



Балтийский государственный  
технический университет  
**«ВОЕНМЕХ»**  
им. Д.Ф. Устинова



# «Оптимизация узлов оптических систем связи малых космических аппаратов внутри роя»

Дубенкова Елизавета, 15 лет, Славянск-на-Кубани

Научные руководители: Гавриш Михаил Владимирович,  
Неделько Сергей Александрович





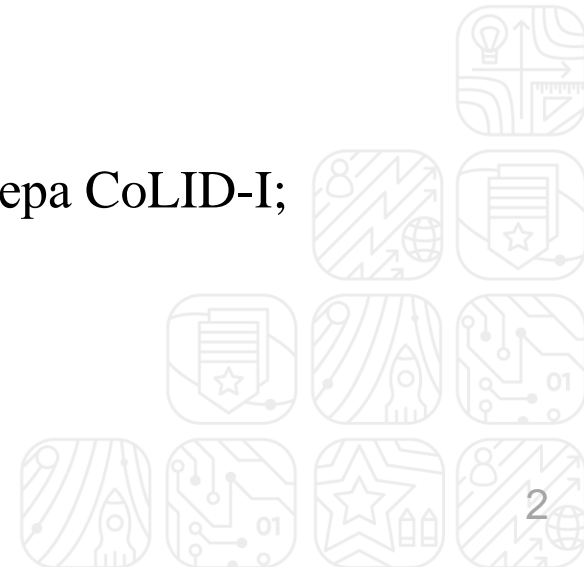
КОСМИЧЕСКИЙ  
КЛАСС

# Цели и задачи

**Цель:** Оптимизация узлов модуля оптической связи в составе наноспутника на основе 6U CubeSat путем установки импульсного пикосекундного лазера

## Задачи:

- Описать концепцию и принцип работы роя малых космических аппаратов (МКА);
- Провести анализ радио и оптического каналов связи;
- Провести подбор приемника и источника лазерного излучения;
- Провести экспериментальные исследования параметров импульса генерации лазера CoLID-I;
- Провести анализ видов и схем приемных телескопов и выбрать оптимальную;
- Провести габаритный расчет;
- Разработать узел приемного телескопа;
- Рассчитать количество модулей 6U Cubesat для покрытия орбиты Земли;





КОСМИЧЕСКИЙ  
КЛАСС

# АКТУАЛЬНОСТЬ



Ограничения:

- Массогабаритные характеристики;
- Энергопотребление;
- Охлаждение.

Перспективное решение: рой МКА

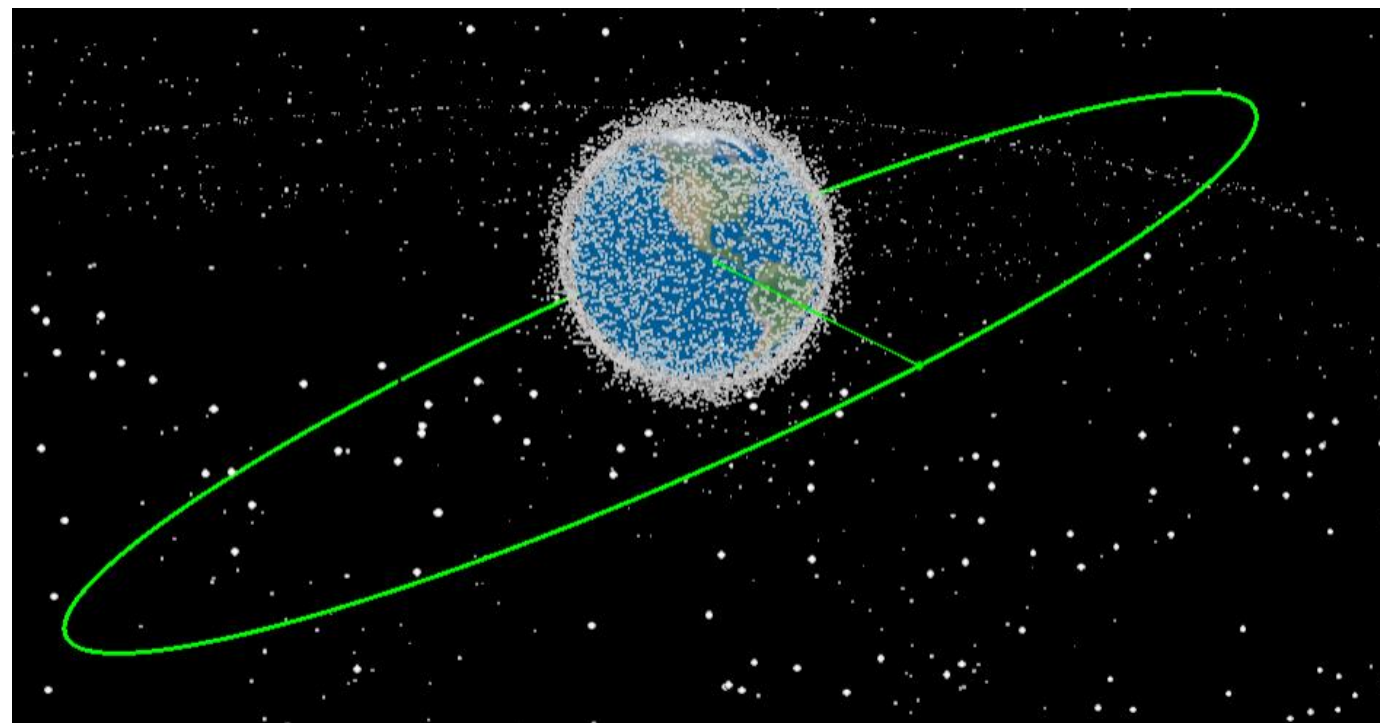


Рисунок 1 – Рой МКА, расположенные по всей орбите Земли





	NASA TBIRD	NASA CLICK	PIXL-1	SDA Tranche 1	Starlink v2	ORION (Optical Relay Information Orbital Network)
Производитель (аппарат/терминал)	Blue Canyon/MIT Lincoln Lab	Blue Canyon/MIT/Univ. Florida	DLR/SESAT Spacecom	York, Lockheed/Minatoc, SESAT	SpaceX (собств. разработка)	-
Дальность передачи	~530 км (Земля)	25-580 км (L2L)	~560 км (Земля)	1000-7500 км (L2L)	500-2000 км (L2L)	570 км (L2L)
Скорость передачи	200 Гбит/с	>20 Мбит/с	100 Мбит/с	1-10 Гбит/с	10-100+ Гбит/с	20 Мбит/с
Масса (аппарат/терминал)	~12 кг / < 3кг	~5кг / ~1,2кг	~4,5кг / 0,4кг	150-300кг / ~15кг	~800кг / нет данных	4,4 кг / 0,4кг
Частота полетов	Единичная миссия	Экспериментальная	Низкая	Высокая (серийно)	Сверхвысокая	Высокая





КОСМИЧЕСКИЙ  
КЛАСС

# Принцип работы МКА

Рой МКА – это группа компактных космических аппаратов с небольшой массой, распределяющая нагрузку между собой и функционирующая как единая система

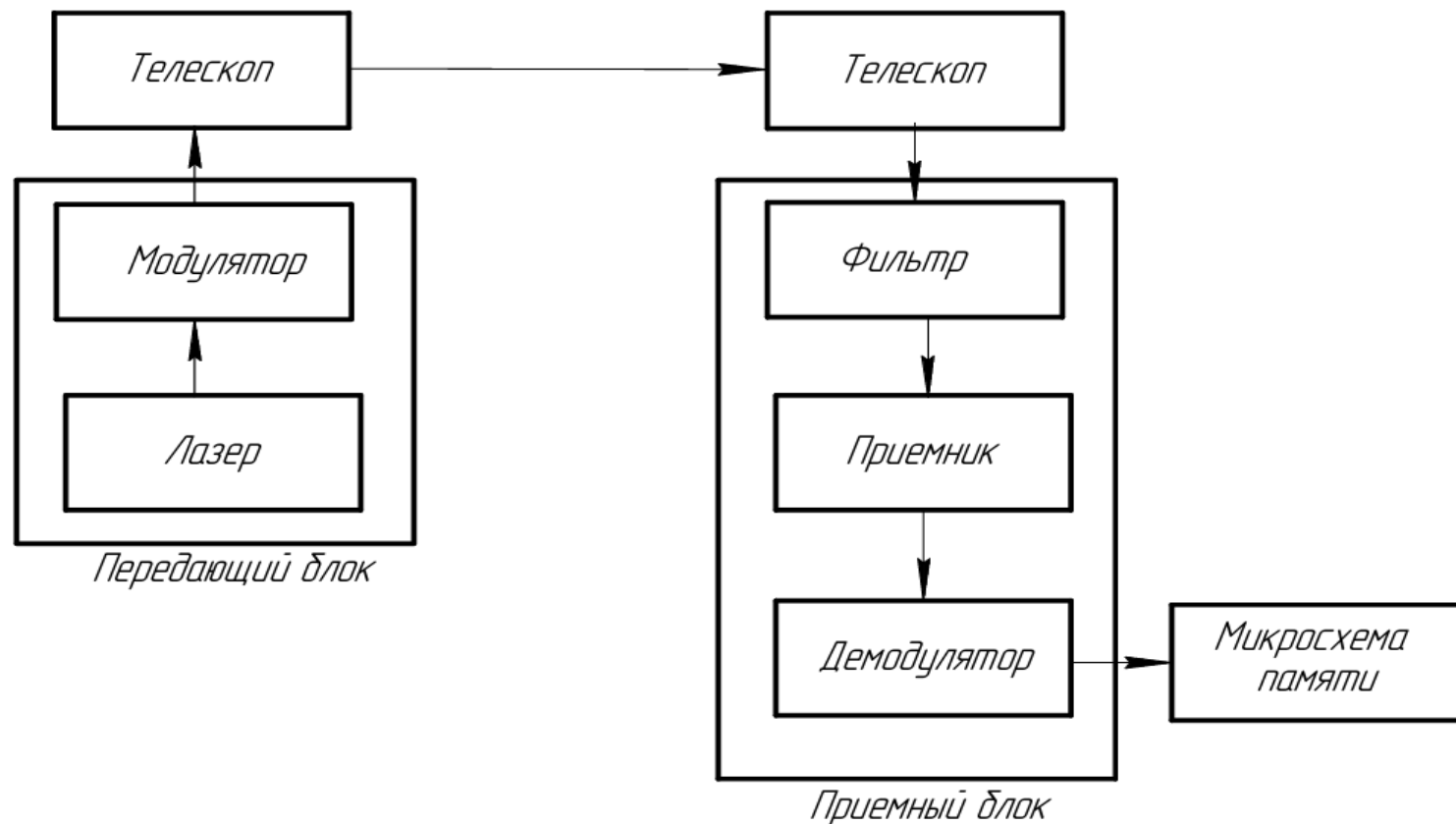


Рисунок 2 – Функциональная блок-схема





КОСМИЧЕСКИЙ  
КЛАСС

# Подбор приемника



Рисунок 3 - Фотоприемник серии KY-PRM от компании Keyang Photonics



Рисунок 4 - Фотоприёмник со сверхнизким шумом PWPR-2K-IN



Рисунок 5 – Сбалансированный приемник от компании Agoltron

Расчет SNR (отношение сигнал/шум):

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

$$P_{noise} = (R \times P_{opt})^2$$

$$= \frac{2q(I_{ph} + I_{dark})B + \frac{4kTB}{R_{load}} + (NEP\sqrt{B})^2}{}$$

где R – отзывчивость фотодиода;

$P_{opt}$  – оптическая мощность сигнала;

q – заряд электрона ( $1.6 \times 10^{-19}$  Кл);

$I_{ph}$  – фототок;  $I_{dark}$  – темновой ток;

B – полоса пропускания;

k – постоянная Больцмана ( $1.38 \times 10^{-23}$  Дж/К);

T – температура детектора;

$R_{load}$  – сопротивление нагрузки;

$NEP\sqrt{b}$  – минимальная обнаруживаемая мощность.

Таблица 1 – Характеристики приемников

Параметр	Значение		
Название приемника	Приемник от компании Agoltron	Фотоприёмник со сверхнизким шумом PWPR-2K-IN	Фотоприёмник серии KY-PRM от компании Keyang Photonics
SNR	4	82	22
Диапазон частот, кГц	-	До 2	До 40-10 <sup>6</sup>
Время нарастания/спада, нс	1	0,17-10 <sup>6</sup>	3,5
SNR	4	82	22

# Подбор источника



Рисунок 6 – Пикосекундный волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I



Рисунок 7 – Наносекундный дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550



Рисунок 8 - PErL-PM компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер

Таблица 2 – Исходные данные источников

	Наносекундный лазер	Пикосекундный лазер	Фемтосекундный лазер																																																																																				
Модель лазера	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I	PErL-PM Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер																																																																																				
Частота следования импульсов, [кГц]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Модель лазера</th> <th>Наносекундный лазер</th> <th>Пикосекундный лазер</th> <th>Фемтосекундный лазер</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550</td> <td>Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550</td> <td>Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I</td> <td>Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер</td> </tr> <tr> <td>Частота следования импульсов, [кГц]</td> <td>50 – 2 × 10<sup>3</sup></td> <td>1 – 3 × 10<sup>3</sup></td> <td>3 × 10<sup>3</sup> – 1 × 10<sup>4</sup></td> </tr> <tr> <td>Длительность импульса</td> <td>3 нс</td> <td>0,5-250 нс</td> <td>&lt;100 фс</td> </tr> <tr> <td>Рабочее напряжение, [В]</td> <td>12</td> <td>До 12</td> <td>100-220</td> </tr> <tr> <td>Размеры, [мм]</td> <td>90 × 24,5</td> <td>90 × 23,5</td> <td>200×130</td> </tr> <tr> <td>Вес, [г]</td> <td>100</td> <td>&lt;300</td> <td>400</td> </tr> </tbody> </table>	Модель лазера	Наносекундный лазер	Пикосекундный лазер	Фемтосекундный лазер	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I	Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер	Частота следования импульсов, [кГц]	50 – 2 × 10 <sup>3</sup>	1 – 3 × 10 <sup>3</sup>	3 × 10 <sup>3</sup> – 1 × 10 <sup>4</sup>	Длительность импульса	3 нс	0,5-250 нс	<100 фс	Рабочее напряжение, [В]	12	До 12	100-220	Размеры, [мм]	90 × 24,5	90 × 23,5	200×130	Вес, [г]	100	<300	400	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Модель лазера</th> <th>Наносекундный лазер</th> <th>Пикосекундный лазер</th> <th>Фемтосекундный лазер</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550</td> <td>Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550</td> <td>Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I</td> <td>Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер</td> </tr> <tr> <td>Частота следования импульсов, [кГц]</td> <td>50 – 2 × 10<sup>3</sup></td> <td>1 – 3 × 10<sup>3</sup></td> <td>3 × 10<sup>3</sup> – 1 × 10<sup>4</sup></td> </tr> <tr> <td>Длительность импульса</td> <td>3 нс</td> <td>0,5-250 нс</td> <td>&lt;100 фс</td> </tr> <tr> <td>Рабочее напряжение, [В]</td> <td>12</td> <td>До 12</td> <td>100-220</td> </tr> <tr> <td>Размеры, [мм]</td> <td>90 × 24,5</td> <td>90 × 23,5</td> <td>200×130</td> </tr> <tr> <td>Вес, [г]</td> <td>100</td> <td>&lt;300</td> <td>400</td> </tr> </tbody> </table>	Модель лазера	Наносекундный лазер	Пикосекундный лазер	Фемтосекундный лазер	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I	Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер	Частота следования импульсов, [кГц]	50 – 2 × 10 <sup>3</sup>	1 – 3 × 10 <sup>3</sup>	3 × 10 <sup>3</sup> – 1 × 10 <sup>4</sup>	Длительность импульса	3 нс	0,5-250 нс	<100 фс	Рабочее напряжение, [В]	12	До 12	100-220	Размеры, [мм]	90 × 24,5	90 × 23,5	200×130	Вес, [г]	100	<300	400	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Модель лазера</th> <th>Наносекундный лазер</th> <th>Пикосекундный лазер</th> <th>Фемтосекундный лазер</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550</td> <td>Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550</td> <td>Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I</td> <td>Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер</td> </tr> <tr> <td>Частота следования импульсов, [кГц]</td> <td>50 – 2 × 10<sup>3</sup></td> <td>1 – 3 × 10<sup>3</sup></td> <td>3 × 10<sup>3</sup> – 1 × 10<sup>4</sup></td> </tr> <tr> <td>Длительность импульса</td> <td>3 нс</td> <td>0,5-250 нс</td> <td>&lt;100 фс</td> </tr> <tr> <td>Рабочее напряжение, [В]</td> <td>12</td> <td>До 12</td> <td>100-220</td> </tr> <tr> <td>Размеры, [мм]</td> <td>90 × 24,5</td> <td>90 × 23,5</td> <td>200×130</td> </tr> <tr> <td>Вес, [г]</td> <td>100</td> <td>&lt;300</td> <td>400</td> </tr> </tbody> </table>	Модель лазера	Наносекундный лазер	Пикосекундный лазер	Фемтосекундный лазер	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I	Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер	Частота следования импульсов, [кГц]	50 – 2 × 10 <sup>3</sup>	1 – 3 × 10 <sup>3</sup>	3 × 10 <sup>3</sup> – 1 × 10 <sup>4</sup>	Длительность импульса	3 нс	0,5-250 нс	<100 фс	Рабочее напряжение, [В]	12	До 12	100-220	Размеры, [мм]	90 × 24,5	90 × 23,5	200×130	Вес, [г]	100	<300	400
Модель лазера	Наносекундный лазер	Пикосекундный лазер	Фемтосекундный лазер																																																																																				
Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I	Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер																																																																																				
Частота следования импульсов, [кГц]	50 – 2 × 10 <sup>3</sup>	1 – 3 × 10 <sup>3</sup>	3 × 10 <sup>3</sup> – 1 × 10 <sup>4</sup>																																																																																				
Длительность импульса	3 нс	0,5-250 нс	<100 фс																																																																																				
Рабочее напряжение, [В]	12	До 12	100-220																																																																																				
Размеры, [мм]	90 × 24,5	90 × 23,5	200×130																																																																																				
Вес, [г]	100	<300	400																																																																																				
Модель лазера	Наносекундный лазер	Пикосекундный лазер	Фемтосекундный лазер																																																																																				
Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I	Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер																																																																																				
Частота следования импульсов, [кГц]	50 – 2 × 10 <sup>3</sup>	1 – 3 × 10 <sup>3</sup>	3 × 10 <sup>3</sup> – 1 × 10 <sup>4</sup>																																																																																				
Длительность импульса	3 нс	0,5-250 нс	<100 фс																																																																																				
Рабочее напряжение, [В]	12	До 12	100-220																																																																																				
Размеры, [мм]	90 × 24,5	90 × 23,5	200×130																																																																																				
Вес, [г]	100	<300	400																																																																																				
Модель лазера	Наносекундный лазер	Пикосекундный лазер	Фемтосекундный лазер																																																																																				
Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550	Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I	Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер																																																																																				
Частота следования импульсов, [кГц]	50 – 2 × 10 <sup>3</sup>	1 – 3 × 10 <sup>3</sup>	3 × 10 <sup>3</sup> – 1 × 10 <sup>4</sup>																																																																																				
Длительность импульса	3 нс	0,5-250 нс	<100 фс																																																																																				
Рабочее напряжение, [В]	12	До 12	100-220																																																																																				
Размеры, [мм]	90 × 24,5	90 × 23,5	200×130																																																																																				
Вес, [г]	100	<300	400																																																																																				
Длительность импульса	3 нс	0,5-250 нс	<100 фс																																																																																				
Рабочее напряжение, [В]	12	До 12	100-220																																																																																				
Размеры, [мм]	90 x 24,5	90 x 23,5	200x130																																																																																				
Вес, [г]	100	<300	400																																																																																				



КОСМИЧЕСКИЙ  
КЛАСС

# Подбор источника

Расчет пиковой мощности лазерного излучения

$$P_{\text{пик}} = \frac{E_{\text{имп}}}{\tau}$$

где  $\tau$  – длительность импульсов;  
 $E_{\text{имп}}$  – энергия импульса;

Расчет средней мощности лазерного излучения

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{пик}} \times F \times \tau$$

где  $F$  – частота следования импульсов;

Расчет плотности мощности лазерного излучения

$$q = \frac{P_{\text{ср}}}{\pi \left( M^2 \times f \left( 1,22 \times \frac{\lambda}{D} \right) \right)^2}$$

где  $\pi$  – число Пи;  
 $M^2$  – параметр качества пучка;  
 $f$  – фокусное расстояние линзы;  
 $\lambda$  – длина волны;  
 $D$  – диаметр приемного зеркала;

Таблица 3 – Результаты расчета для источников

Длительность импульса	Наносекундный лазер				Пикосекундный лазер				Фемтосекундный лазер			
Название лазера	Дисковый эрбиевый волоконный лазер SSP-DFL-MP-1550				Волоконный лазер с короткими импульсами CoLID-I				PErL-PM Компактный фемтосекундный Er-волоконный лазер			
Пиковая мощность [Дж/с]	3 · 10 <sup>3</sup>				4 × 10 <sup>3</sup> – 2 · 10 <sup>5</sup>				25 · 10 <sup>3</sup>			
Средняя мощность [Дж*Гц]	4,5				10 <sup>-3</sup> – 3 × 10 <sup>3</sup>				0,2			
Плотность мощности [(Дж*Гц)/м <sup>2</sup> ]	267,9				36 – 18 × 10 <sup>3</sup>				2,2 × 10 <sup>3</sup>			
Средняя мощность [Дж*Гц]	4,5				4 × 10 <sup>3</sup> – 2 · 10 <sup>5</sup>				25 · 10 <sup>3</sup>			
Плотность мощности [(Дж*Гц)/м <sup>2</sup> ]	267,9				36 – 18 × 10 <sup>3</sup>				2,2 × 10 <sup>3</sup>			
Плотность мощности [(Дж*Гц)/м <sup>2</sup> ]	267,9				36 – 18 × 10 <sup>3</sup>				2,2 × 10 <sup>3</sup>			

# Экспериментальные исследования параметров импульса генерации лазера CoLID-I

## Экспериментальная установка:

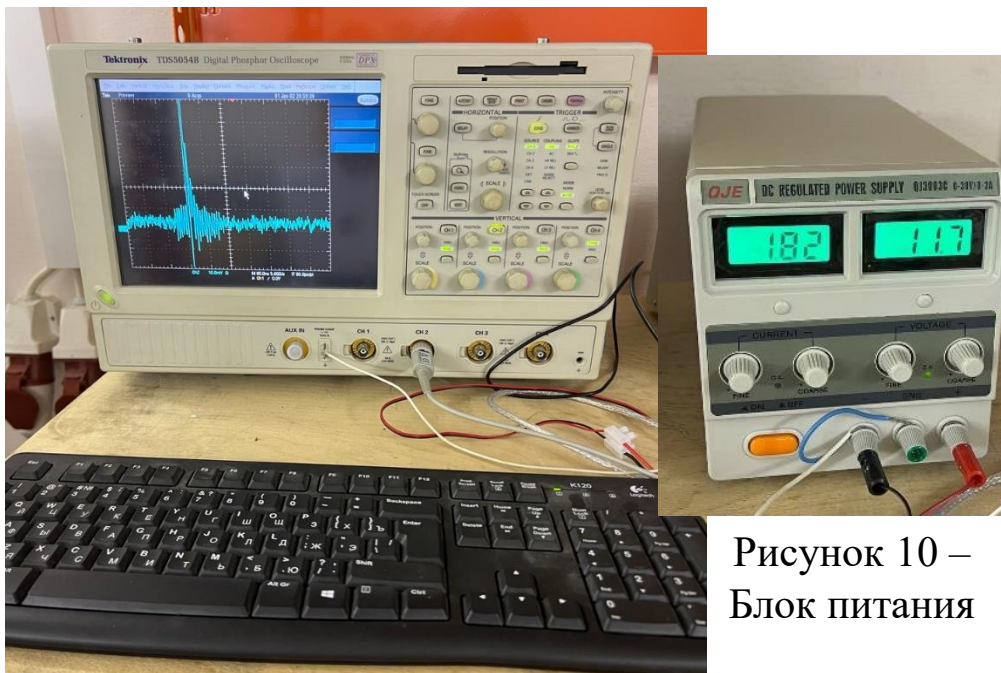


Рисунок 10 –  
Блок питания

Рисунок 9 – Осциллограф

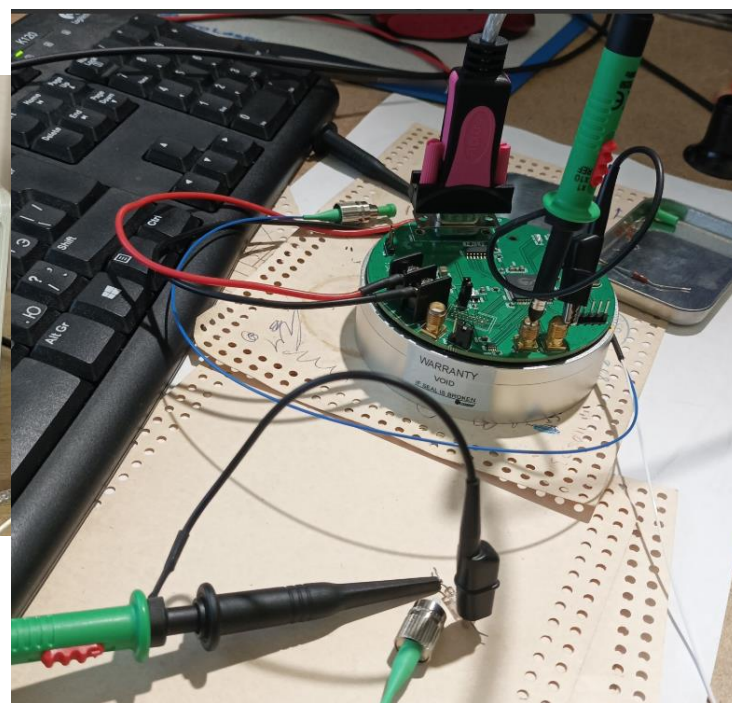


Рисунок 11 – Лазер и диод

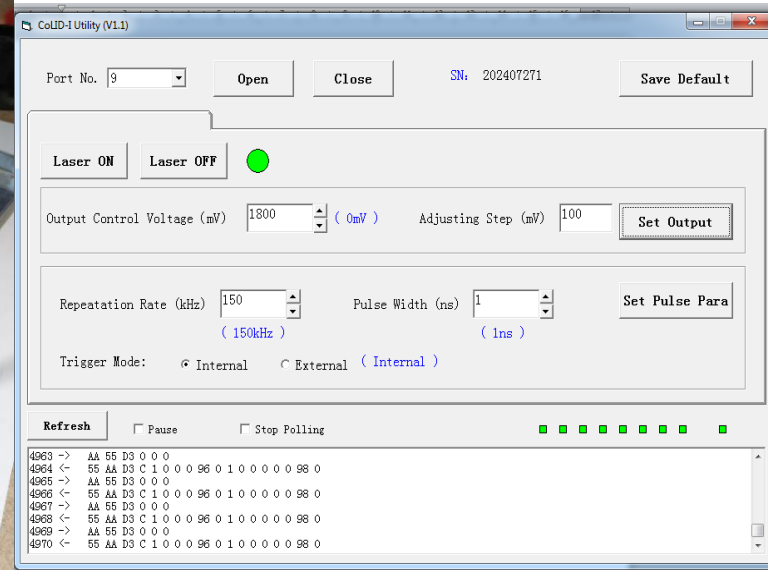


Рисунок 12 – Интерфейс управления  
параметрами лазера

# Экспериментальные исследования параметров импульса генерации лазера CoLID-I

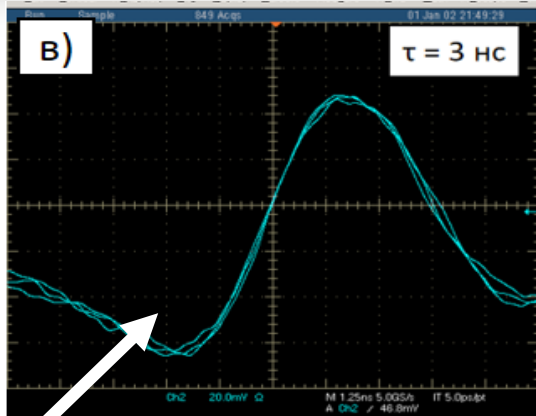


Рисунок 14 – Форма импульса от времени при его различной длительности

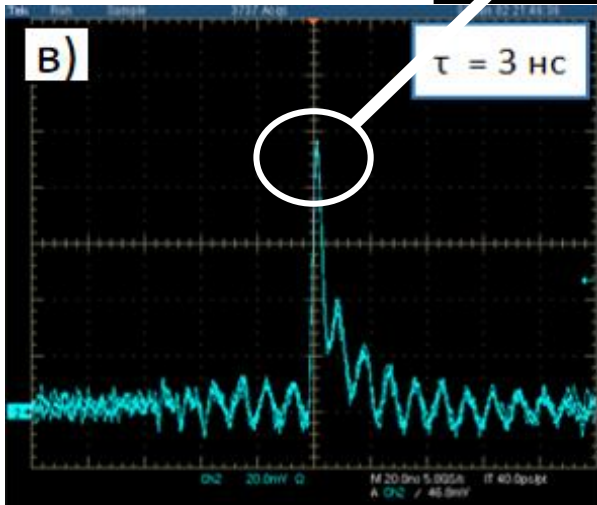


Рисунок 13 - Зависимость выходного мощности от времени при различной длительности импульса

Входное напряжение (мВ)

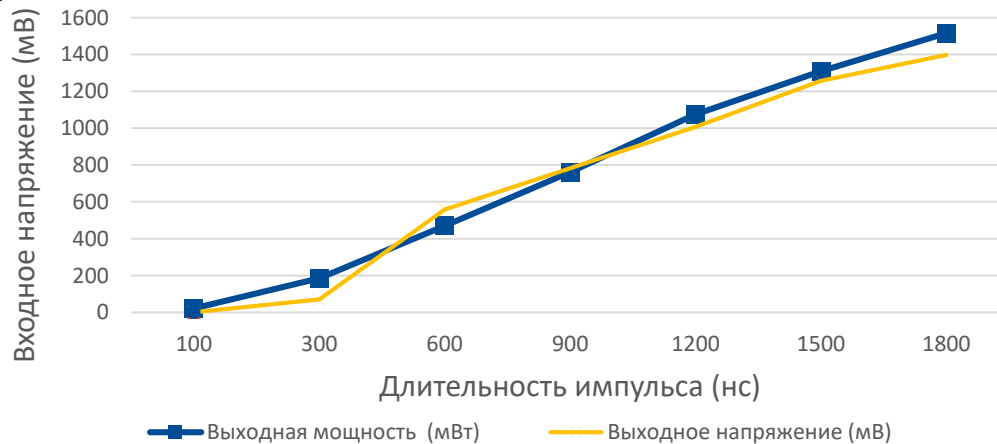


Рисунок 15 – Градуировочный график для оценки выходной мощности лазера

Зависимость плотности мощности от расстояния

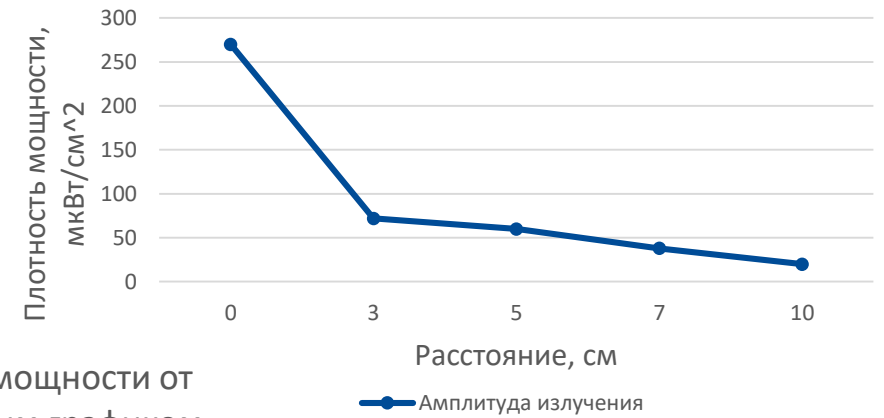
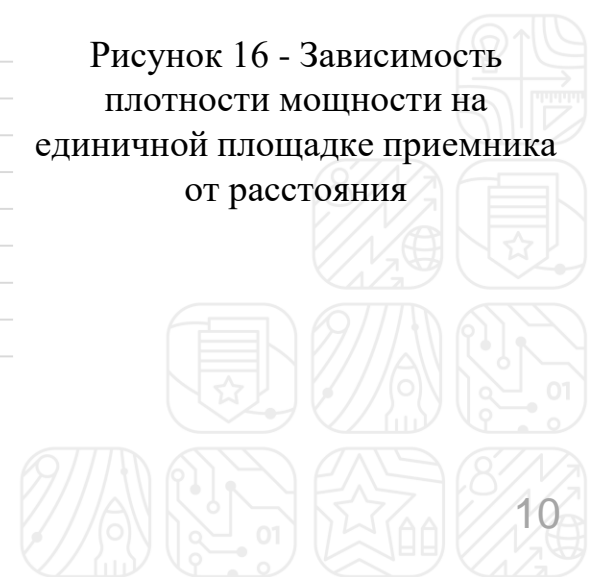


Рисунок 16 - Зависимость плотности мощности на единичной площадке приемника от расстояния





# Выбор телескопа

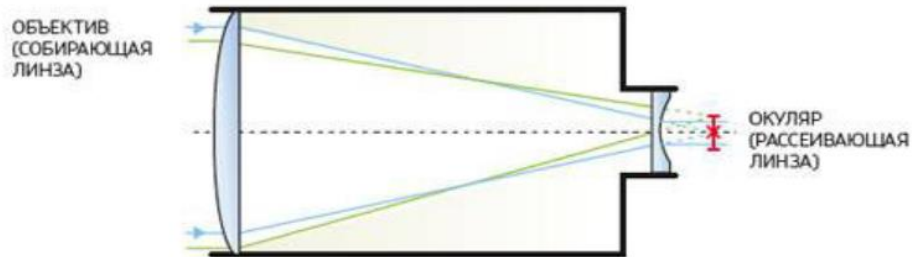


Рисунок 17 – Рефрактор Галилея

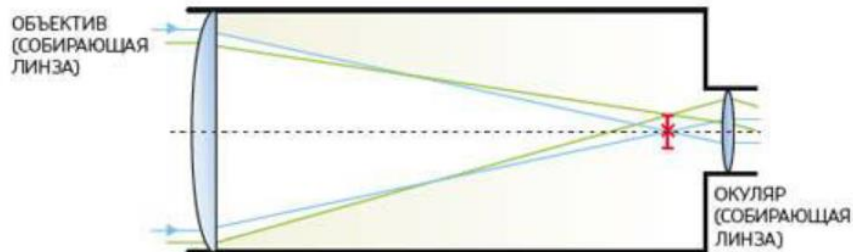


Рисунок 18 – Система Кеплера

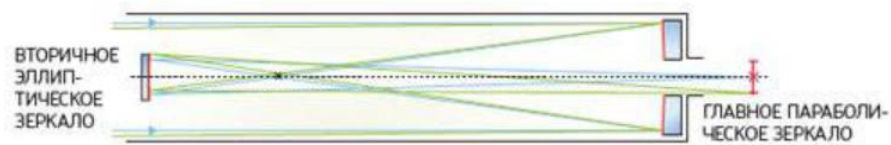


Рисунок 19 – Рефлектор Грегори

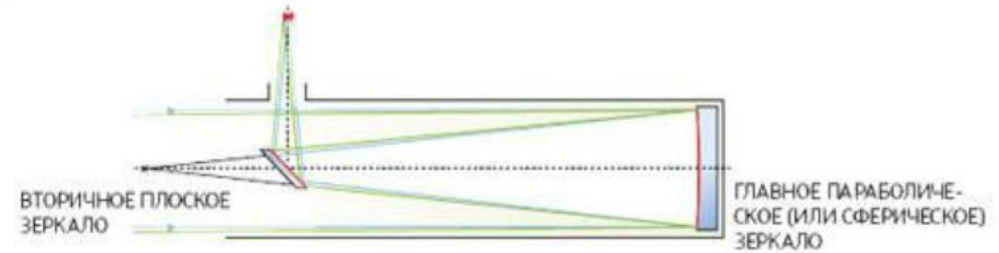


Рисунок 20 – Телескоп Ньютона

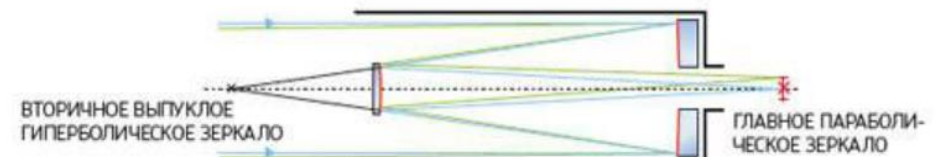


Рисунок 21 – Рефлектор Кассегрена

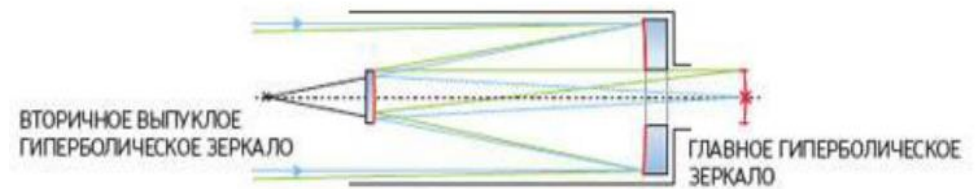


Рисунок 22 – Рефлектор Ричи-Кретьена





# Габаритный расчет

Расчет диаметра главного зеркала

$$D1 = SNR \frac{4NEP\sqrt{B}}{q\pi}$$

Расчет расстояния от фокуса главного зеркала до вторичного

$$s0 = f1 - \Delta$$

Расчет увеличения фокусного расстояния на вторичном зеркале

$$M = \frac{s1}{s0}$$

Расчет радиуса кривизны главного и вторичного зеркала

$$R2 = \frac{2s1s0}{s1 - s0} \quad R2 = \frac{R1}{\left(a \left(1 - \frac{1}{M}\right)\right)}$$

Расчет расстояния от главной линзы до эквивалентного фокусного расстояния всей системы

$$s1 = d + \Delta$$

Расчет радиуса вторичной линзы

$$r2 = \frac{D2}{2}$$

Расчет радиуса пучка лазерного излучения в месте расположения плоского зеркала и расстояния от плоского до главного зеркала

$$\frac{r2}{\Delta + d} = \frac{r3}{y + d}$$

Таблица 4 – Результаты габаритного расчета

Параметр	Значения
диаметр главного зеркала $D1$	80
расстояние от фокуса главного зеркала до вторичного $s0$	45
увеличение фокусного расстояния на вторичном зеркале $M$	3,6
радиус кривизны главного и вторичного зеркала $R1, R2$	270,250
расстояние от вторичного зеркала до эквивалентного фокусного расстояния всей системы $s1$	160
радиус вторичной линзы $r2$	14
увеличение фокусного расстояния на вторичном зеркале $M$	3,6
диаметр главного зеркала $D1$	80
расстояние от фокуса главного зеркала до вторичного $s0$	45
увеличение фокусного расстояния на вторичном зеркале $M$	3,6
радиус кривизны главного и вторичного зеркала $R1, R2$	270,250
расстояние от вторичного зеркала до эквивалентного фокусного расстояния всей системы $s1$	160
радиус вторичной линзы $r2$	14
расстояние от вторичного зеркала до эквивалентного фокусного расстояния всей системы $s1$	160
радиус вторичной линзы $r2$	14



# Габаритный расчет

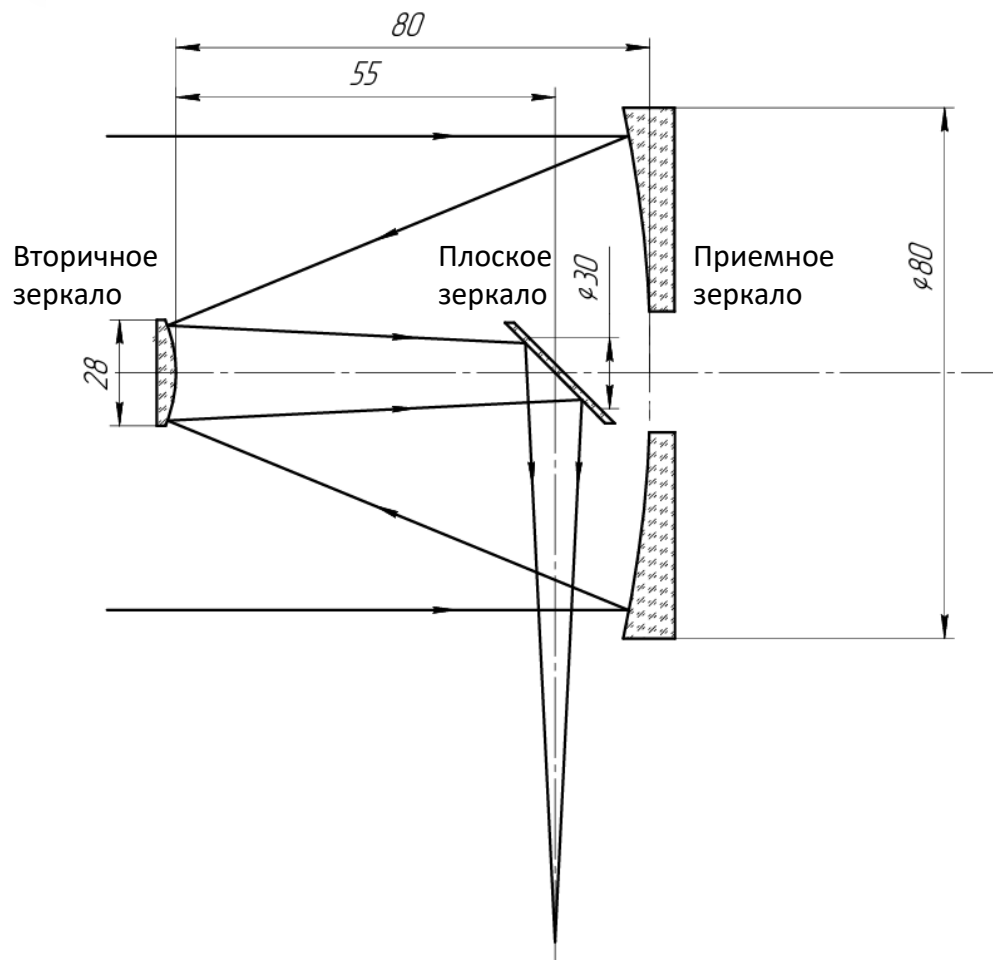


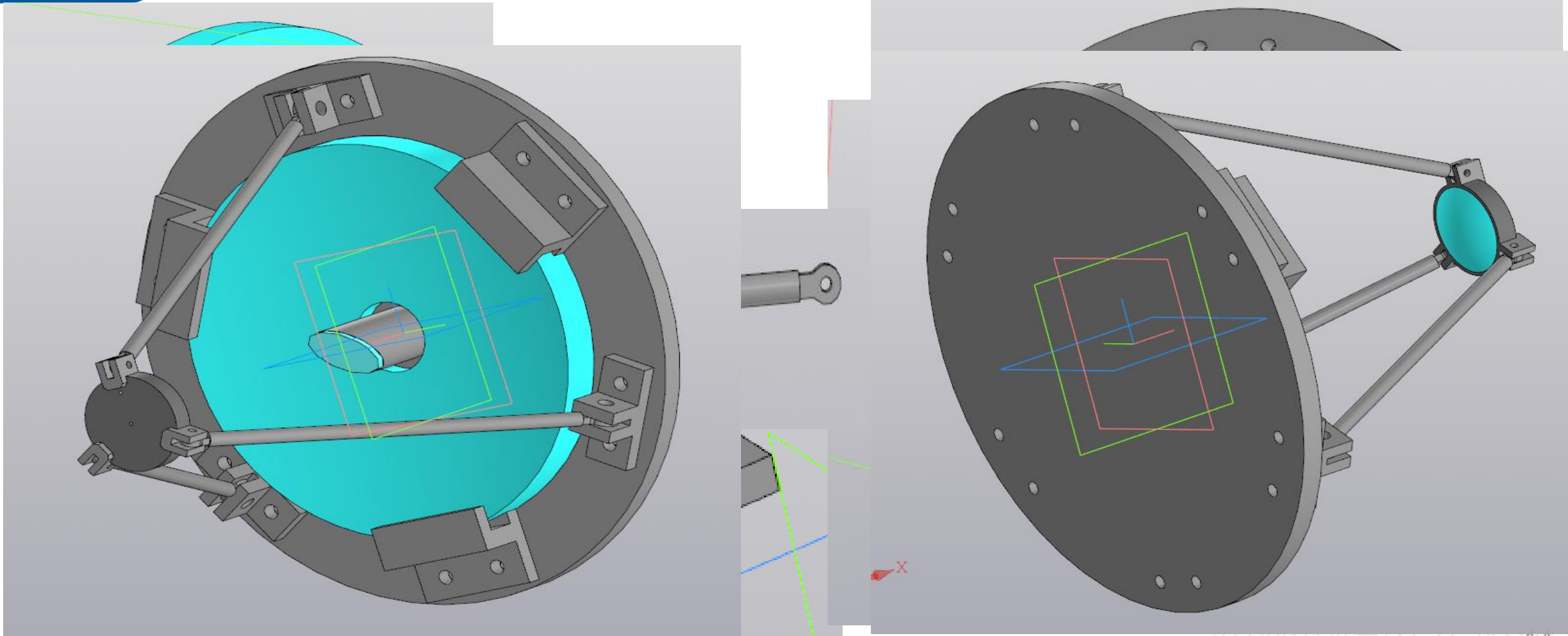
Рисунок 23 – Схема хода лучей в телескопе Кассегрена

Параметр	Значение
расстояние от плоского до главного зеркала $y$	25 мм
Параметр	Значение
расстояние от плоского до главного зеркала $y$	25 мм
расстояние между вторичным и главным зеркалом $\Delta$	100 мм
фокусное расстояние главного зеркала $f_1$	125 мм
диаметр вторичного зеркала $D_2$	20 мм
радиус пучка лазерного излучения в месте расположения плоского зеркала $r_3$	31,25
фактор положения $a$	2
Параметр	Значение
расстояние от плоского до главного зеркала $y$	25 мм
расстояние между вторичным и главным зеркалом $\Delta$	100 мм
фокусное расстояние главного зеркала $f_1$	125 мм
диаметр вторичного зеркала $D_2$	20 мм
радиус пучка лазерного излучения в месте расположения плоского зеркала $r_3$	31,25
фактор положения $a$	2
диаметр вторичного зеркала $D_2$	20 мм
радиус пучка лазерного излучения в месте расположения плоского зеркала $r_3$	31,25
фактор положения $a$	2

Таблица 5 - Результаты габаритного расчета



# Разработка конструкции приемного телескопа





# Расчет количества модулей 6U Cubesat

Таблица 6 – Исходные данные

Параметр	Значение
Высота орбиты, R, км	570
Радиус Земли, h, км	6371
Расстояние между спутниками, d, км	100

Расчет количества модулей 6U Cubesat для покрытия всей орбиты Земли:

$$n = \frac{16(R+h)^2}{d^2} = 77084$$

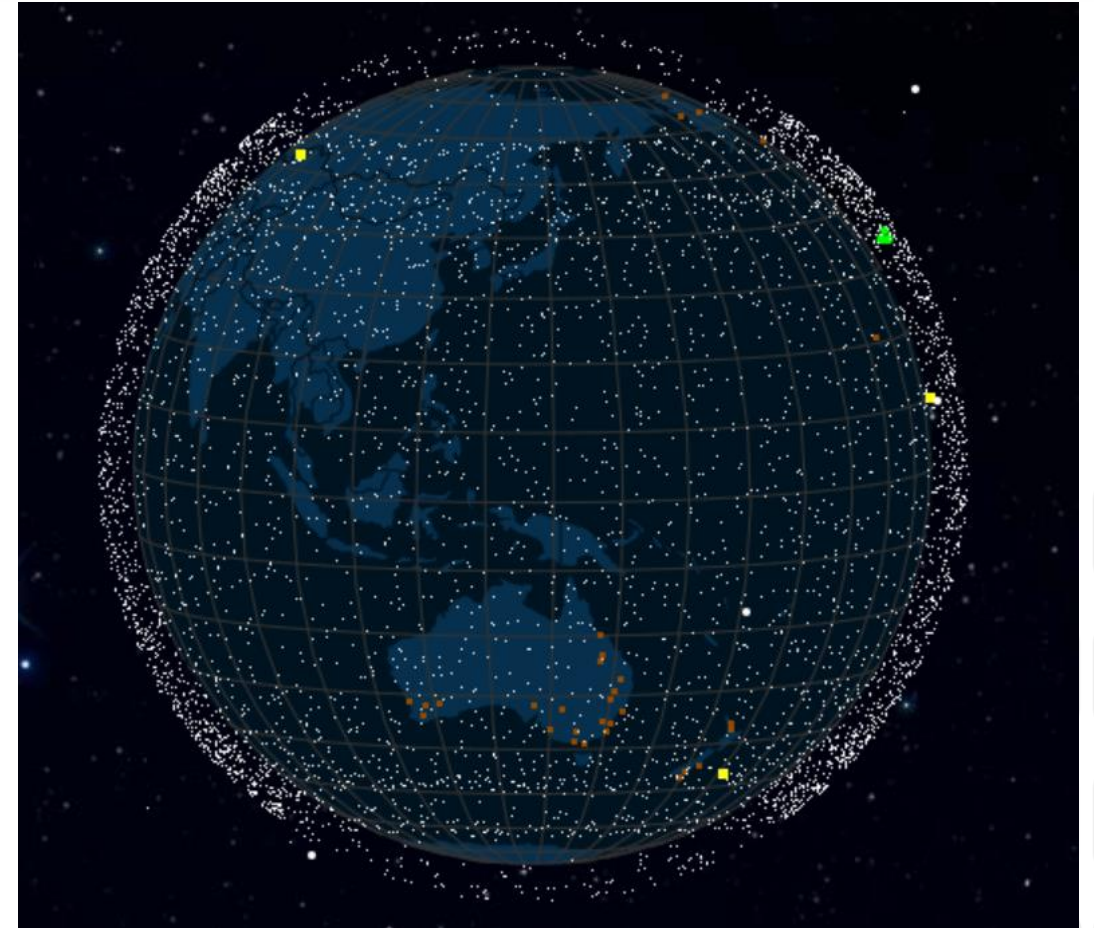
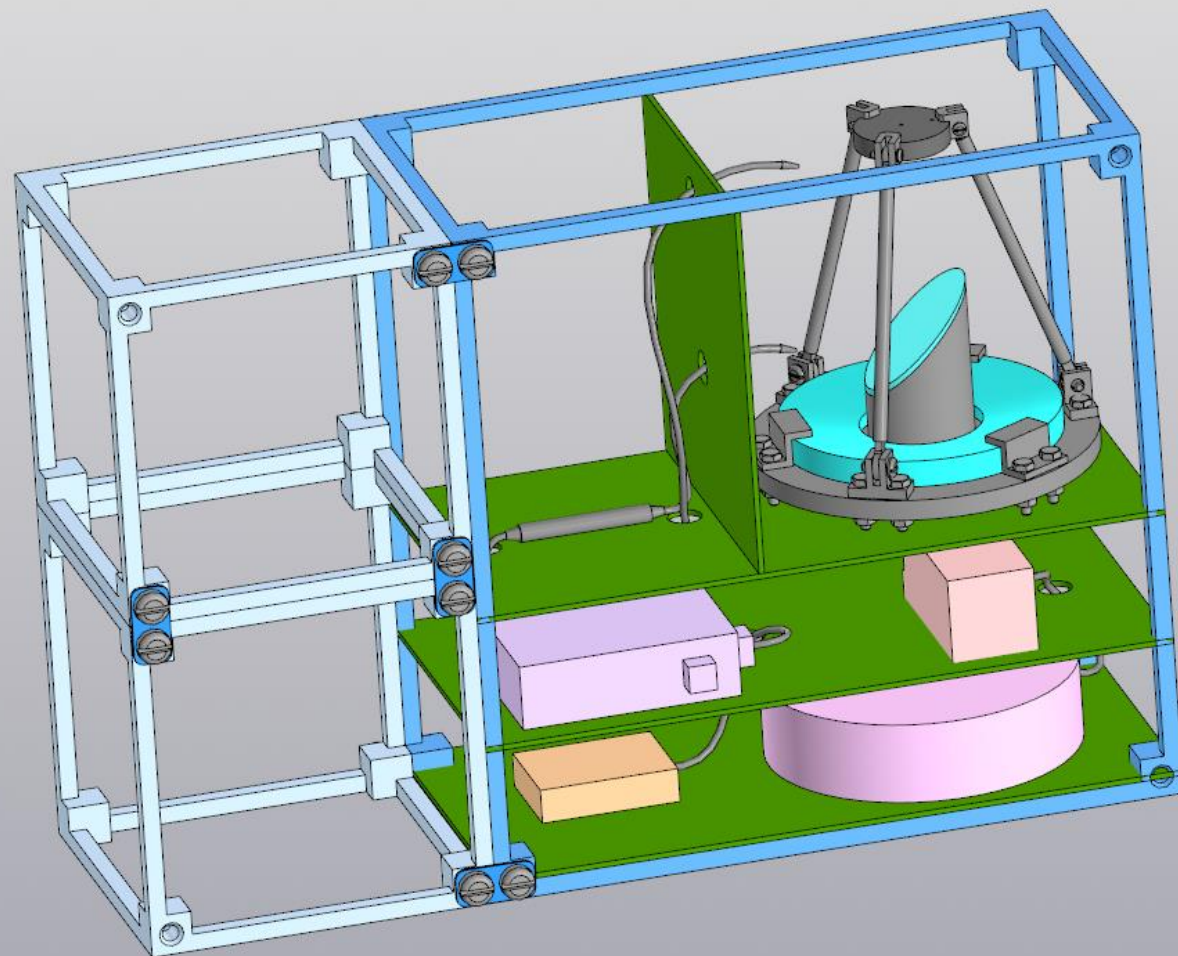
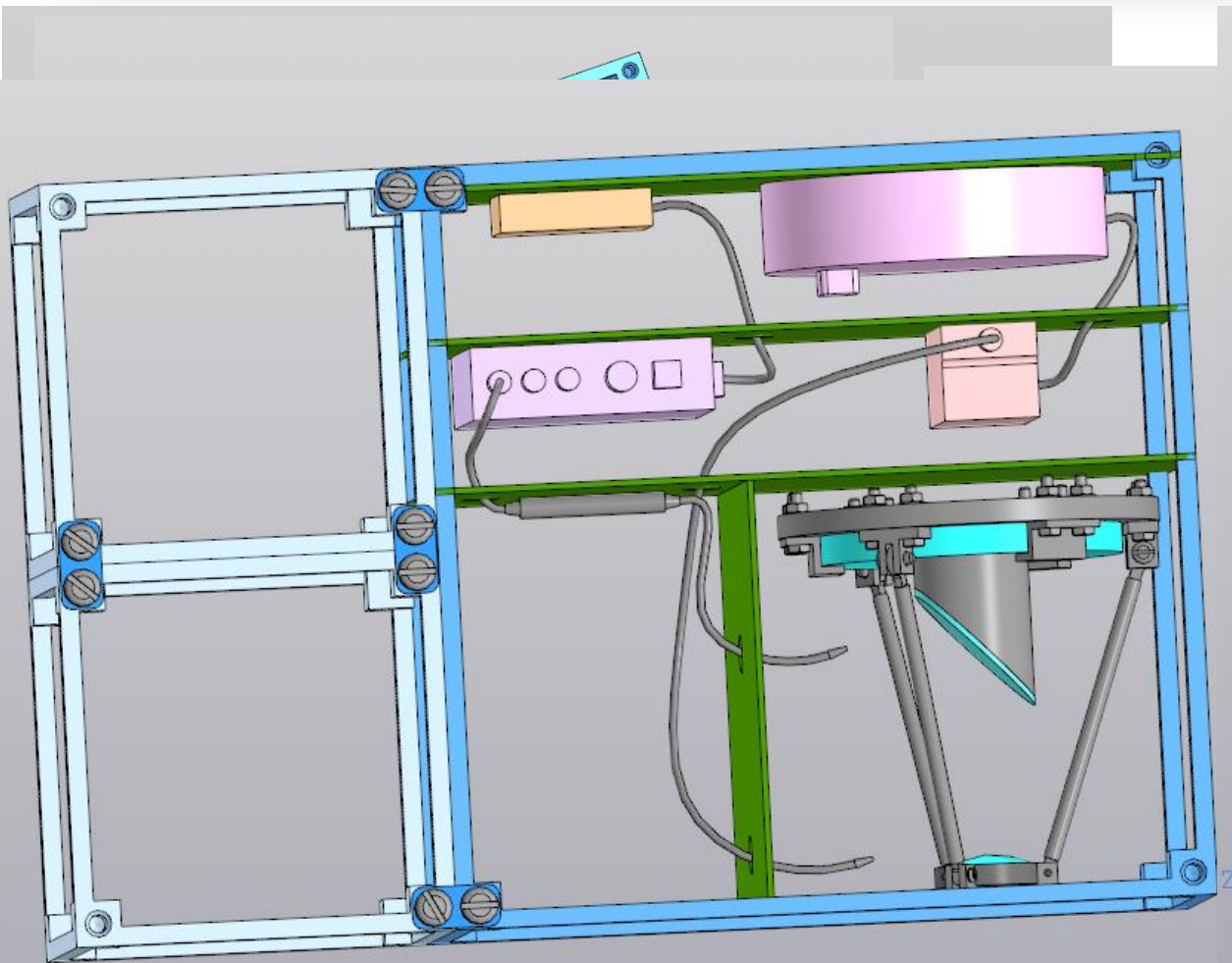


Рисунок 25 – Покрытие модулями МКА всей орбиты Земли





# 3D-модель модуля 6U Cubesat





КОСМИЧЕСКИЙ  
КЛАСС

# Заключение

## Результаты:

- Дано определение и описан принцип работы роя малых космических аппаратов (МКА);
- Рассмотрены радио и оптический каналы связи;
- Произведен подбор приемника и источника лазерного излучения;
- Проведены экспериментальные исследования параметров импульса генерации лазера CoLID-I;
- Рассмотрены виды и схемы приемных телескопов и выбрана оптимальная схема;
- Проведен габаритный расчет приемного телескопа;
- Разработана конструкция приемного телескопа и РКД;
- Разработана схема деления структурная;
- Рассчитано количество модулей 6U Cubesat для покрытия орбиты Земли;
- Разработана 3D-модель модуля 6U Cubesat.

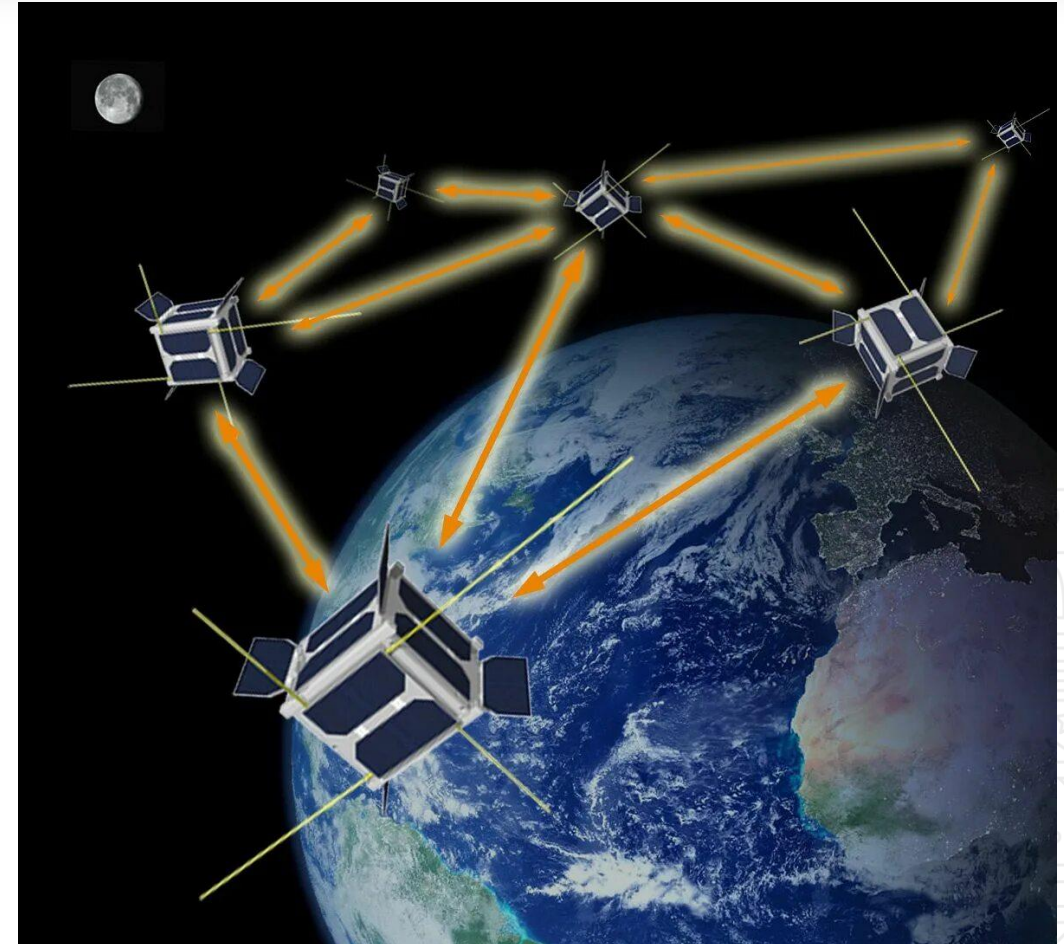


Рисунок 26– рой МКА



Балтийский государственный  
технический университет  
**«ВОЕНМЕХ»**  
им. Д.Ф. Устинова



РОСКОСМОС



КОСМИЧЕСКИЙ  
КЛУБ

# Спасибо за внимание!

