

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

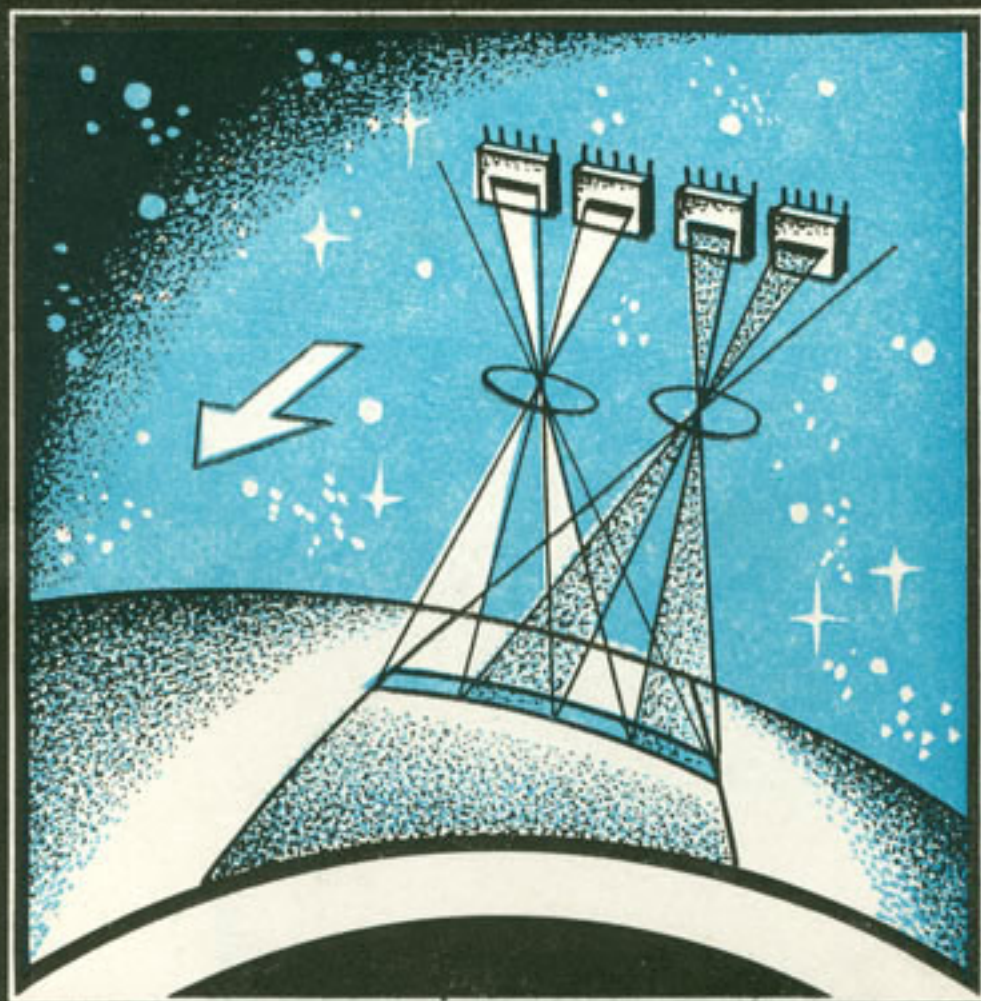
ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1987/8

Ф.С.Ортенберг

МЕТОДЫ ИНФРАКРАСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ
8/1987

Издается ежемесячно с 1971 г.

Ф. С. Ортенберг,
кандидат физико-математических наук

МЕТОДЫ ИНФРАКРАСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

в приложении этого номера:

ХРОНИКА КОСМОНАВТИКИ



Издательство «Знание» Москва 1987

ББК 39.6

О-70

Ортенберг Ф. С.

О-70 Методы инфракрасного зондирования Земли из космоса. – М.: Знание, 1987. – 64 с, ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 8).

Инфракрасные методы дистанционного зондирования Земли с борта космических аппаратов находят все более широкое применение в науке и народном хозяйстве. В брошюре изложены основные закономерности теплового излучения Земли, предпринята попытка объяснить для широкой читательской аудитории принцип действия бортовой инфракрасной аппаратуры, физические основы ее конструирования, описаны последние достижения в области оптики, физики твердого тела, обеспечившие прогресс космического приборостроения в инфракрасном диапазоне спектра.

Брошюра рассчитана на всех интересующихся современными проблемами космонавтики.

3500000000

ББК 39.6

© Издательство «Знание», 1987 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Задачи космического дистанционного зондирования	5
Основные закономерности инфракрасного излучения нагретых тел	7
Тепловое излучение Земли – источник уникальной информации	9
Человеческое и космическое зрение	13
Системы сканирования земной поверхности	16
Оптическая схема радиометра	21
Способы регистрации инфракрасного излучения	27
Характеристики приемников излучения	32
Приборы с зарядовой связью	36
Охлаждение приемников излучения	42
Характеристики инфракрасной аппаратуры дистанционного зондирования	50
Заключение	58
ХРОНИКА КОСМОНАВТИКИ	61

ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасное излучение, открытое в прошлом веке, долгое время служило объектом лишь теоретических и лабораторных исследований, и только сравнительно недавно научные достижения, особенно в области физики твердого тела, подняли уровень информационной техники настолько, что это позволило применять ее в различных областях народного хозяйства. Причем существенный прогресс в этом направлении в значительной мере обусловлен широким использованием инфракрасной аппаратуры в космических исследованиях. Созданные и создаваемые космические средства, предназначенные для решения задач метеорологии, прогноза погоды и климата, изучения природных ресурсов Земли и контроля за состоянием окружающей среды, отличаются глобальностью и оперативностью наблюдений, высокой экономической эффективностью.

Инфракрасный диапазон спектра признан специалистами одним из наиболее важных для геологии, лесного хозяйства, водных ресурсов, агротехники, поскольку почва, растительность, вода, атмосфера и другие объекты на поверхности Земли и над ней обладают своеобразными оптическими свойствами в инфракрасной области спектра. Однако, несмотря на высокую информативность инфракрасных интервалов спектра, особенно в области «окон прозрачности» атмосферы, главным источником информации космического земледования является видимая область спектра, в то время как съемка в инфракрасных лучах только начинает прокладывать себе дорогу.

Последнее связано с тем, что ранее отсутствовала элементная база, необходимая для выпуска инфракрасной аппаратуры, способной обеспечить достаточно жесткие требования к точности измерений энергетической яркости, пространственно-временной разрешающей способности, обзорности. Разработанные в последние десятилетия средства и системы получения информации в инфракрасном диапазоне, использующие прогрессивные физические принципы и технические достижения, начинают все шире применяться в прикладной космонавтике.

Существует большое количество книг, посвященных применениям космической информации при решении задач, связанных с рациональным использованием природных ресурсов Земли и охраной природы. В то же время вопросы разработки самих космических средств для получения информации, трудности, возникающие при создании подобной аппаратуры, освещены в литературе недостаточно. Если проблемы применения космической информации в хозяйстве, научных исследованиях широко популяризируются, то описанию современных космических приборов уделяется существенно меньше внимания.

В брошюре предпринята попытка восполнить этот пробел. В ней рассказано о том, как возникают космические изображения, какие метаморфозы претерпевает уходящее от Земли излучение на борту космического аппарата, прежде чем информация, полученная в инфракрасном диапазоне, ляжет на стол потребителя для обработки и использования. Причем речь здесь будет идти не о каких-либо

конкретных приборах, а об общих закономерностях построения бортовой инфракрасной аппаратуры, о принципе ее действия.

На первый взгляд в таком устройстве все очень просто: оптическая система формирует изображение, приемник излучения преобразует приходящий поток излучения в электрический сигнал, который обрабатывается электронными блоками и передается на Землю радиотехническими системами. В действительности такое разделение труда осложнено весьма запутанными отношениями между составными частями аппаратуры. Настоящая брошюра посвящена описанию свойств и взаимодействию между собой основных «кирпичиков», из которых состоит инфракрасный съемочный аппарат.

ЗАДАЧИ КОСМИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Чем разнообразнее методы исследования, тем глубже можно проникнуть в сущность явления, причем для формирования базы знаний о Земле, ее состоянии и процессах очень плодотворным является метод наблюдения и описания Земли, проводимый «со стороны», а не на ее поверхности. В пионерских работах по изучению лика Земли с воздуха предлагалось взглянуть на «знакомые сцены» под другим углом зрения – с высоты.

Началом отсчета для этих работ можно считать фотографирование французами окрестностей Парижа с гондолы воздушного шара, проведенное в 1859 г. Наблюдение земной поверхности с высот полета аэростатов, самолетов, ракет не с помощью невооруженного глаза, а с помощью приборов внесло большой вклад в понимание динамики атмосферы, океанов, растительного покрова, открыло новые перспективы в изучении земной коры. В дальнейшем аэрофотоснимки, а с началом космической эры съемочные работы на космической орбите превратились в ценный метод решения практических задач.

Однако, несмотря на огромные успехи в области дистанционного зондирования, его использование еще не вышло из младенческой стадии. Почти во всех областях масштабы его внедрения намного уступают контактным наблюдениям. Дистанционное зондирование переживает период своего становления. Главными сдерживающими факторами здесь являются сложность соответствующей аппаратуры космического базирования и трудности интерпретации получаемых результатов.

Дело в том, что космическая техника дистанционного зондирования Земли впитала в себя принципиально новые идеи в таких разных областях знаний, как твердотельная электроника, распознавание образов, связь, вычислительная техника, и др. Без использования этих достижений было бы невозможно создать такое совершенное «зрительное» устройство, каким является аппаратура дистанционного зондирования. Трудности разработки подобной аппаратуры связаны также с тем, что для решения многочисленных исследовательских и прикладных задач – от поиска ископаемых до динамики растительного покрова и оценки продуктивности океана – используются изображения, получаемые с орбитальных космических аппаратов в широкой области электромагнитного спектра.

На рис. 1 представлен весь спектр электромагнитного излучения, условно разбитый на поддиапазоны в зависимости от длины волны и энергии фотона. Если двигаться снизу вверх от гамма- и рентгеновских лучей с очень короткими длинами волн или с высокой энергией фотонов, то мы достигнем в конце концов длинных радиоволн с очень низкой энергией фотонов. При всех своих различиях они глубоко едины по природе: солнечный свет, тепло, радиоволны, рентгеновские лучи представляют собой электромагнитное излучение. Эти излучения в каждом из диапазонов могут содержать в себе полезную информацию об окружающем пространстве. Поэтому при космическом дистанционном зондировании желательно регистрировать все виды излучений. На рис. 1

приведены основные методы дистанционного зондирования окружающей среды, использующиеся в настоящее время. Возможность изучать процессы, недоступные зрительному восприятию, способствует лучшему пониманию природных явлений.

Спектральные диапазоны	Энергия фотона, эВ	Длина волны, м	Основные методы дистанционного зондирования окружающей среды	
Звуковой	10^{-12}	10^6	1000 км	
	10^{-11}	10^5		
	10^{-10}	10^4		
Радиоволновой	10^{-9}	10^3	1 км	Электромагнитное зондирование
	10^{-8}	10^2		
	10^{-7}	10^1		
	10^{-6}	1		
Микроволновой	10^{-5}	10^{-1}	1 м	Пассивная микроволновая радиометрия, радиолокационное изображение
	10^{-4}	10^{-2}		
	10^{-3}	10^{-3}	1 мм	Радиометрия, спектрометрия, термография
	10^{-2}	10^{-4}		
Инфракрасный	10^{-1}	10^{-5}		
	1	10^{-6}	1 мкм	Изображение, камеры, эмульсионные пленки, многоспектральная фотосъемка
Видимый свет	10^1	10^{-7}		
	10^2	10^{-8}		
Ультрафиолетовый	10^3	10^{-9}	1 нм	Рентгеновское изображение
	10^4	10^{-10}		
	10^5	10^{-11}		
Рентгеновские „жесткие“ „мягкие“ гамма-лучи				Счетчики гамма-лучей, гамма-лучевая спектрометрия

Рис. 1. Спектр электромагнитного излучения

В этой брошюре рассмотрены только методы дистанционного зондирования Земли из космоса в инфракрасном диапазоне. Однако прежде чем перейти к описанию устройств, позволяющих «увидеть» в невидимых лучах, напомним основные законы излучения нагретых тел и рассмотрим некоторые особенности теплового излучения Земли.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАГРЕТЫХ ТЕЛ

Истоки научной гипотезы о существовании невидимых тепловых лучей можно отыскать в представлениях наших далеких предков. Например, древние атомисты развивали фантастическое воззрение о «слепках» с предметов, летящих во всех направлениях и попадающих в глаз, создавая зрительное изображение. По Эпикуру, от светящихся тел постоянно отделяются тончайшие пленки, в точности сохраняющие рельеф и особенности тела. В сочинении «О природе вещей» римского философа Тита Лукреция Кара, жившего еще до нашей эры, есть такие строки:

Может быть, также небес светильник розовый – Солнце
Множеством жарких огней обладает, невидимых нами,
Что окружает его совершенно без всякого блеска,
Лишь умножая своей теплотой его силу.

На таком философском поэтическом уровне представления об излучении оставались в основном вплоть до XVII в., когда эксперимент стал составной частью науки. Понадобилось более полутора тысячелетий, чтобы ученые пришли к мысли о том, что каждое тело постоянно излучает теплоту и получает теплоту от окружающих его тел.

Честь открытия инфракрасных лучей принадлежит выдающемуся ученому В. Гершелю. В 1800 г. В. Гершель провел серию опытов, чтобы выяснить, какой нагревающей способностью обладают различные участки солнечного спектра, получаемые разложением в стеклянной призме. В качестве приемника он использовал ртутный термометр с зачерненным концом, который можно было передвигать вдоль спектра.

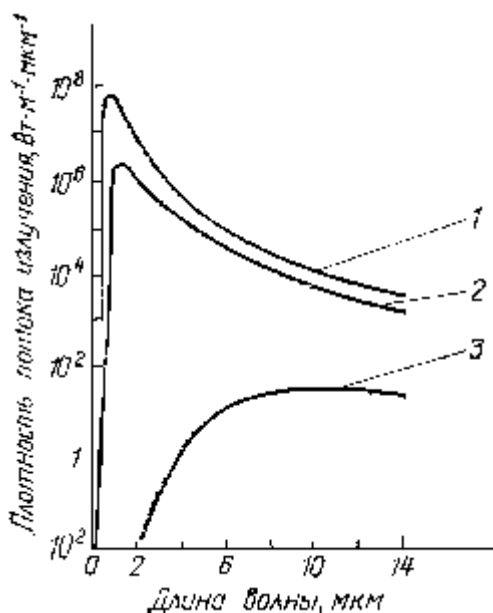


Рис. 2. Идеализированные спектральные распределения при температурах Солнца (1), электрической лампочки (2) и Земли (3)

Оказалось, что за красным краем видимого солнечного спектра термометр нагревался даже сильнее, чем на видимом глазом участке. Опыт, в результате которого произошло открытие инфракрасного (этот термин был введен позднее В. Абнеем) излучения, явился логическим продолжением его оптических и астрономических исследований. В. Гершель показал, что это излучение отражается и преломляется согласно законам оптики, и высказал мысль, что «лучистая теплота идентична со светом».

Инфракрасное излучение так же, как и видимый свет, испускается всеми телами при любых температурах, отличных от абсолютного нуля. При этом излучение и поглощение электромагнитных волн происходят порциями – фотонами.

Энергии фотонов инфракрасного излучения, выраженные в электронвольтах, приведены на рис. 1. Суммарный поток такого излучения пропорционален площади излучающей поверхности и четвертой степени температуры. Для иллюстрации сказанного на рис. 2 показаны идеализированные спектральные распределения излучения нескольких естественных источников: Солнца ($T = 5900$ К), лампы накаливания ($T = 2854$ К) и Земли ($T = 300$ К).

Все эти закономерности излучения приведены для идеализированного излучения абсолютно черного тела, поверхность которого испускает и поглощает максимально возможный при данной температуре поток излучения. В связи с тем что свойства реальных поверхностей иные, чем у абсолютно черного тела, их распределения излучения по спектру также различаются. Отношение энергетической яркости реального излучателя к яркости абсолютно черного тела при той же температуре для данной длины волны называется спектральным коэффициентом излучения (он зависит от материала, температуры, состояния излучающей поверхности, степени ее окисления, шероховатости).

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗЕМЛИ – ИСТОЧНИК УНИКАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Излучение Земли в общем случае складывается из собственного излучения подстилающей земной поверхности, слоя атмосферы, а также излучения небесных тел (Солнца, Луны, звезд), отраженного от земной поверхности и атмосферы. Излучение системы Земля – атмосфера зависит от температуры и характера земной поверхности, состава атмосферы и распределения поглощающего вещества в ней, наличия и состояния облачности. Вкладом незначительной облученности, создаваемой Луной, планетами, звездами, по сравнению с солнечной пренебрегают.

В области длин волн короче 2,5 мкм для дистанционных измерений используется отраженный солнечный свет, в том числе содержащееся в спектре Солнца инфракрасное излучение. В области длин волн от 3 до 5 мкм энергия уходящего в космос излучения складывается из отраженного солнечного излучения и испускаемой тепловой энергии, при больших же длинах волн практически вся уходящая энергия получается за счет собственного излучения Земли.

Излучение в инфракрасном диапазоне может быть использовано, во-первых, для измерения температуры, во-вторых, для различения земных объектов по их излучательной способности. В первую область применения входит обнаружение участков с резко отличной от фона температурой (например, геотермальных источников, лесных пожаров), а также измерение температуры морской поверхности. Тепловая съемка позволяет наблюдать облачные образования, имеющие по сравнению с земной поверхностью более низкую температуру. Только благодаря этому у метеорологии появилась возможность следить за перемещением облачных масс не только днем на освещенной части Земли, но и ночью на теневой ее стороне.

Именно круглосуточное обеспечение спутниковой инфракрасной информацией о динамике движения атмосферы и облачного покрова позволило в последние годы добиться больших успехов в повышении точности краткосрочных прогнозов погоды.

Во вторую область применения входит изучение горных пород по влиянию их состава на излучение. Поскольку поверхность Земли не является абсолютно черным телом, то поток излучения будет зависеть не только от температуры, но и от спектрального коэффициента излучения того участка земной поверхности, с которого поступает излучение. Иными словами, величина потока излучения в инфракрасном диапазоне будет определяться физико-химическими свойствами поверхности в данном месте Земли. На рис. 3 представлены распределения по спектру излучения типичных земных образований и абсолютно черного тела при температуре около 300 К.

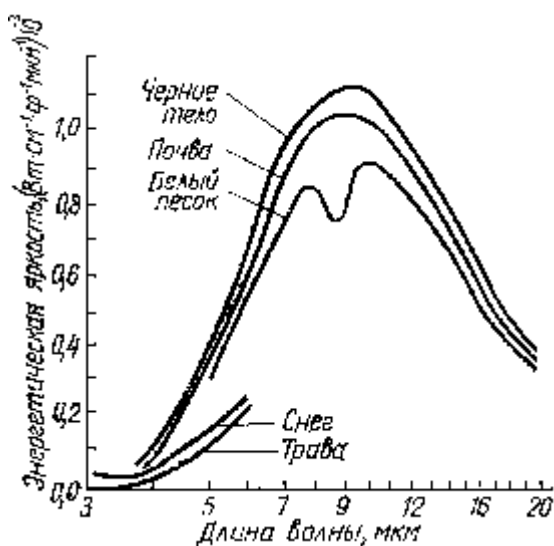


Рис. 3. Яркость земных образований при температуре около 300 К

Снижение потока излучения от снега, почвы, белого песка, травы по сравнению с излучением абсолютно черного тела при той же температуре обусловлено значением спектрального коэффициента излучения для этих земных объектов. Провал на кривой рис. 3 для песка при длине волны 9 мкм является следствием уменьшения коэффициента излучения песка на этой длине волны. Для ряда земных пород характерные минимумы коэффициента излучения отмечаются при других совершенно определенных длинах волн. По положению минимумов в тепловом излучении различных пород можно осуществить их отождествление. Изучая тепловое уходящее от Земли излучение, можно использовать указанный и другие отличительные признаки для картирования изменений химического и минерального состава силикатов.

Особенности физических процессов, используемых при различении и отождествлении минералов, связаны с инерционностью процессов теплопередачи. На формирование картины, наблюдаемой в инфракрасных лучах, влияют скорости нагревания и охлаждения различных участков земной поверхности. В дневное время сильнее нагреваются объекты с наименьшей тепловой инерцией, ночью же, наоборот, более теплыми становятся объекты с максимальной тепловой инерцией. Иными словами, с увеличением тепловой инерции природного или искусственного объекта он медленнее нагревается и медленнее остывает.

Это обстоятельство приводит к тому, что 2 раза в сутки – вечером после захода Солнца и утром вскоре после восхода – происходит инверсия контраста земных объектов с различной тепловой инерцией. В момент инверсии контрасты равны нулю, а затем быстро возрастают. Таким образом, по характеру изменения контрастов на тепловых изображениях, получаемых периодически в течение суток, можно определить распределение пород минералов на земной поверхности и на некоторой глубине от нее, т. е. тепловая съемка позволяет видеть Землю, как говорится, насквозь. Отметим, что эффективность тепловой съемки как метода отождествления горных пород, почв, минералов и материалов по их тепловой инерции весьма высока.

Изучение земной поверхности посредством регистрации испускаемого электромагнитного излучения сильно осложняется влиянием атмосферы, рассеивающей и поглощающей уходящее излучение своими естественными молекулярными компонентами. Поглощение в атмосферных газах определяется в основном поглощением в водяном паре, углекислом газе и озоне; меньший вклад дают метан, окись углерода и другие малые примеси. На рис. 4 стрелочками отмечены длины волн, на которых атмосферные молекулы наиболее сильно поглощают инфракрасное излучение. Суммарное поглощение всеми газами делает атмосферу во многих участках спектра совершенно непрозрачной.

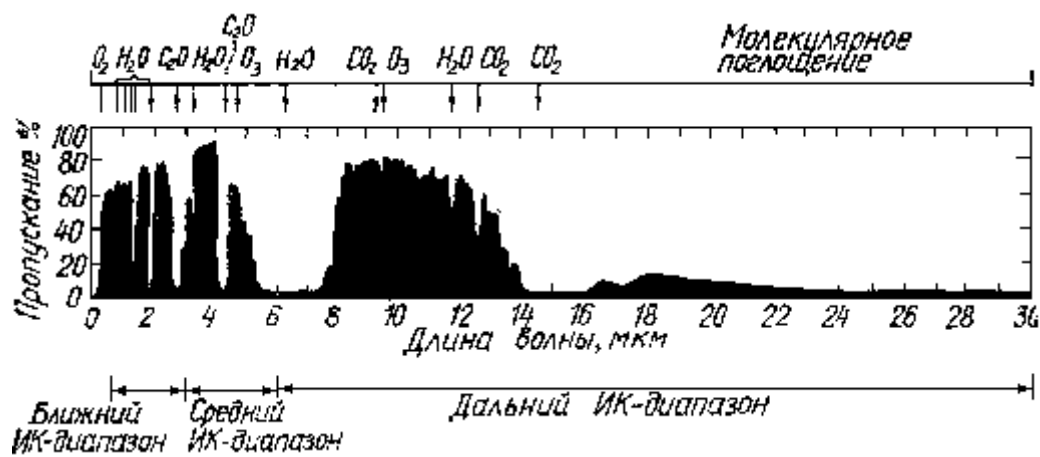


Рис. 4. Пропускание излучения земной атмосферой

Наблюдение за поверхностью Земли следует вести в атмосферных «окнах прозрачности», зачерненных на рис. 4. Наилучшее пропускание атмосферы отмечается в видимом и инфракрасном диапазонах, приходящихся на максимум излучения Солнца и Земли. Как известно, природа приспособила к «окну прозрачности» в видимом участке спектра человеческий глаз.

«Окно прозрачности» в инфракрасном интервале длин волн 8 – 14 мкм позволяет наблюдать собственное излучение Земли с помощью внеземных средств. Атмосфера предоставила режим наибольшего благоприятствования для прохождения земных инфракрасных лучей в спектральном диапазоне, где их поток максимален. Это можно считать дополнительным аргументом в пользу необходимости разрабатывать инфракрасные методы дистанционного зондирования Земли. «Атмосферное окно» между длинами волн 3,5 и 4,0 мкм также пригодно для наблюдения земной поверхности, но только ночью, когда собственное излучение Земли не искажено отраженным солнечным излучением.

Явления рассеяния и поглощения инфракрасного излучения атмосферой рассматриваются в качестве помех, когда мы хотим измерить температуру или состав земной поверхности. При таких измерениях, естественно, необходимо исключить наблюдения участков поверхности, закрытых облаками. Однако в принципе эти эффекты являются средством для изучения свойств самой атмосферы. В частности, при измерении инфракрасной радиации от облаков

можно определить их температуру. Поглощающие излучение земной поверхности атмосферные газы сами являются источниками излучения. Причем интенсивность излучения во всей толще атмосферы зависит от концентрации этих молекул и их температуры.

Таким образом, интенсивность излучения Земли после прохождения атмосферы в спектральных областях непрозрачности атмосферы содержит информацию о вертикальном распределении температуры и концентрации излучающих составляющих атмосферы.

Приведенный краткий перечень физических явлений на поверхности Земли и в ее атмосфере показывает, что инфракрасное излучение Земли несет в себе исключительно ценную незаурядную информацию о Земле, которую мы не можем получить, находясь на Земле или в ее атмосфере.

Для получения такой информации необходимо создание аппаратуры, пригодной для установки на борту космического аппарата и способной непрерывно регистрировать инфракрасное излучение Земли в пространстве и во времени. Иными словами, требуется создать устройство бортового инфракрасного зрения. Рассмотрим теперь, как устроен такой, образно говоря, космический инфракрасный глаз.

ЧЕЛОВЕЧЕСКОЕ И КОСМИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

Перед зрительной системой человека, достигшей поразительного совершенства в ходе естественной эволюции, и современным «электронным глазом», устанавливаемым на космическом аппарате для наблюдения Земли, стоят одинаковые конечные цели. Чувствительность, компактность, долговечность, приспособляемость зрения вызывают восхищение, в зрительном процессе «считывается» каждый поглощенный фотон. Человеческое зрение, безусловно, можно считать прототипом большинства электронных систем приема и усиления световых сигналов, в том числе инфракрасных.

Предел разрешающей пространственной чувствительности глаза удобно измерять в угловых единицах – миллирадианах (мрад), он составляет примерно 3,6 мрад. Если умножить расстояние до предмета в километрах на угловое разрешение в миллирадианах, то получим оценку для размера разрешаемой глазом детали в метрах. Например, на горизонте (расстояние около 4 км) при разрешающей способности глаза примерно 1 мрад можно выделить предметы размером 4 м. Когда говорят о предельной остроте человеческого зрения, в качестве примера приводят способность астронома-любителя различать без всяких затруднений простым глазом компоненты двойной звезды α Козерога, расположенные на расстоянии 6', звездные величины которых составляют 3,8 и 4,5^m.

Адаптация зрительной системы животных к конкретным условиям их жизни дает нам примеры еще более тонкой структуры сетчатки. У высоколетающего ястреба при ярком дневном освещении для поиска полевой мыши разрешение зрительной системы обеспечивает большую детальность зрительного образа. Вместе с тем у ночных животных (например, у лемура) при низких уровнях освещенности зрительные образы крупнозернисты, а структура сетчатки состоит из сравнительно больших по размеру светочувствительных элементов. Не вдаваясь в подробности, отметим, что эта связь между величиной потока излучения, поступающего на чувствительный элемент, и разрешающей способностью зрительной системы носит достаточно общий характер и в дальнейшем будет рассмотрена применительно к аналогичным электронным устройствам.

Отметим существенное отличие между зрительным процессом человека и работой эквивалентной электронной системы, состоящее в том, что все элементы сетчатки одновременно передают оптическую информацию в мозг, в то время как приемник излучения преобразует просматриваемое поле излучения в электрический сигнал последовательно элемент за элементом. Непрерывное упорядоченное поэлементное просматривание пространства называется сканированием. Бортовое оптико-электронное сканирующее устройство формирует изображение земной поверхности путем последовательного просмотра площадок на местности.

Система объектив – приемник характеризуется полем зрения, в пределах которого воспринимается излучение от Земли в каждый момент времени. Угловая мера поля зрения определяется отношением размера чувствительной площадки приемника к фокусному расстоянию объектива. В сканирующих системах угол α

называется мгновенным углом поля зрения. Таким узким мгновенным углом поля зрения осуществляется просмотр полосы на местности. Подобно зрительной системе, в которой геометрический предел разрешающей способности определяется углом поля зрения отдельных палочек и колбочек сетчатки, разрешение на местности бортовой сканирующей аппаратуры определяется мгновенным углом поля зрения.

Для оценки величины элемента разрешения на земной поверхности примем, что для космического аппарата, летящего в заоблачной выси, например, на высоте 1000 км над поверхностью Земли, мгновенный угол поля зрения аппаратуры составляет, как и для глаза, 1 мрад. Тогда, как мы знаем, пространственное разрешение на поверхности Земли будет равно $1000 \text{ км} \times 1 \text{ мрад} = 1000 \text{ м}$. Если для решения многих задач метеорологии этот уровень является приемлемым, то для исследования природных ресурсов и охраны окружающей среды необходима информация о наземных объектах размером в несколько сотен и даже десятков метров.

Таким образом, необходимость дистанционного зондирования предъявляет к аппаратуре космического базирования требования по разрешению, превосходящие параметры зрительной системы человека.

Несмотря на высокое совершенство зрительного процесса человека, в живой природе известны более чувствительные зрительные аппараты, достигшие квантового предела, т. е. использующие почти каждый падающий фотон. Обитающие в темных глубинах океана рыбы формируют изображение на основе скудного лучистого потока. Выражение «видит, как кошка» означает, что зрительная чувствительность домашней кошки в ночных похождениях значительно превышает нашу собственную. В зависимости от условий существования зрительные системы животных в процессе эволюции достигли той или иной степени совершенства. Поэтому можно не опасаться, что мы придем в противоречие с законами природы, поставив задачу спроектировать космическую зрительную систему в некотором смысле более совершенную, чем человеческая.

СИСТЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Просмотр земной поверхности мгновенным полем зрения может осуществляться вращением всего космического аппарата или вращением корпуса всей оптической системы относительно космического аппарата. Однако наибольшее распространение в сканирующих радиометрах получили оптические схемы при неподвижных корпусах спутника и радиометра. В этом случае сканирование осуществляется движением головного зеркала, например плоского зеркала, расположенного под углом 45° к оси вращения двигателя (рис. 5, а).

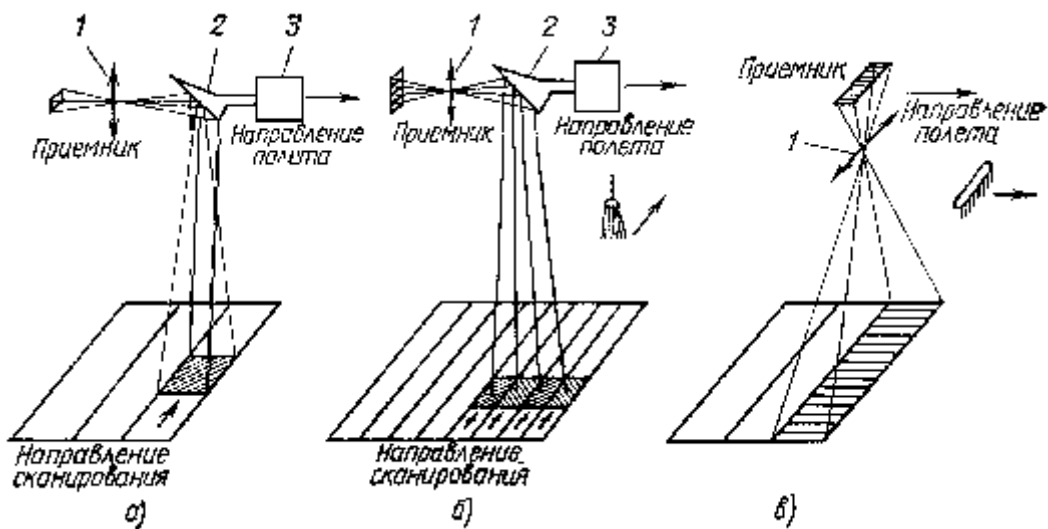


Рис. 5. Схемы сканирования земной поверхности:
а – одноплощадочный приемник; б – сканирование «метелкой»; в – сканирование «щеткой»; 1 – оптическая система; 2 – сканирующее зеркало; 3 – привод

Объяснение принципа работы аппаратуры станет более наглядным, если обратить задачу, представив себе, что в фокусе объектива вместо приемника находится излучатель, скажем, лампочка накаливания. Тогда мы получим осветительный прибор, в котором направление прожекторного луча после отражения от зеркала будет перпендикулярно оптической оси системы. При вращении зеркала прожекторный луч также будет вращаться, оставаясь в плоскости, перпендикулярной оптической оси. В процессе этого вращения световой «зайчик» будет пробегать по поверхности Земли, а затем по внутренним элементам конструкции аппаратуры.

Если вернуться теперь к исходной схеме, предназначенной для регистрации излучения Земли, то становится очевидным, что, вращаясь, зеркало будет последовательно отражать на приемник излучение Земли и внутренней полости прибора. При движении спутника по орбите подспутниковая точка будет оставлять на поверхности Земли воображаемый след орбиты. Если совместить

оптическую ось аппаратуры с направлением полета, то зеркало обеспечит вращение мгновенного поля зрения в плоскости, перпендикулярной направлению полета. В результате при каждом обороте зеркала будет просматриваться полоска на поверхности Земли, расположенная перпендикулярно следу орбиты (рис. 6). Пространственный угол с вершиной в центре входного отверстия аппаратуры, образуемый направлениями на крайние точки полосы, просматриваемой на поверхности Земли, определяет поле обзора и характеризует полосу захвата аппаратуры на местности.

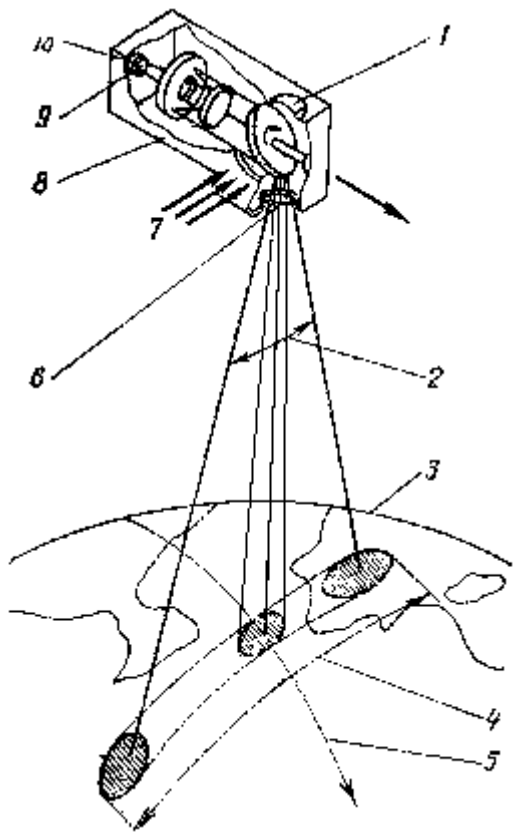


Рис. 6. Принцип работы сканирующего радиометра:
1 – нагреватель; 2 – угол обзора Ω ; 3 – лимб Земли; 4 – ширина полосы захвата; 5 – след орбиты; 6 – диаметр входного зрачка d ; 7 – космическое излучение; 8 – космический аппарат; 9 – фильтр; 10 – приемник

По аналогии с телевизионной терминологией просмотр полосы местности путем механического сканирования называют строчной разверткой, а само изображение полосы – строкой. При поступательном движении спутника строка, просматриваемая при следующем обороте зеркала, будет расположена на местности рядом с первой строкой. Получение изображения за счет сложения отдельных строк по мере перемещения спутника подобно формированию телевизионного изображения при кадровой развертке строк. Сканирование в космических радиометрах обычно осуществляется либо путем вращения зеркала вокруг оси симметрии, либо колебанием вокруг этой оси вправо и влево от направления на подспутниковую точку.

Частота вращения или колебания и мгновенный угол зрения выбираются с таким расчетом, чтобы обеспечить просмотр местности без пропусков между строками и без наложения строки на строку. Приемник в аппаратуре преобразует излучение элементов ландшафтов в электрические сигналы строка за строкой непрерывно в процессе движения по орбите, т. е. изображение получается за счет комбинации двух движений во взаимно перпендикулярных направлениях – движения спутника по орбите и поперечного механического сканирования.

Отметим, что чувствительный элемент приемника может иметь как прямоугольную (см. рис. 5, а), так и круглую форму (см. рис. 6). В последнее время широкое распространение получили приемники, состоящие из нескольких чувствительных элементов, размещенных на одной плоскости. Как правило, отдельные чувствительные площадки прямоугольной формы в таком приемнике располагают в ряд как можно ближе друг к другу.

Какие же преимущества может обеспечить линейка из приемников при создании сканирующей аппаратуры? Оказывается, что размещение линейки из приемников излучения в фокальной плоскости объектива вместо одноплощадочного приемника существенно повышает пространственное разрешение аппаратуры. На рис. 5, б была показана линейка из чувствительных площадок, ориентированная в плоскости орбиты и обеспечивающая просмотр сканирующим зеркалом одновременно нескольких полос поперек трассы. Этот метод просмотра Земли можно назвать сканированием «метелкой», поскольку происходит как бы «подметание» земной поверхности группой строк при одном обороте сканирующего зеркала. За счет орбитального смещения спутника следующий взмах «метелки» будет расположен на поверхности Земли рядом с предыдущим.

Изложенные выше принципы развертки поверхности Земли с помощью головного сканирующего зеркала лежат в основе большинства космических радиометров и называются сканерами с разверткой в плоскости предмета или объекта съемки. При этом объектив системы собирает излучение на приемник малых размеров, расположенный в фокусе объектива.

Как известно, настоящим бичом для оптических приборов является абберрация, состоящая в том, что лучи, идущие из одной какой-нибудь точки предмета, после выхода из оптической системы собираются не строго в точку, а в небольшую фигуру рассеяния. Абберрации увеличивают рассеяние лучей, происходящее по законам геометрической оптики, перераспределяют энергию в плоскости изображения, давая некоторое сгущение в центре с уменьшением освещенности на краю, т. е. образуют так называемые кружки рассеяния. Пригодность оптических систем, формирующих изображение, для анализа малоразмерных деталей съемки ограничена размерами минимального кружка рассеяния. Площадь этого кружка определяет ту минимальную площадь, внутри которой могут быть замечены изменения в распределении потока излучения.

Существенно, что при удалении от оптической оси искажения за счет абберраций увеличиваются. Читатель, наверное, помнит, что мы определили, руководствуясь соображениями геометрической оптики, мгновенный угол поля зрения как отношение размера приемника к фокусному расстоянию оптической системы. При этом величину мгновенного угла поля зрения отождествляли с разрешающей

способностью аппаратуры. Представим себе теперь, что размер кружка рассеяния превышает размер приемника. Совершенно очевидно, что пространственное разрешение аппаратуры в этом случае будет определяться уже не размером приемника, а кружком рассеяния. Следовательно, оценку реальной разрешающей способности аппаратуры необходимо выполнять с учетом кружка рассеяния всей оптической системы.

Два любых точечных источника излучения могут быть разрешены только в том случае, когда расстояние между ними превышает размеры мгновенного угла зрения при условии, что размеры кружка рассеяния в плоскости изображения меньше размеров приемника излучения. Для рассмотренных способов съемки с разверткой зеркалом в плоскости объекта изображаемые сюжеты проецируются постоянно вблизи фокуса оптической системы. Как уже отмечалось, абберации минимальны именно вблизи фокуса. В связи с этим в схемах с головным сканирующим зеркалом проще обеспечить кружок рассеяния, не превышающий размер приемника излучения. Поэтому схемы со сканированием в плоскости объекта съемки практически легче реализуются и получили наибольшее распространение.

Однако можно отказаться от головного сканирующего плоского зеркала и просматривать изображение, создаваемое оптической системой в фокальной плоскости, одним или несколькими приемниками излучения. Такой способ сканирования называется разверткой в плоскости изображения (один из примеров осуществления схемы сканирования в плоскости изображения был приведен на рис. 5, в). Линейный массив маленьких приемников излучения располагается перпендикулярно направлению движения в фокальной плоскости объектива. Поперечное сканирование вдоль строки осуществляется считыванием электрических сигналов приемников линейки одним за другим от начала линейки до ее конца. Сканирование от строки к строке совершается, как и в предыдущих схемах, за счет орбитального смещения спутника.

Такой способ сканирования иногда называют щеточным, где «щетинки» от «щетки» представляют собой мгновенные поля зрения каждого приемника линейки, пробегающие по поверхности Земли всем своим рядом в процессе движения спутника, создавая изображение Земли в полосе, охватываемой полем обзора линейки. На максимальное число мгновенных углов зрения по ширине изображения накладываются ограничения, связанные с абберациями оптической системы, поскольку чем больше приемников в линейке, тем они будут располагаться все дальше от фокуса оптической системы, где искажения увеличиваются.

Разработка оптических систем, в особенности для инфракрасного диапазона спектра, в которых вредное влияние аббераций сведено к минимуму, представляет большие трудности. В связи с этим сканеры с разверткой в плоскости изображения не получили пока широкого распространения и применяются, когда требуется иметь сравнительно небольшое число мгновенных углов зрения на строке.

Логическим продолжением такой схемы является размещение двумерной матрицы приемников в фокальной плоскости. За термином «двухмерная матрица

приемников» стоит набор одинаковых прямоугольных чувствительных элементов, размещенных в одной плоскости, подобно клеткам шахматной доски. По принципу работы аппаратура с такой матрицей ближе всего к зрительному восприятию изображения сетчаткой глаза. Сканирование в радиометре осуществляется быстрым считыванием информации вдоль строки и от строки к строке в пределах матрицы.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА РАДИОМЕТРА

То, что человеческий глаз слеп в инфракрасном диапазоне спектра, как оказалось, имеет вескую причину: если бы человеческое зрение стало чувствительным к инфракрасным лучам, то мы не смогли бы вести наблюдение в видимом участке спектра. Дело в том, что окружающие нас предметы, как мы знаем, основную свою энергию при комнатной температуре излучают в инфракрасном диапазоне с максимумом вблизи длины волны 10 мкм, и в этом же диапазоне излучают внутренние стенки глаза. Плотность фотонов собственного излучения окружающих тел и полости глаза сравнима с плотностью фотонов, соответствующей яркому солнечному свету. А это означает, что глаз постоянно подсвечивался бы инфракрасным излучением с такой интенсивностью, что по сравнению с ним потухли бы Солнце и освещаемые им предметы. Человек видел бы только внутреннюю поверхность своего глаза и ничего больше, а это равносильно слепоте.

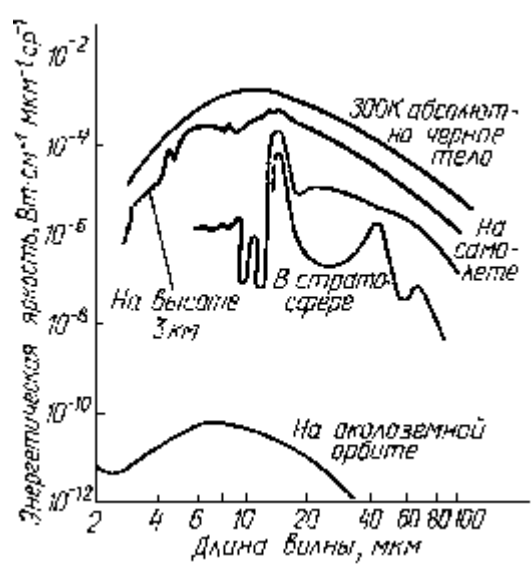


Рис. 7. Излучение окружающего фона для нескольких высот над поверхностью Земли

Значения энергетической яркости окружающего фона для нескольких высот над поверхностью Земли в инфракрасном диапазоне приведены на рис. 7. Как видно, вплоть до стратосферных высот абсолютно отсутствует темный фон, в то время как для видимого диапазона собственное излучение малонагретых окружающих тел практически отсутствует, и мы можем без помех наблюдать освещенные естественными или искусственными источниками предметы. Поэтому вполне целесообразно, что глаз не чувствителен в инфракрасном диапазоне.

Посмотрим, не возникнут ли в результате подобных рассуждений непреодолимые преграды при создании инфракрасной аппаратуры?

Как видно на рис. 7, инфракрасный фон на орбитальной высоте почти в миллион раз меньше потока излучения окружающего фона вблизи поверхности Земли. На рис. 8 для читателей, интересующихся природой этого космического фона в рассматриваемом нами диапазоне спектра, указаны наиболее яркие источники, создающие фон в не освещенной Солнцем части космического пространства. На этой же схеме для сравнения приведены спектральные распределения энергетической яркости для абсолютно черного тела при температурах 3 и 10 К. Учитывая, что вклад в излучение звездного неба от других астрономических тел на околоземных орбитах еще меньше, для практических целей принимают, что плотность потока излучения в космическом пространстве не превышает плотность потока излучения, соответствующую абсолютно черному телу при 10 К. Поскольку эта величина пренебрежимо мала по сравнению с излучением Земли, аппаратура космического зондирования наблюдает Землю на абсолютно черном фоне.

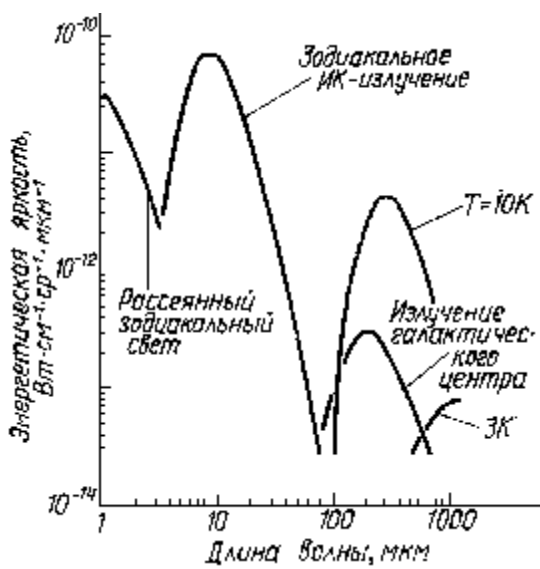


Рис. 8. Естественное фоновое излучение космического пространства

Наличие такого «нулевого» инфракрасного излучения позволяет значительно уменьшить влияние внутреннего фона на выходной сигнал инфракрасной аппаратуры. Излучение же не освещенной Солнцем части космического пространства можно использовать в качестве опорного излучателя, создающего начало отсчета для абсолютных измерений яркости Земли. Подобно тому как при взвешивании на разбалансированных весах вначале производится уравнивание чаш добавкой корректирующего груза на одну из сторон, устанавливающее стрелку весов в «нуль», а затем определяется масса неизвестного тела, в инфракрасной аппаратуре осуществляется коррекция «нуля» по излучению космоса, а затем уже измеряется земное поле излучения.

Простейший вариант такой калибровки был представлен на рис. 6. Через специальное окно в корпусе радиометра с помощью сканирующей системы излучение из космоса в определенный момент поступает на приемник, и этот сигнал является той корректирующей добавкой, которую необходимо вычитать из сигнала, приходящего от Земли при дальнейшем вращении зеркала. Иногда в

качестве опорного излучателя используют нагреватель с заданной и стабилизированной температурой.

Имеются и другие методы исключения фона и прецизионной регистрации полезного сигнала.

Отличительной особенностью бортовых инфракрасных радиометров является использование в них в качестве объектива телескопических зеркальных систем. Несмотря на то что в настоящее время разработано и выпускается большое количество материалов, прозрачных в инфракрасном диапазоне спектра (трехсернистый мышьяк, германий, кремний, йодистый и бромистый таллий, сульфид цинка и др.), пригодных для изготовления инфракрасных линзовых систем, в последнее время в силу ряда причин чаще применяются зеркальные системы в аппаратуре, предназначенной для измерения инфракрасного излучения от удаленных на большое расстояние объектов.

Простейшие методы геометрической оптики – древнейшей дисциплины, доведенной до высокой степени совершенства учеными еще в XVII – XVIII вв., позволили им разработать и создать уникальные зеркальные телескопы. Оптические схемы, предложенные ими, полностью заимствованы в наши дни разработчиками космической инфракрасной аппаратуры (рис. 9). Во всех трех приведенных зеркальных системах первичным зеркалом является параболоидный отражатель. В качестве вторичного зеркала, отклоняющего фокусируемые первичным зеркалом лучи, на поверхность приемника инфракрасного излучения, в системе Ньютона используется плоское зеркало, в системе Грегори – зеркало, представляющее часть поверхности эллипсоида, фокус которого совпадает с фокусом параболоидного отражателя, в системе Кассегрена – зеркало, представляющее собой часть поверхности гиперboloида.

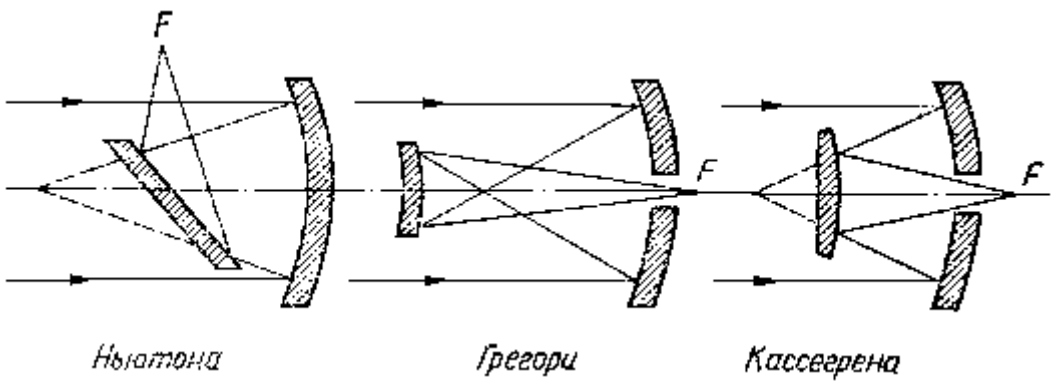


Рис. 9. Схемы зеркальных объективов

Наличие в этих системах вторичного зеркала вызывает неизбежное затенение (экранирование) части поверхности первичного зеркала, уменьшающее поток излучения, приходящий на приемник. Привлекательной чертой таких зеркальных систем является относительная легкость их изготовления даже для больших апертур. Однако в тех случаях, когда необходимо предельно высокое

геометрическое разрешение, диаметр объектива невелик и допустимы потери на пропускание оптических элементов, продолжают применять и линзовые инфракрасные системы.

Представление об оптической системе инфракрасного радиометра будет неполным, если не упомянуть об оптических фильтрах, которые являются обязательной деталью в таких приборах. Фильтры устанавливаются, как правило, перед приемником излучения, с их помощью формируется спектральная область пропускания аппаратуры. Наибольшее распространение в инфракрасных приборах получили поглощающие и интерференционные фильтры, отличающиеся по физическому принципу их взаимодействия с излучением. В поглощающих инфракрасных фильтрах используется явление поглощения излучения естественными материалами (германием, кремнием, кварцем, сапфиром и др.), стеклами, окрашенными специальными поглощающими красителями, пластмассами.

Окончательно спектральная область работы аппаратуры определяется не только пропусканием фильтра, но и спектральными характеристиками других оптических компонентов аппаратуры и свойствами приемника излучения.

В ряде задач дистанционного зондирования очень важно согласовать спектральную область работы аппаратуры с одним из «атмосферных окон». Оказывается, что для большинства малоконтрастных земных объектов с небольшими плавными температурными изменениями при температурах 20°C и ниже наилучшие результаты получаются в диапазоне длин волн 8 – 13 мкм. В то же время зоны геотермальной деятельности, активные и потухшие вулканы, лесные пожары, участки окисления сульфидных руд, пожары горючих полезных ископаемых, промышленные сооружения, различная техника при функционирующих источниках энергии и т. д. составляют группу объектов со значительными превышениями температур над земными фонами. Их регистрацию лучше производить в другом атмосферном «окне прозрачности» с длинами волн 3,5 – 4,0 мкм.

В реальных условиях съемки значительных площадей встречаются нормальные и аномальные, холодные и нагретые объекты и фоны. Оптимальным является использование многоканальной аппаратуры, принимающей инфракрасное излучение в нескольких спектральных зонах в пределах «окон пропускания». Такая аппаратура будет «смотреть в оба» – в оба инфракрасных «окна прозрачности».

Когда для задач космического землеведения необходима информация об излучении в очень узком спектральном диапазоне, применяют интерференционные фильтры, которые не поглощают, а отражают излучение нежелательных длин волн, пропуская на приемник излучение заданных длин волн. В качестве примера бортовой аппаратуры, в которой для выделения узких участков спектра применяются подобные интерференционные фильтры, приведем инфракрасные радиометры, предназначенные для работы не в «атмосферных окнах», а в полосах поглощения молекулярных составляющих земной атмосферы CO₂, H₂O, O₃ и др.

Поскольку поток излучения атмосферных газов зависит только от плотности и температуры данного газа на данной высоте, появляется возможность определять высотные профили температуры и концентрации газовых компонентов с помощью дистанционных измерений из космоса. Погрешность определения температур и концентрации будет тем меньше, чем больше будет проведено измерений при различных длинах волн в пределах полосы поглощения конкретного газа.

Например, измерение инфракрасного излучения с помощью спутника в области полосы поглощения CO_2 (около 15 мкм) в 10 узких спектральных интервалах шириной $\Delta\lambda$, менее 0,1 мкм позволяет вычислить распределение температуры атмосферы по высоте с достаточной для практических целей точностью. Определение же с помощью инфракрасной техники вертикального профиля атмосферных температур, концентраций излучающих компонентов в любой точке земного шара с цикличностью, недоступной другим средствам, играет важную роль в метеорологии.

Разумеется, в облике космического инфракрасного радиометра, построенного из описанных выше узлов и изображенного ранее на рис. 6 (с поясняющими его работу надписями), представлены лишь основные его черты. При проектировании конкретной аппаратуры в соответствии с заданными требованиями технические решения могут существенно отличаться от изложенных, в оптической схеме появятся вспомогательные элементы (модуляторы, конденсоры, призмы, расщепители лучей, световоды, диафрагмы, бленды, обтекатели и др.), обеспечивающие решение поставленной задачи.

Общим для всех этих систем является обязательное наличие в их составе приемника излучения. Создание приемников теплового излучения, отвечающих по конструктивным и физическим параметрам требованиям космической инфракрасной техники, вылилось в большую многоплановую проблему, решение которой продолжается по сей день.

Приступая к описанию технических характеристик приемников инфракрасного излучения, отметим, что последние появились только в текущем столетии и успехам в этой области мы обязаны не корифеям XVII – XIX вв., а нашим современникам, ученым и изобретателям, создавшим при жизни последних двух поколений людей высококачественные устройства для приема инфракрасного излучения.

СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Считают, что тепловые приемники в качестве тепlopеленгаторов использовались миллионы лет назад отдельными видами змей, которые, ощущая небольшую разницу в температуре жертвы и окружающей среды, могли обнаружить добычу. Живущие в настоящее время гадюки имеют особые углубления, содержащие чувствительные к инфракрасному излучению органы, и у удавов чувствительной к тепловому излучению является область вблизи челюстей. Установлено, что некоторые насекомые (достоверные сведения имеются об одной разновидности жуков) обладают способностью улавливать инфракрасное излучение. Иными словами, искусство регистрации инфракрасного излучения было освоено природой задолго до появления человека.

Приемники инфракрасного излучения являются, по существу, преобразователями энергии излучения в удобную для непосредственного измерения форму, например в электрический ток. Рассмотрим подробнее физические принципы, лежащие в основе приема, или, как говорят, детектирования инфракрасного излучения приемником.

По характеру взаимодействия электромагнитного излучения с чувствительным элементом приемники делят на две большие группы – тепловые и фотоэлектрические. В тепловых приемниках в результате поглощения излучения происходит его нагрев. Материал приемника выбран таким образом, чтобы это увеличение температуры привело к изменению свойств приемника, которое затем и воспринимается как выходной сигнал, обусловленный внешним облучением.

Известно несколько типов тепловых приемников: болометры, у которых при изменении температуры меняется электрическое сопротивление чувствительного элемента; термоэлементы, в которых возникает термоэлектродвижущая сила в цепи, состоящей из двух разнородных материалов, при нагревании места их спая; пироэлектрические приемники, в которых регистрируются приращения поверхностного заряда пироэлектрического материала при изменении его температуры в процессе нагрева излучением; оптико-акустические, в основе которых лежит свойство увеличения объема газа при повышении температуры.

В отличие от тепловых приемников, в которых нагрев материала поглощаемыми фотонами приводит к изменению измеряемых электрических свойств, в фотоприемниках имеет место прямое взаимодействие между падающими фотонами и электронами полупроводникового материала чувствительного элемента. Согласно представлениям зонной теории твердого тела уровни энергии, на которых могут находиться электроны атомов кристаллической решетки, образуют зоны (рис. 10, а). Наивысшая энергетическая зона, заполненная электронами, называется валентной. Следующую за ней дозволенную зону, которая может быть и не заполненной электронами, называют зоной проводимости. Между этими зонами расположен энергетический зазор, запрещенный для электронов квантовомеханическими законами.

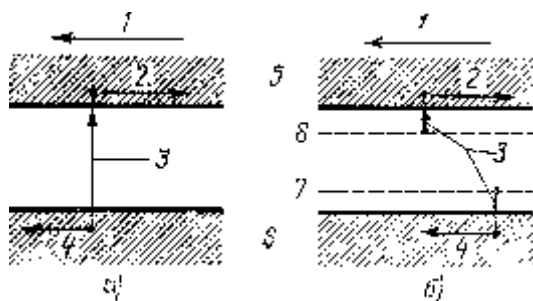


Рис. 10. Фотопроводимость собственная (а) и примесная (б):

1 – электрическое поле; 2 – электрон; 3 – фотовозбуждение; 4 – дырка; 5 – зона проводимости; в – валентная зона; 7 – акцепторный уровень; 8 – донорный уровень

Проводимость материала обеспечивается только электронами, находящимися в зоне проводимости. В полупроводнике ширина запрещенной зоны достаточно мала, так что даже при комнатной температуре энергия некоторых электронов из валентной зоны становится достаточной для их перехода через запрещенную зону в зону проводимости. Состояния, ранее занятые этими электронами, положительно заряжены и называются дырками. При наличии внешнего электрического поля электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне будут передвигаться в противоположных направлениях, обеспечивая проводимость полупроводника.

Описанный чистый безпримесный полупроводник называется полупроводником с собственной проводимостью. Падающие на него фотоны отдают энергию валентным электронам, которые переходят в зону проводимости и образуют электронно-дырочные пары, изменяющие проводимость. Используя это явление собственной фотопроводимости приемники излучения называются фотосопротивлениями. Фотосигнал с приемника будет наблюдаться в том случае, когда энергия фотона превышает ширину запрещенной зоны. Поскольку для освобождения носителей тока (электронов и дырок) требуется некоторая минимальная энергия, характерная для данного материала, каждый тип приемника имеет длинноволновую границу, за которой энергия фотона уже недостаточна для создания носителей тока.

Для идеальных фотоэлектрических приемников излучения сигнал будет возрастать с уменьшением длины волны падающего потока фотонов, энергия которого поддерживается постоянной. С увеличением длины волны энергия каждого фотона уменьшается и при некоторой длине волны будет уже недостаточной для возбуждения носителей заряда: сигнал приемника будет резко уменьшаться. Эту длину волны, за которой приемник становится нечувствительным, называют точкой отсечки.

К сожалению, известные элементарные полупроводники – кремний Si и германий Ge – имеют точки отсечки соответственно при длинах волн 1,1 и 1,8 мкм. Ширина запрещенной зоны у двойных соединений – сульфида и селенида свинца (PbS, PbSe), арсенида индия (InAs), антимонида индия (InSb) – уже, чем у Si и Ge. Они

обладают собственной фотопроводимостью вплоть до длинноволновой границы 2,9; 5,4; 3,2 и 5,4 мкм соответственно для PbS, PbSe, InAs и InCb.

В связи с этим серьезные усилия были предприняты в направлении создания приемников излучения с собственной проводимостью для области спектра в диапазоне длин волн 8 – 12 мкм. В 60 – 70-х годах были получены так называемые тройные соединения теллурид ртути – кадмия (HgCdTe) и теллурид свинца – олова (PbSnTe), представляющие собой полупроводниковый сплав, ширина запрещенной зоны которого зависит от количественного содержания составных компонентов в смеси. Варьируя состав сплава HgCdTe, можно получать граничную длину волны, непрерывно изменяющуюся в широком диапазоне длин волн от 1 до 30 мкм. Достижения в технике инфракрасного зондирования Земли оказались возможными благодаря разработке именно таких высококачественных узкозонных фотоприемников.

Другим способом сдвига порога в сторону более длинных волн для полупроводниковых материалов с широкой запрещенной зоной является введение других чистых полупроводников в небольших количествах примесей. В результате легирования исходного материала примесями на энергетической диаграмме (см. рис. 10, б) в запрещенной зоне появляются энергетические уровни примеси. Атомы примеси, энергетические уровни которых расположены вблизи валентной зоны, способны забирать (акцептировать) электроны из основного вещества. Дырки, возникающие при этом в валентной зоне, становятся зарядоносителями. Такие примеси, приводящие к недостатку электронов, называются акцепторными.

Соответственно примеси, уровни которых размещены вблизи зоны проводимости, могут отдавать электроны при возбуждении, действуя как доноры электронов и обеспечивая электронную проводимость материала. Подобная проводимость называется примесной фотопроводимостью и наблюдается в том случае, когда энергия падающих фотонов недостаточна для образования электронно-дырочной пары при переходе из валентной зоны в зону проводимости, но ее хватает, чтобы возбудить атом примеси до состояния, когда образуется свободная дырка и связанный на акцепторном уровне электрон и свободный электрон и связанная дырка на донорном уровне. Длинноволновая граница примесной фотопроводимости определяется шириной узкой энергетической зоны между валентной зоной и акцепторным уровнем или между донорным уровнем и зоной проводимости.

Для создания приемников излучения с областью спектральной чувствительности, соответствующей «атмосферному окну» в интервале длин волн 8 – 14 мкм, в качестве основной кристаллической решетки чувствительного элемента применяют Ge, в качестве примеси – Hg. У фотоприемников с примесной проводимостью на основе Si легирующей добавкой могут служить Si, B, Al, P, As, Sb. Длинноволновая граница этих приемников изменяется в пределах длин волн от 16 до 30 мкм. Фотопроводимость полупроводников с собственной и примесной проводимостью заключается в изменении электропроводности материала под действием падающего на него инфракрасного излучения и измеряется с помощью электродов, присоединенных к образцу.

Фотопроводимость – наиболее простой, но не единственный из фотоэлектрических эффектов, широко используемых в фотоприемниках инфракрасного излучения.

Однако при регистрации теплового излучения с помощью фотоприемников возникает следующее серьезное затруднение: приемник становится неработоспособным при рабочей комнатной температуре. Дело в том, что электрические эффекты связаны с возникновением носителей тока в полупроводнике под действием падающих фотонов. Для материала с широкой запрещенной зоной лишь отдельные электроны за счет теплового движения смогут преодолеть этот барьер: Однако этот конкурирующий процесс освобождения носителей приобретает исключительно важное значение, когда энергия активации носителей становится все меньше и меньше.

Рассмотренные нами узкозонные полупроводники с собственной проводимостью и полупроводники с примесной проводимостью, пригодные для регистрации длинноволнового излучения, при данной температуре будут иметь тем больше носителей, возбужденных термическим путем, чем уже их запрещенная зона. На фоне этих тепловых носителей могут, как говорят, потеряться носители, возбужденные фотонами. Если уменьшить тепловые колебания кристаллической решетки путем охлаждения полупроводникового материала, то количество тепловых носителей тока может быть снижено даже для узкозонных фотоприемников.

Необходимая степень охлаждения приемника зависит от величин минимальной энергии, достаточной для освобождения носителей для данного материала, т. е. от ширины его запрещенной зоны. Считают, что приемники, имеющие длинноволновую границу фоточувствительности в ближнем инфракрасном диапазоне до 3 мкм, еще могут работать при комнатной температуре. Для приемников с длинноволновой границей 4 – 5 мкм уже требуется охлаждение до температуры сухого льда (195 К). Приемники, работающие на основе собственного фотоэффекта и чувствительные в интервале длин волн 8 – 14 мкм, должны охлаждаться до температуры жидкого азота (77 К). Приемники, точки отсечки которых лежат в области больших длин волн, необходимо охлаждать до еще более низких температур. Для приемников с длинноволновой чувствительностью до 30 мкм охлаждение производится до температуры жидкого гелия (4,2 К).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Как оценить качество приемника? Какой из приемников лучше, какой хуже? Как определить применимость того или иного приемника в инфракрасной аппаратуре? Для ответа на эти вопросы необходимо дать определения количественным характеристикам приемников.

Спектральная чувствительность показывает, как изменяется выходной сигнал приемника с длиной волны падающего на него излучения. Приемники разделяют на неселективные, чувствительность которых не зависит от длины волны, и селективные, которые чувствительны к инфракрасному излучению только в ограниченном спектральном диапазоне.

Постоянная времени приемника, определяющая его быстродействие, характеризует быстроту нарастания электрического сигнала по отношению к приходу потока излучения. Этот параметр представляет собой промежуток времени от начала облучения приемника до момента, когда выходной сигнал достигнет определенной части установившегося сигнала при длительном облучении. Постоянная времени определяет максимально допустимую частоту изменения приходящего потока излучения и колеблется от нескольких секунд до долей микросекунды.

*Обнаружительная способность D^** , характеризует способность приемника регистрировать минимальные потоки излучения. В материале приемника и в цепи его включения носители заряда всегда находятся в хаотическом тепловом движении, в результате которого в любой момент времени число, например, электронов, движущихся в приемнике в одном направлении, не равно числу электронов, движущихся в противоположном направлении, что создает на выходе приемника непрерывно изменяющийся сигнал. Случайный характер носят и тепловые движения самой кристаллической решетки материала приемника, приводящие к изменению числа носителей зарядов. Имеются и другие случайные явления, например изменения сопротивления в местах контактов, на поверхности приемника, случайные колебания температуры приемника относительно некоторого среднего значения, также приводящие к случайным электрическим сигналам на выходе приемника.

Хаотические сигналы со случайными амплитудой и частотой, возникающие в цепи включения приемника, называют *шумами*. Собственный шум приемника ограничивает тот минимальный поток излучения, который можно зарегистрировать с помощью оптико-электронной системы. Обнаружить на выходе приемника слабый сигнал на фоне электрических шумов приемника так же трудно, как, скажем, услышать тиканье наручных часов на многолюдной улице, по которой движется колонна грузовиков. В таком мощном шуме можно различить разве что пожарную или милицейскую сирену. Зато вдали от промышленных объектов в тихую безветренную погоду можно уловить слабые шорохи или плеск воды в реке. Предел, налагаемый шумами на наименьший уровень достоверно обнаруживаемого полезного сигнала, зависит от величины

шума. Небезынтересно, что человеческий слух в предельном случае ограничен тепловым шумом окружающей среды.

При сравнении приемников по способности к обнаружению минимального потока излучения лучшим будет приемник, который обладает меньшим *собственным шумом*. При решении проблемы измерения сигнала в присутствии шума особенно удобно оперировать понятием отношения сигнал/шум. Критерием качества приемника служит величина отношения сигнал/шум при мощности падающего излучения, равной 1, которая показывает, во сколько раз значение шума меньше 1. Чем эта величина, называемая обнаружительной способностью D^* , больше, тем лучше приемник.

После ознакомления с параметрами приемников излучения становятся очевидными существенные отличия между тепловыми и фотоэлектрическими приемниками, определяющие области их применения в инфракрасной аппаратуре. Приемники, использующие тепловые эффекты, являются неселективными. Процесс нагрева чувствительного элемента излучением является инерционным, и поэтому постоянная времени в таких приемниках очень большая (от нескольких миллисекунд до нескольких секунд), что резко ограничивает их применение в различных оптико-электронных системах. По обнаружительной способности тепловые приемники также существенно уступают современным фотоэлектрическим приемникам.

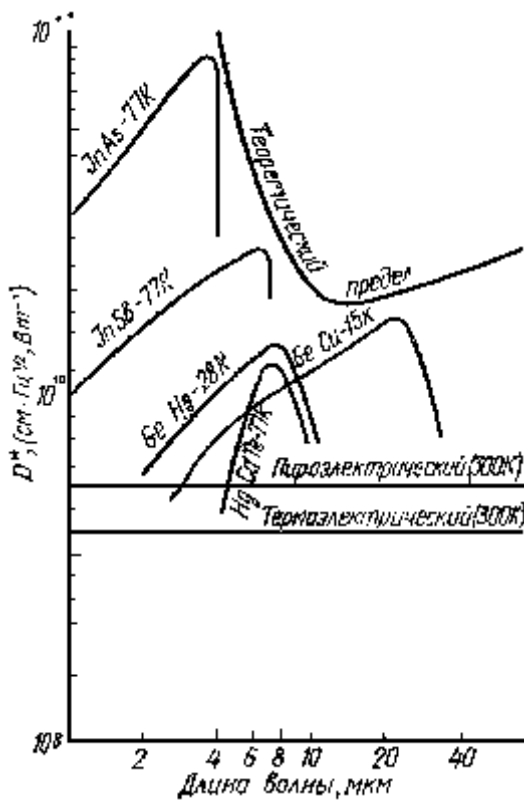


Рис. 11. Спектральные зависимости обнаружительной способности приемников инфракрасного излучения

Несмотря на это, тепловые приемники нельзя считать устаревшими, в ряде случаев их применение оказывается более предпочтительным, и основные их типы используются в инфракрасной аппаратуре и поныне. Так, в космической метеорологии при определении радиационного баланса системы Земля – атмосфера необходимо измерять тепловое излучение Земли и атмосферы, уходящее в космос, во всей инфракрасной области с длинами волн от 3 до 30 мкм.

При создании актинометрической аппаратуры для этих целей применяют неселективные тепловые приемники инфракрасного излучения. До появления искусственных спутников Земли прямые измерения энергии, теряемой нашей планетой, были недоступны. Использование бортовой актинометрической аппаратуры позволяет более полно учитывать реальные условия энергетики атмосферы и способствует повышению достоверности долгосрочных прогнозов погоды.

По сравнению с тепловыми фотоэлектрические приемники обладают существенно меньшей инерционностью (постоянная времени фотоприемников $10^{-6} - 10^{-9}$ с). Спектральная чувствительность их возрастает с ростом длины волны вплоть до длинноволновой границы, за которой электрический «фотоотклик» приемника падает до нуля, т. е. они являются селективными приемниками.

Диапазон чувствительности фотоприемника зависит от свойств использованного материала. Имеющееся разнообразие фоточувствительных материалов позволяет обеспечить регистрацию инфракрасного излучения практически на любой длине волны интересующего нас диапазона спектра.

Для иллюстрации на рис. 11 представлены спектральные зависимости обнаружительной способности D^* для некоторых из упомянутых выше приемников инфракрасного излучения. Кривые отражают достигнутый для промышленных образцов приемников уровень по параметру D^* на сегодняшний день. Верхняя кривая представляет собой теоретический предел для охлаждаемого идеального фотоприемника, когда уровень шума определяется уже не собственными шумами приемника, а флуктуациями фонового излучения. Отмеченные свойства фотоприемников позволяют регистрировать слабые сигналы в инфракрасном диапазоне с рекордным быстродействием, что делает их очень привлекательными для инфракрасной радиометрии Земли, где именно эти параметры задают достигаемый уровень пространственного и радиационного разрешения аппаратуры.

ПРИБОРЫ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Развитие физики твердого тела и достижения в области твердотельной технологии обеспечили возможность промышленного изготовления стабильных фотоприемников, пригодных для эксплуатации в инфракрасной бортовой оптико-электронной аппаратуре. Успехи в этих областях знаний позволили создать в последние годы линейки и матрицы приемников с высокой плотностью чувствительных элементов. Читатель, наверное, помнит, что при рассмотрении сканирующей аппаратуры, в которой использовалась линейка приемников (см. рис. 5, в), отмечалось, что для формирования выходного сигнала аппаратуры необходимо поочередно измерить электрические сигналы, поступающие с каждого элемента линейки. Можно сказать, должно быть обеспечено последовательное подключение электрических проводников от отдельных элементов к общему выходу.

Путем такого «опроса» чувствительных площадок, расположенных в ряд, вырабатывается электрический сигнал, соответствующий одной строке изображения. Процесс переключения электрических цепей чувствительных элементов в аппаратуре осуществляется специальным электронным переключателем последовательного действия. В итоге линейка приемников обеспечивает строчное сканирование изображения электронным, а не механическим способом.

В новейших, наиболее перспективных образцах инфракрасной аппаратуры все чаще используются твердотельные схемы, обеспечивающие прием и обработку сигнала с линейки или матрицы в одном устройстве. Первые два коротких сообщения группы американских исследователей об этой новой идее в области физики твердого тела и об ее экспериментальной проверке появились в 1970 г. Приборы с зарядовой связью – так был назван этот класс устройств – привлекли к себе чрезвычайный интерес и за прошедшие после их изобретения годы нашли самое широкое применение в устройствах формирования изображений в вычислительной технике, в устройствах отображения информации. Само собой разумеется, что мы рассмотрим лишь те варианты приборов, которые позволяют использовать их для регистрации инфракрасного излучения.

С точки зрения физики приборы с зарядовой связью интересны тем, что электрический сигнал в них представлен не током или напряжением, а электрическим зарядом. Основной принцип их действия изображен на рис. 12. Прибор с зарядовой связью представляет собой линейку электродов на изолирующей основе, нанесенной на поверхность тонкой пластины полупроводника. Обычно под металлическими электродами расположен изолирующий слой окисла SiO_2 , а в качестве полупроводникового материала используется Si. В результате образуется как бы сэндвич: металл–окисел–полупроводник (см. рис. 12, а).

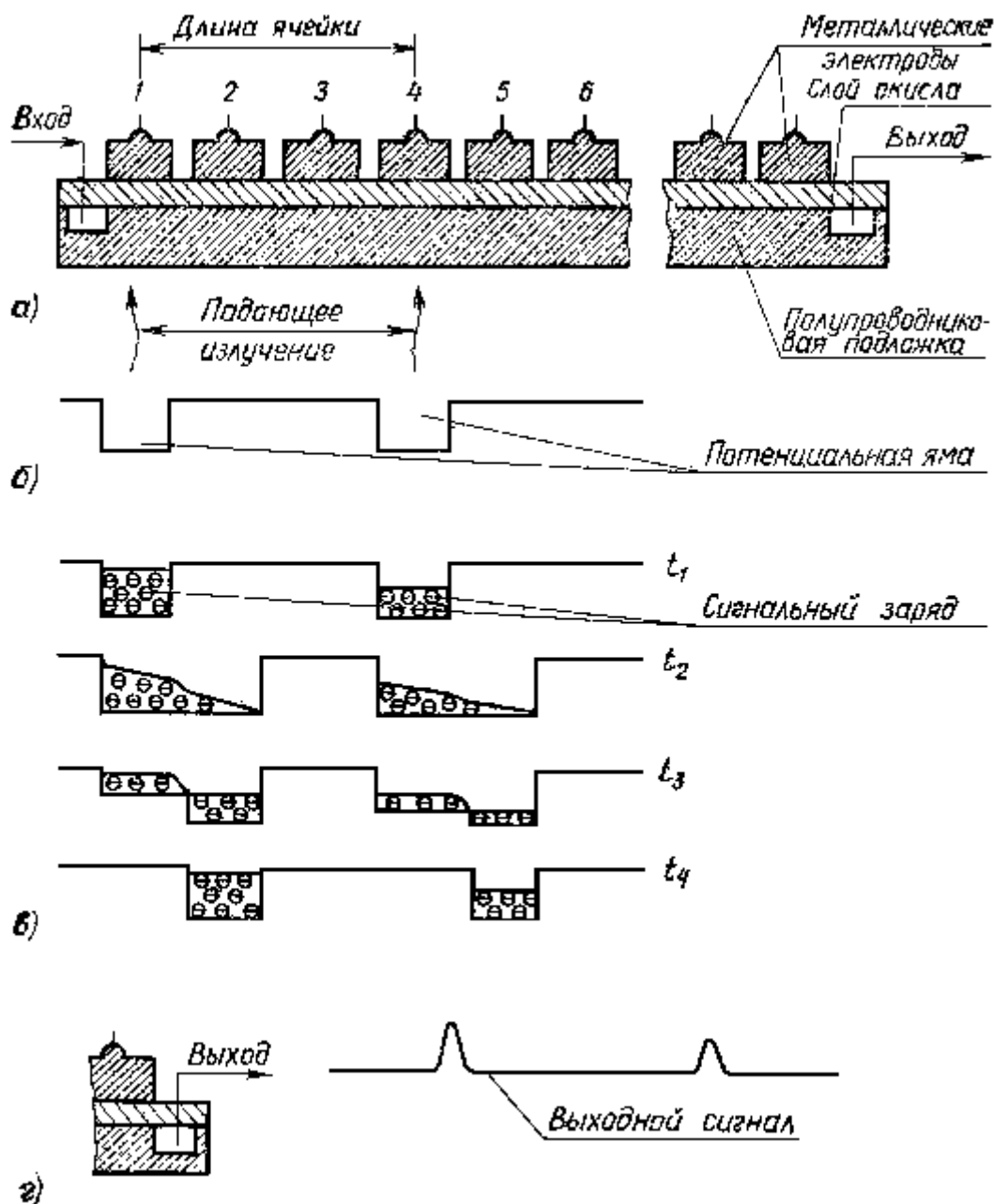


Рис. 12. Принцип работы прибора с зарядовой связью.

Для понимания процессов в приборе с зарядовой связью вспомним энергетическую диаграмму состояний полупроводника (см. рис. 10), обратив внимание на горизонтальный уровень, отделяющий запрещенную зону от зоны проводимости. В приборах с зарядовой связью появляется возможность, подавая напряжения на металлические электроды, воздействовать через изолятор на положение энергетического уровня, сдвигая его вниз от горизонтальной линии в местах расположения электродов. В итоге на границе раздела Si-SiO₂ энергетическая диаграмма будет представлять собой не ровную, а холмистую поверхность, на которой впадины будут расположены под теми электродами, к которым приложено напряжение.

Для наглядности впадины этого рельефа на энергетической диаграмме представляют в виде ямы с плоским дном и вертикальными стенками. На рис. 12, б изображены такие прямоугольные потенциальные ямы, сформированные с помощью напряжений, приложенных к электродам. Чем выше напряжение на электроде, тем глубже яма под данным электродом в месте его расположения. Когда фотон падает на чувствительный к излучению Si и создает электронно-дырочную пару, то электрон стекает в ближайшую потенциальную яму. При дальнейшем облучении образца электроны будут накапливаться и сохраняться в соответствующих потенциальных ямах.

Для совокупности электронов, захваченных потенциальной ямой, физики также придумали образное название, ставшее общепризнанным, — «зарядовый пакет». Такие зарядовые пакеты в соответствии с изложенным механизмом будут возникать на поверхности полупроводника под действием излучения в местах расположения потенциальных ям. Величина каждого зарядового пакета будет пропорциональна потоку излучения, приходящему на образец вблизи расположения данной потенциальной ямы. Тем самым величины зарядовых пакетов и их положение на поверхности прибора с зарядовой связью находятся в полном соответствии с распределением падающего на прибор излучения. Образуется, как говорят, зарядовая копия изображения.

Отметим, что оптической стороной, принимающей излучение, может служить как поверхность, на которой расположены электроды, так и тыльная полупроводниковая сторона прибора.

Важнейшим достоинством прибора с зарядовой связью является возможность сканировать полученное зарядовое изображение электронным, а не механическим способом. Достигается это перемещением полученных зарядовых пакетов по поверхности полупроводника от входа к выходу. Поясним, каким образом осуществляется перемещение зарядовых пакетов.

Пусть в момент t_1 (см. рис. 12, в) напряжения поданы на электроды 1 и 4, причем на электрод 1 приходит поток излучения больший, чем на электрод 4, соответственно под электродом 1 накопится зарядов больше, чем под электродом 4. Подадим в момент t_2 напряжение на электроды 2 и 5, тогда позади зарядовых пакетов сохранится некоторый барьер, а перед пакетами яма расширится и заряды будут, подобно воде, растекаться по дну ямы. В момент t_3 снимем напряжение с электродов 1 и 4, заряды будут перетекать в более глубокие ямы и к моменту t_4 будут полностью вытолкнуты в потенциальные ямы под электродами 2 и 5.

В результате такой последовательности смены напряжений на электродах данная конфигурация заряда будет перемещаться от одной ячейки к другой, от входа к выходу. Тем самым обеспечивается движение зарядовых пакетов вслед за потенциальными ямами, управляемыми внешними напряжениями. В качестве аналогии по шаговому перемещению заряда от ячейки к ячейке вдоль линейки можно обратиться к способу передачи груза по цепи из рук в руки бригадой грузчиков.

Многократное повторение описанной смены напряжений на всех электродах приводит к тому, что на выходе линейки появятся сигналы, пропорциональные

величинам зарядовых пакетов. Огибающая последовательности импульсов на выходе представляет собой видеосигнал (см. рис. 12, з), амплитуда которого пропорциональна потоку излучения в соответствующем месте прибора. Другими словами, прибор с зарядовой связью является элементом, преобразующим пространственное распределение излучения по его поверхности во временную последовательность электрических сигналов. Перенос накопленных зарядовых пакетов со всей линейки завершает прочтение одной строки изображения и ее подготовку к считыванию накопленной информации со следующей строки.

В итоге прибор с зарядовой связью осуществляет прием и сканирование изображения в одном устройстве, т. е. прибор представляет собой набор приемников излучения с самосканированием. Линейка приемников с самосканированием информации вдоль строки органично вписывается в рассмотренную ранее схему радиометра (см. рис. 5, в).

Поскольку в описанном приборе применяется полупроводниковый Si с широкой запрещенной зоной, генерация электронно-дырочных пар может производиться только энергичными фотонами видимого участка спектра. Для фотоприема инфракрасного излучения с малой энергией фотоном необходимы, как уже говорилось, либо примесные полупроводники, либо узкозонные полупроводники с собственной проводимостью. Если использовать для детектирования инфракрасного излучения примесный Si, а в качестве считывающего устройства – представленный выше прибор с зарядовой связью, то можно на основе полупроводникового Si изготовить монолитный прибор, чувствительный к инфракрасному излучению.

Обычно для детектирования инфракрасного излучения применяют гибридную структуру, получаемую наращиванием на сэндвич металл–окисел–полупроводник еще одного слоя из материала, фоточувствительного к инфракрасному излучению (например, из HgCdTe). При освещении этот чувствительный материал обеспечивает инжекцию фотоэлектронов в потенциальные ямы прибора с зарядовой связью. Считывание информации производится аналогичным пошаговым способом сдвига зарядовых пакетов от одного края линейки к другому. Таков упрощенный принцип работы твердотельных линеек приемников инфракрасного излучения с самосканированием изображения.

Подобным же способом используются приборы с зарядовой связью в двумерных матрицах приемников инфракрасного излучения. Их особенностью является возможность самосканирования и по строкам, и по столбцам. В результате видеосигнал формируется полностью для всего спроектированного на матрицу изображения только электронными средствами без всякого механического сканирования.

Для того чтобы представить себе технологические сложности, встающие перед разработчиками матриц приемников, упомянем лишь, что размер одной ячейки составляет десятки микрометров, а зазоры между электродами – не более нескольких микрометров. Тем не менее в разработке и изготовлении матричных формирователей сигналов инфракрасных изображений с зарядовой связью в последние годы отмечается быстрый технический и промышленный прогресс. Имеются сообщения об изготовлении однострочных линеек с 1000 и более

элементов в линейке, о проектировании линеек, содержащих до 10 000 элементов, двумерных самосканирующих матриц из 1000×1000 элементов. Получение до 10 000 элементов изображения на одной линии с большой плотностью и хорошей точностью их размещения позволяет сформировать изображения с высокой разрешающей способностью.

Широкие возможности по улучшению технических характеристик инфракрасных приемников нового поколения связаны с идеей совмещения электронного считывания и механического сканирования изображения по поверхности фоточувствительного слоя в одном и том же направлении с одинаковой скоростью. Как и описанные ранее, такие приемники работают с зарядовыми пакетами, однако подбором напряженности электрического поля, тянущего заряды от входа к выходу, достигается совпадение дрейфовой скорости фотоэлектронов и скорости перемещения изображения по фоточувствительной поверхности от одного края линейки фотодетекторов к другому. Иными словами, путем механического сканирования каждая точка изображения движется к выходу одновременно со своими потенциальными ямами, добавляя по ходу движения заряды – каждая в свою яму. Процессы фотоприема изображения и его считывания оказываются совмещенными во времени.

Изображение как бы приклеено к своей зарядовой копии, движется вместе с ней к выходу матрицы, подпитывая при этом потенциальные ямы зарядами. Тем самым достигается последовательное накопление зарядов в процессе считывания изображения. Синхронное с перемещением изображения движение зарядовых пакетов в линейке позволяет увеличить чувствительность приемника без ухудшения разрешающей способности. Поскольку, как уже отмечалось, съем информации происходит достаточно быстро, требуется очень высокая скорость оптико-механического сканирования изображения по поверхности приемника, что представляет известные трудности. Тем не менее в высококачественных тепловизионных системах предполагается применение подобных устройств.

Естественно, что для обеспечения нормальных условий функционирования и наивысшей чувствительности прибор с зарядовой связью вместе с матрицей приемников инфракрасного излучения должен работать при низкой температуре.

ОХЛАЖДЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Итак, в процессе погони за малошумящими и быстродействующими приемниками излучения появилась необходимость в снижении их рабочей температуры. На первый взгляд эта проблема для космической аппаратуры может показаться надуманной. Действительно, эффективная температура космического пространства не превышает 10 К. Для обеспечения теплового излучения при этих условиях можно создать «холодную» площадку соответствующих размеров с высокой излучательной способностью, на которой смонтирован приемник. За счет стока тепла в само космическое пространство при его излучении с поверхности площадки температура последнего должна понижаться вплоть до температуры космоса, подобно тому, как раскаленный слиток при остывании со временем должен принять комнатную температуру. Эта идея очень привлекательна, так как подобная система является совершенно пассивной, не потребляет электрической энергии, должна обладать высокой надежностью и ресурсом. Разумеется, необходимо экранировать холодную площадку от теплопритоков от Солнца, Земли и корпуса космического аппарата.

Мощность, излучаемая радиационной пластиной в свободное космическое пространство, определяется ее площадью и излучательной способностью. Конечной целью охлаждения является приемник, на который поступает сконцентрированный оптической системой поток излучения – полезный сигнал инфракрасной аппаратуры. Величина этого потока представляет собой тепловую нагрузку приемника, которая должна быть рассеяна радиационным путем. Помимо тепловой нагрузки приемника, к радиационной пластине постоянно притекает тепло по конструктивным элементам, крепящим ее к космическому аппарату, по электрическим проводникам, соединяющим приемник излучения с электронными блоками. Имеются также дополнительные теплопритоки за счет излучения более нагретых деталей аппаратуры и космического аппарата.

Таким образом, тепловая нагрузка приемника и паразитные теплопритоки будут нагревать радиационную пластину, а ее радиационное охлаждение будет осуществляться стоком тепла в космос с ее поверхности. В стационарном режиме пластина должна принять постоянную температуру, называемую температурой криостатирования.

Исходя из этих соображений, в конструкцию радиационного холодильника, кроме радиатора внутренней низкотемпературной ступени, вводится внешняя ограждающая ступень (рис. 13). Внешняя ступень крепится к корпусу космического аппарата с помощью опор, обладающих малой теплопроводностью, и поддерживает внутреннюю холодную ступень на таких же опорах. Приемник излучения размещается внутри холодной ступени, его чувствительная поверхность обращена в сторону инфракрасной аппаратуры. Внутренние поверхности внешней ступени являются зеркально отражающими.

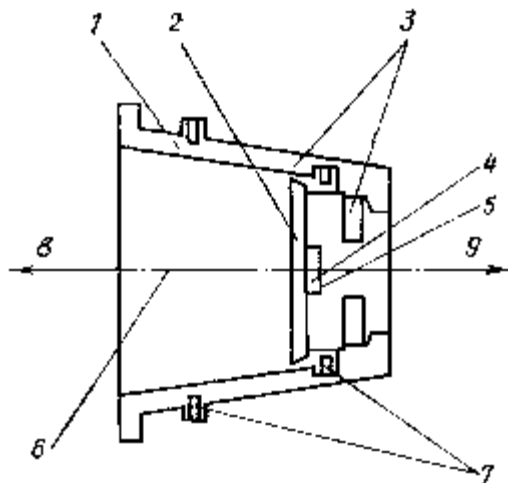


Рис. 13. Радиационный холодильник:

1 – внешняя ступень; 2 – внутренняя ступень; 3 – многослойная изоляция; 4 – приемник; 5 – чувствительная поверхность; 6 – оптическая ось; 7 – опоры с малой теплопроводностью; 8 – направление на космос; 9 – к аппаратуре

При проектировании такого радиационного холодильника любыми изолирующими способами стремятся уменьшить приток тепла к холодной ступени за счет излучения и теплопроводности по элементам конструкции. Схематическое изображение радиационного холодильника (см. рис. 13) примерно соответствует исполнению подобных устройств, прошедших испытания в космосе. К сожалению, в такой типичной конструкции паразитные теплопритоки составляют до 90% от общей тепловой нагрузки радиатора и только 10% приходится на приемник излучения.

Тепловой баланс, складывающийся из суммарной излучаемой радиатором мощности, с одной стороны, и из вредных теплопритоков и нагрузки приемника – с другой, определяет температурный уровень криостатирования. Для существующих радиационных холодильников эти рабочие температуры составляют 80 – 120 К. Продвижение в область более низких температур, по-видимому, невозможно из-за жестких ограничений, связанных с недостаточным экранированием и паразитными теплопритоками. Имеется еще одна немаловажная особенность, присущая радиационному холодильнику: его размещение на космическом аппарате должно исключать прямое попадание излучения от Солнца и Земли на рабочие поверхности холодильника.

Отсюда становится понятным, что для многих инфракрасных приборов, приемники которых нуждаются в охлаждении, радиационные холодильники могут оказаться непригодными. Среди факторов, препятствующих применению радиационных холодильников, во-первых, следует назвать серьезные ограничения, накладываемые на орбиту и ориентацию космического аппарата. Дело в том, что подавляющее большинство космических аппаратов в процессе эксплуатации занимает произвольное положение относительно Солнца и Земли и становится невозможным исключить нагрев радиационного холодильника излучением от Солнца и Земли без принятия специальных мер.

В некоторых случаях меры по экранировке радиационного холодильника от излучений Солнца и Земли приводят при конструировании к серьезным трудностям, зачастую непреодолимым. Поэтому вторым препятствием на пути широкого применения радиационного холодильника можно считать сложности компоновки, возникающие при проектировании космического аппарата с инфракрасной аппаратурой, снабженной радиационным холодильником.

Третье ограничение вытекает из запросов инфракрасной техники к холодильным системам в части требований по интенсивности теплоотвода. Для приемников, используемых в современной инфракрасной аппаратуре, характерна тенденция к повышению тепловыделений и паразитных теплопритоков, связанная главным образом с увеличением количества чувствительных элементов в приемнике. Кроме самого приемника, часто приходится охлаждать линзы, диафрагмы, спектральный фильтр, а также отдельные радиоэлектронные элементы входных цепей и целые усилители. Стремление увеличить холодопроизводительность радиационного холодильника приводит к непомерному увеличению его размеров и массы. Препятствие к использованию крупногабаритных холодильников создают ограничения по размерам и массе, налагаемые на космические аппараты средствами их доставки на орбиту.

Четвертым препятствием при эксплуатации радиационного холодильника является то, что дополнительные осложнения вносит ухудшение оптических характеристик его оптических поверхностей, обусловленное воздействием факторов космического пространства и осаждением на охлажденные поверхности холодильника частиц и газов атмосферы, окружающей космический аппарат. В какой-то степени удастся восстановить работоспособность радиационного холодильника, очищая его рабочие поверхности от загрязнений. Очистка достигается путем испарения загрязняющих веществ, при периодическом подогреве поверхностей холодильника электрическими нагревателями. Несмотря на эти предосторожности, деградация оптических свойств излучающих поверхностей холодильника все же остается серьезным препятствием при длительной его эксплуатации.

Невзирая на отмеченные недостатки, идея радиационного охлаждения в космосе оказалась весьма плодотворной, но с практической точки зрения использование радиационного холодильника допустимо только при относительно низких тепловых нагрузках и температурах криостатирования приемника не ниже 80 К. Таким образом, радиационный холодильник ни в какой мере нельзя отнести к универсальным устройствам, и альтернативные способы охлаждения для космических нужд пришлось искать среди известных методов криогенного охлаждения.

Попытки «втиснуть» наземные холодильные установки на борт космических аппаратов стимулировали появление и развитие специфической области техники – микрокриогенной, в арсенале которой имеется довольно широкий спектр холодильных установок, отличающихся своим принципом действия. Выбор из этого многообразия того или иного микрокриогенного устройства для решения конкретной задачи зависит от температуры криостатирования, холодопроизводительности, энергопотребления, массы, габаритных размеров, ресурса и других характеристик микрокриогенных установок. Не вдаваясь в

детали, мы перечислим лишь основные способы получения низких температур на борту космического аппарата.

Начнем с простейшего способа, который является очень заманчивым в случае кратковременных инфракрасных космических экспериментов и состоит в доставке земных запасов холода на орбиту. Действие системы сходно со способом охлаждения мороженого на брикетах «сухого льда»: до тех пор, пока запасенный хладагент не испарится, мороженое сохраняет свои вкусовые качества.

Аналогичная ситуация имеет место и для космических систем охлаждения, длительность работы которых также определяется количеством запасенного хладагента. Известны три разновидности таких систем, называемых системами открытого типа: использующие запас газа, использующие запас криогенных жидкостей, содержащие запас твердых хладагентов. Они пригодны только в случае малой холодопроизводительности, так как их масса быстро растет с увеличением мощности тепловыделения. Основные особенности систем открытого типа – простота, надежность и относительная экономичность.

В системах открытого типа, использующих запас криогенных жидкостей, для хранения жидкого газа (например, гелия или азота) применяют дьюаровский сосуд, подобный обычному термосу. Сжижение газа и наполнение им дьюаровского сосуда осуществляются на Земле с последующим выведением этого «заряда» холода на орбиту. Обычно при работе системы жидкий газ из емкости по змеевику поступает на охлаждаемую поверхность с приемником излучения, температура которой поддерживается на заданном низком уровне.

Преимущество криогенных систем с запасом твердого хладагента заключается в меньшей массе по сравнению с системами, использующими криогенные жидкости. Объясняется это тем, что скрытая теплота сублимации (перехода из твердого состояния в газообразное) больше, чем скрытая теплота парообразования. Значит, при одинаковой массе отвержденные газы будут обладать большим запасом холода, чем сжиженные. В холодильных агрегатах с твердым водородом может быть достигнута температура 8 – 13 К. Кроме водорода, можно использовать твердые неон (что позволяет получить температуры 13 – 24 К), азот (43 – 63 К), аргон (48 – 83 К), метан (60 – 90 К), аммиак (125 – 135 К). Поскольку подобные системы не потребляют электрической энергии, они считаются перспективными для ограниченного применения, где требуются малые тепловые нагрузки и где температура приемника, параметры орбиты и другие условия препятствуют использованию радиационных холодильников.

Совершенно естественно во многих случаях ожидать вытеснения этих систем эффективными, надежными и компактными холодильными системами так называемого замкнутого типа, подобными нашим бытовым холодильникам. Как известно, подключенный к электрической сети комнатный холодильник за счет потребляемой электроэнергии совершает работу над рабочим телом (газом), изменяя циклически его состояние, в результате чего морозильник отбирает тепло от замораживаемых продуктов и нагревает комнату за счет отобранного тепла. С определенной долей условности по такому же принципу работают космические микрохолодильники. Основная их часть – криогенная газовая машина – отводит

тепло от нагрузки и обеспечивает снижение температуры приемника излучения до заданного уровня.

Тепловая нагрузка плюс все энергопритоки к холодильной машине должны сбрасываться в космос с помощью радиатора. В отличие от ранее описанных холодильников машинные системы замкнутого типа позволяют получить полезную холодопроизводительность не в сотни милливатт, а в несколько ватт практически при любых уровнях криостатирования. Существенно, что такие системы можно эксплуатировать в длительных полетах в течение нескольких лет. Характерно также, что криогенные газовые машины выигрывают соревнования с другими холодильниками, благодаря сравнительно малой массе, небольшим габаритам и короткому пусковому периоду. Последняя характеристика очень важна при эксплуатации, так как определяет время от начала работы холодильника до момента достижения приемником рабочего температурного уровня.

Вместе с тем для холодильной машины необходимо энергопитание. На борту космического аппарата источником электрической энергии являются системы, получающие энергию или от ядерных изотопных генераторов, или от панелей батарей полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей при освещении их Солнцем. Современные солнечные батареи космических аппаратов в основном способны удовлетворить энергетические запросы микрокриогенных систем, хотя обеспечить энергетические потребности холодильных машин с повышением холодопроизводительности и снижением температуры криостатирования достаточно сложно.

Известные трудности возникают при сопряжении холодных узлов криогенных машин с охлаждаемыми приемниками излучения, поскольку стыковка должна удовлетворять противоречивым требованиям. С одной стороны, потери холодопроизводительности тем меньше, чем лучше контакт между приемником и холодильной машиной. При этом возрастают вибрации приемника, вызванные работающей машиной, а вибрации отрицательным образом влияют на выходные характеристики приемника, увеличивая его шумы. С другой стороны, развязка приемника от вибраций машины с помощью демпфирующих узлов ухудшает условия охлаждения приемника. Несмотря на это, криогенное охлаждение космических приборов с помощью замкнутых систем получило широкое распространение.

В связи с продолжающейся микроминиатюризацией электронных элементов наблюдается тенденция дальнейшего уменьшения тепловыделений, массы и габаритов. Становится возможным применение термоэлектрических холодильников с малой холодопроизводительностью. В основе работы термоэлектрического холодильника лежит эффект Пельтье, заключающийся в том, что прохождение электрического тока через контакт между двумя различными проводниками может вызывать охлаждение или нагрев контакта в зависимости от направления тока. Это означает, что при подаче соответствующей электрической мощности на вход прибора происходит перекачка тепла от одной его стороны к другой.

Такая замкнутая холодильная система принципиально отличается от механической, поскольку в ней электрический ток непосредственно создает тепловой поток без применения какого-либо движущегося жидкого или газообразного рабочего тела. Роль же рабочего тела при реализации процесса охлаждения выполняет «электронный» газ. Термоэлектрические холодильники поэтому имеют следующие преимущества: практически неограниченный ресурс работы из-за отсутствия в конструкции подвижных элементов, бесшумность, отсутствие вибраций, малые массу и размеры. Весьма перспективным является использование термоэлектрических холодильников для охлаждения и регулирования температуры инфракрасных приемников и приборов с зарядовой связью, работающих в диапазоне так называемых промежуточных температур – 180 – 300 К.

Требования космического приборостроения к таким техническим характеристикам охлаждающих устройств, как температура криостатирования, величины тепловых нагрузок, масса, габариты, энергетические затраты, ресурс, условия эксплуатации, весьма разнообразны. Для удовлетворения всех запросов, помимо перечисленных выше холодильников, исследуются и разрабатываются абсорбционные, магнитные и различные типы механических холодильников, например турбохолодильники.

Значительные усилия направлены на оптимизацию характеристик холодильных систем, на создание каскадированных холодильников, в которых охлаждение проводится ступенчато холодильниками разных типов, на поиск новых физических эффектов, пригодных для охлаждения. Проведенный краткий обзор систем охлаждения показывает, что проблема получения и поддержания на высокостабилизированном уровне низких рабочих температур для приемников излучения, расположенных на борту космического аппарата, оказалась сложной задачей, но вполне разрешимой для современной техники. Дальнейшие исследования должны выявлять технологическую несостоятельность одних видов охлаждающих аппаратур и определять перспективные для космоса типы холодильников.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАКРАСНОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Вернемся, однако, к бортовому оптико-электронному устройству инфракрасного диапазона, принципиальные черты которого были представлены на рис. 5 и 6. Теперь, когда описаны основные его компоненты, приведены их характеристики, попытаемся проанализировать некоторые факторы, определяющие эффективность аппаратуры.

В конечном счете выбор параметров аппаратуры должен обеспечить на выходе электронного канала отношение сигнал/шум, гарантирующее заданную точность измерения яркости Земли. Исторически космическая фотометрия впитала в себя достижения астрономической фотометрии нашего столетия, в течение которого фотография и фотоэлектрические устройства стали активно заменять человеческий глаз в качестве селективного детектора при регистрации излучений от звезд и других слабых астрономических источников.

В ряде новых астрономических приборов отмечается целенаправленный отказ от чисто оптических и механических средств измерения данных и отдается предпочтение сложным комплексным системам, в которых доминирующую роль играет электроника. Многие из этих технических решений, в особенности в инфракрасном диапазоне, были подчас в готовом виде заимствованы космическим приборостроением из астрономии. Фотометрия точечных источников излучения в астрономии и прецизионное измерение интенсивности излучения мелких участков поверхности Земли из космоса имеют много общего.

Качество приборов для таких измерений определяется величиной минимального сигнала, который можно зарегистрировать на фоне шума. Для оценки чувствительности систем, образующих тепловые изображения, применяют разность температур ΔT , понятие, эквивалентное шуму. Величина ΔT определяется как температура абсолютно черного тела, которое создает на выходе прибора сигнал, равный шуму. Чем меньшую разность температур ΔT может зарегистрировать аппаратура, тем она чувствительнее. Для лучших образцов бортовых сканирующих устройств ΔT не превышает десятых долей кельвина и определяет радиационную чувствительность и разрешающую способность аппаратуры.

Очевидно, что величина ΔT тем меньше, чем больше поток излучения, приходящий на приемник, и чем выше обнаружительная способность приемника D^* . Или, иными словами, величина пороговой разности температур ΔT обратно пропорциональна потоку излучения, поступающему на приемник, и обнаружительной способности приемника. В связи с этим становится очевидным, почему такие большие усилия прилагаются в направлении увеличения обнаружительной способности инфракрасных приемников. Как уже отмечалось, величина потока излучения, собираемого оптической системой, определяется эффективной площадью входного зрачка, и следовательно, радиационная чувствительность аппаратуры будет улучшаться с увеличением диаметра объектива аппаратуры d . В процессе сканирования приемник воспринимает

излучение от площадки земной поверхности, охватываемой мгновенным углом поля зрения α . Значит, повышение пространственного разрешения (уменьшение α) снижает принимаемый приемником поток излучения и ухудшает радиационное разрешение при неизменных остальных характеристиках аппаратуры.

Для анализа взаимосвязей между параметрами аппаратуры с учетом ряда допущений можно воспользоваться следующим упрощенным соотношением, справедливым для сканирующих устройств с фотосопротивлением в качестве приемника: $\alpha^2 d \cdot n^{1/2} = \text{const}$, где n – число элементарных приемников в линейке. При этом предполагается, что радиационное разрешение ΔT , спектральная полоса пропускания $\Delta\lambda$, угловая ширина полосы обзора Ω , обнаружительная способность приемника, коэффициенты полезного действия оптической системы, электронного тракта, способа сканирования и другие конструктивные признаки остаются неизменными для данного класса сканирующих устройств.

Безусловно, приведенная формула отражает лишь общие соотношения между параметрами аппаратуры α , d и n

Возможности практического применения информации, получаемой с помощью инфракрасной аппаратуры, значительно расширяются при увеличении пространственной разрешающей способности. Опираясь на приведенную формулу, попытаемся оценить, как будет улучшаться пространственная разрешающая способность аппаратуры с увеличением диаметра ее апертуры и числа приемников. На рис. 14 приведены результаты расчетов при увеличении диаметра оптической системы до 3 м при применении в аппаратуре одно- и двухплощадочных приемников, линеек с количеством чувствительных площадок 20, 200 и 2000. В качестве базовой аппаратуры при расчетах использованы характеристики многоканального сканирующего устройства, установленного на одном из американских спутников для исследования природных ресурсов Земли: $\alpha = 0,26$ мрад, $d = 23$ см, $n = 2$ (отмечены точкой на рис. 14).

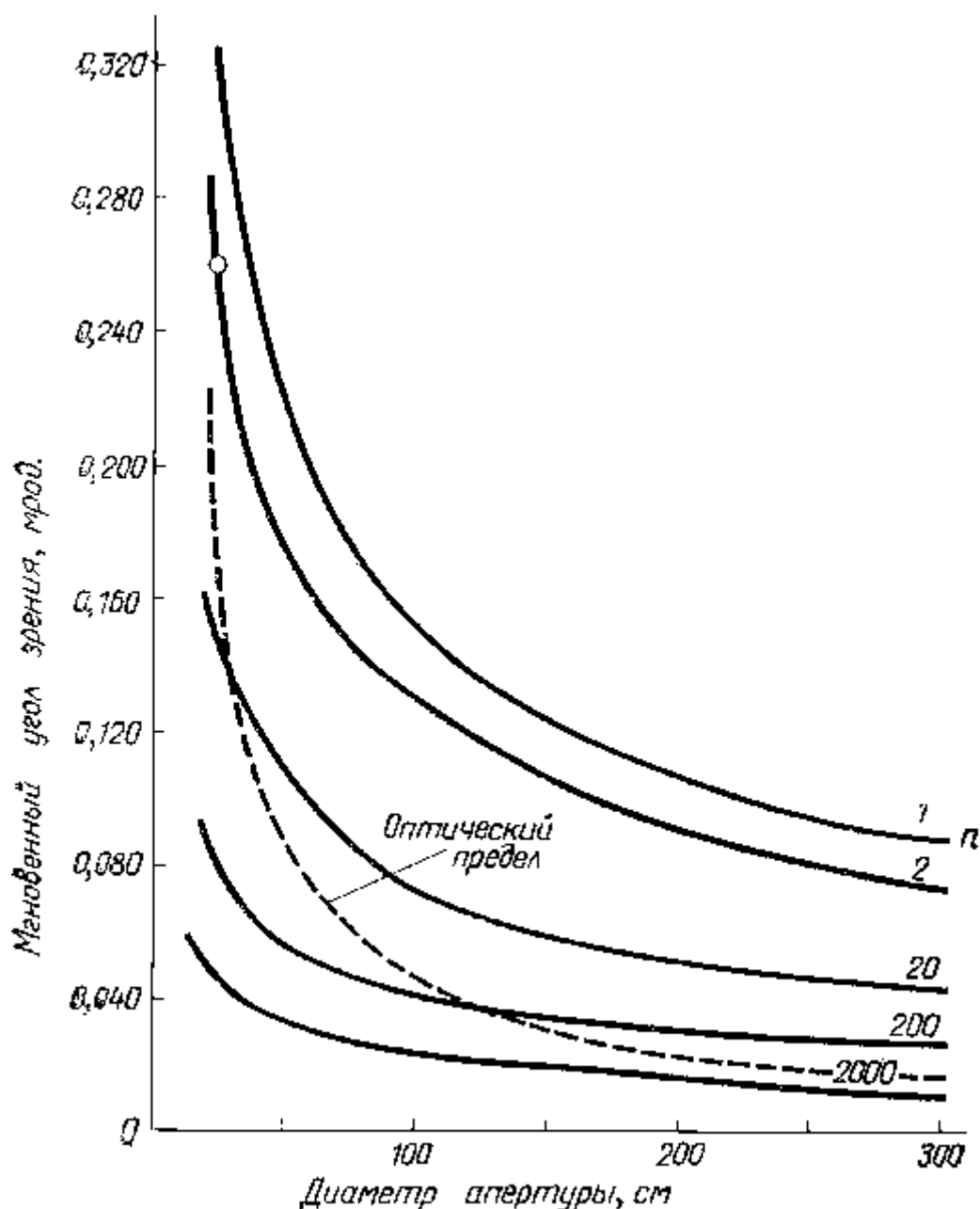


Рис. 14. Зависимость пространственного разрешения инфракрасной аппаратуры от диаметра объектива и числа приемных площадок

С высоты 1000 км, как мы знаем, базовый прибор с $\alpha = 0,26$ мрад сможет различить в инфракрасном диапазоне детали на поверхности Земли не менее 260 м. На рис. 14 видно, что существенное повышение разрешающей способности может быть достигнуто только за счет значительного увеличения величин n и d . Так, для двукратного увеличения разрешающей способности необходимо увеличить d до 40 см, число приемников до 10. А для повышения разрешения в 10 раз (элемент разрешения на поверхности Земли – несколько десятков метров) нужны оптическая система с диаметром 2 м 40 см и линейка из 200 приемников.

При этом масса только телескопа аппаратуры даже при использовании самых современных легких оптических материалов должна увеличиться в 1000 раз!

Как тут не вспомнить слово «мастодонт», употребляемое в среде инженеров для иронической характеристики установок и приборов, неоправданно усложненных и раздутых в размерах. Трудно сказать, какого размера были глаза у этого древнего хоботного млекопитающего, но в погоне за повышенной «остротой инфракрасного зрения» бортовых устройств необходимо проектировать аппаратуру грандиозных размеров и массы. И повинна в этом не склонность разработчиков к гигантомании, а, как видно на рис. 14, строгие физические законы.

Имеется еще один важный аспект влияния характеристик приемника излучения на разрешающую способность сканирующего устройства, связанный с его постоянной времени. Дело в том, что сканирование одной строки изображения происходит с определенной скоростью. При этом просмотр пространственного угла обзора Ω мгновенным углом α может выполняться как механическими, так и электронными средствами. В любом случае число элементов разрешения равно углу обзора Ω , деленному на мгновенный угол зрения α , и следовательно, съем информации с каждого элемента разрешения поверхности Земли производится за некоторое конечное время.

Очевидно, что уменьшение величины α при заданной зоне обзора приводит к снижению времени «пребывания» излучения от элемента разрешения на приемнике в процессе сканирования. Возникает риск того, что время съема информации с одного элемента разрешения станет меньше постоянной времени приемника, в результате чего уменьшится чувствительность приемника. Для того чтобы предотвратить ухудшение характеристик системы при заданной скорости обзора, необходимо применить более быстродействующий приемник или увеличить число приемников в линейке. Как мы уже знаем из предыдущих разделов брошюры, изыскательские работы в области приемников инфракрасного излучения в последнюю четверть нашего века были направлены на повышение быстродействия и плотности упаковки приемников. Эти достижения и обусловили возможность создания сканирующих устройств с высоким разрешением.

Одной из главных характеристик аппаратуры является ее спектральная полоса пропускания, определяемая спектральной чувствительностью приемника и свойствами оптического фильтра. Как уже отмечалось, для ряда задач дистанционного зондирования Земли необходимо производить измерения излучения с высокой радиометрической точностью в достаточно узком интервале длин волн $\Delta\lambda$. Естественно, что поток излучения, поступающий на приемник, будет уменьшаться при сужении спектральной полосы пропускания аппаратуры. Поэтому в системах дистанционного зондирования с высоким спектральным разрешением для сохранения температурной чувствительности ΔT приходится либо пожертвовать пространственным разрешением α , либо увеличивать число площадок приемника n и диаметр апертуры α . Таким образом, набор параметров d и n определяет отношение сигнал/шум сканирующего устройства и ограничивает тем самым увеличение пространственной и спектральной разрешающих способностей при неизменности остальных характеристик системы.

Следует отметить, что уменьшение α сильно влияет не только на характеристики аппаратуры, но и на параметры космического аппарата. Вообще говоря, мероприятия по обеспечиванию функционирования сканирующего устройства высокого разрешения затрагивают весь космический аппарат, требуют решения многочисленных задач по усовершенствованию других служебных систем. Проблемы, создаваемые увеличением массы, габаритов и потребления аппаратуры, не единственные в этом перечне. Например, существенно усложняется обработка и передача на Землю результатов измерений, необходимы информативные каналы связи с высокой скоростью передачи данных. С увеличением разрешающей способности возрастают требования к системе стабилизации космического аппарата в пространстве, поскольку от точности этой системы зависит «смазывание» элементов изображения, погрешность их привязки к поверхности Земли.

Для того чтобы читатель составил себе примерное представление о внешнем облике современных инфракрасных сканирующих космических устройств, на рис. 15 приведен общий вид тематического картографа, являющегося основным измерительным прибором американского природоресурсного спутника «Лэндсат». Тематический картограф представляет собой сканирующий радиометр для получения спектрозональных изображений с высоким пространственным разрешением. Для пояснения масштаба приведенного рисунка отметим, что диаметр d апертуры оптической системы составляет 42 см. Прибор принимает излучение Земли в 7 спектральных диапазонах, в том числе в «окне прозрачности» в интервале длин волн 10,4 – 12,5 мкм. Пространственное разрешение в этом канале составляет 120 м при радиометрической чувствительности 0,5 К.

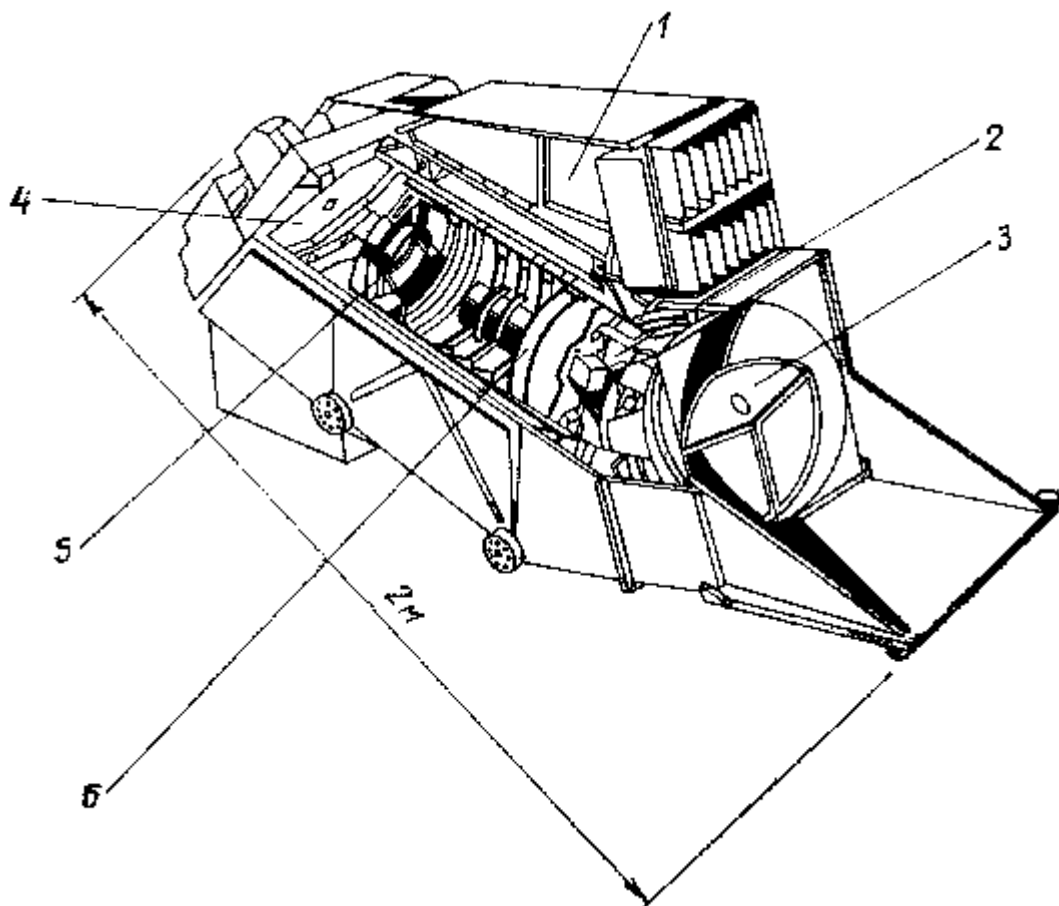


Рис. 15. Тематический картограф спутника «Лэндсат»:

1 – электронные блоки; 2 – приемник излучения; 3 – радиационный холодильник; 4 – сканирующее зеркало; 5 – вторичное зеркало; 6 – первичное зеркало

При анализе параметров инфракрасного сканирующего устройства существенным является вопрос о его предельных возможностях. Существуют ли ограничения повышению разрешающей способности и какова их природа? Можно ли беспрестанно увеличивать апертуру и число приемных элементов, повышая тем самым разрешающую способность аппаратуры до бесконечности?

Вера во всемогущество оптики, переоценка возможностей оптических приборов могут создать иллюзию осуществимости проекта бортового инфракрасного устройства со сколь угодно малой детальностью получаемых с его помощью изображений. Например, обнаружение на таком изображении теплокровного белого зайца на фоне холодного снега или даже дымящейся сигареты во рту курильщика!

Граница, отделяющая возможное от невозможного, связана уже не с квантовой, а с волновой природой инфракрасного излучения, в частности с дифракцией электромагнитных волн. В оптической системе аппаратуры дифракция проявляется в том, что изображение точки на земной поверхности превращается в

пятно, окруженное сложной дифракционной картиной. Если точка изображается неверно, то и всякий элемент будет представляться в искаженном виде. Тем самым дифракция приводит к размытию изображения. Величина искажений характеризуется диаметром кружка рассеяния, обусловленного дифракцией. Угловой диаметр кружка пропорционален длине волны и обратно пропорционален диаметру апертуры.

У сканирующих устройств, работающих в интервале длин волн 10 – 12 мкм, при диаметрах объективов 50 и 200 см угловой диаметр дифракционного кружка рассеяния будет составлять соответственно 0,1 и 0,02 мрад. Уменьшать мгновенный угол зрения аппаратуры ниже этого предела нецелесообразно, так как детали меньшего размера будут все равно неразличимы. Помимо принципиального дифракционного предела, потенциальное увеличение пространственного разрешения ограничивается возможностями современной оптической технологии, в частности, геометрическим несовершенством оптики и несоосностью оптических элементов.

В рассмотренных ранее двухзеркальных оптических системах (см. рис. 9) размеры кружка рассеяния из-за неточности геометрии и сборки оптики не превышают дифракционного кружка. Предельное значение пространственного разрешения инфракрасной аппаратуры, обусловленное дифракцией и оптическими aberrациями, показано на рис. 14 штриховой линией. Как видно, оптический предел не препятствует десятикратному улучшению разрешающей способности за счет увеличения апертуры и количества приемников. Однако дальнейшее усовершенствование сканирующей аппаратуры, построенной в соответствии с рассмотренными техническими решениями, стеснено оптическими ограничениями.

Высказанные оптимистические соображения о возможности увеличения разрешающей способности справедливы только вблизи главной оптической оси. Если же мы разместим в фокальной плоскости телескопа линейку приемников таким образом, чтобы оптическая ось проходила через центр линейки, то периферийные чувствительные площадки будут удаляться все дальше от оптической оси по мере увеличения числа элементов в линейке. Резкое увеличение aberrаций при отклонении от оптической оси может привести к тому, что на краях линейки угловой диаметр кружка рассеяния начнет превышать угловой размер одного чувствительного элемента линейки. Это, как мы знаем, не позволит реализовать пространственное разрешение, соответствующее каждому элементу линейки.

Словом, aberrации оптических систем являются серьезным ограничивающим фактором для применения линеек и матриц приемников с очень большим числом элементов. Это обстоятельство препятствует увеличению поля обзора и разрешающей способности систем со сканированием пространства изображений и заставляет использовать в аппаратуре с широкой полосой обзора развертку в плоскости объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каждой ступени развития производительных сил общества соответствует определенный уровень измерительной техники. Прогресс человечества неразрывно связан с созданием средств для получения опытным путем информации о величинах, характеризующих свойства и состояние производственных процессов, явлений природы. Поэтому без особого преувеличения можно сказать, что во все времена приборостроение занимало одно из центральных мест в науке и жизни, являлось их неотъемлемой частью независимо от того, говорим ли мы о примитивных устройствах для измерения масс и расстояний в глубокой древности, об угломерных инструментах в античную эпоху, идет ли речь о телескопе Галилея или о бортовом инфракрасном сканирующем устройстве. По своей физической сущности бортовая инфракрасная аппаратура представляет измерительный преобразователь теплового излучения Земли в электрический сигнал. Ознакомившись с ее устройством, мы видим, что это большая система с множеством разного рода связей, как внешних, так и внутренних.

Мы рассмотрели достаточно подробно лишь внутреннее строение, так сказать, принципиальную схему функционирования такой системы. Действительное ее воплощение сопряжено в каждом конкретном случае с большим объемом исследовательских и проектных работ. Высокого мастерства от разработчиков требует внедрение в единую аппаратуру таких разнородных новшеств, как высокостабильные устройства развертки, микрокриогенные системы, охлаждаемые приемники излучения, крупногабаритные оптические телескопы, калибровочные опорные нагреватели и т. д.

Тем не менее сочетание теории, эксперимента и промышленного производства позволило создать весьма совершенные приборы. Доставляемая инфракрасной аппаратурой информация обладает необходимым пространственным, радиационным, спектральным разрешением, поступает с заданной оперативностью. Ранее описанные принципы лежат в основе работы нескольких классов инфракрасных аппаратур – тепловизионной, радиометрической, спектрометрической, актинометрической, – отличающихся своим назначением. За прошедшие с начала космической эры годы изготовлено и испытано несколько десятков инфракрасных систем, успешно прошедших проверку на «дееспособность» в составе автоматических и пилотируемых космических аппаратов.

Что касается внешних связей инфракрасной аппаратуры, то ее взаимоотношения с другими системами космического аппарата, вопросы усиления и передачи сигналов на Землю, приема, обработки и распространения спутниковой информации на Земле представляют не менее интересный раздел космической техники и ее применений, но уже выходят за рамки настоящей брошюры. Отметим лишь, что информация о невидимом инфракрасном излучении Земли, поступающая со спутника в виде электрического сигнала, в регистрирующих наземных устройствах может воспроизводиться с минимальными искажениями уже в видимом свете (например, на фотопленке или на экране электронно-лучевой

трубки). Почернение на фотоснимке или яркость свечения экрана в каждой точке полученного таким образом теплового «слепок» Земли пропорциональны излучению от соответствующего элемента ландшафта. Тепловизионные изображения являются удобным для использования и наглядным видом представления инфракрасной информации. В конечном счете такие снимки делают невидимое зримым.

Инфракрасные изображения связаны с физической температурой излучающей поверхности. Тем самым инфракрасная аппаратура исполняет роль своеобразного космического термометра. Иллюстрацией может служить, полученная с помощью спутниковых измерений в инфракрасном спектре, глобальная карта средней температуры земной поверхности, схематично представленная на четвертой странице обложки и охватывающая весь диапазон земных температурных условий от жгучих холодов Антарктиды до знойной жары пустыни Сахара. Инфракрасной космической иконикой назвал образно инфракрасные снимки Земли один из разработчиков такой аппаратуры. И действительно, подобно иконам выдающихся мастеров, позволяющим глубже познать человеческую природу, тепловые «лики» Земли открывают неведомые тайны скрытых процессов, происходящих на Земле и в ее атмосфере. Скрупулезные исследования этих прихотливых и изменчивых инфракрасных изображений позволили узнать необычайно много нового и неожиданного.

Температурное поле Земли зависит от физических параметров разнообразных объектов на ее поверхности, свойств и состояния атмосферы, изменений потока солнечной радиации в течение суток и года. Для понимания всех факторов, влияющих на формирование земного температурного поля, инфракрасная техника дистанционного зондирования предоставляет ценнейшую информацию, дополняет традиционные методы исследований земной поверхности, атмосферы, океана. Фактически бортовая инфракрасная аппаратура поставляет только косвенную измерительную информацию о тепловом излучении Земли. Искомые значения температур, концентраций, состава атмосферы, земной поверхности и т. д. находят на основании последующей обработки этой информации.

Из материалов брошюры видно, что современная бортовая измерительная инфракрасная техника представляет собой пример превращения успехов фундаментальных наук, изобретений и открытий последних десятилетий в технические достижения. При этом вклад науки в технический прогресс бесспорен. Однако потоки знаний и информации обратимы, и инфракрасная космическая техника, в свою очередь, революционизировала науки о Земле. Инфракрасное дистанционное зондирование Земли из космоса стало незаменимым средством решения задач гидрогеологии и инженерной геологии, геологического картирования, мелиорации и ирригации, изучения водной среды, снежного и ледяного покрова, районов вулканизма и геотермальной деятельности, охраны окружающей среды и т. д.

Без преувеличения можно сказать, что космические инфракрасные методы исследования находят применение во всех научных дисциплинах, связанных с изучением земной поверхности. Инфракрасная аппаратура космического базирования поставляет «сырой материал», используемый для научных и практических целей, открывает глаза на многие недостаточно изученные

процессы на Земле и в ее атмосфере. Суммируя, можно сказать, что инфракрасная измерительная техника стала важной частью нашего оружия для наступления на неизведанное. Активный обмен информацией и идеями между учеными и инженерами определил облик описанных инфракрасных устройств космического базирования, их место в современной науке и практике, направления совершенствования инфракрасной аппаратуры.

Для обеспечения прогресса в сборе данных с помощью инфракрасного дистанционного зондирования можно ожидать, что в новых системах, рассчитанных на применение в последующие годы, будут использоваться охлаждаемые двухмерные матрицы приемников излучения в сочетании с приборами с зарядовой связью. Современная технология в области оптики, приемников излучения, микроэлектроники, криогенной техники, систем обработки и анализа данных движется вперед крупными шагами, демонстрирует все новые исключительно интересные возможности инфракрасных приборов космического базирования. Бурное развитие этой молодой области науки вселяет уверенность, что в будущем с помощью инфракрасной техники будут сделаны важные открытия в познании Земли и существующих на ней условий.

ХРОНИКА КОСМОНАВТИКИ *

* ПРОДОЛЖЕНИЕ (см. № 5 за 1987 г.). По материалам различных информационных агентств приводятся данные о запусках некоторых искусственных спутников Земли (ИСЗ), начиная с февраля 1987 г. О пилотируемых полетах рассказывается в отдельных приложениях. О запусках ИСЗ серии «Космос» регулярно сообщается, например, на страницах журнала «Природа», куда и отсылаем интересующихся читателей.

5 ФЕВРАЛЯ в Японии с космодрома Утиноура с помощью ракеты-носителя (РН) «Мю-3С-2» запущен ИСЗ «Гинга» («Галактика») массой 420 кг. На его борту находятся приборы, разработанные японскими, английскими и американскими учеными и предназначенные для исследований в области рентгеновской астрономии, в том числе для изучения галактических дискретных источников рентгеновского излучения.

19 ФЕВРАЛЯ в Японии с космодрома Танегасима при последнем запуске РН «Эн-2» выведен на околополярную солнечно-синхронную орбиту ИСЗ «Момо» массой 750 кг, предназначенный для исследований природных ресурсов океана. В состав его аппаратуры входят многозональный радиометр с разрешающей способностью 50 м, микроволновый радиометр и радиометр, работающий в видимой и инфракрасной областях спектра. Кроме того, ИСЗ снабжен системой ретрансляции информации, собираемой от автоматических наземных измерительных средств.

27 ФЕВРАЛЯ в США на мысе Канаверал с помощью РН «Дельта» на геостационарную орбиту к точке «стояния» 75° з. д. запущен очередной (7-й) метеорологический ИСЗ «ГОЕС», оснащенный экспериментальным ретранслятором (работающим на частоте 406 МГц) для международной поисковой системы КОСПАС–САРСАТ. Получение спутниковой информации с использованием ИСЗ «ГОЕС», чрезвычайно важной, в частности, для заблаговременного предупреждения о зарождении ураганов и их приближении к территории США, обеспечивается при двух работающих ИСЗ, однако с июня 1984 г. в работоспособном состоянии на орбите находился только один ИСЗ «ГОЕС», причем предыдущий запуск ИСЗ «ГОЕС» 3 мая 1986 г. закончился неудачей.

19 МАРТА в СССР с помощью РН «Протон» запущен очередной (19-й) ИСЗ связи «Радуга». Выведенный на геостационарную орбиту к точке «стояния» 85° в. д., он получил международный регистрационный индекс «Стационар-3». Наряду с геостационарными ИСЗ «Горизонт» и «Экран», а также ИСЗ «Молния-1» и «Молния-3» на высокоэллиптических орбитах, ИСЗ «Радуга» широко используются в системах спутникового телевизионного вещания, действующих в нашей стране.

20 МАРТА в США на мысе Канаверал с помощью РН «Дельта» запущен на геостационарную орбиту 2-й ИСЗ связи «Палапа-2П» для индонезийской системы спутниковой связи (подробнее об этом ИСЗ см. приложение к № 11 за 1985 г.).

Этот ИСЗ должен заменить ранее выведенный на геостационарную орбиту ИСЗ «Палапа-2», работающий со сбоями (оба ИСЗ разработаны и изготовлены американской фирмой «Хьюз»). Первоначально вывод ИСЗ «Палапа-2П» планировался в июне 1986 г. при полете очередного МТКК, однако взрыв американского МТКК «Челленджер» в начале прошлого года помешал этим планам.

24 МАРТА в Индии неудачей закончился первый испытательный запуск индийской новой твердотопливной РН АСЛВ, с помощью которой должен был быть выведен на орбиту ИСЗ, предназначенный для исследований в области гамма-астрономии.

24 МАРТА в США на мысе Канаверал неудачей закончился запуск РН «Атлас–Центавр» (предполагают, что причиной аварии при запуске стало попадание разрядов молнии в РН). Таким образом, примерно в течение года потерпели аварии все основные ракетно-космические средства США (МТКК «Челленджер», РН «Титан», «Дельта» и, наконец, «Атлас–Центавр»).

24 АПРЕЛЯ в СССР с помощью РН «Союз» запущен ИСЗ «Космос-1841», предназначенный для проведения экспериментов по получению полупроводниковых материалов с улучшенными свойствами и особо чистых биологических препаратов. Через 14 сут после выполнения программы исследований полученные опытные образцы по космическому материаловедению были доставлены на Землю для дальнейшего изучения в земных лабораториях.

11 МАЯ в СССР с помощью РН «Протон» запущен очередной (14-й) ИСЗ связи «Горизонт». Выведенный на геостационарную орбиту к точке «стояния» 140° в. д., он получил международный регистрационный индекс «Стационар-7». Помимо использования для передачи телевизионных программ на сеть наземных станций «Орбита», «Москва» и «Интеркосмос», этот ИСЗ служит для связи с судами и самолетами при помощи дополнительных ретрансляторов.

15 МАЯ в СССР на космодроме Байконур в рамках программы летно-конструкторских испытаний состоялся первый запуск новой мощной универсальной РН «Энергия», предназначенной для выведения как многоразовых орбитальных кораблей, так и крупногабаритных космических аппаратов научного и народно-хозяйственного назначения. Первые испытания универсальной тяжелой РН, являющейся основным звеном создаваемой в СССР многоразовой транспортной космической системы, а также уникального стартового комплекса завершились полным успехом. После окончания работы двигателей первой ступени произошло ее отделение и приземление в расчетном районе на территории СССР. Вторая ступень РН продолжала работу в строгом соответствии с полетным заданием и вывела в расчетную точку габаритно-весовой макет спутника. После разделения с этим макетом вторая ступень приводнилась в заданном районе акватории Тихого океана.

Двухступенчатая РН «Энергия» высотой около 60 м выполнена по схеме «пакет» с боковым размещением выводимого полезного груза. Ее первая ступень состоит из четырех боковых блоков – ускорителей, вторая – представляет собой центральный блок длиной около 60 м и диаметром около 8 м. Двигатели первой

ступени, самые мощные в мире, работают на кислородно-керосиновом топливе, четыре двигателя второй ступени – на жидких кислороде и водороде. При стартовой массе свыше 2000 т РН «Энергия» может выводить на орбиту более 100 т полезного груза.

Отделившийся от второй ступени габаритно-весовой макет спутника должен был с помощью собственного двигателя выйти на круговую орбиту, однако в работе его бортовых систем произошел сбой, и на заданную орбиту он не вышел. В процессе работы двигателя, который должен был перевести макет на более высокую орбиту, неправильно сработала система ориентации макета. Однако эта неудача к испытаниям самой РН «Энергия» не имела никакого отношения.

Подписное научно-популярное издание

Фридрих Самойлович Ортенберг

МЕТОДЫ ИНФРАКРАСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Главный отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*

Редактор *Е. Ю. Ермаков*

Мл. редактор *Е. Е. Куликова*

Обложка художника *А. А. Астрецова*

Худож. редактор *Т. С. Егорова*

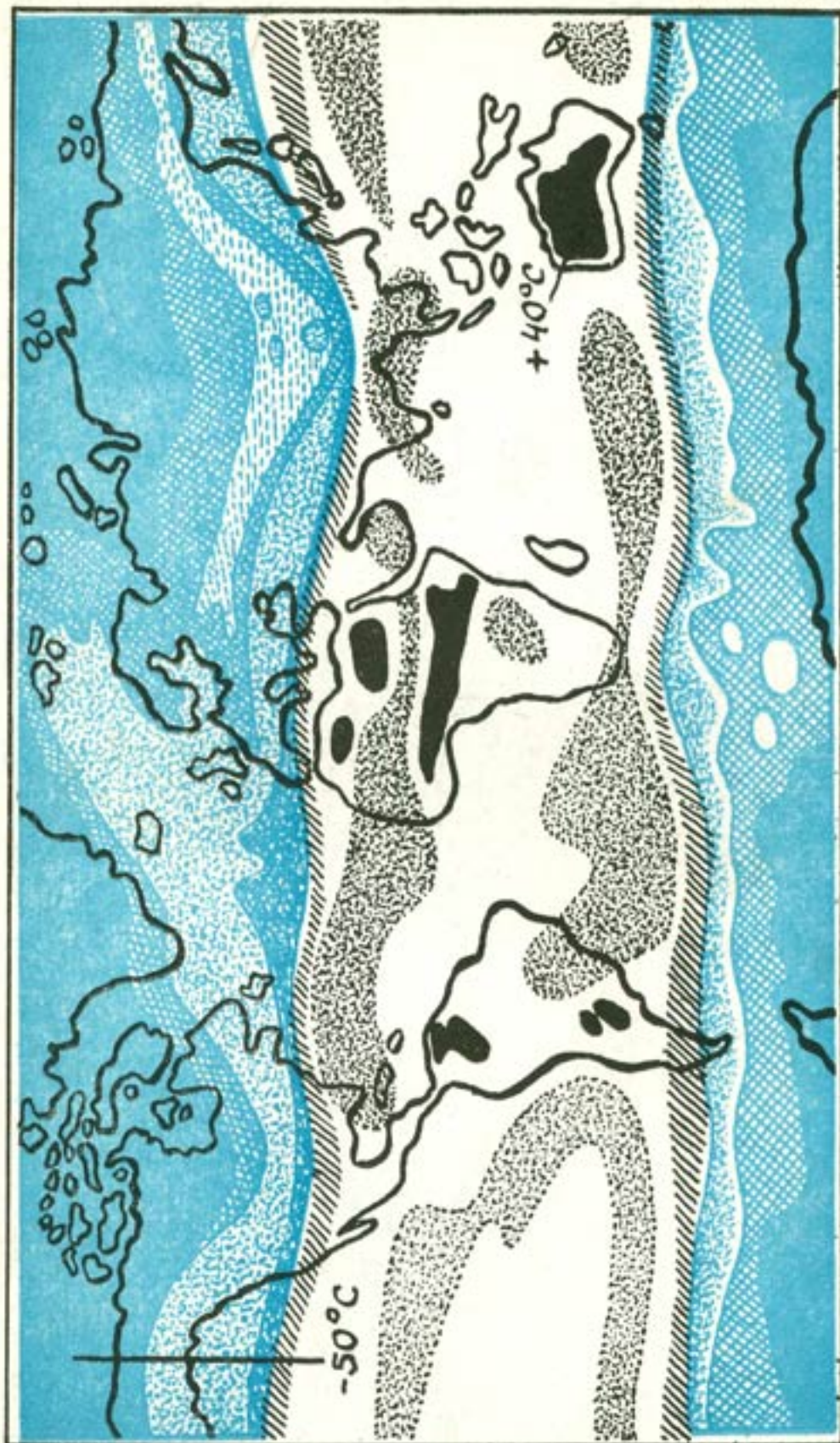
Техн. редактор *Н. В. Калюжная*

Корректор *В. В. Каночкина*

ИБ № 8892

Сдано в набор 20.05.87. Подписано к печати 10.07.87. Т 00568. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,47. Тираж 31 728 экз. Заказ 1141. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 874208.

Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



СЕРИЯ **КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ**