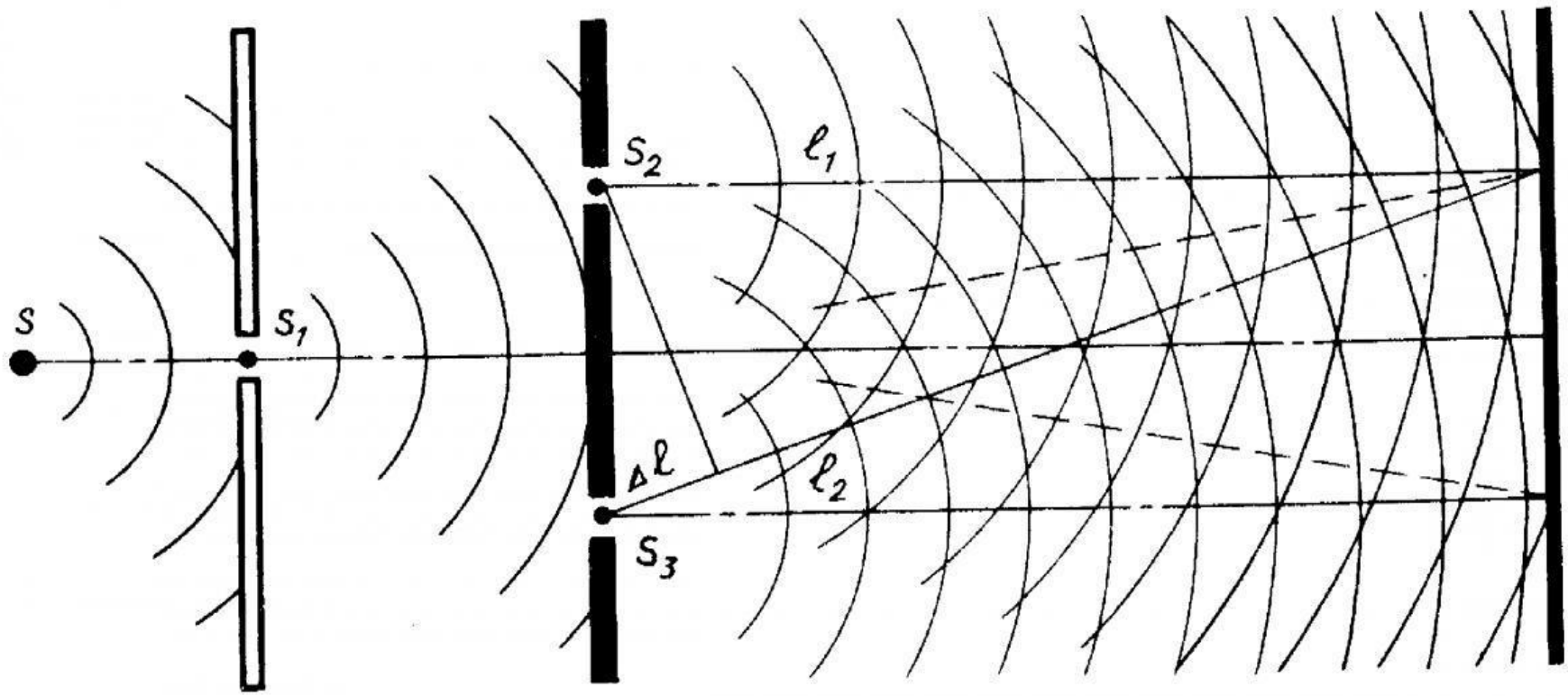


Многоспектральная видеоаппаратура для космических аппаратов

Интерференция света, сложение световых волн, при котором обычно наблюдается характерное пространственное распределение интенсивности света (интерференционная картина) в виде чередующихся светлых и тёмных полос вследствие нарушения принципа сложения интенсивностей. Некоторые явления интерференция света наблюдались ещё И. Ньютоном, но не могли быть объяснены с точки зрения его корпускулярной теории. Правильное объяснение И. с. как типично волнового явления было дано в начале 19 в. Т. Юнгом и О. Френелем.

Интерференция света возникает только в случае, если разность фаз постоянна во времени, т. е. волны когерентны. До создания лазеров когерентные световые пучки могли быть получены только путём разделения и последующего сведения лучей, исходящих из одного и того же источника света. При этом разность фаз этих колебаний постоянна и определяется только разностью путей, проходимых лучами, или разностью хода D .



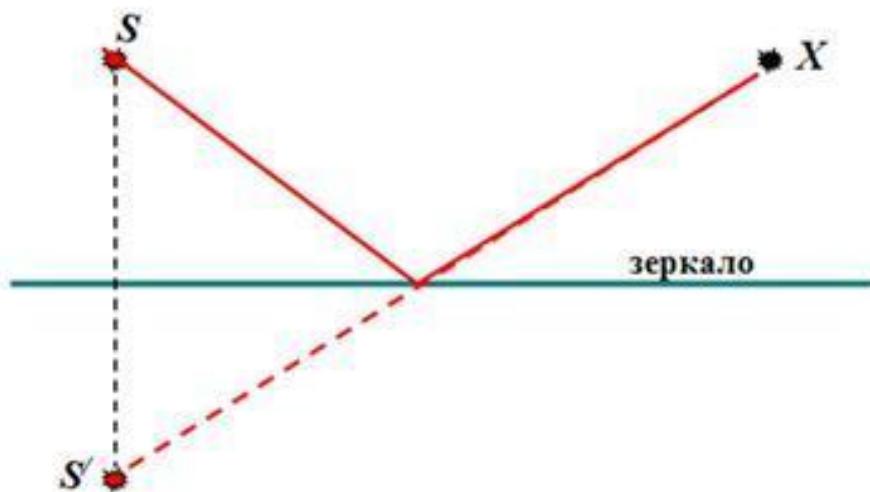
Интерферограмма – зарегистрированное изображение явления усиления или ослабления поля двух световых волн в зависимости от разности фаз

$$E(t) = U(t) + U(t - \tau)$$

$$I(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |U(t) + U(t - \tau)|^2 dt = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \{ |U(t)|^2 + |U(t - \tau)|^2 + 2\{\overline{U}(t)U(t - \tau)\} \} dt$$

Автокорреляционная функция оптического сигнала

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \overline{U}(t)U(t - \tau) dt \Rightarrow I(\tau) = 2R(0) + 2R(\tau)$$



интерферометр Ллойда

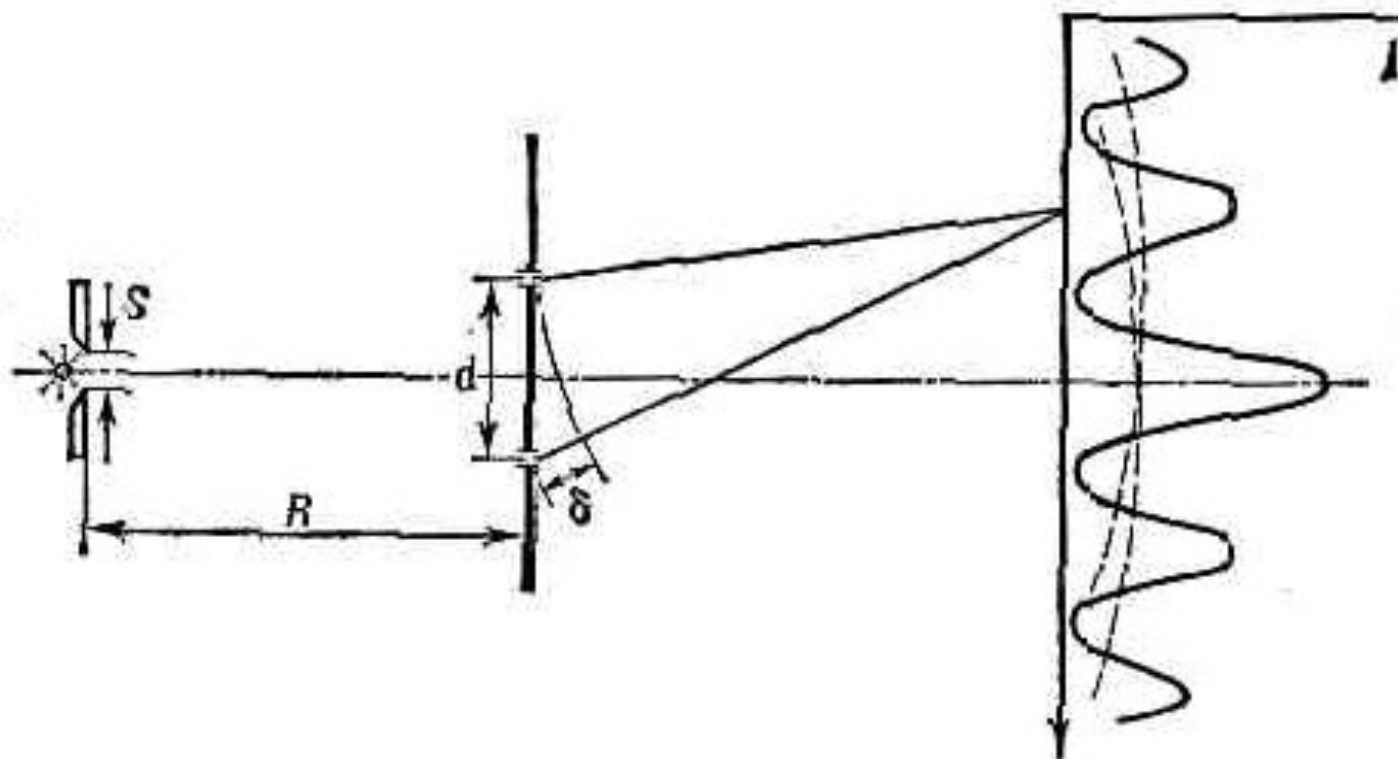
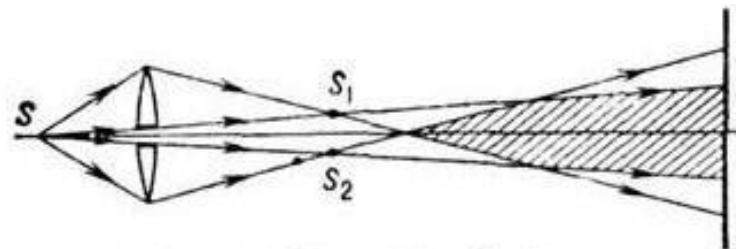
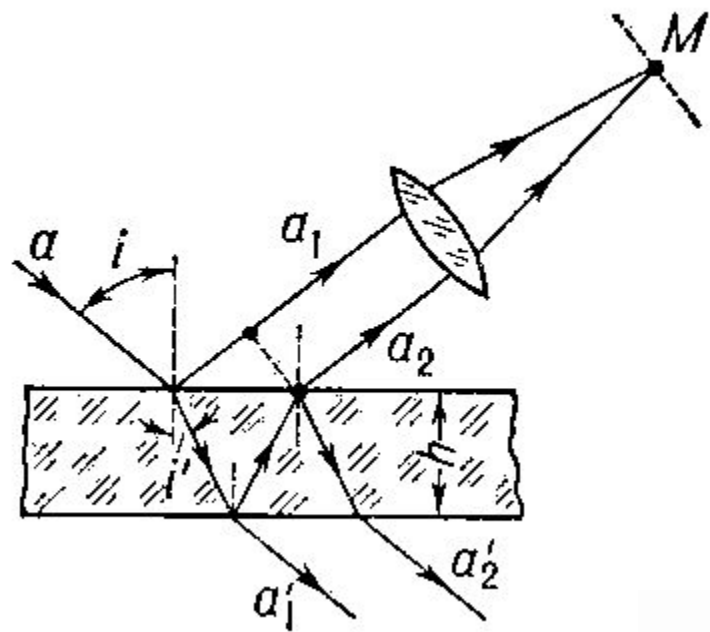
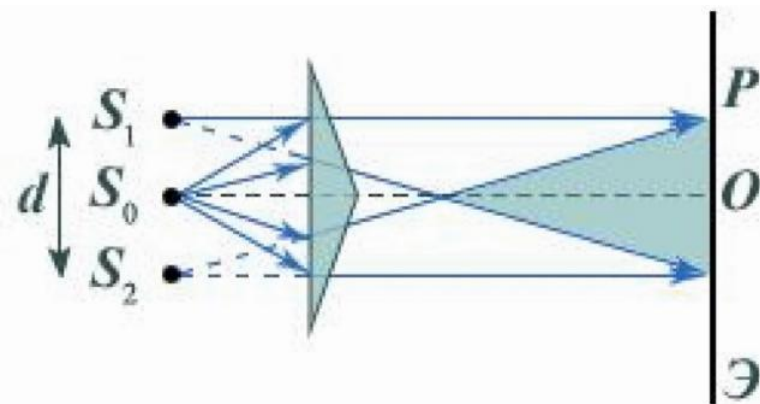


Схема опыта Юнга. Справа сплошной линией представлена зависимость интенсивности на экране от координаты, нормальной щелям; пунктиром показана освещённость экрана при поочерёдном закрывании щелей.

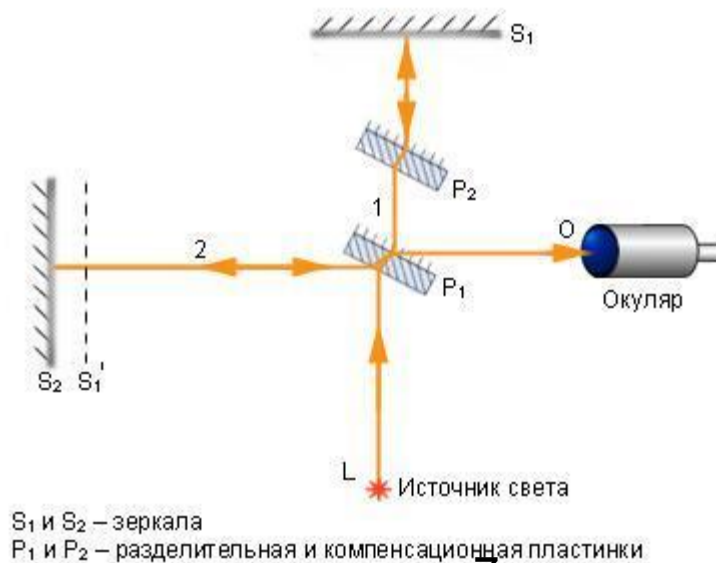
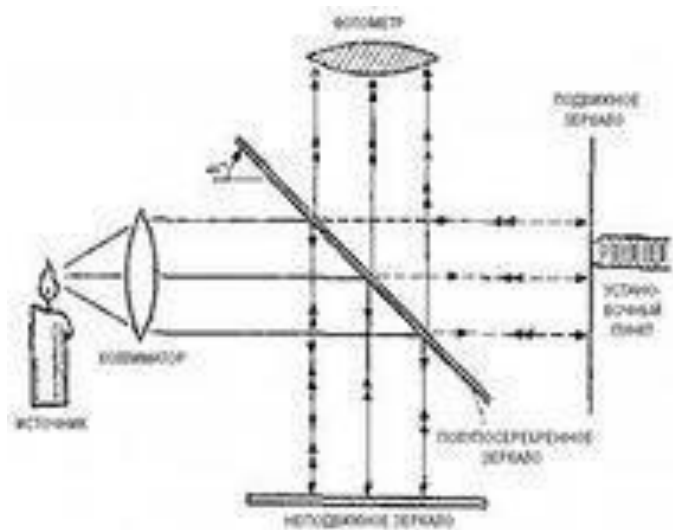


Билинза Бийе.

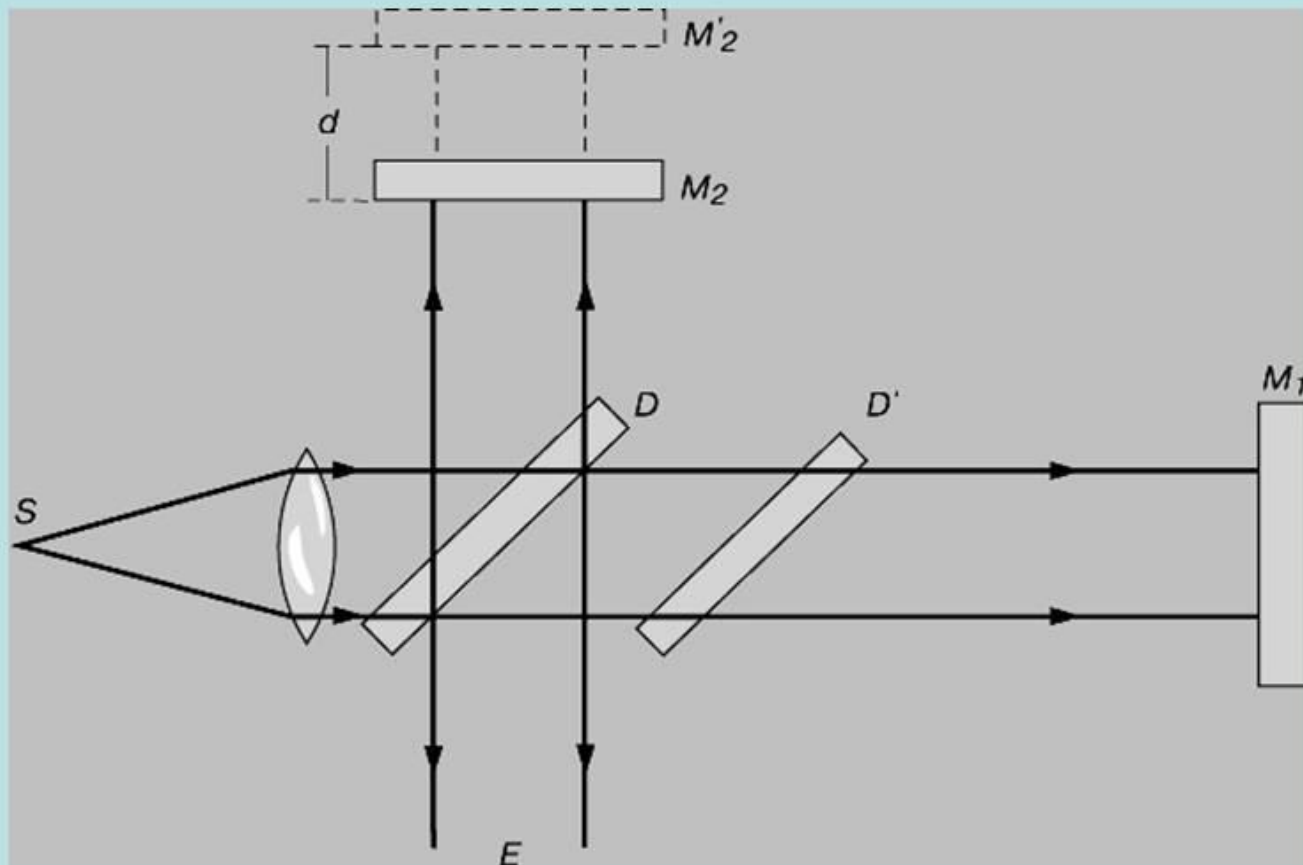


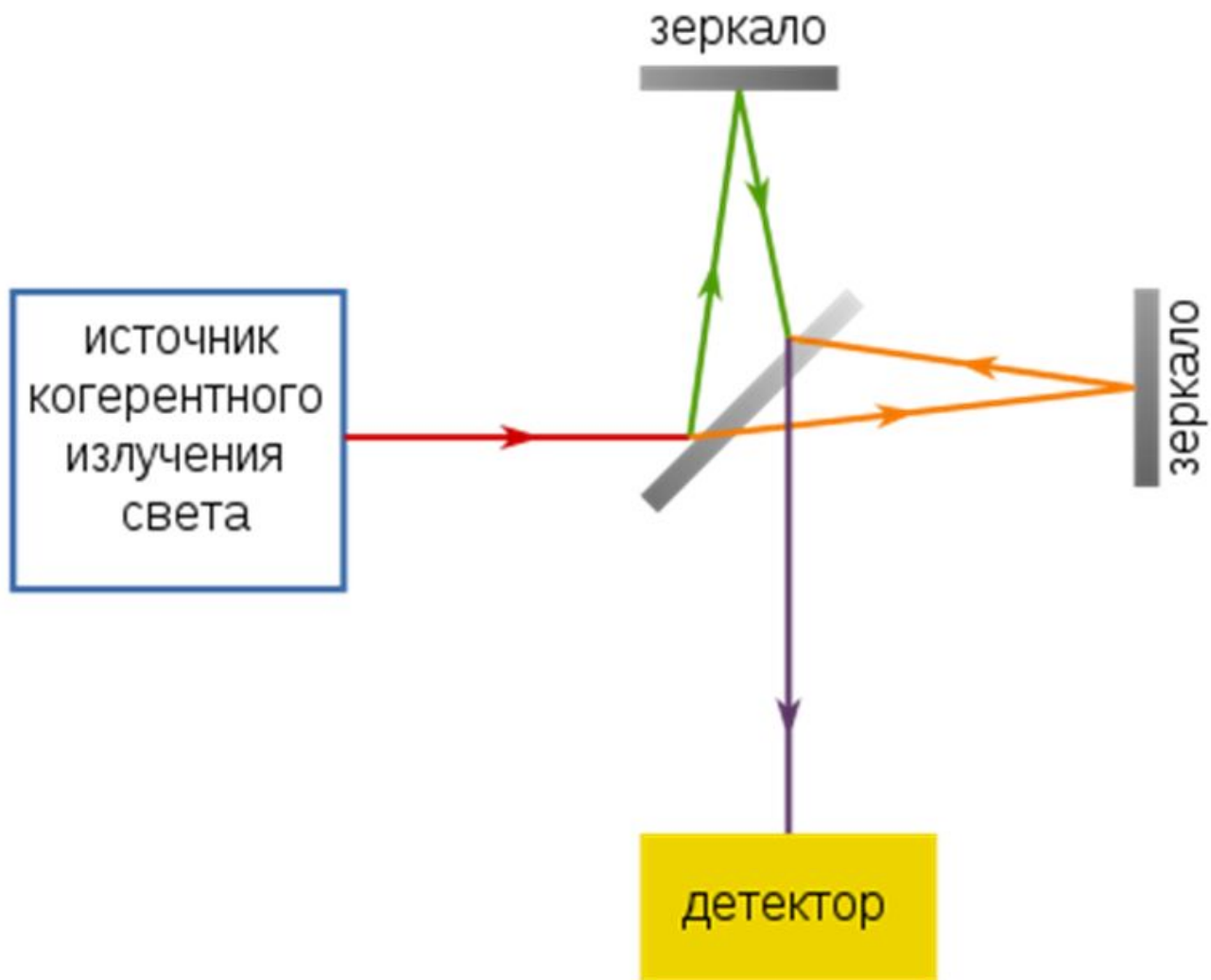
Бипризма Френеля.

Изобретение Майкельсона - двулучевой интерферометр, за которое он получил Нобелевскую премию, дало первый толчок использования такого интерферометра для расшифровки спектров. В 1887 году Майкельсон совместно с Морли использовал интерферометр для исследования сверхтонких линий ртути, натрия и других источников по кривым видности, характеризующим изменение контраста интерференционной картины при изменении разности хода в интерферометре. Принцип Фурье-спектрометрии был впервые сформулирован Н.Г. Бахшиевым, как возможность кодирования длинами волн электрических частот, а не пространства, что было свойственно всем известным до того времени спектральным приборам. Основы нового направления и преимущества метода были сформулированы П. Жакино, Фелжетом, П. Конном и Ж. Конн

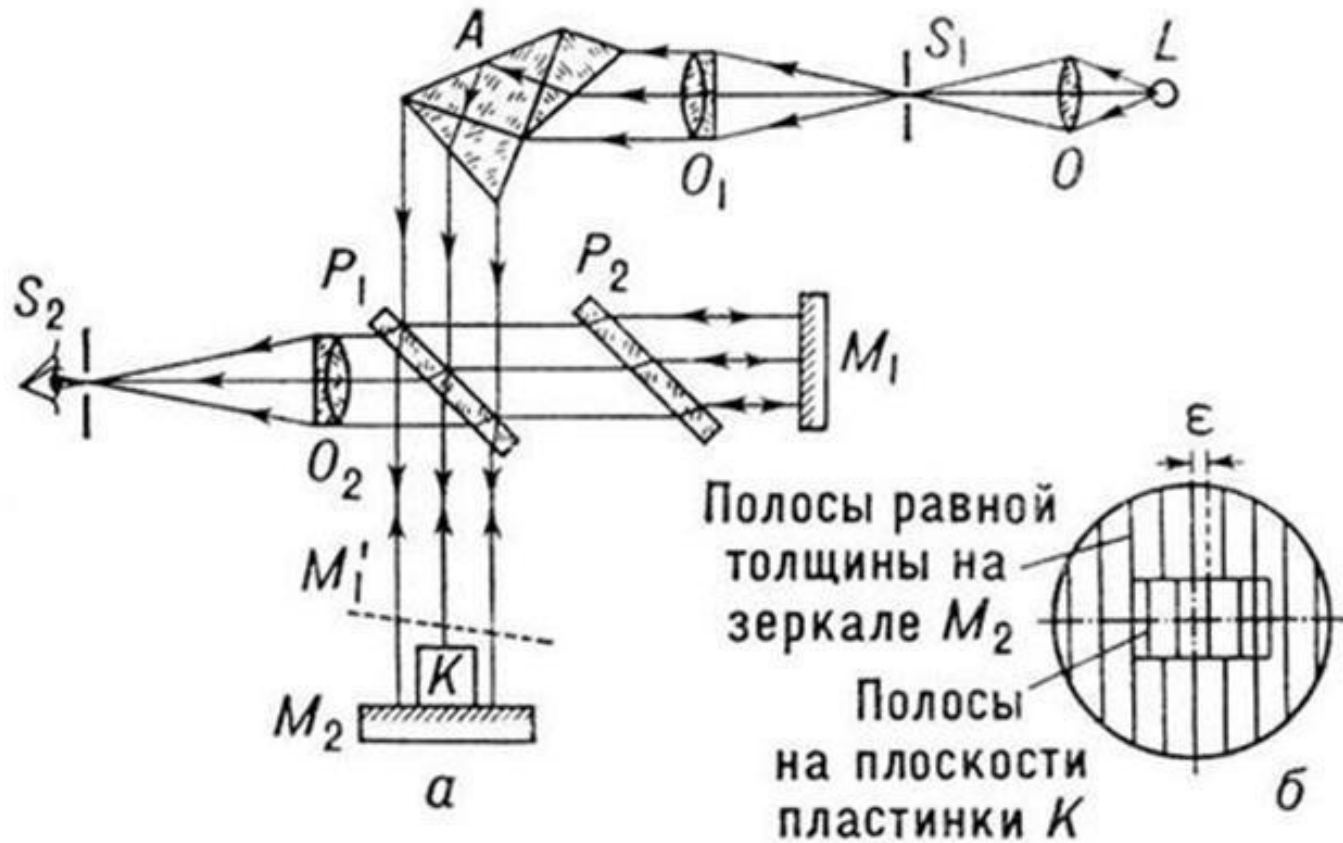


Интерферометр Майкельсона





Интерферометр Кёстера



Монохроматический источник - $I_t = B(\sigma_0) \cos^2(\pi\sigma_0\Delta)$

Полихроматический источник - $dI_t = B(\sigma) \cos^2(\pi\sigma\Delta)d\sigma \Rightarrow$

$$I_t = \frac{1}{2} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} B(\sigma) [1 + \cos 2\pi\sigma\Delta] d\sigma$$

Интерферограмма для положительных частот

$$I(\Delta) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \cos 2\pi\sigma\Delta d\sigma$$

Если ввести искусственный спектр $B(-\sigma)$, то получим

$$I(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_p(\sigma) e^{i2\pi\sigma\Delta} d\sigma ;$$

$$B_p(\sigma) \xrightarrow{FT.} I(\Delta); \quad B_p(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\Delta) e^{-i2\pi\sigma\Delta} d\Delta$$

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА (ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ)

1. Длина цуга волны в вакууме - $l = c \times \tau_a$, где τ_a — время жизни атома в возбужденном состоянии ($10^{-8} \dots 10^{-10}$ с).

2. Длина когерентности $\Delta_c = \lambda_0^2 / \Delta\lambda$ или

$\Delta_c = \lambda_0^2 / 2\Delta\lambda_{0,5}$; $\Delta\lambda_{0,5} = 3,58 \times 10^{-7} \lambda_0 \sqrt{T/A}$, где λ_0 — длина волны света максимальной интенсивности; $\Delta\lambda_{0,5}$ — полуширина спектральной линии; T — абсолютная температура по Кельвину; A — атомная масса.

3. Условия когерентности:

$d \times \text{tg} \sigma \ll \lambda/2$ — для источника на конечном расстоянии,

$a \times \text{tg} \omega \ll \lambda/2$ — для источника в бесконечности,

где d — ширина источника излучения; σ — апертурный угол источника света; a — расстояние между вторичными когерентными источниками; ω — угол сходимости интерферирующих лучей.

4. Ширина интерференционной полосы $e = \lambda / \omega$

5. Контраст интерференционной картины $K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$

6. Интенсивность результирующего колебания:

а) при наложении k монохроматических волн

$$I = \sum_k I_k + 2 \sum_{i < k} \sqrt{I_i I_k} \cos \delta \varphi_{ik}$$

б) при наложении двух монохроматических волн одинаковой частоты $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \varphi_{1,2}$, если $I_1 = I_2$, то $I = 2I_1 (1 + \cos \delta \varphi)$.

7. Степень взаимной когерентности $\gamma_{1,2}(\tau) = \pi ad / (\lambda p)$.

8. Разность хода лучей в плоскопараллельной пластине

а) в отраженном свете $\Delta = 2dn \cos \xi' + \lambda / 2$; $\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \xi} + \lambda / 2$

б) в проходящем свете $\Delta = 2dn \cos \xi''$; $\delta \varphi = \frac{4\pi d}{\lambda_0} \sqrt{n^2 - \sin^2 \xi}$, где d —

толщина пластины; n — показатель преломления; ε , ε' , ε'' — углы падения, отражения и преломления соответственно

9. Интенсивность интерференционной картины в проходящем и отраженном свете при интерференции в тонких пластинах и пленках:

а) интенсивность в отраженном свете $I' = 2I\rho(1 - \cos \delta\varphi)$

б) интенсивность в проходящем свете $I'' = I[1 - 2\rho(1 - \cos \delta\varphi)]$

где ρ — коэффициент отражения; $\delta\varphi$ — разность фаз.

10. Допустимая толщина пленки для наблюдения интерференции в белом свете $d_{0\pi} = \frac{k\lambda + \lambda/2}{2n\cos\xi''}$

где k — порядок интерференции.

**11. Интерференция в клине
полосы равной толщины:**

а) оптическая разность хода лучей в клине - $\Delta = 2a n \sin \gamma$, где a — расстояние от вершины клина до точки, в которой определяют разность хода; n — показатель преломления среды клина; γ — угол клина;

б) разность фаз - $\delta\varphi = \frac{4\pi a}{\lambda} \sin \gamma$

в) интенсивность интерференционной картины в отраженном свете $I' = 2I\rho(1 - \cos \delta\varphi)$

г) положение минимумов в интерференционной картине от клина $a = (k\lambda/2) \times \sin \gamma$

12. Кольца Ньютона (в проходящем свете):

а) условие образования темных колец $2dn = (2k-1)\lambda/2$

б) радиусы темных колец $\rho_k = \sqrt{\frac{2k-1}{n}} R \frac{\lambda}{2}$

в) условие образования светлых колец $2dn = k\lambda$

г) радиусы светлых колец $\rho_k = \sqrt{R\lambda k}$, где R — радиус кривизны сферической поверхности линзы k — число темных или светлых колец.

13. Многолучевая интерференция:

а) интенсивность интерференционной картины при многолучевой интерференции в проходящем свете

$$I'' = I \frac{\tau^2}{(1-\rho)^2 + 4\rho \sin^2(\delta\varphi/2)}$$

б) интенсивность интерференционной картины в отраженном свете $I' = I\rho \frac{4 \sin^2(\delta\varphi/2)}{(1-\rho)^2 + 4\rho \sin^2(\delta\varphi/2)}$

где I — интенсивность падающего света; ρ — коэффициент отражения.

14. Толщина пленок, наносимая при просветлении преломляющих поверхностей:

а) условие минимумов, обеспечивающих гашение отраженного света $\Delta = 2dn_{ст} = (2k+1)\lambda/2$

б) толщина пленки $d_{ст} = \frac{(2k+1)\lambda}{4n_{ст}}$. Наилучшее гашение

обеспечивается при $n_{ст} = \sqrt{n_{пл}}$, где $n_{пл}$, $n_{ст}$ — показатели преломления пленки и стекла соответственно.

В случае ультрафиолетовой, видимой или инфракрасной сигнатуры целесообразно выделить следующее:

- Интегральное, в рабочем спектральном диапазоне, изображение объекта;**
- Монохроматические, в рабочем спектральном диапазоне, изображения объекта;**
- Интегральное и спектральное распределение силы излучения элементов объекта в пространстве;**
- Статистические характеристики визуализируемых картин в рабочем спектральном диапазоне (средние величины, гистограммы и т.п.).**

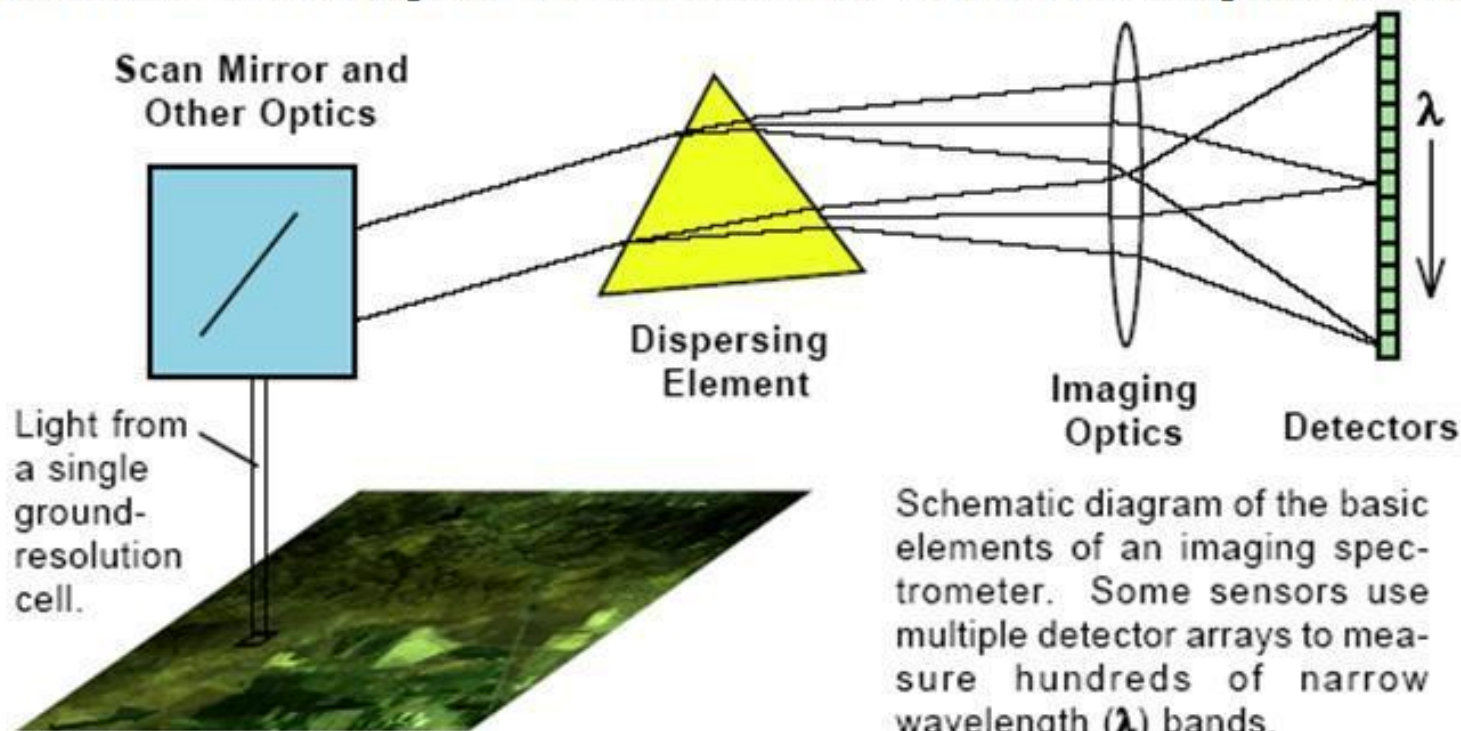
При этом восприятие и оценка распределения излучения по поверхности объекта является наиболее продуктивным подходом к определению ультрафиолетовой, видимой или инфракрасной сигнатуры движущегося объекта при наличии меняющихся контрастов между объектом и фонами.

1. **Экологический мониторинг, выявление зон экологических нарушений (загрязнение почвы, атмосферы, водоемов).**
2. **Слежение за восстановлением нарушенных природных ландшафтов в результате их промышленного использования.**
3. **Мониторинг отдельных объектов городской инфраструктуры (дороги, мосты, промышленные объекты).**
4. **Выявление объектов размещения отходов производства и потребления;**
5. **Определение состояния объектов недропользования.**
6. **Обнаружение лесных, степных, торфяных пожаров, аварий на нефтяных вышках и промышленных объектах, сопровождающихся пожарами.**
7. **Выявление последствий пожаров, в том числе лесных гарей и ущерба от пожаров.**
8. **Мониторинг паводковой обстановки на реках, контроль половодий, наводнений, имеющих разное происхождение (дожди, таяние снега, последствия землетрясений, аварии на гидроэлектростанциях и т.д.), контроль ледовой обстановки при прохождении паводка на реках.**
9. **Обнаружение выбросов загрязняющих веществ в водоемы и моря.**
10. **Обнаружение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и промышленных зон, задымленность городов и населенных пунктов в результате лесных, степных и торфяных пожаров.**
11. **Выявление сельскохозяйственных зон, подверженных засухе.**
12. **Контроль вырубки лесных массивов.**

13. **Контроль распространения загрязняющих веществ вокруг промышленных зон, на нефтепромыслах.**
14. **Слежение за таянием горных ледников.**
15. **Обнаружение и контроль схода селей,**
16. **Выявление и контроль оползней.**
17. **Обнаружение активной деятельности вулканов и контроль обстановки в зоне их действия.**
18. **Контроль территорий, находящихся в зонах морских приливов и отливов.**
19. **Контроль территорий, подвергнувшихся землетрясениям.**
20. **Обнаружение песчаных и пылевых бурь, контроль их последствий.**
21. **Контроль опустынивания территорий (интенсивная деградация почв) из-за засоления почв, ветровой и плоскостной эрозии почвенного покрова, изменения климата.**
22. **Контроль интенсивного заболачивания территорий.**
23. **Структурный анализ поверхности Земли.**
24. **Анализ локальных и глобальных геоинформационных аномалий.**
25. **Геологическое изучение площадей и составление геологических карт.**

- 26. Геоэкологический мониторинг экзогенных геологических процессов.**
- 27. Прогнозирование полезных ископаемых:**
- а) региональная стадия - оценка прогнозных ресурсов полезных ископаемых нефтегазоносных и рудных провинций, рудоносных зон и областей;**
 - б) детальная (поисковая) стадия - зональный прогноз с выявлением нефтегазоносных и рудных зон, рудных районов и узлов;**
 - в) локальная (разведочная) стадия прогноза - разведка месторождений, оценка запасов.**

Развитие гиперспектральных видеоспектрометров вызвано соединением двух связанных, но отличных технологий: спектроскопии и дистанционного изображения объектов и в частности поверхности Земли.

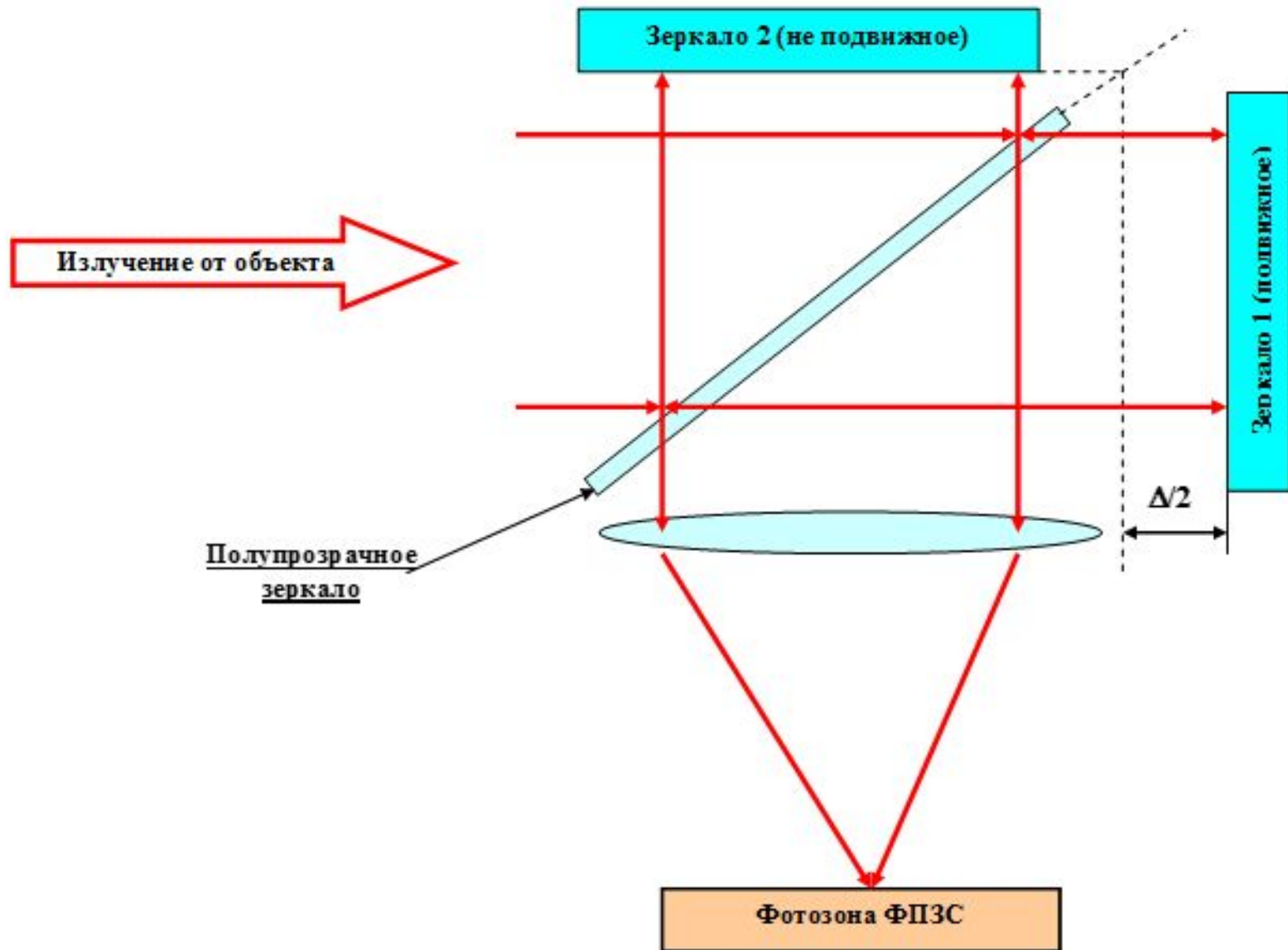


Schematic diagram of the basic elements of an imaging spectrometer. Some sensors use multiple detector arrays to measure hundreds of narrow wavelength (λ) bands.

Любой видеоспектрометр объединяет в своем составе объектив, проецирующий изображение исследуемой сцены на матрицу приемников с определенным пространственным разрешением и спектральную аппаратуру, обеспечивающую требуемое спектральное разрешение. Развитие подобной аппаратуры идет в направлении определения наиболее перспективных способов получения спектральной информации, повышения чувствительности, спектрального диапазона и разрешения, увеличения точности привязки шкалы длин волн, при сокращении габаритов и веса, введении унифицированных узлов аппаратуры и т.п.

Вся история развития спектрального приборостроения - это поиски путей увеличения потока информации, поступающего из прибора за единицу времени, при сохранении или сокращении габаритов и веса прибора. Информацией спектрального прибора являются сигналы в аналоговом либо цифровом виде, определяющие спектральное, а в некоторых случаях и пространственное разрешение, охватываемый спектральный диапазон, пороговую чувствительность, отношение сигнал/шум и точность регистрации измеряемых величин. В настоящее время различают, так называемые, классические спектральные приборы, осуществляющие кодировку пространства длинами волн - дисперсионные устройства (призмы, решетки) и новые приборы, кодирующие длинами волн электрические частоты (фурье-спектрометры и адамар-спектрометры). Среди последних, наиболее успешно развиваются фурье-спектрометры.

Фурье-спектрометрия



Необходимо рассматривать два типа фурье-спектрометров, значительно отличающихся друг от друга по идеологии исполнения и предельным возможностям: динамические (интерферометр с подвижным зеркалом) и статические (зеркало неподвижно) фурье-спектрометры.

В динамических фурье-спектрометрах изменение разности хода происходит во времени и, синхронно с изменением разности хода, во времени снимается интерферограмма исследуемого излучения. Серийно выпускаемые приборы подобного типа практически полностью заменили лабораторные спектральные приборы классического типа основанных на применении дифракционных решеток. Подавляющее большинство спектрорадиометров, предназначенных для установки на космические аппараты, также используют метод динамической фурье-спектрометрии. Огромный диапазон спектральных разрешений, реализованных в подобных приборах, охватывает диапазон от 100см^{-1} до $0,001\text{см}^{-1}$. Освоен серийный выпуск лабораторных фурье-спектрометров, работающих в спектральном диапазоне от $0,2\text{мкм}$ до 1000мкм .

Статические фурье-спектрометры используют пространственное расположение интерферограммы, чаще всего фокусирующуюся либо на линейку, либо на матрицу фотоприемника. Отсутствие подвижных элементов легко позволяют использовать подобные приборы в ультрафиолетовом диапазоне спектра. Кроме того, прибор становится гораздо надежнее в эксплуатации, что позволяет его использовать на разных носителях. Однако, спектральное разрешение подобных приборов оказывается ограничено числом пикселей линейки приемников, где фиксируется интерферограмма. Как правило, относительное спектральное разрешение не может превышать величины $N_{\text{стр}}/2$, где $N_{\text{стр}}$ - число пикселей в строке приемника.

Можно сделать вывод о равных возможностях видео дисперсионных спектрометров и динамических фурье-спектрометров, что и постулируется в работе. В самом деле, в проводимом сравнении основополагающие, как обычно считается, преимущества фурье-спектрометров - большая светосила и мультиплексность, в видео конструкциях с матричным приемником практически не работают. Большая светосила не может быть использована, так как для каждого отдельного пикселя при средних спектральных разрешениях она избыточна. В первом приближении не сказывается и фактор мультиплексности, так как время регистрации интерферограммы (любым единичным пикселем матричного ФПУ фурье-спектрометра и время регистрации спектра столбцом матричного ФПУ дисперсионного спектрометра остается одинаковым. Поэтому, как показано в отношении сигнал/шум при всех вышеперечисленных ограничениях остается одинаковым в обоих типах спектрометров.

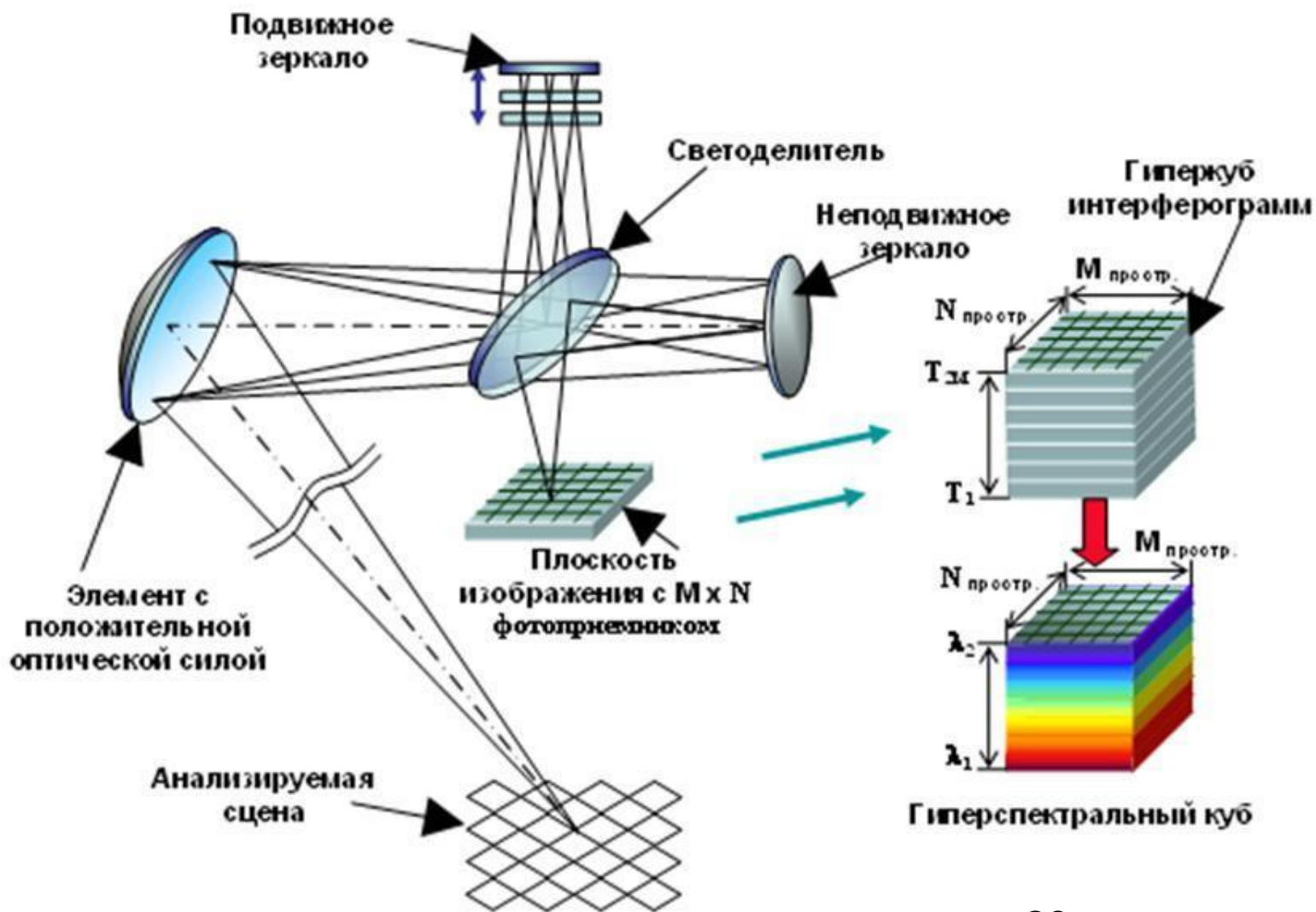
Однако преимущества мультиплексности и светосилы в фурье-спектрометрах все-таки могут использоваться. Каждый отдельный пиксель двумерной матрицы регистрирует спектр определенной зоны наблюдаемой сцены. При перемещении зоны сцены по матрице за счет движения носителя, при подборе размеров матрицы, спектрального разрешения и скорости движения носителя, и применении специального алгоритма съема информации, можно значительно увеличить время регистрации отдельной интерферограммы вплоть до времени прохождения исследуемого элемента сцены через все столбцы или строки приемной матрицы.

Тем самым можно не только повысить отношение сигнал/шум (до нескольких десятков), но и уменьшить влияние «смаза» изображения, вызываемого однонаправленным движением носителя, что особенно важно при высоком пространственном разрешении и быстром движении носителя.

Также большая светосила фурье-спектрометра позволяет устанавливать его непосредственно в сходящемся пучке лучей входного телескопа, не применяя дополнительную фокусирующую оптику, необходимую при установке щели в дисперсионных системах, тем самым позволяет значительно уменьшить габариты и вес аппаратуры.

Следующим весьма важным преимуществом фурье-спектрометров является отсутствие переналожения спектров и, следовательно, большая ширина регистрируемого спектра. Достаточно рассмотреть два примера требований, предъявляемых к видеоспектрометрам: работа в спектральном диапазоне $2 \div 20$ мкм и работа в спектральном интервале $0,9 \div 3,5$ мкм. В обоих случаях при разработке видеоспектрометра на основе фурье-спектрометра весь спектральный диапазон может быть перекрыт одним прибором, тогда как, в случае использования классического спектрометра, в первом диапазоне требуется установка четырех сменных параллельно работающих дифракционных решеток и соответствующих наборов отрезающих фильтров. Это, безусловно, значительно увеличивает массогабаритные характеристики аппаратуры, либо ухудшает ее технические характеристики.

Блок-схема получения гиперспектрального куба - «куба данных» исследуемой сцены в дисперсионном динамическом видеоспектрометре

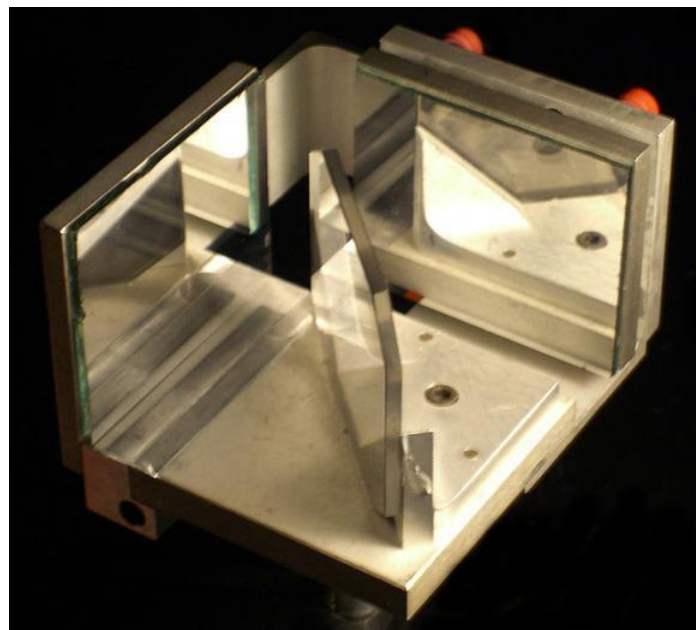


На рисунке представлена блок-схема получения гиперспектального куба - «куба данных» исследуемой сцены в дисперсионном видеоспектрометре. Съёмка сцены проводится в режиме построчного сканирования в режиме «push-broom». Изображение сцены фокусируется на входную щель спектрометра. Излучение, пропущенное через входную щель, отражается или проходит сквозь диспергирующий элемент (дифракционную решетку или призму) и далее направляется на $N \times M$ элементов матричного фотоприемного устройства (ФПУ). Таким образом, на двумерном фотоприемнике формируется пространственно-спектральное изображение. Спектральные изображения входной щели спектрометра рассредоточены по M_{spect} детекторов расположенных перпендикулярно щели.

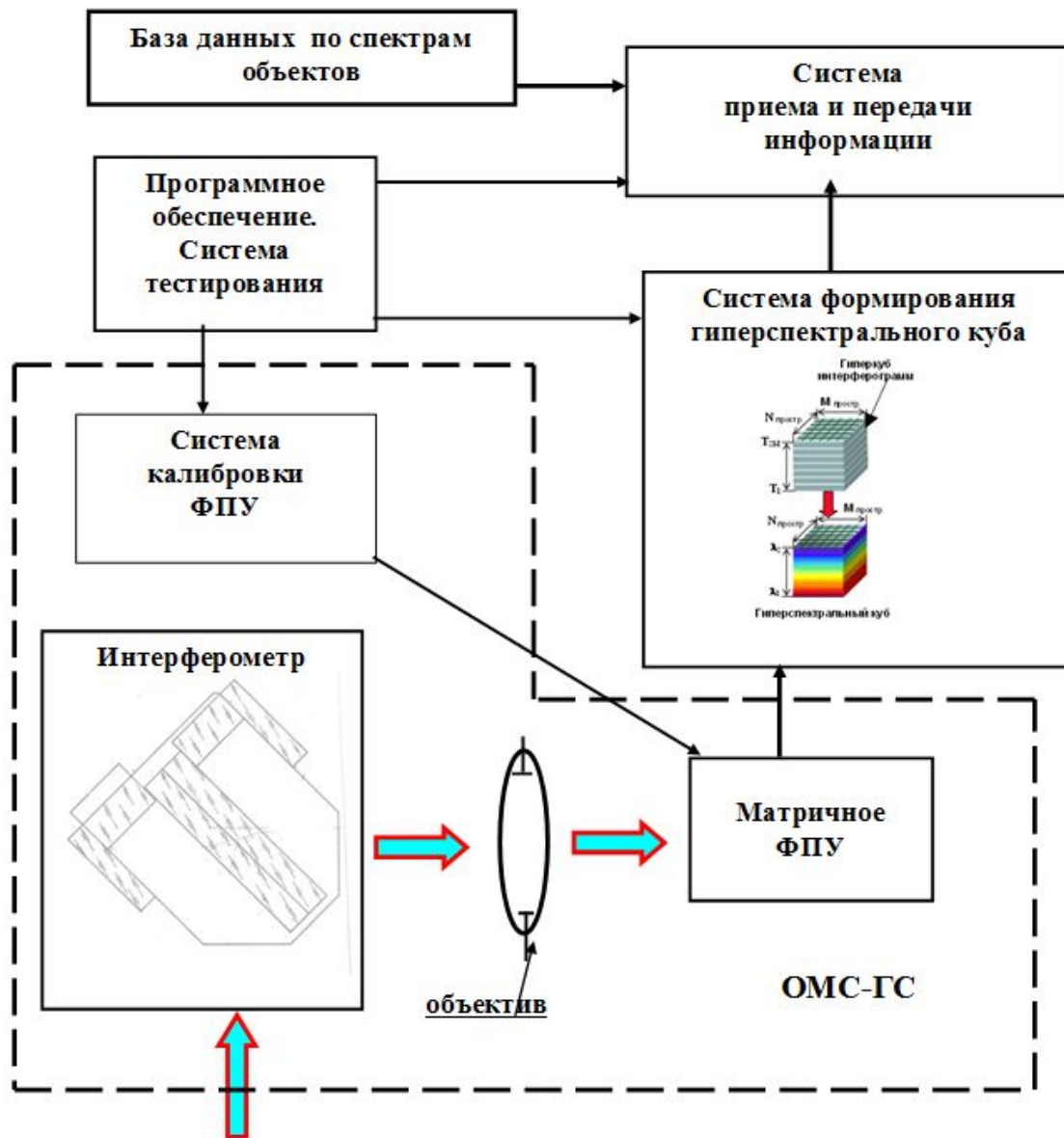
На каждом детекторе данного столбца матрицы снимается усредненная спектральная информация, равная $(\lambda_2 - \lambda_1)/M_{\text{spect}}$, где λ_1 и λ_2 - длины волн в конечных точках диапазона исследуемого спектрального интервала, а M_{spect} - число детекторов в столбце матрицы видеопреобразователя параллельном направлению сканирования спектрометра. Видеоинформация, собранная с этого столбца матрицы фотоприемника представляет собой вертикальный срез получаемого гиперспектрального «куба данных», в то время как вторая пространственная координата сканируется во времени за счет движения носителя вдоль трека

Сцена регистрируется в не сканирующем режиме кадровой съемки. Фурье-спектрометр смотрит на изображаемую сцену сквозь динамический двухлучевой интерферометр Майкельсона (разность хода изменяется во времени) с NxM-элементным матричным ФПУ на выходе. Передвижение зеркала интерферометра со скоростью «v» переводит спектральную информацию во временную интерферограмму, в которой определенные длины волн кодируют определенные электрические частоты $f = 2v/\lambda$ (λ - длина волны). С каждого пикселя матрицы ФПУ за время перемещения зеркала интерферометра снимается своя уникальная интерферограмма, представляющая функцию корреляции спектрального излучения зоны пространства, сопряженной с этим элементом. Чтобы получить конечный пространственно-спектральный «куб данных» должно быть выполнено преобразование Фурье интерферограммы. Спектральное разрешение зависит от разности хода, достигнутой за время сканирования подвижного зеркала. Пространственное разрешение по двум координатам пространства зависит от реализованного поля зрения единичного элемента матрицы. Общее поле зрения определяется числом элементов в строках и столбцах матричного ФПУ.

При рассмотрении всех возможных схем построения интерферометров, для унификации конструкции гиперспектрометра, можно выбрать интерферометр для всех спектральных диапазонов по одной оптической схеме – модифицированный интерферометр Майкельсона, в котором в качестве концевых зеркал используются уголковые отражатели. Смещение одного из отражателей в боковом направлении обеспечивает требуемый боковой сдвиг. Отличие интерферометров каждого канала только в выборе материала светоделителя (монокристаллический кварц и селенид цинка) и величине требуемого сдвига (смещение одного из зеркал интерферометра). Данная компоновка интерферометра Майкельсона малогабаритна и, при этом, очень устойчива к внешним воздействиям, так как оба плеча интерферометра, практически, имеют те же элементы. После интерферометра устанавливается объектив, фокусирующий исследуемую пространственную сцену на матрицу фотоприемников.



Блок-схема гиперспектрометра



$$B_{\text{смаз}} = f'_{\text{об}} \times \tau_{\text{сч}} \times \varpi_{\text{стб}} \leq 0,9 \Delta_{\text{пикс}}$$

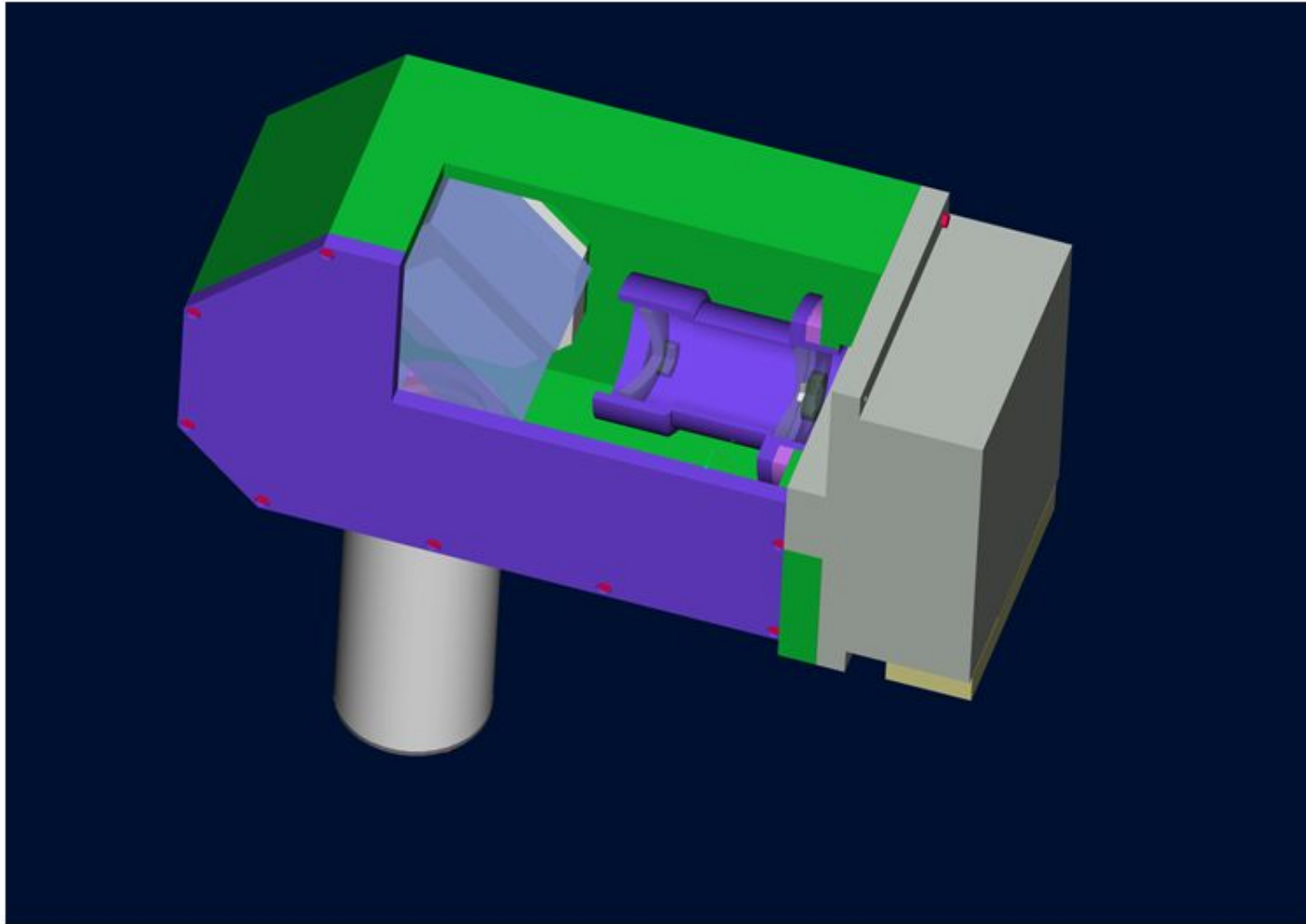
$B_{\text{смаз}}$ - **погрешность смещения («смаза») изображения, вызванная погрешностью стабилизации ГСА;**

$f'_{\text{об}}$ - **фокусное расстояние объектива ГСА;**

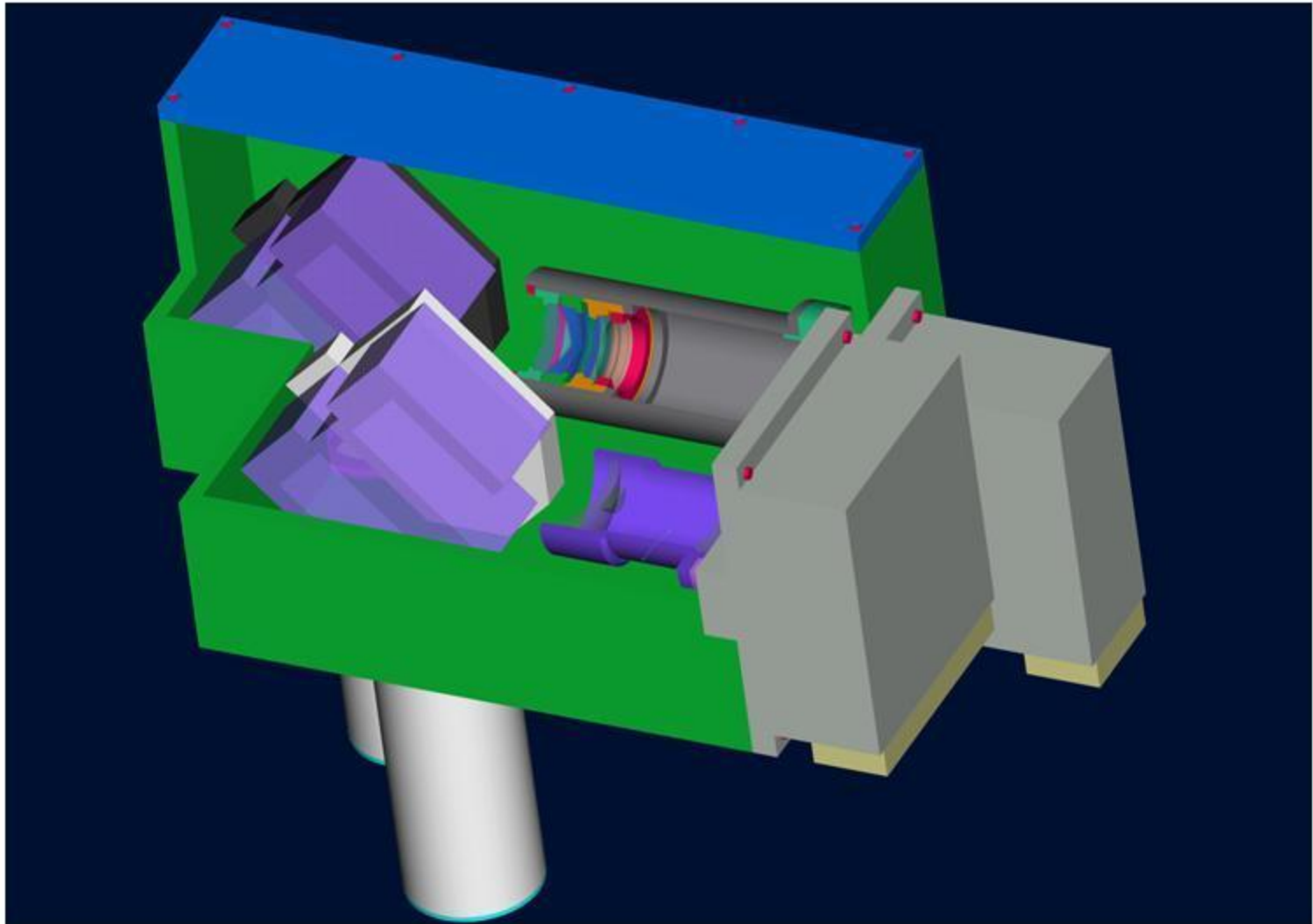
$\tau_{\text{сч}}$ - **время считывания по строке матрицы;**

$\varpi_{\text{стб}}$ - **погрешность стабилизации посадочных мест под аппаратуру по каналам крена, тангажа и рыскания ($8,7 \times 10^{-5} \text{с}^{-1}$)**

$\Delta_{\text{пикс}}$ - **размер пикселя.**

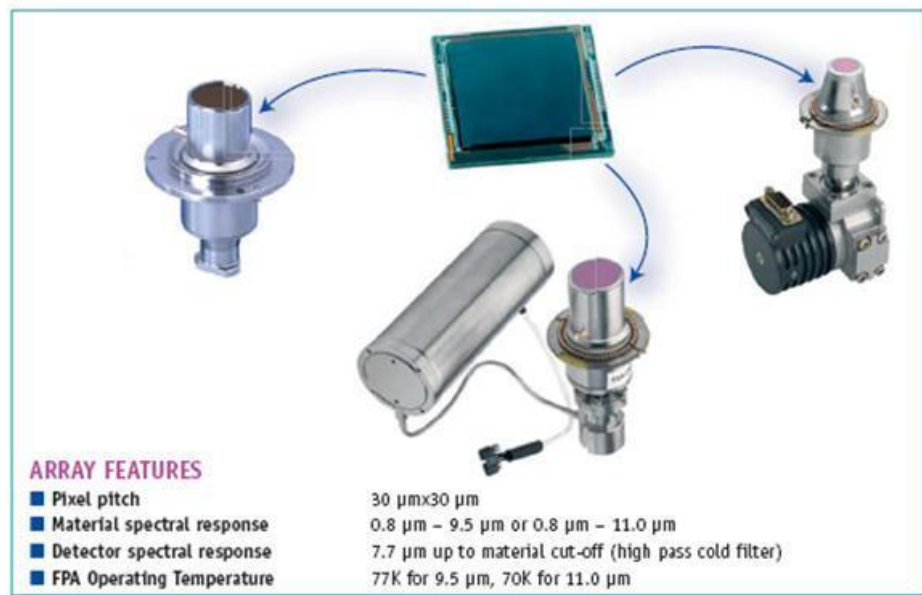


Вид ОМС-ГС 0.2-1 в аксонометрии



Вид ОМС-ГС 0.2-2.5 в аксонометрии

Фотоприемники «MARS-MW» и «MARS-LW» фирмы Sofradir (Франция) С термоэлектрическим охлаждением спектральный диапазон 3,7-5,0 мкм и 8-11 мкм

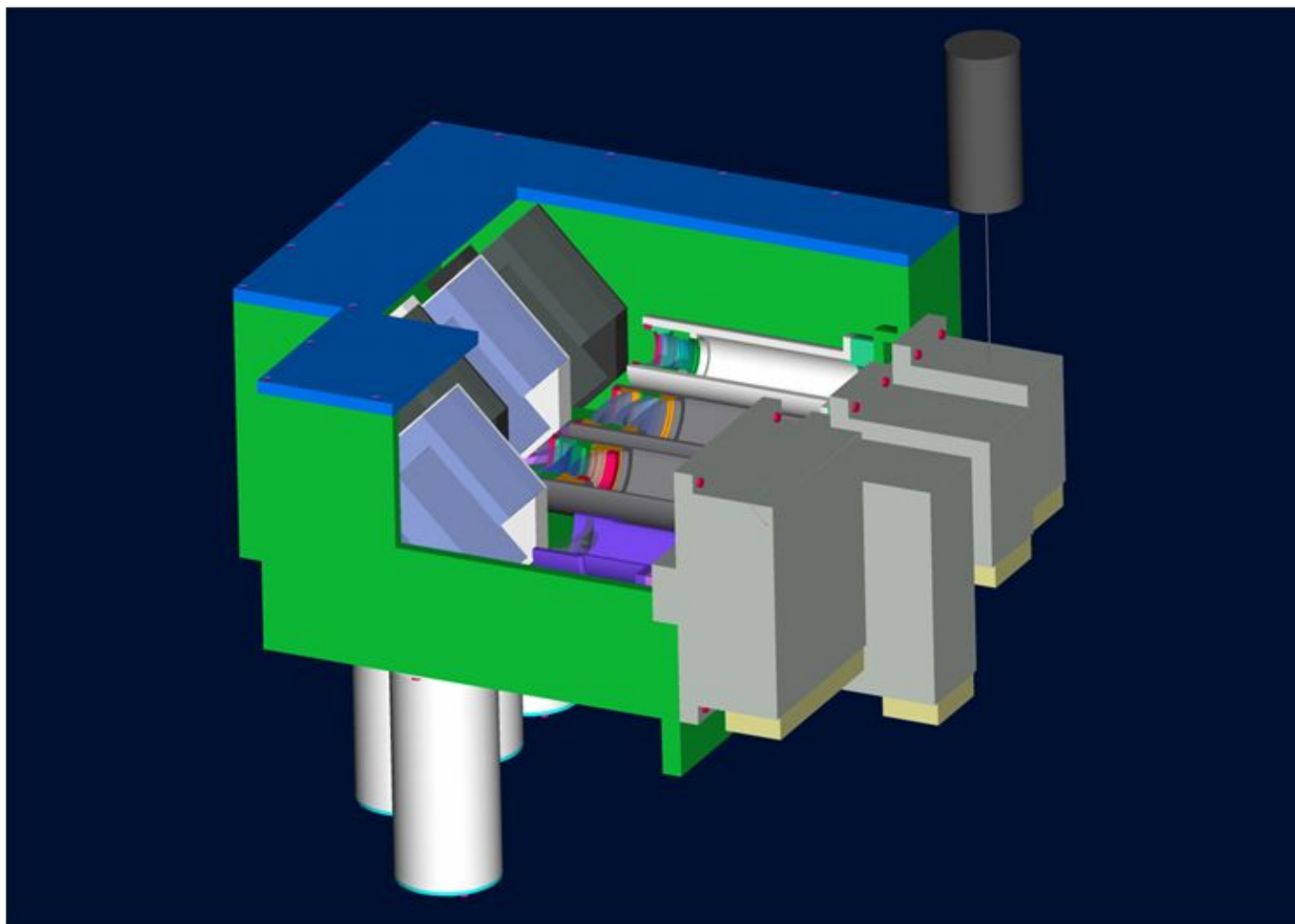


ARRAY FEATURES

- Pixel pitch
- Material spectral response
- Detector spectral response
- FPA Operating Temperature

30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$
0.8 μm – 9.5 μm or 0.8 μm – 11.0 μm
7.7 μm up to material cut-off (high pass cold filter)
77K for 9.5 μm , 70K for 11.0 μm

- Формат 320 x 256
- Размер пиксела 30 x 30 мкм
- Спектральный диапазон 3,7-5,0 мкм
- Спектральный диапазон 8-11 мкм



Вид ОМС-ГС 0.2-11 в аксонометрии

