

Средства измерений

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Артюхина Н. К., Котов М. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В статье показаны факторы, влияющие на качество изображения Земли, получаемого с помощью видеоспектрометров: высота орбиты космического аппарата, атмосфера, характеристики оптической схемы, вид диспергирующего элемента, вид фотоприемника. Представлены результаты проработки вопроса о влиянии на параметры оптической системы видеоспектрометра указанных факторов, исходя из требований и ограничений вносимых различными звеньями оптико-электронного тракта.

Видеоспектрометр дистанционного зондирования Земли из космоса – оптико-электронный прибор, позволяющий получать изображение предмета в большом количестве узких спектральных диапазонов. Для получения количественной и качественной оценки работы видеоспектрометра в условиях съемки земной поверхности из космоса в отношении способности формирования гиперспектрального изображения была исследована математическая модель видеоспектрометра, отражающая наиболее важные процессы, происходящие в нем. Высота орбиты влияет на пространственное разрешение и полосу захвата съемочной системы, атмосфера вносит вклад в спектр снимаемого объекта, а также ухудшает пространственное разрешение. Способ разложения оптического

спектра наблюдаемого объекта и вид дисперсионного элемента влияют на принципиальную схему построения прибора. Характеристики оптической системы, включая фотоприемник, подбираются таким образом, чтобы компенсировать разного рода искажения, возникающие во всех звеньях оптико-электронного тракта видеоспектрометра для получения требуемого качества изображения.

В настоящее время существует достаточно широкий набор видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с числом спектральных каналов от нескольких десятков до нескольких сот.

В таблице 1 приведены параметры видеоспектрометров ДЗЗ космического базирования [1].

Таблица 1

Примеры видеоспектрометров ДЗЗ

Спектрометр (спутник, агентство)	Год запуска	Число спектральных каналов	Спектральный диапазон, мкм	Спектральное разрешение, нм	Пространственное разрешение, м (полоса захвата, км)
SPIMs (MSX, DoD)	1996	272	0.4–1.0	15 nm	770 (15)
HYPERION (EO-1, NASA)	2000	220	0.4–2.5	10 nm	30 (7,5)
AFRL (MightySat II, BBC (США))	2000	256	0.4–1.0	2–6 nm	50 (15) m
CHRIS (PROBA, EКА)	2001	19–62	0.4–1.0	1.25–11 nm	25–50 (13)

Как видно из таблицы, современные видеоспектрометры космического базирования имеют порядка от 100 до 250 спектральных каналов со спектральным разрешением порядка 10 нм. При этом они имеют пространственное разрешение около 10 метров, что представляет сложившееся требование для мультиспектральных камер.

Технические характеристики видеоспектрометра

Основные технические характеристики видеоспектрометра следующие:

- полоса захвата – ширина снимаемого кадра – определяет ширину полосы съемки при полете космического аппарата с видеоспектрометром на борту;
- пространственное разрешение – минимальный элемент поверхности Земли различимый в изображении при зачетных условиях съемки;
- количество каналов – число различных спектральных диапазонов;
- спектральное разрешение – наименьшая ширина спектрального канала.

Также к ним следует добавить массогабаритные характеристики, однако этот вопрос не будет затронут в данной статье. Для создания и исследования модели видеоспектрометра были заданы в качестве базовых следующие основные технические характеристики, предъявляемые к видеоспектрометрам ДЗЗ космического базирования [1, 2]:

- пространственное разрешение не хуже 50 метров;
- число спектральных каналов не менее 100;
- спектральное разрешение не хуже 10 нм.

Цель статьи заключается в обобщении знаний о видеоспектрометрах дистанционного зондирования из космоса для детального понимания особенностей работы видеоспектрометров в специфических условиях пассивного наблюдения. Основным при исследовании был вопрос о том, возможно ли получить необходимое отношение сигнал/шум при различных параметрах диспергирующих элементов и при использовании тех или иных параметров оптических элементов видеоспектрометра. Величина отношения сигнал/шум показывает способность видео-спектрометра преобразовать спектральные составляющие предмета наблю-

дения в электрический сигнал с требуемым уровнем. Как показало исследование, значение этой величины достаточно велико во всем спектральном диапазоне при зачетных условиях съемки, кроме близких к 1000 нм спектральных каналов. Это обусловлено типом применяемого фотоприемника.

Математическая модель видеоспектрометра

В модели в качестве основного выходного параметра используется количество фотонов, регистрируемое одним пикселом фотоприемной матрицы, а также их распределения по матрице в зависимости от входного спектрального состава. Данные величины, наряду с шириной распределения излучения от спектрального канала, позволят понять систему видеоспектрометра ДЗЗ из космоса. Основные блоки модели показаны на рисунке 1.

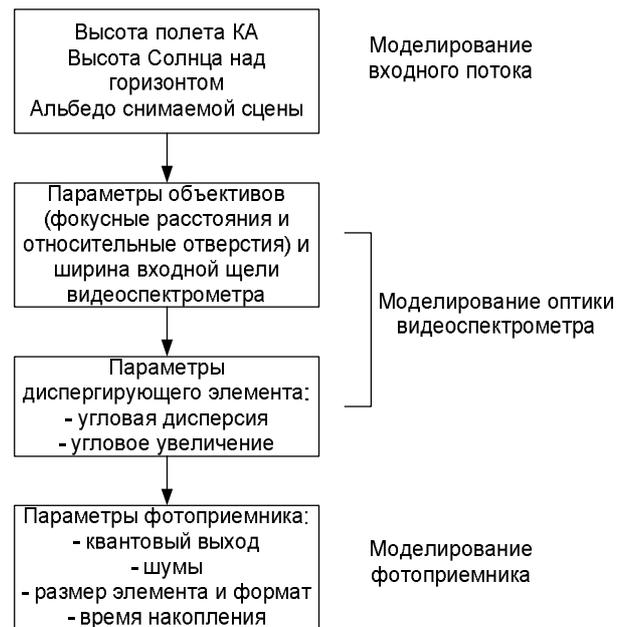


Рисунок 1 – Блочная структура энергетической модели видеоспектрометра

На первом этапе в модель вводится величина входного потока. Она вводится исходя из высоты полета космического аппарата с видеоспектрометром на борту и зачетных условий съемки. Зачетные условия съемки представляют собой значение альbedo снимаемой области и высоты Солнца над горизонтом.

На втором этапе моделируются параметры проецирующего объектива и входной щели. Исходя из их значения, определяется линейный размер изображения предмета в плоскости

входной щели и ее яркость, а также пространственное разрешение видеоспектрометра.

На третьем этапе моделируются параметры диспергирующего элемента. Их значения определяют значения угловой дисперсии.

На четвертом этапе в модели задаются параметры коллиматорного и камерного объективов. На выходе определяется распределение освещенности в фокальной плоскости видеоспектрометра и размер изображения [3, 4].

И наконец, в модель вводится фотоприемник – матричный ПЗС. Он выполняет преобразование разложенного в спектр изображения входной щели в заряды.

В качестве фотоприемной матрицы задан 4-мегапиксельный ПЗС матрицей (2048x2048) с размером элемента 7,4 мкм с уровнем собственных шумов 60 электронов. То есть, для обеспечения 100 спектральных каналов, необходимо чтобы в среднем по матрице один спектральный канал занимал 20 строк.

Построенная математическая модель отражает наиболее важные процессы, происходящие в видеоспектрометре:

- формирование изображения земной поверхности на входной щели;
- формирование разложенного в спектр изображения входной щели в плоскости фотоприемной матрицы;
- преобразование спектрального разложения изображения земной поверхности в электронный сигнал для дальнейшего анализа.

Рассмотрим эти три процесса более подробно.

Формирование изображения земной поверхности на входной щели

Высота Солнца над горизонтом во время съемки при детальном изучении земной поверхности обычно составляет не менее 20°. При этих условиях получается, что яркость Земной поверхности составляет в среднем 3,6 Вт/(м²ср) с учетом альбедо поверхности.

При проецировании входная щель будет иметь такую же яркость, согласно закону сохранения энергии.

Данное заключение сделано без учета потерь в оптике [5].

Проекция входной щели на поверхность Земли через проекционный объектив видеоспектрометра формирует геометрическое раз-

решение на местности L_R , определяемое выражением

$$L_R = b \frac{H}{f_{np}},$$

где H – высота полета космического аппарата; f_{np} – фокусное расстояние проекционного объектива; b – поперечный размер входной щели.

Формирование спектрального разложения

Использование призмы

Зададимся стандартной призмой с преломляющим углом 60°, изготовленной из стекла ТФ1. И зададимся размерами входной щели равной 74 мкм (в два раза меньше, чем средняя ширина спектрального канала на фотоприемнике).

В этом случае при использовании камерного и проекционного объективов с фокусными расстояниями 100 мм, как показывает модель, на матрицу попадает участок спектра от 400 до 813 нм.

На рисунке 2 представлен вид относительного распределения освещенности от монохроматического излучения с длиной волны 600 нм.

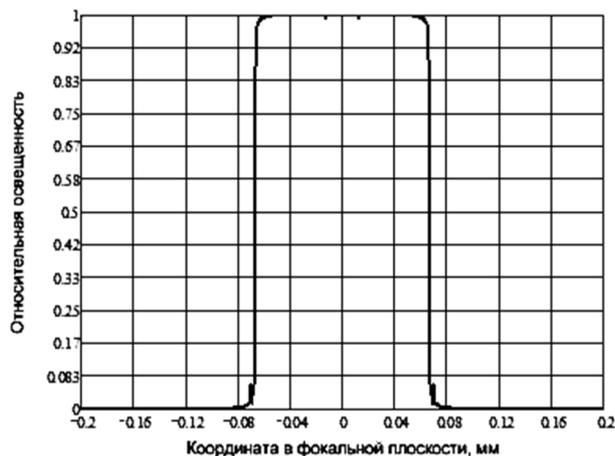


Рисунок 2 – Распределение освещенности монохроматического излучения

Как видно из рисунка 2 дифракционные явления практически не сказываются в формировании изображения. Поэтому вид функции распределения освещенности изображения

входной щели имеет практически П-образную форму.

На рисунке 3 показан размер изображений входной щели в количествах пикселей для различных длин волн при тех же параметрах системы.

Как видно из рисунка 3, ширина изображения щели в синей области несколько больше, чем 20 пикселей.

Это приводит к тому, что в синей области необходимо использовать несколько больше информативных строк матрицы, однако это увеличение не приводит к уменьшению спектрального разрешения в синей области, так как в этой области призма обладает сильной дисперсией (рисунок 4).

Как видно из представленных зависимостей, имеется довольно большие различия в синей и красной областях спектра при использовании в схеме видеоспектрометра призмного дисперсионного элемента.

Это приводит к сложностям постобработки сигнала. Данную проблему возможно решить, используя различные призмные системы.

Использование дифракционной решетки

При использовании дифракционной решетки необходимо рассчитать ее дисперсию, чтобы при конкретном фокусном расстоянии камерного объектива фотоприемная матрица полностью перекрывала требуемый спектр.

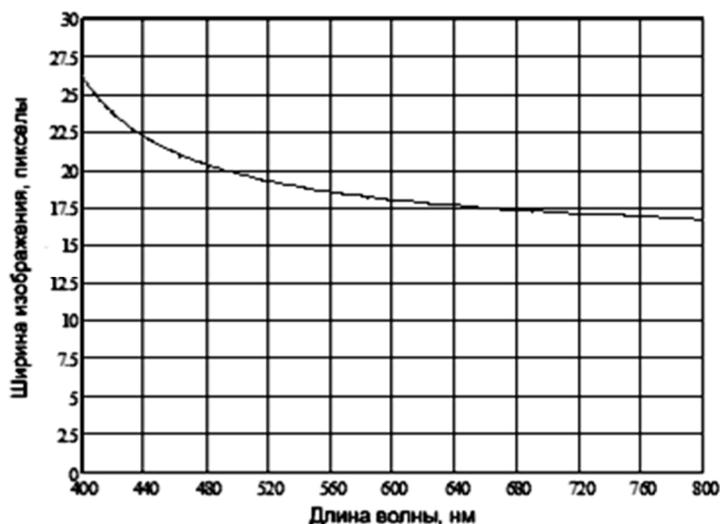


Рисунок 3 – Ширина изображения щели для различных длин волн

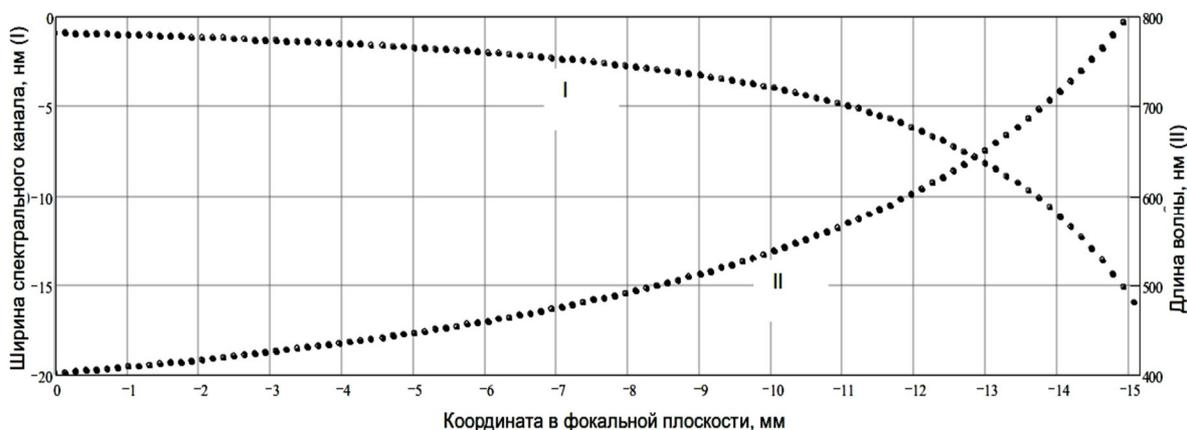


Рисунок 4 – Зависимость ширины спектральных каналов от положения на матрице (I) и соответствие положение канала длине волны (II)

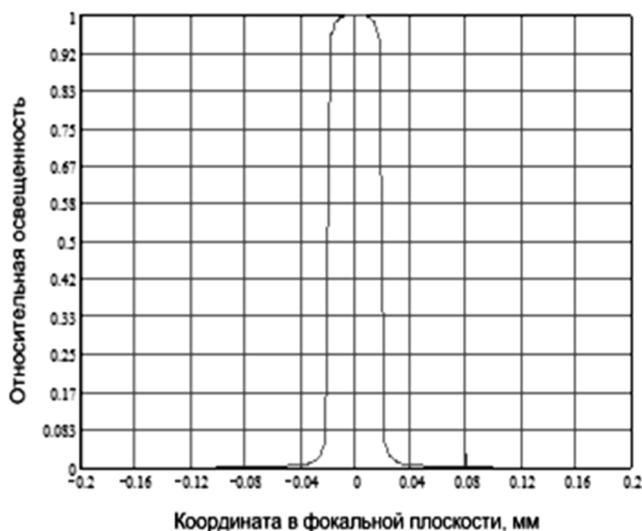


Рисунок 5 – Распределение освещенности монохроматического излучения

При исследовании модели были получены следующие величины:

- количество штрихов на мм дифракционной решетки равно 135;
- фокусное расстояние камерного объектива 183 мм;
- угол падения излучения на решетку $20,7^\circ$.

В этом случае имеем рабочий спектральный диапазон равный 400–1000 нм. (Для устранения перекрытия спектров необходимо использовать фильтр.)

На рисунке 5 показана ширина монохроматического изображения входной щели для длины волны 600 нм, при использовании кол-

лиматорного объектива с фокусным расстоянием 100 мм, и шириной щели 22 мкм.

Как видно из рисунка 5, дифракционные явления фактически не проявляются.

На рисунке 6 показана зависимость ширины спектральных каналов от положения на матрице (I) и соответствие положение канала длине волны (II) для системы с дифракционной решеткой с выбранными ранее параметрами.

Таким образом, качественно показан принцип формирования спектрального изображения входной щели видеоспектрометра при использовании призменного дисперсионного элемента и дифракционной решетки и при использовании компактных оптических систем проекционных объективов (имеются в виду значения фокусного расстояния).

Расчет отношения сигнал/шум

В качестве примера видеоспектрометра возьмем вариант с дифракционной решеткой. В качестве проекционного объектива выберем объектив с фокусным расстоянием 500 мм и относительным отверстием 1:3. Значение относительного отверстия считается максимальным для не очень сложных систем с приемлемым качеством изображения, а фокусное расстояние взято для проецирования во входную щель размером 44 мкм участка земной поверхности размером 50 м. Данный размер щели является минимальным для обеспечения требуемого отношения сигнал шум, а фокусное расстояние выбрано из соображений компактности.

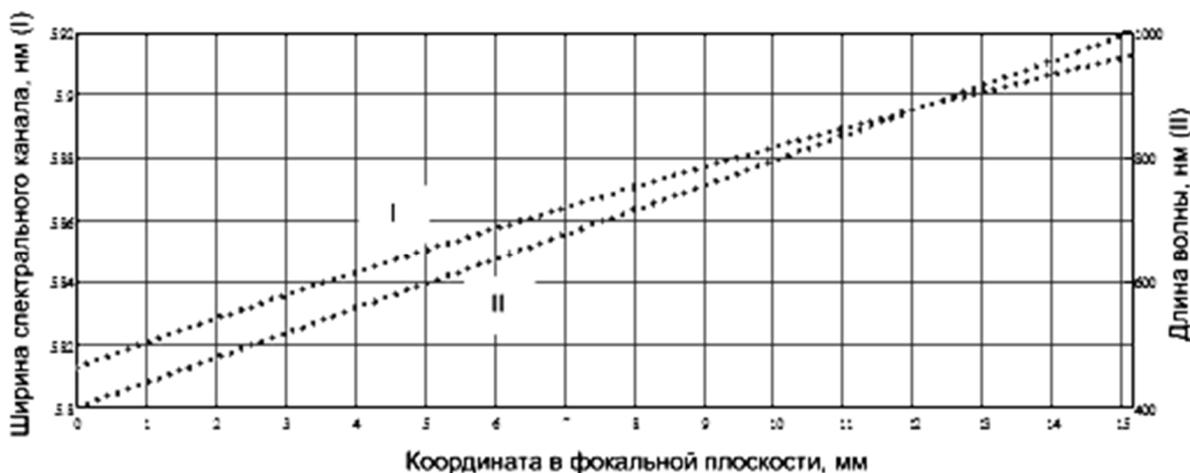


Рисунок 6 – Зависимость ширины спектральных каналов от положения на матрице (I) и соответствие положение канала длине волны (II)

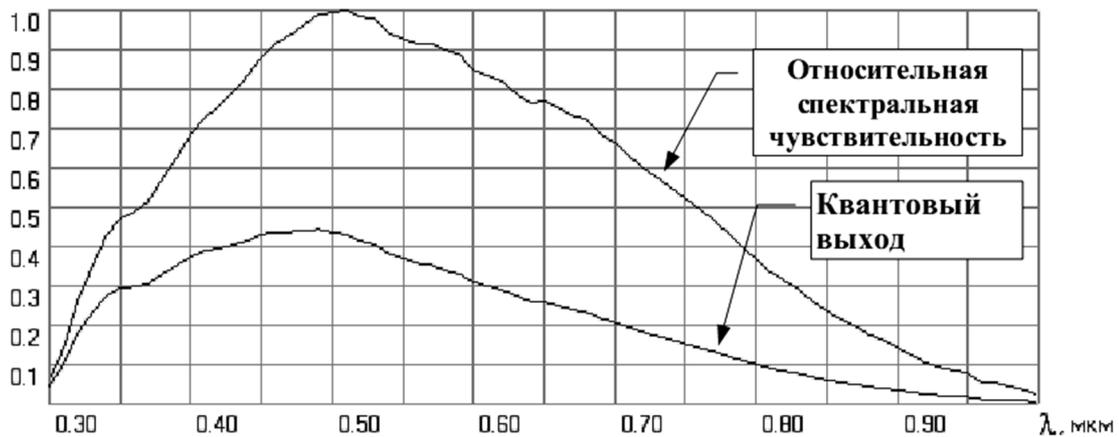


Рисунок 7 – Квантовый выход и относительная спектральная чувствительность ПЗС матрицы

Отношение сигнал/шум вычислялось следующим образом. Считалось, что входная щель видеоспектрометра освещена равномерным по спектру светом и имела интегральную яркость $1,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ср})$ (коэффициент потерь принимается 0,5). Далее щель с данной яркостью формирует освещенность в плоскости фотоприемника, которая вызывает некий отклик в нем, обусловленный значением освещенности и чувствительностью фотоприемника (значением квантового выхода).

Квантовый выход для данных типов выбранной нами матрицы показан на рисунке 7 [6].

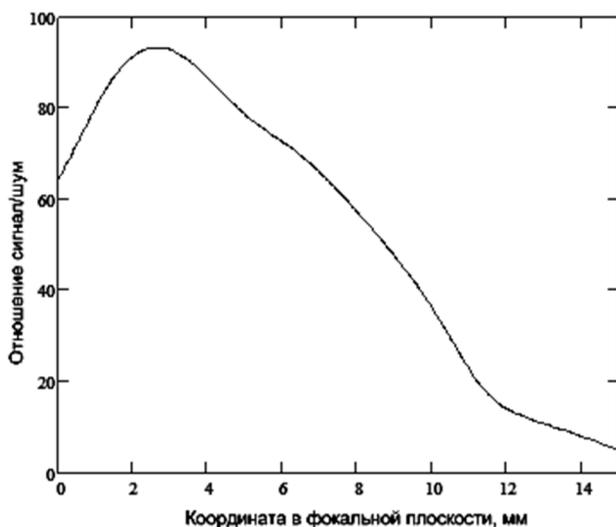


Рис 8. Зависимость отношения сигнал/шум в спектральном канале в зависимости от координаты на матрице

Далее, так как один канал занимает 20 строк матрицы, производится бинирование 20×20 (сложение соседних пикселей). Таким образом полезный сигнал увеличился в 400 раз, шум при этом также увеличился, но в 20 раз. Поэтому при бинировании отношение сигнал/шум возросло в 20 раз. Величина отношения сигнал/шум, полученная при моделировании, представлена на рисунке 8.

Из графика видно, что отношение сигнал/шум во всем диапазоне спектрального изображения превышает 10. И только лишь в области близкой к 1000 нм, имеет несколько меньшее значение, связанное с низкой чувствительностью фотоприемника.

Выводы

Для изучения работы видеоспектрометров ДЗЗ из космоса и оценки возможности создания и особенности построения видеоспектрометра с использованием диспергирующего и дифракционного метода разложения в спектр была создана математическая модель. Модель позволяет учитывать особенности съемки Земли из космоса, параметры оптической схемы и параметры фотоприемника. Модель позволяет получать распределение освещенности в спектральном изображении снимаемого предмета, спектральное разрешение в разных участках спектра, величину отношения сигнал/шум. При использовании простой призмы в качестве диспергирующего элемента имеются существенные различия в спектральном разрешении для различных участков спектра. Для решения данной проблемы необходимо использовать слож-

ные составные призмы или дифракционные решетки, позволяющие улучшить равномерность спектрального разрешения по спектру. С использованием параметров оптических компонент, принятых при моделировании отношение сигнал/шум принимает значение не менее 10 для всего спектрального диапазона, что позволяет уверенно выделять полезный сигнал над шумом. Таким образом, при исследовании получены основные выходные энергетические и спектральные параметры видеоспектрометров ДЗЗ в зависимости от принятых технических характеристик.

Список цитируемых источников

1. <http://www-optic.unine.ch/events/engelberg2007/pdf/MO4a%20-%20Hyperspectral%20Imagers%20-%20Nieke.pdf>. Hyperspectral Imagers. Год публикации 2007.
2. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_conf_pdf/C/Gryzdev.pdf. Действующие образцы видеоспектрометров видимого – ближнего ИК диапазона для авиационных и космических носителей. Год публикации 2008.
3. Пейсахсон, И. В. Оптика спектральных приборов. / И.В. Пейсахсон.– Изд. 2-ое, перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1975. – 312 с.
4. Скоков, И. В. Оптические спектральные приборы : уч. пособие для вузов / И. В Скоков. – М. : Машиностроение, 1984. – 240 с.
5. Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю.Г. Якушенков. – М. : Логос, 1999. – 480 с.
6. http://www.rastr.net/Download/Doc/RT1020DC_passport.pdf. Камера цифровая телевизионная RT-1020DC. Паспорт КЦТ1К-02. Год публикации 2007.

Artyukhina N.K., Kotov M.N.

Features of construction remote sensing imaging spectrometers from space

In article factors influencing quality of the Earth image received with imaging spectrometers are presented: height of an orbit of a spacecraft, atmosphere, characteristics of the optical scheme, type of dispersive element and a photodetector. Results of study of influence of the optical system parameters of a video spectrometer of factors are presented taking into account requirements and restrictions brought by various links of an optoelectronic path of the device.

Поступила в редакцию 01.07.2010.