

НЕКОТОРЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖАЮЩИХ ПРИБОРОВ

©2009 А.С. Рафаилович

Филиал Института физики полупроводников СО РАН
Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники,
г. Новосибирск

Поступила в редакцию 23.11.2009

Рассмотрена структурная схема приборов, предназначенных для получения пространственно-частотной и спектро-энергетической информации об исследуемом объекте. Определены взаимосвязи, методы и пути улучшения основных функциональных характеристик.

Ключевые слова: *спектральный изображающий прибор, функциональные характеристики*

Под спектральным изображающим прибором (СИП) в данной работе понимается прибор, предназначенный для получения информации о пространственно-частотных и спектральных характеристиках исследуемого объекта. В технической литературе для обозначения данного типа приборов часто применяется термин «видеоспектрометр», «imaging spectrometer». Такие приборы широко применяются для дистанционного зондирования Земли с авиационных и космических носителей. Иногда в качестве приборов данного типа рассматриваются цветные (многодиапазонные) телевизионные камеры и подобные им устройства [1]. На данный момент СИП развиваются по двум основным направлениям:

- сканирующие, где мгновенное линейное поле зрения представляет собой, как правило, узкий прямоугольник, длина которого значительно больше высоты, а пространственное сканирование осуществляется перемещением платформы-носителя;

- смотрящие, где мгновенное линейное поле зрения позволяет получать информацию сразу по двум координатам, представляя собой, плоскую фигуру, куда можно вписать прямоугольник, длина которого отличается от высоты на незначительную величину.

Обобщённая структурная схема СИП приведена на рисунке 1.

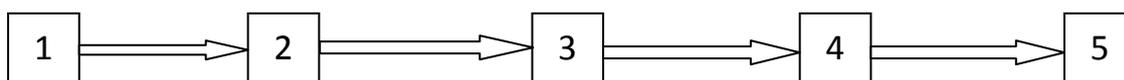


Рис. 1. Обобщённая структурная схема СИП: 1 – входная оптика; 2 – преобразователь излучения; 3 – приёмная оптика; 4 – приёмник излучения; 5 – модуль обработки сигнала

Излучение от исследуемого объекта, которое несёт информацию об объекте и среде, через которую оно прошло, приводится входной оптикой 1 к виду, пригодному для преобразования, позволяющего в дальнейшем проанализировать его спектральные характеристики. Действие преобразователя излучения 2 может быть основано на таких физических явлениях, как дифракция, интерференция и поляризация. В данном элементе излучение может быть селективно модулировано по амплитуде

или частоте. Приёмная оптика 3 переносит излучение на приёмник излучения 4, где оно преобразуется в электрический сигнал. Модуль обработки сигнала 5 предназначен для выделения из сигнала информации о спектральной и пространственно-частотной составляющей излучения от исследуемого объекта. Конструктивный элемент прибора может одновременно выполнять функции нескольких структурных элементов (СЭ). Например, асферическая вогнутая дифракционная решётка может играть роль 1, 2 и 3 элементов структурной схемы, или многодиапазонный фотоприёмник может выполнять функции 2, 3

Рафаилович Алексей Сергеевич, научный сотрудник.
E-mail: ra@oesd.ru

и 4 элементов. Преобразование сигнала, поступающего на вход СИП и несущего информацию об объекте и среде, через которую прошло излучение, в общем виде можно описать в виде передаточной функции (ПФ) G , представляющей собой произведение ПФ входящих в состав СИП структурных элементов G_i :

$$G = G_1 \times G_2 \times G_3 \times G_4 \times G_5 \quad (1)$$

Любое преобразование информации сопровождается определёнными потерями. Задача совершенствования характеристик СИП, таким образом, сводится к уменьшению потерь информации, вызванных структурными элементами системы в пределах её рабочего диапазона. Передаточные функции G_i можно рассматривать, как функции, описывающие потери информации, вносимые в систему каждым из СЭ. В дополнение к трём видам потерь информации, применяемых, например, для описания преобразования сигнала телевизионными системами [2]: *пространственному*, связанному с уменьшением амплитуды отдельных гармонических составляющих, из которых складывается наблюдаемая сцена; *градационному*, определяющему воспроизведение системой динамического диапазона яркостей наблюдаемой сцены (радиометрические разрешение, диапазон) и *временному*; в СИП можно выделить четвёртый вид потерь – потери *спектральной* информации. Соответственно, для описания того или иного вида потерь информации выражение (1) можно записать как:

$$G(f) = G_1(f) \times G_2(f) \times G_3(f) \times G_4(f) \times G_5(f) \quad (2)$$

где $G(f)$ – ПФ системы, описывающая пространственные потери информации; $G_i(f)$ – передаточная функция структурного элемента (ПФСЭ), описывающая пространственные потери информации.

$$G(l) = G_1(l) \times G_2(l) \times G_3(l) \times G_4(l) \times G_5(l) \quad (3)$$

где $G(l)$ – ПФ системы, описывающая градационные потери информации; $G_i(l)$ – ПФСЭ, описывающая градационные потери информации.

$$G(t) = G_1(t) \times G_2(t) \times G_3(t) \times G_4(t) \times G_5(t) \quad (4)$$

где $G(t)$ – ПФ системы, описывающая временные потери информации; $G_i(t)$ – ПФСЭ, описывающая временные потери информации.

$$G(\lambda) = G_1(\lambda) \times G_2(\lambda) \times G_3(\lambda) \times G_4(\lambda) \times G_5(\lambda) \quad (5)$$

где $G(\lambda)$ – ПФ системы, описывающая потери спектральной информации; $G_i(\lambda)$ – ПФСЭ, описывающая потери спектральной информации.

По сути ПФСЭ представляют собой частные производные функции G . Выразить их в виде общего уравнения, пригодного для оценки информационной модели конкретного СИП расчётным методом не всегда представляется возможным. Описание информационной модели СИП при помощи формул (2), (3), (4) и (5) позволяет использовать данные, полученные непосредственно с графиков, описывающих ПФСЭ. Например, для описания потерь пространственной информации системы на практике удобно использовать частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) СЭ. Обычно для определения ЧКХ оптической части СИП на стадии разработки используют расчётные программы (трассировщики), выдающие результат в виде графика. Для оценки качества изготовленной (приобретённой) оптики график ЧКХ строят путём проведения измерений на стенде.

Градационные потери в оптическом тракте СИП зависят от функции пропускания оптических компонентов и определяются в первую очередь коэффициентами поглощения, пропускания и отражения. В электронном тракте (4 и 5 элементы структурной схемы) потери определяются динамическим диапазоном приёмника излучения, усилительного тракта, а также разрядностью дискретизации (числом уровней квантования) при оцифровке сигнала. Кроме того, играет роль применяемый при обработке сигнала критерий разрешения двух спектральных линий.

Временные потери возникают в основном из-за трёх факторов:

- времени, необходимого для преобразования излучения по спектру во 2 элементе структурной схемы, определяемого аппаратной функцией прибора [3];
- быстродействия приёмника излучения;
- временных задержек, возникающих в модуле обработки сигнала.

Потери спектральной информации обусловлены выбранным способом преобразования излучения по спектру, спектральной чувствительностью и ЧКХ фотоприёмника. К основным характеристикам СИП можно отнести:

- спектральный диапазон;
- спектральное разрешение;
- спектральную чувствительность;

- энергетическую чувствительность;
- пространственное разрешение;
- формат кадра (количество элементов в изображении для одного минимально-разрешаемого спектрального интервала);
- частоту кадра (динамические характеристики системы).

Рассмотрим, каким образом возможно добиться улучшения основных характеристик при модернизации существующих на данный момент СИП. Влияние ПФСЭ на основные характеристики СИП приведены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние ПФСЭ на основные характеристики СИП

	$G_1(f)$	$G_2(f)$	$G_3(f)$	$G_4(f)$	$G_5(f)$	$G_1(l)$	$G_2(l)$	$G_3(l)$	$G_4(l)$	$G_5(l)$	$G_1(t)$	$G_2(t)$	$G_3(t)$	$G_4(t)$	$G_5(t)$	$G_1(\lambda)$	$G_2(\lambda)$	$G_3(\lambda)$	$G_4(\lambda)$	$G_5(\lambda)$
спектральный диапазон	-	-	-	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
спектральное разрешение	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+
спектральная чувствительность	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+
энергетическая чувствительность	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-
пространственное разрешение	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-
формат кадра	-	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
частота кадра	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	+

"+" – оказывает влияние; "-" – влияние отсутствует, либо незначительно

Оптимизация оптических характеристик СИП в целом заключается в правильном выборе основных параметров схемы в результате габаритного, энергетического и абберационного расчётов. Данная тема достаточно проработана и широко освещена в специальной литературе [3, 4]. Из теории оптических систем известно, что увеличение относительного отверстия приводит к необходимости более тщательной коррекции аббераций, и, следовательно, увеличению стоимости системы. Модернизация оптического тракта СИП, таким образом, может быть направлена на снижение влияния аббераций за счёт их взаимной коррекции в разных частях СИП, что реализовано, например, в схемах приборов представленных в докладе [5], а также на выигрыш в светосиле за счёт уменьшения числа компонентов оптической схемы, что становится возможным при применении асферических поверхностей и адаптивной оптики.

Увеличение рабочего спектрального диапазона, повышение пространственного и спектрального разрешения связано с резким увеличением объёма информации, даваемой системой. Намечившаяся тенденция к обработке

массива информации в режиме реального времени выводит на первое место вопрос об эффективных алгоритмах такой обработки. Основными направлениями совершенствования аппаратной части являются: применение специализированных процессоров обработки видеoinформации; увеличение объёма встроенных устройств хранения информации с уменьшенным временем доступа к ним. В качестве скоростного узла цифровой обработки информации возможно применение программируемых логических микросхем (ПЛИС) [6]. Миниатюризация электронных компонентов при возросших скоростях выполнения ими математических и логических операций принципиально позволяет реализовать такие системы без значительного увеличения габаритов, энергопотребления и стоимости.

Структурным элементом, совершенствование которого может дать значительный прирост в качественных характеристиках СИП, является приёмник излучения. В качестве таковых в современных СИП широко применяются многоэлементные анализаторы изображения на основе матриц приборов с зарядовой связью (ПЗС). Как видно из таблицы 1, размер

элемента ПЗС-матрицы определяет минимально разрешаемый элемент изображения, которое, как правило, в СИП представляет собой либо последовательность монохроматических изображений входного раstra, либо интерференционную картину. Формат фотоприёмника (количество фоточувствительных элементов) также является фактором, определяющим спектральное и пространственное разрешения, а также ширину спектрального диапазона. Динамический диапазон ПЗС ограничивается насыщением потенциальной ямы. Возможности модернизации данного СЭ СИП сводятся к увеличению числа фоточувствительных элементов (ФЧЭ) при одновременном уменьшении размера ФЧЭ (периода матрицы ПЗС).

При выполнении задач дистанционного зондирования исследуемого объекта зачастую необходимо работать с излучениями низкой интенсивности. Повысить чувствительность фотоприёмника возможно путём стыковки матрицы ПЗС с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП). При этом возникает принципиальная возможность увеличения частоты кадров за счёт сочленения с ЭОП скоростной телекамеры. Максимальная скорость считывания в данном случае ограничена световременной характеристикой люминофора. Дальнейшее увеличение геометрического разрешения фотоприёмника становится возможным с применением микросканирования [7], которое осуществляется путём сдвига изображения (кадра) в плоскости ФЧЭ на часть периода матрицы ПЗС (наиболее часто

используется сдвиг на $\frac{1}{2}$ кадра) и выборки полученного изображения с последующим объединением полученных изображений. Однако, применение микросканирования становится малоэффективным в случае наблюдения подвижных объектов, изображение которых нестабильно в течении времени обнаружения и распознавания [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Тарасов, В.В.* Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения / *В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков.* – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
2. *Грязин, Г.Н.* Системы прикладного телевидения. СПб: Политехника, 2007. – 277 с.
3. *Пейсахсон, И.В.* Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1970. – 272 с.
4. *Тарасов, К.И.* Спектральные приборы. 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Машиностроение, 1974. – 368 с.
5. *Груздев, В.Н.* Действующие образцы видеоспектрометров видимого-ближнего ИК диапазона для малых космических аппаратов / *В.Н. Груздев, В.М. Красавцев, А.В. Марков* и др. // http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_conf_pdf/C/Gryzdev.pdf
6. *Кремис, И.И.* Способы и принципы построения алгоритмов ЦОС многоэлементного фотоприёмного устройства ИК-диапазона на основе микросхемы программируемой логики. / *И.И. Кремис, Ю.Ф. Однолько* // Прикладная физика. – 2008. - №3. – С.101-111.
7. *Тарасов, В.В.* Некоторые пути совершенствования тепловизионных систем / *В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков* // Специальная техника – 2004. - №2. – С. 11-19.

SOME WAYS OF PERFECTION OF SPECTRAL REPRESENTING DEVICES

© 2009 A.S. Rafailovich

Branch of Institute of Physics of Semiconductors SB RAS
Constructive-technological Institute of Applied Microelectronics,
Novosibirsk

The structural circuitry of the instruments, intended for reception of spatially-frequency and spectral-power information about the researched object is observed. Interconnections, methods and ways of ensuring of basic functional characteristics are certain.

Key words: *spectral representing device, functional characteristics*