

Технологический образец
бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2
для температурного и влажностного зондирования
атмосферы Земли

Ф.С. Завелевич¹, Ю.М. Головин¹, А.В. Десятов¹, Д.А. Козлов¹, Ю.П. Мацицкий¹,
А.Г. Никулин¹, Р.И. Травников¹, А.С. Романовский², С.А. Архипов³, В.А. Целиков³

(1) ФГУП "Центр Келдыша"

(2) МГТУ имени Н.Э. Баумана

(3) ОАО «Красногорский механический завод имени С.А. Зверева»

Назначение прибора

Прибор ИКФС-2 предназначен для измерения спектров уходящего излучения системы "атмосфера-поверхность", необходимых для получения следующих видов информации:

Восстанавливаемые метеорологические данные	Погрешность определения
профили температуры в тропосфере и нижней стратосфере с вертикальным разрешением до 1 км в нижней тропосфере	1-1.5K
профили влажности в тропосфере с вертикальным разрешением 1-2 км в нижней тропосфере	10%
общее содержания озона вертикальный профиль содержания O ₃ (в 2-х или 3-х слоях атмосферы)	не хуже 5% 10%
температура подстилающей поверхности	≤ 0,5K (вода) ≤ 1K (суша)
доля покрытия облачностью и давление на верхней границе облачности	---
общего содержания малых газовых составляющих (МГС) атмосферы: CH ₄ , N ₂ O и др.	---

* Указанные погрешности восстановления метеопараметров приведены для условий безоблачной атмосферы

Технические характеристики фурье-спектрометра

Рабочий спектральный диапазон	не менее 5-15 мкм ($\nu = 2000 \dots 667 \text{ см}^{-1}$)
Спектральное разрешение (ширина изолированной спектральной линии на половине высоты линии) с учетом аподизации	не более $0,5 \text{ см}^{-1}$
Интервал дискретизации	не более $0,25 \text{ см}^{-1}$
Порог обнаружения /NESR/ [$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}$] не более:	
- при длине волны 6 мкм	$3 \cdot 10^{-4}$
- при длине волны 13 мкм	$1 \cdot 10^{-4}$
- при длине волны 15 мкм	$1 \cdot 10^{-4}$
Погрешность измерения спектральной яркости объекта в терминах эквивалентной температуры при длине волны 11...12 мкм и при температуре объекта 280...300 К	0,5 К
Угловой диаметр поля зрения по уровню 0.5, или пространственное разрешение (в надире)	не более 40 мрад не более 33 км
Периодичность получения интерферограммы	$\leq 0.6 \text{ с}$
Информативность	не более 650 кбит/с
Масса прибора	не более 50 кг
Потребление:	
- среднее за виток - в режиме дегазации (4 суток за 6 месяцев)	не более 50 Вт не более 120 Вт

Характеристики перспективных атмосферных ИК-зондировщиков
для полярно-орбитальных КА

Наименование	AIRS	IASI	CrIS	ИКФС-2
Орбита (км)	705	833	824	832
Тип инструмента	Диффр. спектрометр	Фурье-спектрометр	Фурье-спектрометр	Фурье-спектрометр
Агентство производитель	NASA JPL/LoMIRIS	EUMETSAT/ CNES, Alcatel	DoD/NOAA/ NASA, ITT	Росавиакосмос Центр Келдыша
Спектр. полоса (см ⁻¹)	649-1135 1217-1613 2169-2674	Непрерывная 645-2760	650-1095 1210-1750 2155-2550	667-2000
Спектр.разреш. способность	1000-1400	2000-4000	900-1800	1300-4000
Простр. разр.в км (1 пиксель)	13 x 7	12	14	33
Плотность наблюдений на (50*50) км ²	9	4	9	1
Потребляемая мощность (Вт)	225	200	86	50
Масса (кг)	140	230	81	50
Платформа КА	AQUA (EOS-PM1)	МЕТОР-1,-2,-3	NPOESS,NPP	Метеор-М №2
Дата запуска	2002	2007	2009	2010

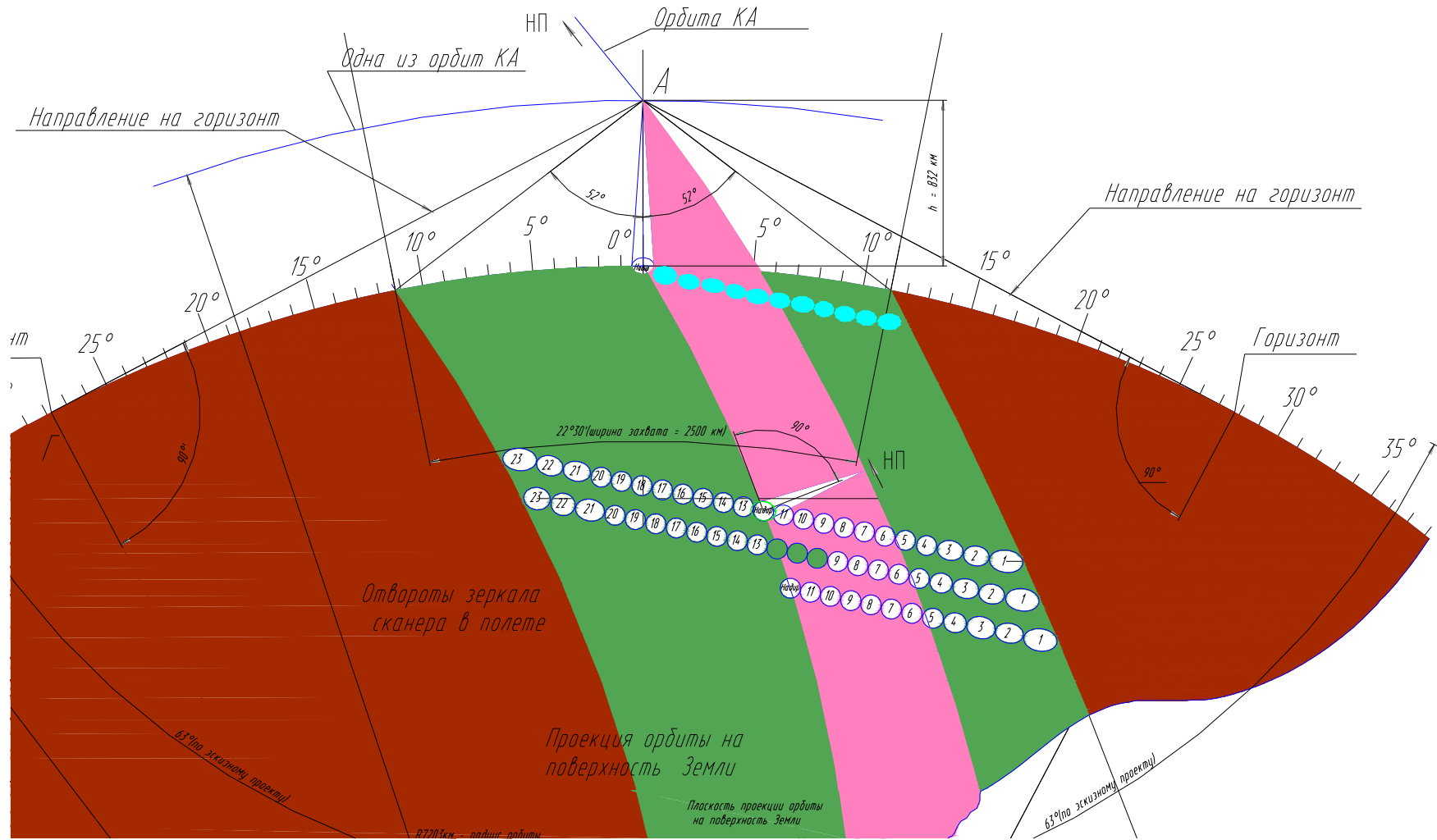
Состав прибора ИКФС-2

Прибор состоит из двух блоков:

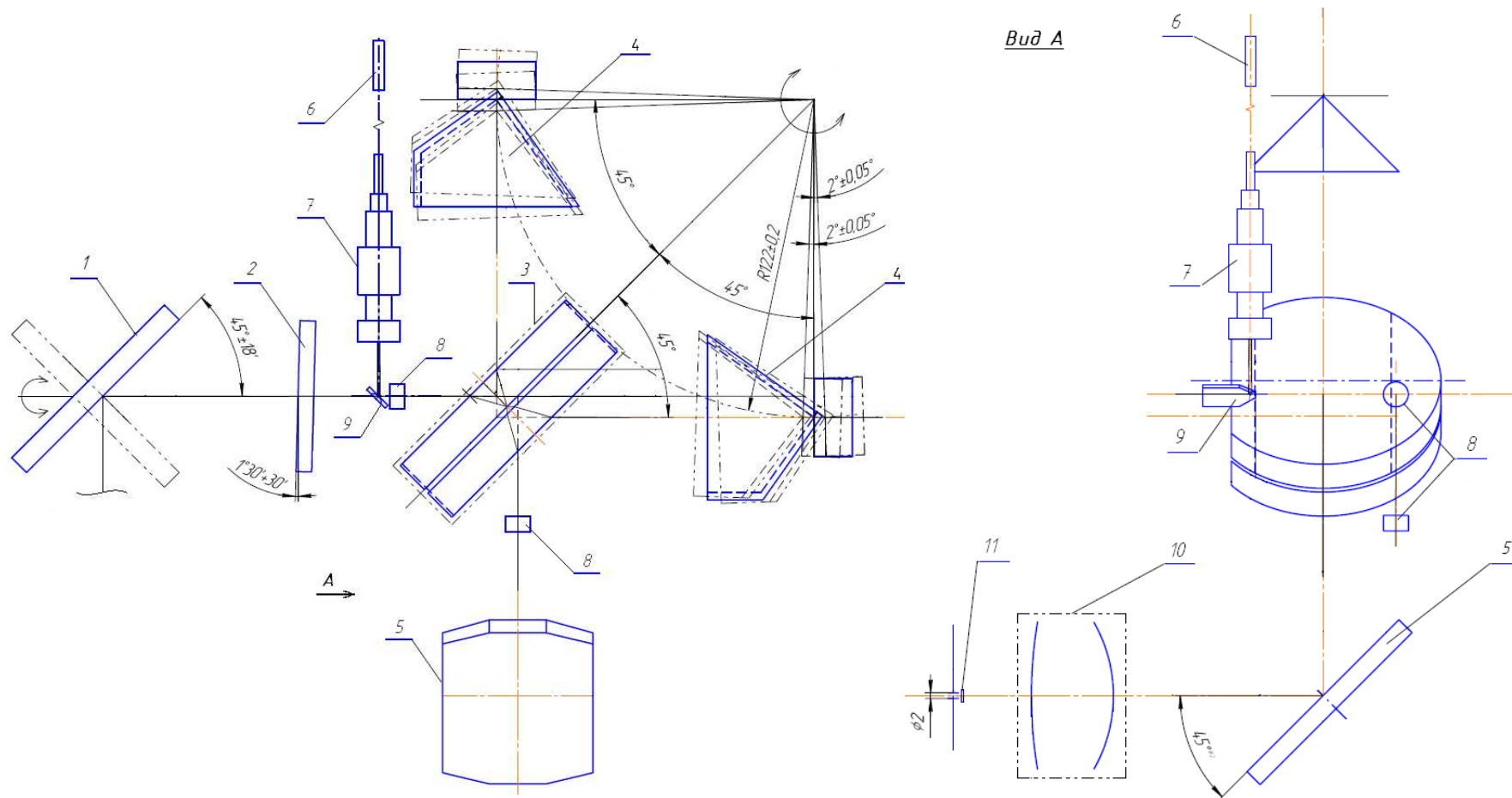
- 1) **оптико-механический блок (ОМБ)**, устанавливаемый снаружи на обращённой в надир поверхности КА и включающий:
 - а) **интерферометрический модуль (МИ)**, в котором происходит измерение спектральной яркости объекта;
 - б) **модуль сканера (МС)**, направляющий поле зрения прибора в требуемую точку и содержащий эталонный ИК-излучатель для периодической калибровки прибора;
 - в) **радиационный холодильник (РХ)** для охлаждения приёмника излучения;
- 2) **блок обработки, управления и питания (модуль электроники МЭ)**.

МЭ предназначен для управления работой прибора, предварительной обработки полученных прибором данных, формирования пакетов научной и служебной информации и передачи их в память БИС-М, приема от КА команд.

Схема измерения



Оптическая схема



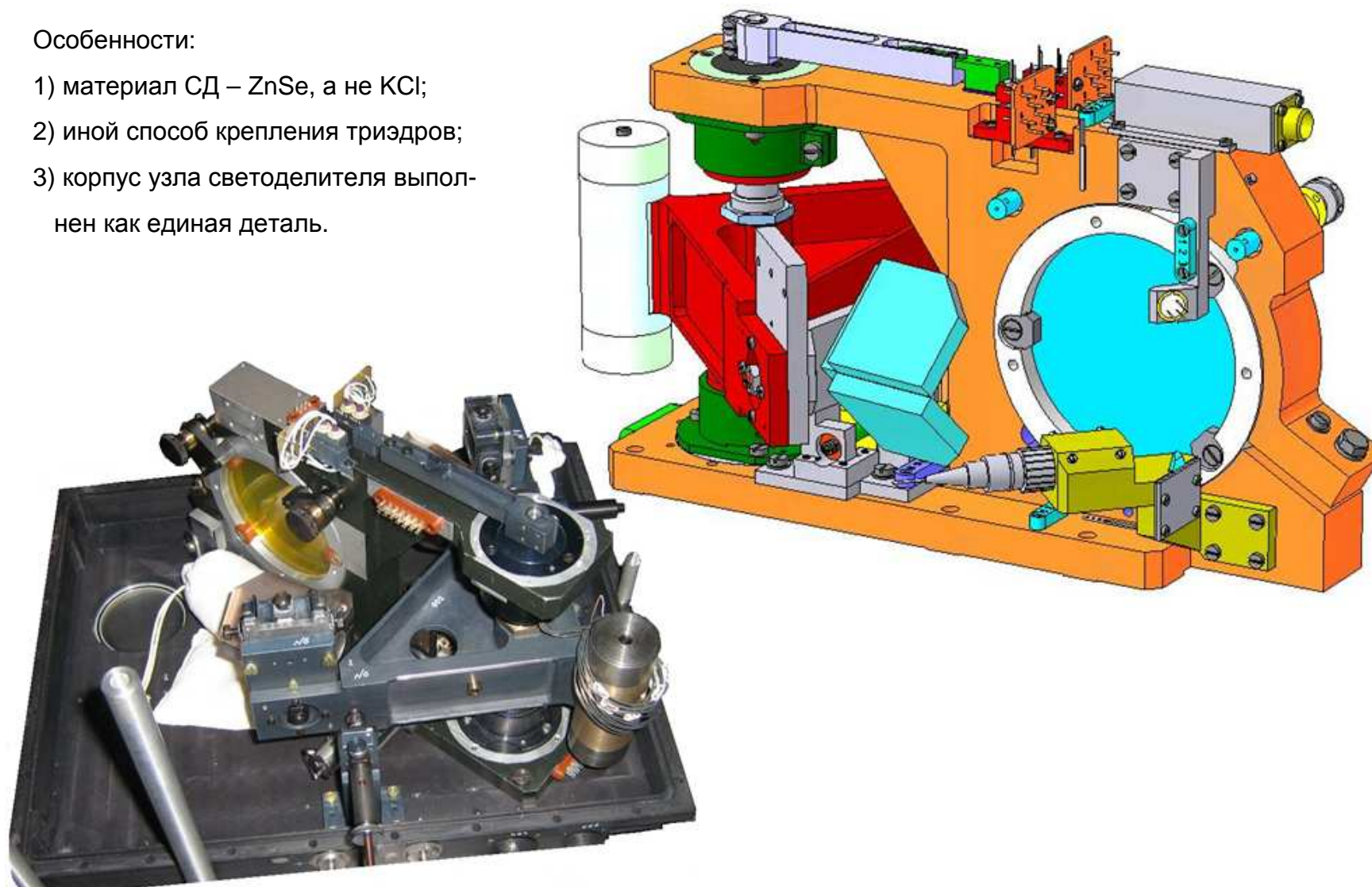
1 – зеркало сканера;
 2 – входное окно (Ge, 6мм);
 3 – светоделитель (ZnSe);
 4 – триэдры;
 5 – поворотное зеркало;

6 – лазер референтного канала ($\lambda = 1.31\text{мкм}$);
 7 – коллиматор;
 8 – фотоприемник референтного канала;
 9 – зеркало реф. канала;
 10 – объектив;
 11 – КРТ-приемник

Технологический образец

Особенности:

- 1) материал СД – ZnSe, а не KCl;
- 2) иной способ крепления триэдров;
- 3) корпус узла светоделителя выполнен как единая деталь.

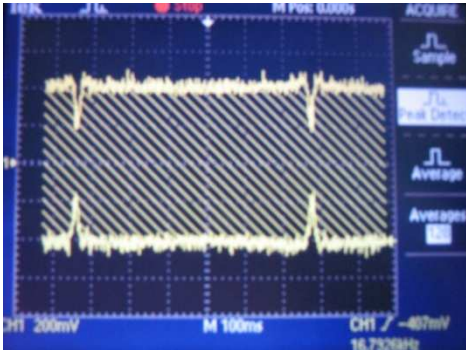


Испытания ТО

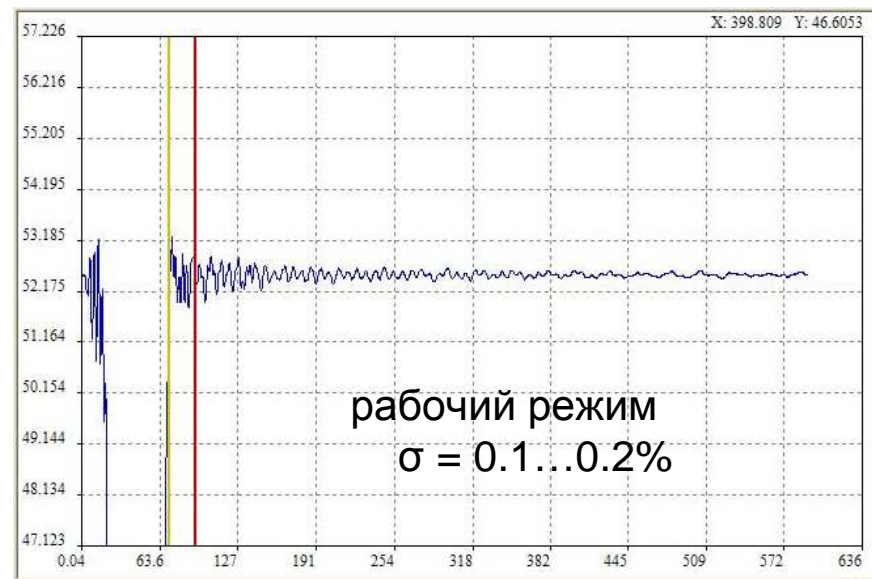
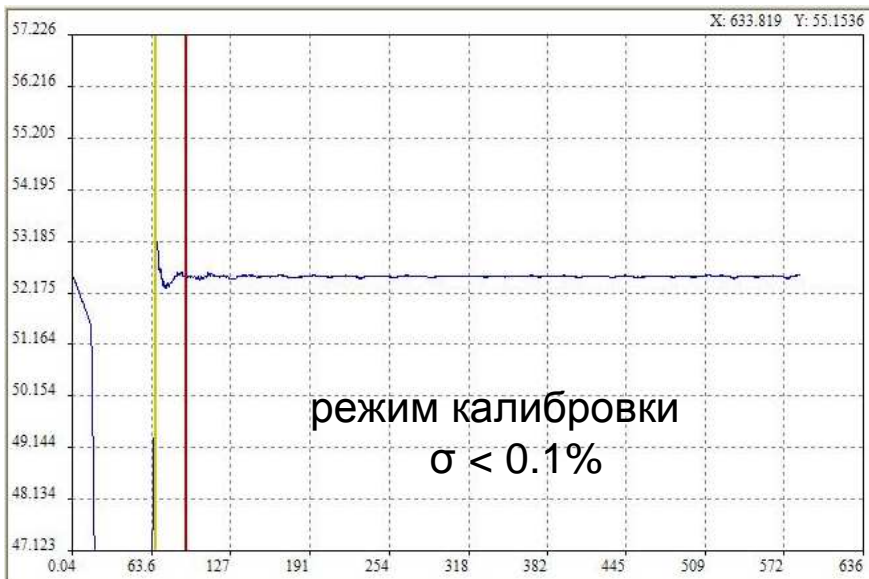
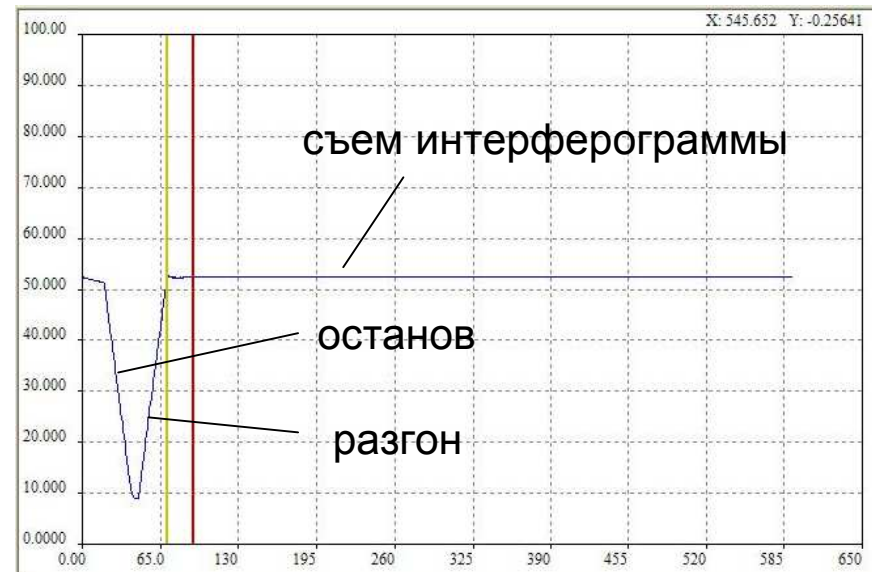
Вид испытания	
1. Измерение стабильности скорости	+
2. Измерение контраста интерференции	+
3. Измерение отношения «сигнал-шум» в ИФГ	+
4. Оценка спектрального разрешения	+
5. Измерение пороговых характеристик	-
6. Измерение аппаратной функции	-

Измерение стабильности скорости изменения разности хода

Неидеальность частотных характеристик электронного тракта основного и референтного каналов накладывает требования на стабильность скорости перемещения триэдров.



Огибающая сигнала референтного канала, $f = 52.5\text{кГц}$



Измерение контраста интерференции

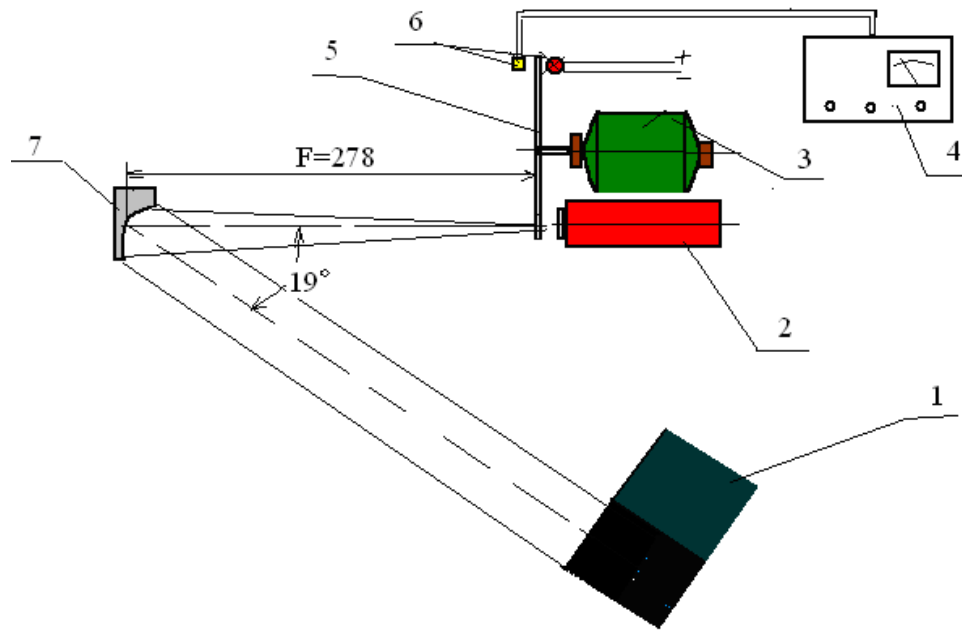
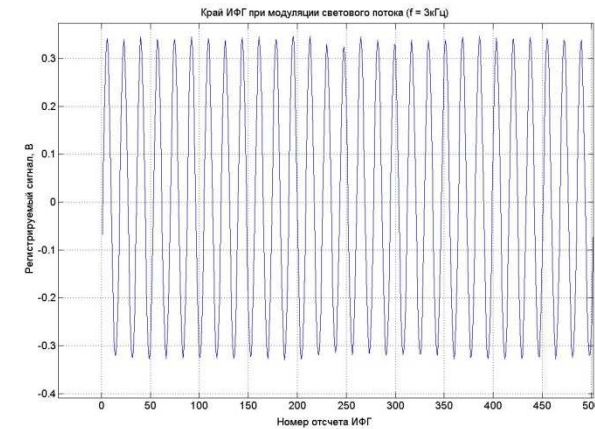
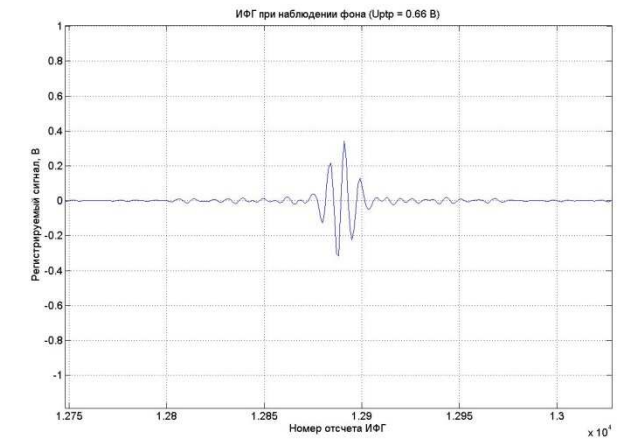
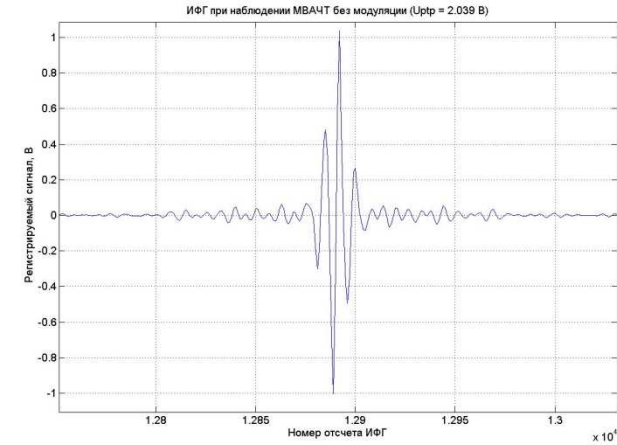


Схема установки для измерения контраста интерференции:
 1 – МИ ИКФС-2; 2 – МВАЧТ; 3 – двигатель; 4 – частотомер;
 5 – диск модулятора; 6 – оптопара; 7 – внеосевое параболическое зеркало.

$$K = \frac{U_{PTP}^{MBACT} - U_{PTP}^{\Phi}}{2U_{MOD}} \cdot K_{ПУ}^{ОГН} \quad (2)$$

Результаты: $U_{PTP}^{MBACT} \approx 2B$; $U_{PTP}^{\Phi} \approx 0.66B$;

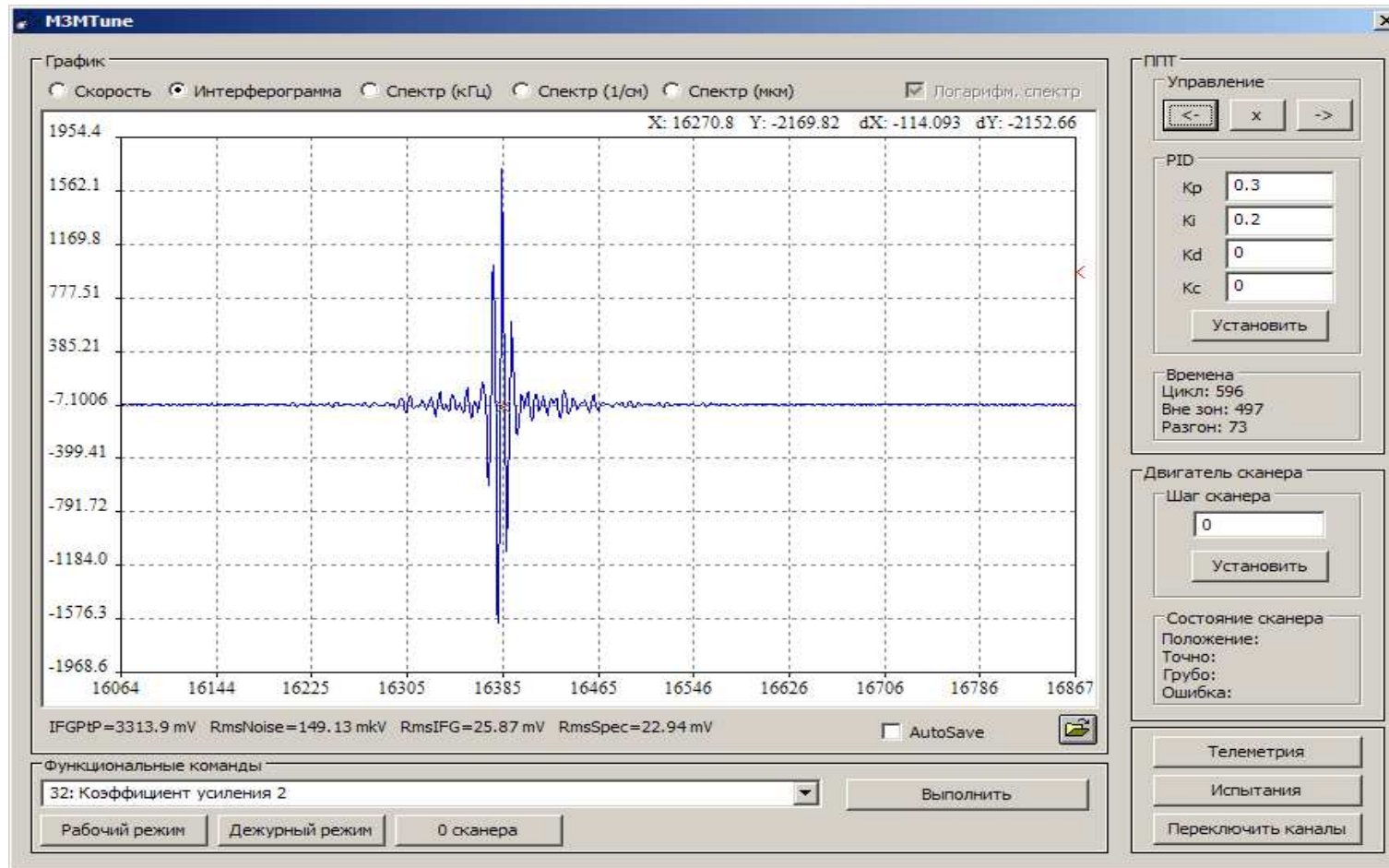
$U_{MOD}^{3кГц} \approx 0.65B$; $K_{ПУ}^{ОГН} (3кГц) = 0.87$; $K \approx 0.85...0.9$



Измерение отношения «сигнал-шум» в интерферограмме

При наблюдении бортового модуля калибровки (БМК), имеющего температуру 40 град., сначала измеряется размах ИФГ, а затем оценивается СКЗ шума по 1000 крайних отсчетов, после чего отношение «сигнал-шум» определяется как:

$$SNR = \frac{U_{PTP}}{2\sigma} \quad (1) \quad \text{Результаты: } U_{PTP} \approx 3.3B; \quad \sigma \approx 110\text{мкВ}; \quad SNR \approx 15000$$

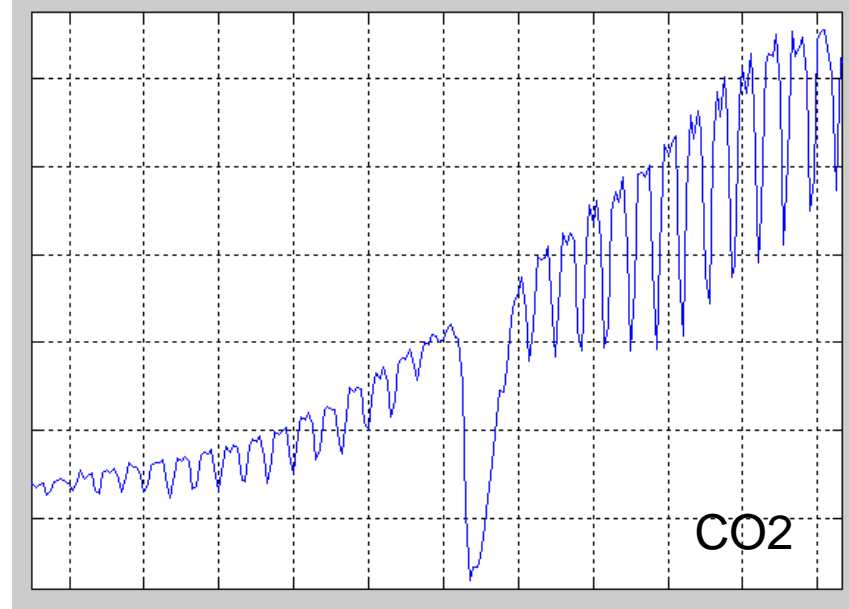
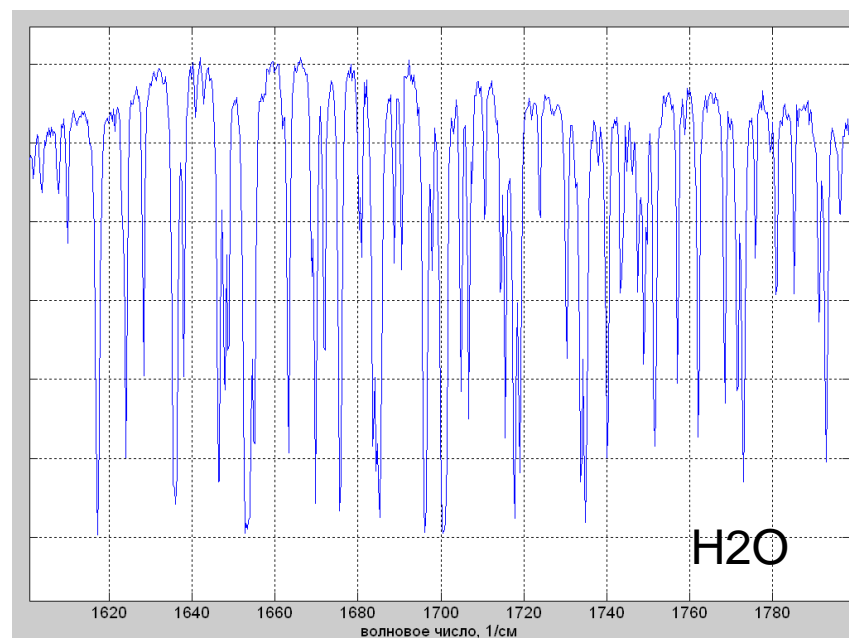
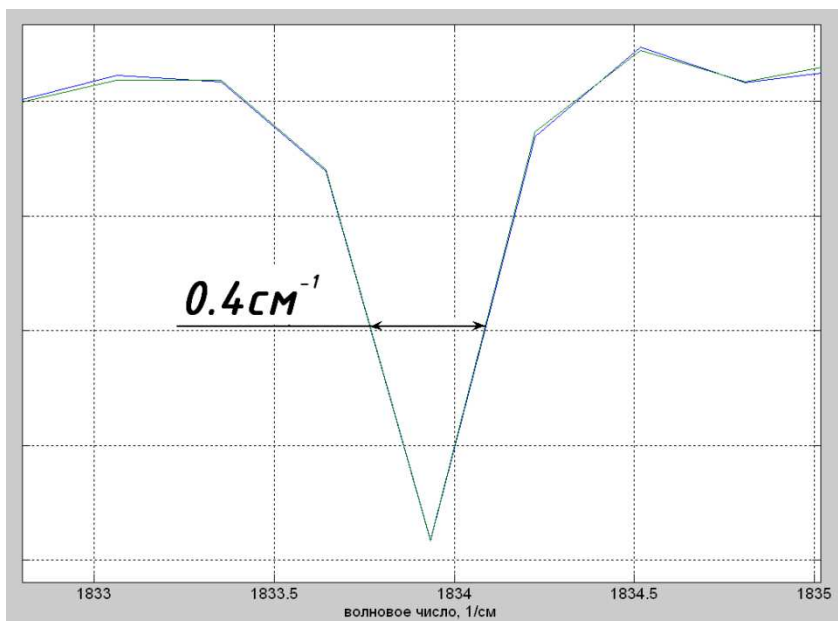


Оценка спектрального разрешения

Требование к спектральному разрешению прибора, определяемому как ширина аппаратной функции по уровню 0.5, составляет 0.5 см^{-1} с учетом аподизации.

Оценка показывает, что технологический образец ИКФС-2 обеспечивает спектральное разрешение $0.35 \dots 0.4 \text{ см}^{-1}$ без учета аподизации.

Более корректное значение $\delta\nu$ будет получено на этапе измерения аппаратной функции прибора.



Спасибо за внимание