этих характеристик, выполненных в «НПО «Орион»» в начале 60-х гг., показали, что излучение факела в диапазоне длин волн 1—6 мкм селективно и сильно ослабляется атмосферой на приземных измерительных трассах. Поэтому экспериментальные исследования были продолжены с борта летающих лабораторий, оборудованных на базе военных (Ту-16, Су-7) и военно-транспортных (Ан-8, Ан-12) самолетов. История создания этих л/л, их устройство, перечень самолетов-носителей и измерительной аппаратуры приведены в [2].

Ниже дано описание оптических схем, принципа работы и конструкций быстродействующих спектрометров и телерадиометров, которыми были укомплектованы эти самолетные лаборатории.

Поскольку в то время отечественная оптико-механическая промышленность не выпускала специализированных спектрометров для работы в негерметизированной части самолета, в «НПО «Орион»» было разработано и изготовлено несколько экземпляров специальных быстродействующих самолетных спектрометров и телерадиометров с полупроводниковыми приемниками излучения. Эти приборы на протяжении двух десятилетий использовались на борту л/л при натуральных исследованиях характеристик оптического излучения факелов межконтинентальных баллистических и оперативно-тактических ракет, реактивных струй самолетов и других объектов авиационной техники.

При разработке аппаратуры решались следующие задачи.

Спектрометр должен иметь относительно высокое быстродействие (порядка 10 спектров/с) для регистрации нестационарных процессов излучения факелов ракет и некоторых объектов авиационной техники.

Это исключало возможность применения традиционных для средней ИК-области спектра фотоприемников таких, как термоэлементы и болометры, из-за их большой постоянной времени. В связи с этим в приборах были использованы малоинерционные полупроводниковые фотоприемники — фоторезисторы из антимонида индия и соединений кадмий — ртуть — теллур, охлаждаемые жидким азотом, а также германиевые фотодиоды.

Оптическая схема монохроматора должна была обеспечивать малые габаритные размеры и массу спектрометра, максимальную пороговую чувствительность и поле зрения, достаточное для удержания в нем источников излучения, двигавшихся со значительными угловыми скоростями.

Опыт предшествующих работ, выполненных при участии авторов с помощью спектрометра БРС-1, имевшего в основе призменный монохроматор, а также сравнительный анализ оптических схем монохроматоров, приведенный в [3], показали, что в самолетном спектрометре монохроматор целесообразно построить по автоколлимационной схеме Литтрова с диспергирующим элементом — дифракционной решеткой. За основу была взята схема ранее разработанного спектрометра [4].

На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема монохроматора самолетного спектрометра БРС-6. В качестве коллиматорного (камерного) объектива 7 использовано параболическое зеркало с фокусным расстоянием $f = 278$ мм и относительным отверстием $A = 1:3$. Дисперсия осуществляется репликой дифракционной решетки с количеством штрихов на миллиметр $N = 200$ и рабочей площадью 90×90 мм. Сканирование по спектру со скоростью 10 спектров в секунду производилось поворотом решетки. Уменьшенное системное изображение входной щели 4 переносилось на светочувствительные площадки приемников излучения — полупроводниковый фоторезистор из антимонида индия 16, охлаждаемый жидким азотом, и германиевый фотодиод 11. Фотоприемники одновременно работали, соответственно, в диапазоне $1,8\text{--}5,5$ мкм первого порядка и в диапазоне $1,2\text{--}1,8$ мкм второго порядка дифракционного спектра. Первый порядок выделялся с помощью селективных светофильтров, расположенных на вращающемся диске 13, который имел общий привод с механизмом поворота решетки. Второй порядок выделялся с помощью неподвижного фильтра 17, расположенного непосредственно перед фотодиодом. На оси вращения решетки установлен датчик угла поворота, сигналы которого позволяют привязывать спектрограммы к шкале длин волн.

Для использования прибора в качестве телеспектрометра, измеряющего спектральную силу излучения удаленных источников малых угловых размеров, он снабжен осветительным объективом 1, 2 Кассегрена (фокусное расстояние $f = 900$ мм, относительное отверстие $A = 1:4$). При размерах входной щели 8×8 мм угол поля зрения спектрометра составлял 30×30 угловых минут. Боковые засветки входной щели устранены применением бленды, укрепленной на корпусе объектива.

В плоскости входной щели помещен модулятор 5, лопасти которого выполнены таким образом, что при любом их положении общая действующая площадь отверстий в пределах щели остается неизменной и равной половине площади входной щели. Такая конструкция модулятора одновременно обеспечивает:

модуляцию сигнала, поступающего от “точечного” источника с постоянной несущей частотой для дальнейшего усиления сигнала на переменном токе;

полное исключение сигнала от равномерного фона и собственного излучения модулятора;

пространственную фильтрацию помех, вызванных излучением неоднородных фонов.

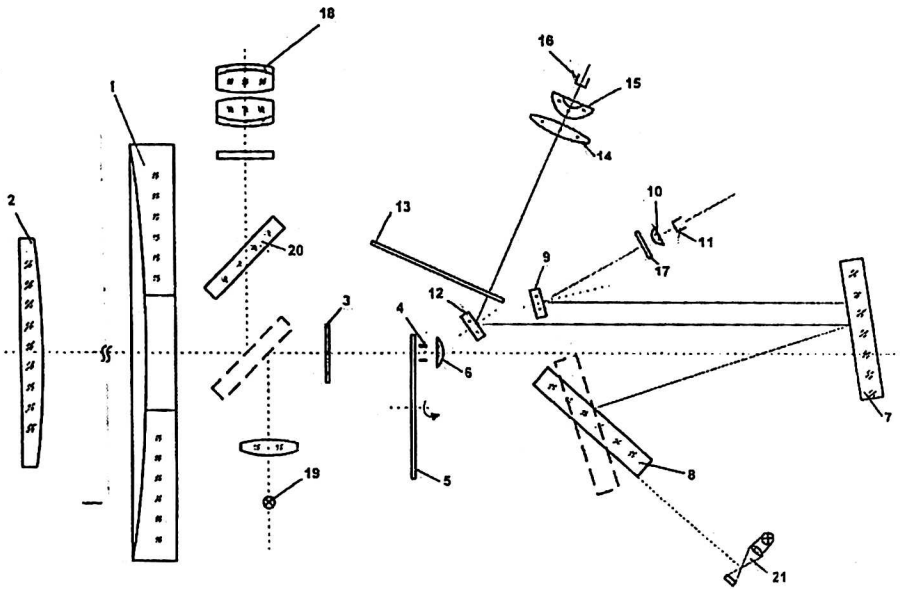


Рис. 1. Оптическая схема спектрометра БРС-6:

- 1, 2 — зеркала сферические; 3 — стекло защитное; 4 — щель; 5 — диск модулятора;
 6 — коллектив; 7 — зеркало; 8 — решетка дифракционная; 9, 12, 20 — зеркала плоские;
 10, 14, 15 — линзы; 11, 16 — фотоприемники; 13, 17 — фильтры; 18 — визир;
 19 — опорный излучатель; 21 — реперный отметчик

Спектрометр снабжен встроенным опорным излучателем 19 для периодической проверки энергетической градуировки в процессе работы. В условиях полета температура прибора соответствовала температуре воздуха за бортом ($-50 \div -70$ °С). При этом уменьшалась радиационная засветка светочувствительной площадки фотоприемника от элементов конструкции монохроматора, находившихся в его поле зрения. Кроме того, с увеличением разреженности воздуха при подъеме самолета снижалась температура точки кипения жидкого азота, охлаждающего фотоприемник, так как он находился вне герметизированного объема монохроматора. Оба эти фактора вызывали заметное увеличение обнаружительной способности и вольтовой чувствительности фоторезистора на основе антимонида индия [5] и вносили изменения в энергетическую градуировку прибора. Сигналы опорного излучателя позволяли учитывать эти изменения при обработке результатов.

В осветительном объективе смонтирован оптический визир 18, позволяющий производить юстировку спектрометра совместно с другими приборами измерительного комплекса.

Регистрация информационных и служебных сигналов спектрометра производилась на многоканальном магнитном самописце типа "Гамма АЧМ".

Запись информационных сигналов осуществлялась одновременно по нескольким каналам в разных масштабах для расширения динамического диапазона регистрации. Результаты измерений обрабатывались в лабораторных условиях на ПЭВМ.

Конструкция монохроматора выполнена в соответствии с условиями эксплуатации прибора в негерметизированной части самолета при значительных перепадах температур ($+50 \pm -70$ °С), больших уровнях вибраций и механических перегрузок. Корпус монохроматора сварен из листовой стали. В передней части корпуса имелся фланец с посадочным местом, которым он соединялся с объективом. Этот фланец одновременно служил ребром жесткости, за которое прибор крепился на специальном кронштейне. Вход и выход корпуса монохроматора герметизировались соответственно входным окном из лейкосапфира и выходными объективами 14, 15. Осветительный объектив не имел защитного окна, поэтому он снабжен поворотной шторкой, которая во время взлета и посадки защищала оптику объектива от грязи и пыли, заносимых вихревыми потоками воздуха.

В ходе летных исследований возникали новые задачи, в основном касающиеся расширения спектрального диапазона исследований. Эти задачи были решены разработкой других приборов на базе БРС-6. Так было построено несколько самолетных быстродействующих спектрометров, которым присваивались соответствующие индексы. Без изменения конструкции основных элементов монохроматора были разработаны спектрометры БРС-6К — для ближней области ИК-излучения 0,6—1,8 мкм и БРС-6Д — для области спектра 7,5—13 мкм, а также прибор БРС-7 на область спектра 1,8—3,6 мкм с разрешением на порядок выше, чем у БРС-6. Этот прибор потребовался для изучения в натуральных условиях контура полосы водяного пара с центром в 2,7 мкм — наиболее мощной излучающей полосы ракетного факела. Благодаря тому, что габаритные размеры и посадочные места у всех приборов были одинаковы, в ходе летных исследований легко производилась их замена.

Помимо перечисленных приборов, на базе монохроматора БРС-6 был разработан спектрометр БРС-6УФ на область спектра 0,3—0,6 мкм с разрешением порядка 2А. Прибор предназначен для эмиссионного анализа линий металлов в факеле испытываемого в стендовых условиях жидкостного ракетного двигателя в целях диагностики возникновения нештатного режима его работы. В отличие от остальных спектрометров прибор БРС-6УФ имеет осветительный объектив из внеосевого парабооида ($f = 278$ мм, $A = 1:3$) и плоского вторичного зеркала. Приемник излучения — фотоумножитель ФЭУ-27.

Параметры всех перечисленных приборов приведены в таблице.

Опыт экспериментальных исследований оптического излучения факелов ракет и объектов авиационной техники показал, что размеры поля зрения спектрометров недостаточны для непрерывного отслеживания этих целей. Поэтому в дополнение к спектрометрам были разработаны телерадиометры (названные так по аналогии с принятым термином “телефотометры”) с более широкими полями зрения, что позволяло практически непрерывно сопровождать исследуемые объекты излучения.

Известно, что при обычной схеме радиометра, когда фотоприемник находится в фокальной плоскости объектива, чувствительность прибора неравномерна по полю зрения, и на выходе возникают сигналы от излучения неравномерных фонов. Поэтому в основу разработки самолетного телерадиометра была положена конструкция прибора [6], построенного по проекционной схеме, свободной от указанных недостатков.

Технические характеристики спектрометров и телерадиометров

Показатели	Спектрометры					Телерадиометры		
	БРС-6	БРС-6К	БРС-6Д	БРС-7	БРС-6УФ	ИБР-4	ИБР-2КФ	ИБР-7С
Рабочий спектральный диапазон, мкм	1,2-1,8 1,8-1,5	0,6-1,8	7,5-13,0	1,8-3,6	0,3-0,6	1,6-6,0 2,0-3,3 3,7-6,0 4,0-5,0	0,3-0,7 0,7-1,2	2,1-3,3
Диспергирующий элемент	Дифракц. решетка 200 штр/мм	Дифракц. решетка 600 штр/мм	Эшеллет 100 штр/мм	Дифракц. решетка 300 штр/мм	Дифракц. решетка 1200 штр/мм	—	—	—
Разрешение, мкм	0,065 0,13	0,06	0,25	0,023	0,0002	—	—	—
Частоты модуляции, Гц	4060	4060	2500	4070	—	2500	2500	4080
Фокусное расстояние осветительного объектива, мм	900	900	900	900	278	278	278	900
Относительное отверстие	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/4
Поле обзора, угл. мин	30x30	30x30	30x30	28	1,2x96	90x100	175x150	45x34
Мгновенное поле зрения, угл. мин	15x30	15x30	15x30	28	—	22,5x100	—	—
Фотоприемник	ФД-5Г ФС InSb 77К	ФД "РУБИН"	Ф. С. КРТ 77К	ФС InSb 77К	ФЭУ-27	ФС InSb 77К	ФЭУ-27 ФЭУ-28	ФС InSb 77К
Пороговая облученность, Вт/см ²	1,1·10 ⁻¹⁰ (1,5 мкм) 2,2·10 ⁻¹⁰ (3,5 мкм)	1,2·10 ⁻¹⁰ (1,5 мкм)	7,8·10 ⁻¹⁰ (9 мкм)	2·10 ⁻¹⁰	1·10 ⁻⁶	7·10 ⁻¹¹ 1,2·10 ⁻¹⁰ 1,8·10 ⁻¹⁰ 6·10 ⁻¹¹	1·10 ⁻¹⁴ 1,7·10 ⁻¹²	1,3·10 ⁻¹¹
Габаритные размеры, мм	820x360x320							
Масса, кг	20							
Год выпуска	1976	1978	1986	1987	1999	1969	1976	1991

П р и м е ч а н и е. Быстродействие спектрометров 10 спектров/с; частота кадров ИБР-7С — 48 кадров/с.

Принципиальная оптическая схема прибора показана на рис. 2. Объектив, состоящий из внеосевого параболоида 2 с фокусным расстоянием $f = 278$ мм и относительным отверстием $A = 1:3$ и плоского зеркала 3, проектирует изображение пространства предметов в плоскость диафрагмы поля зрения 4, за которой находится конденсор 6, в свою очередь проектирующий зрачок на фотоприемник 7. Непосредственно у диафрагмы поля зрения находится вращающийся модулятор 5, устроенный так же, как в монохроматоре и выполняющий функции модулятора лучистого потока и пространственной фильтрации фона. Проекционный способ, при котором фотоприемник освещается равномерно при любом положении изображения исследуемого объекта в поле зрения, обеспечивает постоянство чувствительности прибора по всему полю зрения независимо от формы и неравномерности чувствительности фотоприемника по его поверхности. Данная схема позволяет работать в любых спектральных диапазонах, ограниченных только областями чувствительности фотоприемников и пропусканьем конденсора.

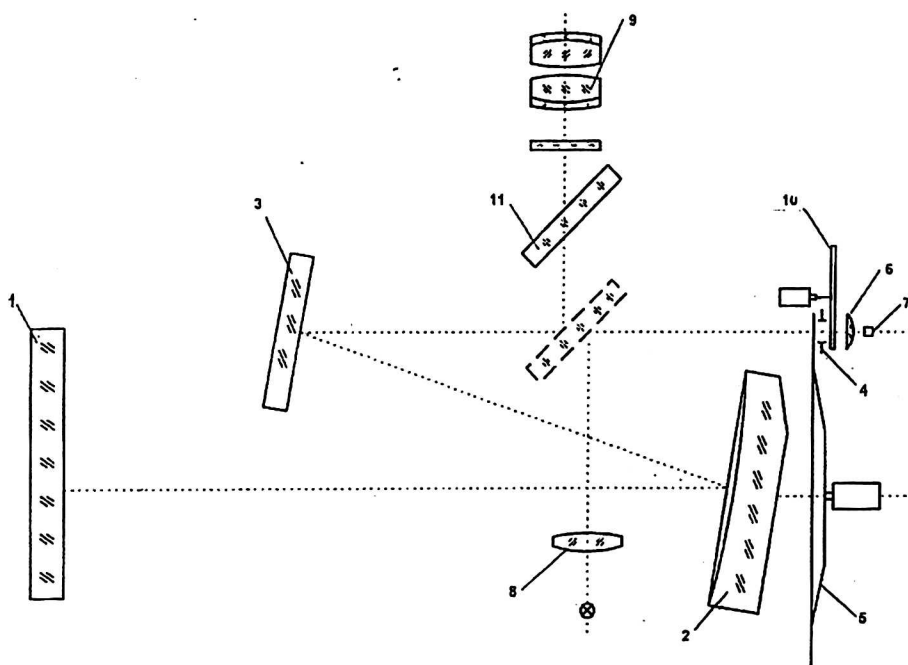


Рис. 2. Оптическая схема телерадиометра ИБР:

1 — защитное окно из LiF; 2 — внеосевая парабола; 3 — плоское зеркало; 4 — полевая диафрагма; 5 — модулятор; 6 — конденсор из кремния; 7 — фотоприемник; 8 — опорный излучатель; 9 — визир; 10 — отрезающий светофильтр; 11 — подвижное зеркало

По представленной схеме было построено несколько вариантов бортовых телерадиометров, отличающихся границами рабочих спектральных диапазонов, функциональными возможностями и пороговой чувствительностью.

Базовым телерадиометром, которым были укомплектованы все самолетные лаборатории, был телерадиометр ИБР-4, рассчитанный на работу в диапазоне спектра 1,1—6,0 мкм. Для выделения узких спектральных интервалов между диафрагмой поля зрения и конденсором была установлена кассета со свето-

фильтрами на область спектра 2,0—3,3; 3,7—6,0 и 4,0—5,0 мкм. Смена фильтров производилась дистанционно. В качестве фотоприемника использовался полупроводниковый фоторезистор из антимиониды индия, охлаждаемый жидким азотом.

Герметичный корпус прибора изготовлен из листовой стали. Входное защитное окно выполнено из монокристаллического фтористого лития, прозрачного в рабочем диапазоне прибора. Боковые засветки диафрагмы поля зрения устранены с помощью достаточно длинной бленды, укрепленной на корпусе перед объективом.

Для проведения исследований характеристик излучения факелов ракет в коротковолновой области спектра был разработан двухканальный телерадиометр ИБР-2КФ, который работал одновременно в двух участках спектра — 0,3—0,7 и 0,7—1,2 мкм. Интерференционный светоделитель, установленный за диафрагмой поля зрения, распределял лучистый поток между двумя фотомножителями, соответственно, ФЭУ-27 и ФЭУ-28. Конструкция этого прибора аналогична ИБР-4.

По мере расширения исследований и накопления данных о характеристиках излучения факелов ракет, потребовалась информация о его геометрических размерах, конфигурации и пространственно-яркостном поле в ИК-области спектра. Для этого была осуществлена разработка сканирующего радиометра.

Принципиальная оптическая схема этого прибора не отличается от представленной выше. Сканирование пространства предметов осуществлялось методом последовательного восприятия по диагональной траектории [7] двумя дисками: сканирующим и модулирующим. Модулятор выполнен по приведенной выше конструкции, обеспечивавшей модуляцию сигнала и фильтрацию сигналов от фона. Сканирующий диск имел узкие радиальные щели. Оба диска установлены в плоскости диафрагмы поля зрения так, что их прорезы пересекали поле зрения прибора в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Объектив Кассегрена ($f = 900$ мм, $A = 1:4$) обеспечивал поле обзора 45×35 угл. мин, при этом мгновенное поле зрения составляло 4×17 угл. мин. Частота кадров — 48 в секунду.

С помощью этого прибора были получены данные о геометрических размерах и яркостном поле факела баллистических и оперативно-тактических ракет в ИК-области спектра.

Все перечисленные телерадиометры имели опорные излучатели для контроля энергетической градуировки во время работы и оптические визиры для юстировки в составе самолетных измерительных комплексов.

Информационные и служебные сигналы телерадиометров регистрировались на бортовых многоканальных самописцах. Результаты обрабатывались в лабораторных условиях на ЦЭВМ.

Технические характеристики телерадиометров приведены в таблице.

В качестве иллюстрации использования быстродействующих спектрометров и телерадиометров ниже приведено краткое описание двух летающих лабораторий и даны некоторые результаты летных исследований.

Исследования спектроэнергетических характеристик излучения объектов авиационной техники и факелов ракет выполнялись разными л/л, оборудованными, соответственно, на борту военно-транспортного самолета Ан-12 (рис. 3) и самолета-бомбардировщика Ту-16 (рис. 4). На обоих самолетах приборы измерительных комплексов были размещены практически одинаково. Оптико-механические блоки спектрометров и телерадиометров установлены вместо пушек на кормовых орудийных станциях на специальных кронштейнах.

нах. Для регистрации размеров, конфигурации, ракурсов цели и ее положения в поле зрения приборов в состав измерительных комплексов входили автоматические фотокамеры с длиннофокусными объективами. Наведение приборов на исследуемые объекты осуществляли вручную операторы кормовых орудийных станций. Пульты управления, блоки усилительно-регистрающей и вспомогательной аппаратуры размещались в гермокабинах самолетов. Управление измерительными комплексами производилось специально подготовленными операторами.

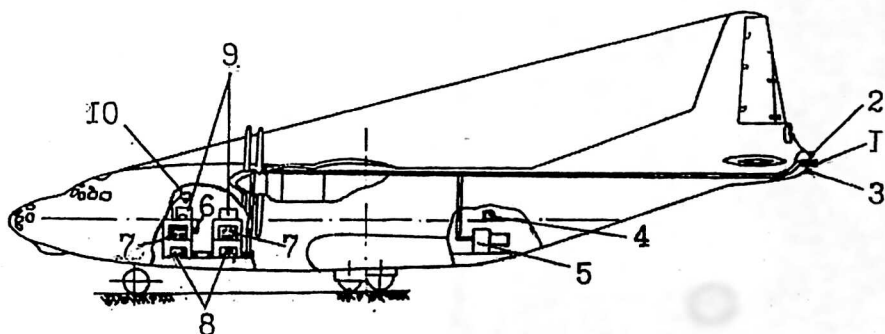


Рис. 3. Схема размещения аппаратуры на самолетной лаборатории Ан-12:
1 — спектрометр БРС-6; 2 — радиометр ИБР; 3 — кинокамера; 4, 5 — сканирующие спектрометры; 6—10 — аппаратура управления, контроля и регистрации

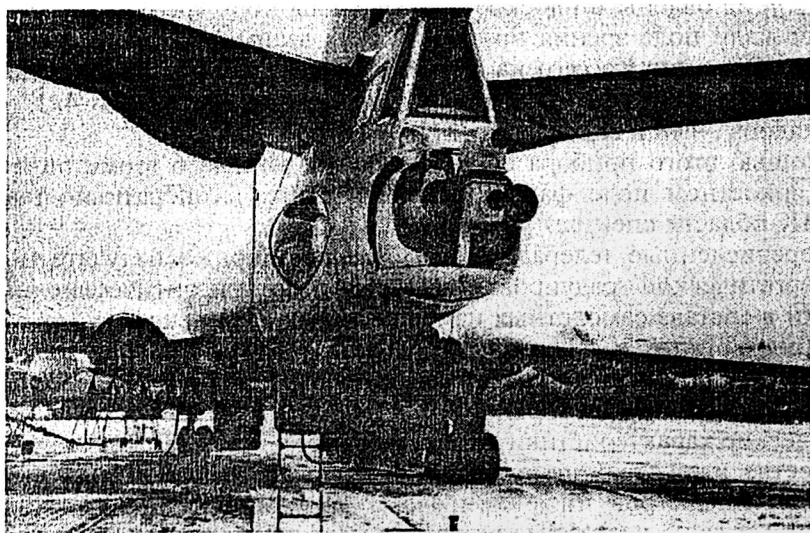


Рис. 4. Размещение аппаратуры на самолетной лаборатории Ту-16

Состав измерительных средств этих л/л несколько отличался: на Ту-16 одновременно работали два спектрометра БРС-6 и БРС-6К и два телерадиометра ИБР-4 и ИБР-2КФ; на Ан-12 — спектрометр БРС-6 и телерадиометр ИБР-4.

В ходе летных исследований узлы и блоки измерительной аппаратуры, а также методика измерений подвергались доработкам и усовершенствованиям в соответствии с требованиями экспериментов.

Некоторые результаты летных исследований приведены ниже. На рис. 5 показан высотный ход силы излучения и приведены спектры излучения факела баллистической ракеты на различных участках траектории ее полета.

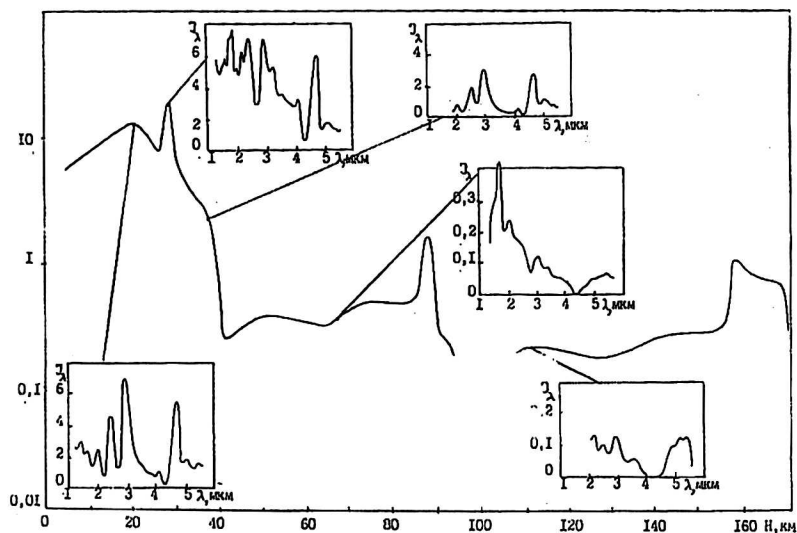


Рис. 5. Высотный ход и спектры силы излучения факела БР

На рис. 6 представлены спектры излучения форсажной и бесфорсажной реактивной струй самолета-истребителя. На рис. 7 дана индикатриса силы излучения вертолета в горизонтальной плоскости. Комментарии к представленным результатам выходят за рамки данного сообщения.

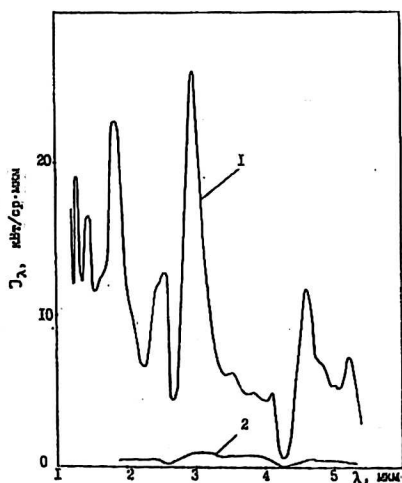


Рис. 6. Спектры излучения форсажной (1) и бесфорсажной (2) струй самолета-истребителя

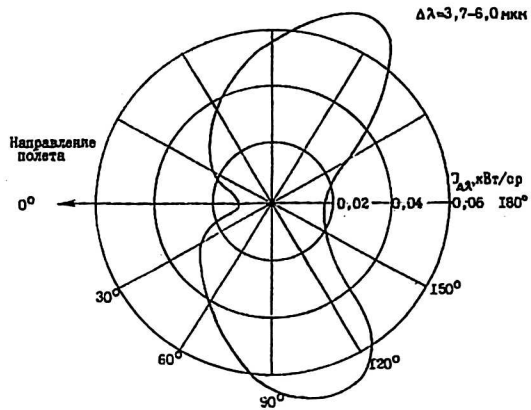


Рис. 7. Индикатриса силы излучения вертолета

В заключение следует отметить, что с помощью спектрометров типа БРС-6 и телерадиометров типа ИБР, установленных на летающих лабораториях, были подробно изучены процессы излучения факелов нескольких типов баллистических и оперативно-тактических ракет, двигательные установки которых работали на различных видах топлива, а также характеристики ИК-излучения объектов авиационной техники в условиях, соответствующих их боевому применению.

Л и т е р а т у р а

1. Курбатов Л. Н. Очерк истории приемников ИК-излучения на основе халькогенидов свинца//Вопр. оборон. техники. Сер. 11. 1996. Вып. 1(148)—2(149). С. 3—29.
2. Лотошников Ю. М., Журавлева Ю. Н. История создания отечественных летающих лабораторий, предназначенных для исследования характеристик ИК-излучения факелов баллистических ракет//Прикладная физика, 1999. № 1. С. 15—25.
3. Тарасов К. И. Спектральные приборы. — Л.: Машиностроение, 1968. — 387 с.
4. Арефьев А. В., Журавлева Ю. Н. и др. Сканирующий спектрометр//Оптико-механическая пром-сть. 1971. № 7. С. 70.
5. Шоль Ж., Марфан И. и др. Приемники инфракрасного излучения. — М.: Мир, 1969. — 282 с.
6. Бушуева Е. А., Лотошников Ю. М. и др. Телерадиометр//Оптико-механическая пром-сть. 1971. № 8. С. 68.
7. Катус Г. П. Информационные сканирующие системы. — М.: Машиностроение, 1965. — 445 с.

Special high-speed spectrometers and teleradiometers with semiconductor detectors

Yu. M. Lotoshnikov, Yu. N. Zhuravlyeva
State Scientific Centre «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

Reasons of necessity of development of special high-speed spectrometers and teleradiometers with semiconductor detectors provided for researching spectroenergetic characteristics of optical radiation of flying vehicles and missile flames in natural conditions are given. Optical circuits and design peculiarities of high-speed diffraction spectrometers of BRS-6-type and teleradiometers of IBR-type developed and produced in SSC «RD&P Centre "Orion"» are presented. A brief description of two flying laboratories equipped by BRS and IBR devices and used for investigation of IR-radiation of aircrafts, helicopters, thermal traps (flying laboratory AN-12) ballistic missile flames (flying laboratory TU-16) is given.