

В.А. СОЛОМАТИН

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СКАНЕРЫ И СПЕКТРОМЕТРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Учебное пособие для вузов

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 12.00.00 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии» в качестве *учебного пособия* для реализации образовательных программ высшего образования по направлению подготовки магистратуры 12.04.02 «Оптотехника»; специальности 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения»

МОСКВА
«ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2021

УДК 681.782.473

ББК 32.85

С 60

РЕЦЕНЗЕНТЫ : д.т.н., проф. А.К. Цицулин,
АО «НИИ телевидения»;
д.т.н., проф. В.С. Титов,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный университет»

Соломатин В.А.

С 60 Оптико-электронные сканеры и спектрометры космических аппаратов. М.: Инновационное машиностроение, 2021. 156 с. ил.

ISBN 978-5-907104-89-1

Рассмотрены принципы построения, элементная база, схемы и параметры оптико-электронных сканеров и спектрометров космических аппаратов.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» и по смежным специальностям. Может быть полезна специалистам, занимающимся разработкой, внедрением и эксплуатацией оптико-электронного оборудования космических аппаратов.

УДК 81.782.473

ББК 32.85

ISBN 978-5-907104-89-1

© В.А. Соломатин, 2021

© ООО «Издательство „Инновационное машиностроение“, 2021

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.

Оглавление

Введение.....	5
ГЛАВА 1. Оптические элементы сканеров и спектрометров.....	9
1.1. Объективы	9
1.2. Оптические фильтры	15
1.3. Диспергирующие элементы	21
1.4. Поляризационные элементы	30
1.5. Волоконно-оптические элементы	34
1.6. Оптические элементы сканирующих систем	37
1.7. Приемники излучения	41
1.7.1. Приемники излучения VIS и VNIR	41
1.7.2. Приемники излучения ИК-диапазона	51
Контрольные вопросы	58
ГЛАВА 2. Whishbroom-сканеры	61
2.1. Структурная схема whishbroom-сканера	61
2.2. Пространственно-временные соотношения в технологии whishbroom.	68
2.3. Энергетическое уравнение whishbroom-сканера	70
2.4. Пространственно-частотные соотношения в технологии whishbroom.	73
2.5. Схемы, параметры и характеристики whishbroom-сканеров	76
2.5.1. Сканер MSS спутника Landsat	76
2.5.2. Сканер TM спутника Landsat	78
2.5.3. Сканер MCV-CK спутников Метеор	81
2.5.4. Сканер-поляриметр POLDER спутника ADEOS	84
2.5.5. Сканер-поляриметр APS спутника Glory	86
Контрольные вопросы	89
ГЛАВА 3. Pushbroom-сканеры.....	90
3.1. Структурная схема pushbroom-сканера	90
3.2. Энергетическое уравнение pushbroom-сканера	92
3.3. Пространственно-частотные соотношения в технологии pushbroom.	94
3.4. Схемы, параметры и характеристики pushbroom-сканеров	97
3.4.1. Сканер ALI спутника EO-1	97

3.4.2. Сканер OSA спутника Ikonos-2	100
3.4.3. Сканер OLI спутника Landsat-8	103
3.4.4. Сканер NAOMI спутников SPOT-6,7	105
3.4.5. Сканеры спутника «Канопус-В»	108
3.4.6. Сканер HiRi спутника Pleiades	111
3.4.7. Сканер VGT-P спутника PROBA-V	114
Контрольные вопросы	117
ГЛАВА 4. Спектрометры	118
4.1. Классификация спектрометров	118
4.2. Схемы, параметры и характеристики спектрометров	130
4.2.1. Фурье-спектрометр IMG спутника ADEOS	130
4.2.2. Фурье-спектрометр IASI-NG спутника MetOp-SG	132
4.2.3. Фильтровый спектрометр OCO-2	137
4.2.4. Дисперсионный гиперспектрометр Hiperion спутника EO-1	141
4.2.5. Фильтровый гиперспектрометр AaSI спутника Aalto-1	143
4.2.6. Дисперсионный гиперспектрометр HSI спутника EnMAP	145
4.2.7. Дисперсионный гиперспектрометр DESIS международной космической станции	149
Контрольные вопросы	151
Список литературы	153

Введение

Первые изображение земной поверхности из ближнего космоса вплоть до высоты 200 км были получены с помощью аппаратуры, установленной на баллистических ракетах и зондах. Еще в 1945 г. немецкая ракета Fau-2, запущенная с американского ракетного полигона White Sands, была оснащена фотоаппаратом, который был возвращен на Землю в специальной капсуле вместе с отснятой пленкой. Начало систематического обзора земной поверхности из космоса приходится на 60-е годы. В США первый метеорологический спутник Tiros-1 был запущен 1 апреля 1960 г. Вскоре появились и отечественные спутники аналогичного назначения серии «Космос» и «Метеор». С тех пор космические технологии дистанционного зондирования Земли бурно развиваются, непрерывно расширяются области применения данных дистанционного зондирования. Успешно эксплуатируются десятки специализированных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в разработке находятся сотни новых проектов, реализуемых в различных странах.

Основными областями применения космической информации, полученной в результате ДЗЗ, по оценке Федерального космического агентства являются:

- гидрометеорология, для решения конкретных задач которой необходимо периодическое получение в глобальном масштабе космических данных об облачном и снежно-ледовом покровах, трехмерных полях температуры и влагосодержания атмосферы, трехмерном поле ветра, температуре и других физико-химических параметрах поверхности Земли, зонах и интенсивности осадков, крупномасштабных и опасных процессах в атмосфере и на поверхности Земли (циклоны, антициклоны, тропические штормы и ураганы, стихийные гидрометеорологические явле-

ния и др.), всех составляющих элементов для изучения эволюции климата (альbedo Земли, малые газы, аэрозоль, вариации солнечного излучения и т. д.), гелиогеофизических параметрах «погоды» Земли в околоземном космосе и динамике изменения растительного покрова;

- экологический мониторинг на глобальном, региональном и локальном уровнях за распространением загрязнений во всех трех основных природных сферах (атмосфера, поверхность суши, водная среда), развитием эрозионных и других процессов деградации природной среды; обнаружение факта и адресная локализация крупных промышленных и иных источников загрязнения окружающей среды; контроль трансграничного переноса загрязнений; экологический мониторинг районов добычи полезных ископаемых, транспортировки углеводородного топлива и других химических продуктов (аммиак и т.д.) и крупнейших скоплений промышленных предприятий и мегаполисов;

- мониторинг чрезвычайных ситуаций, включая обнаружение факта ЧС, оценку масштабов и характера разрушений; прогнозирование землетрясений и других разрушительных природных явлений; оповещение о цунами, наводнениях, селях, химическом и ином заражении местности, лесных пожарах, крупных разливах нефтепродуктов и т. д.;

- создание и обновление широкого спектра общегеографических и тематических картографических материалов (топографические карты, карты в цифровом виде, ГИС разного назначения, карты сейсмичности и геологического риска, карты лесных массивов, сельхозугодий и другого тематического назначения);

- информационное обеспечение деятельности по землеустройству, прокладке транспортных магистралей, строительству промышленных объектов и градостроительству, составлению кадастров земельных и иных природных ресурсов;

- информационное обеспечение хозяйственной деятельности в ведущих отраслях социальной экономики, связанных с использованием и переработкой возобновляемых и невозобновляемых природных ресурсов, включая сельское, рыбное, лес-

ное, водное хозяйство, геологию и разработку месторождений полезных ископаемых;

- океанография и океанология (зондирование водных поверхностей в целях определения их температуры, солености, цветности, прозрачности, биопродуктивности, загрязнений, течений, ледовой обстановки, волнения, приводного ветра, а также изучение шельфа);

- фундаментальное изучение закономерностей и тенденций изменения глобальных и крупнейших региональных процессов в атмосфере и других оболочках нашей планеты (гидросфера, криосфера, биосфера, околоземный космос и магнитосфера).

Многие страны, в их числе США, Россия, Франция, Китай, Япония, имеют долгосрочные программы по развитию ДЗЗ. Ведущие космические державы прилагают организационные усилия по созданию космических систем глобального мониторинга Земли в рамках международного сотрудничества. Активно развиваются коммерческие программы в области ДЗЗ. Так, в США большинство спутников со сверхвысоким пространственным разрешением (менее 1 м) являются коммерческими. Создание космической аппаратуры ДЗЗ имеет в ряде случаев характер учебно-исследовательской работы, проводимой в ведущих высших учебных заведениях США, Японии, европейских стран. Современные спутники ДЗЗ способны решать и оборонные задачи, реализуя принцип двойных технологий. Такие примеры можно найти в ходе локальных вооруженных конфликтов и малых войн, уже произошедших в XXI в. В наши дни информация, полученная космическими системами ДЗЗ, стала доступна не только крупным специализированным предприятиям, но и мелким фирмам, частным лицам. Космические снимки Земли широко распространяются, в частности, через Интернет.

Важнейшую роль в технологиях ДЗЗ играют оптико-электронные системы, позволяющие получать данные в широком диапазоне спектра электромагнитных волн. В современной технической литературе по оптико-электронным системам часто используются обобщающие обозначения спектральных диапазонов оптического излучения: VIS (visible) — видимый диа-

пазон; VNIR (Visible and Near Infrared) — видимый и ближний ИК-диапазоны; SWIR (Short Wave Infrared) — коротковолновый ИК-диапазон; SMIR (Short and Medial Infrared) — коротковолновый и средневолновый ИК-диапазоны; MWIR (Medial Wave Infrared) — средневолновый ИК-диапазон; LWIR (Long Wave Infrared) — длинноволновой диапазон.

Наряду с телевизионными системами первыми спутниковыми системами ДЗЗ стали оптико-электронные радиометры и спектрометрические приборы. Эта была аппаратура трассового типа — проекция области измерений на поверхность Земли представляла собой линию. Позднее появилась и широко распространилась аппаратура ДЗЗ панорамного типа — сканеры, проекция области измерений на поверхность Земли которых представляет собой полосу обзора. В последние годы определились два ведущих направления развития пассивных оптико-электронных систем ДЗЗ — многоспектральные сканеры и спектрометры, а в наиболее совершенном варианте — гиперспектрометры. В многоспектральных сканерах с высоким пространственным разрешением одновременно формируется изображение в десятках узких спектральных каналах. В гиперспектрометрах анализируется непрерывный спектр пространственных элементов земной поверхности, при этом число спектральных каналов может составлять от сотен до нескольких тысяч. Переход от трассовых спектрометров к гиперспектрометрам стал возможен в связи с развитием информационных технологий, обеспечивающих эффективную цифровую обработку изображений.

В учебном пособии рассматриваются принципы построения, элементная база, схемы, параметры и характеристики многоспектральных сканеров, спектрометров и гиперспектрометров, составляющих основу спутниковой оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ в оптическом диапазоне спектра. Особое внимание уделено рассмотрению инновационных схемотехнических решений, поскольку публикуемые обзоры аппаратуры ДЗЗ обычно содержат внешние (эксплуатационные) параметры таких систем. Будущим же разработчикам интересны принципы построения оптико-электронных систем ДЗЗ и их схемотехника.