Министерство образования и науки Республики Казахстан
Казахский национальный университет им. аль-Фараби

ТЕМА ДИПЛОМА:
КОСМИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП, СХЕМА ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕТА И СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ФОКАЛЬНОГО УЗЛА.

Научный руководитель: Нугманов Р.Н.

Выполнил: Арсланов Ш.Р.

Специальность: 5В074600 - «Космическая техника и технологии»

Цель и задача дипломной работы

Целью работы является изучение строения космического телескопа.

Изучение с точки зрения сложности изготовления оптического телескопа с учетом особенностей выбора температурного режима в космосе.

Выбор оптимальной принципиальной оптической схемы космического телескопа с учетом факторов изготовления и транспортировки.

Содержание

I. Введение.
II. Оптическая система космического телескопа.
III. Особенности теплового режима КТ.
IV. Оптическая схема космического телескопа.
V. Выбор принципиальной оптической схемы.
VI. Скорость бега изображения (СБИ).
VII. Преобразование фотона света в электрический сигнал.
VIII. Заключение.
IX. Литература

I. Введение

Космический телескоп является инструментом находящимся в космическом пространстве как для мониторинга земли так и для наблюдения далеких планет , галактик и других астрономических объектов . Жесткая конструкция телескопа и система крепления должны обеспечивать точное позиционирование зеркала для того, чтобы сформировать изображение на ПЗС приемнике без смази. Учитывая все эти обстоятельства и сложные условия эксплуатации аппаратуры космического базирования, выбор оптимальной оптической схемы является одним из важных и достаточно сложных этапов создания космических телескопов.

II. Оптическая система космического телескопа

Рис.1 Космический телескоп

Оптическая система космического телескопа (КТ) включает в себя объектив, светозащитное устройство (бленду), крышку для защиты от загрязнения и попадания прямого солнечного излучения, а также элементы системы фокусировки объектива в полете. В состав оптической системы, как правило, также входит система обеспечения температурного режима (СОТР), необходимая для сохранения качества рабочих поверхностей оптических элементов.

III. Особенности теплового режима КТ.

СОТР КА должна обеспечивать в орбитальном полете следующие основные температурные условия для несущих конструкций ВЗ и ГЗ:
Температура на внутренней поверхности несущей конструкции ВЗ, ГЗ и платформы ГЗ в режиме ОП (ориентированного полета) КА в течении рабочих режимов в диапазоне $T_{ном} \pm 8{,}9^{o}C$, где номинальное значение температуры $T_{ном}$ составляет $20^{o}C$

Температура платформы КА в местах установки несущей конструкции ВЗ и ГЗ, а также фокального узла в диапазоне от 0 до плюс $30^{o}C$ в режиме ОП и от минус 50 до плюс $50^{o}C$ в режиме неориентированного полета (НП) КА.

IV. Оптическая схема космического телескопа.

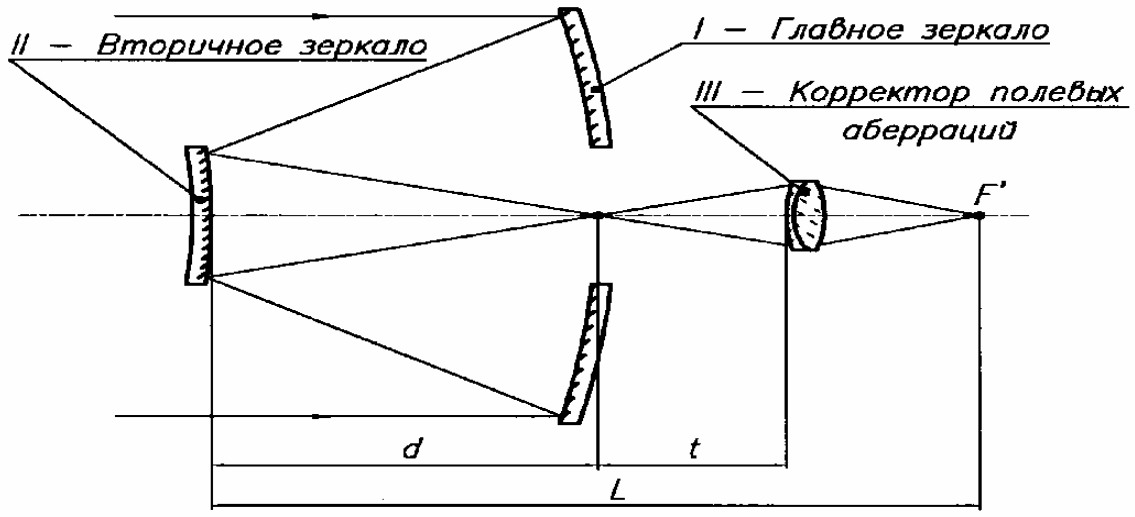

Рис. 2 Принципиальная оптическая схема зеркально-линзового КТ.

Принципиальная оптическая схема КТ состоит из главного (ГЗ) и вторичного (ВЗ) зеркал и корректора полевых аберраций. Жесткая конструкция телескопа и система крепления должны обеспечивать точное позиционирование зеркала для того, чтобы сформировать изображение на ПЗС приемнике. Исходя из всех данных обстоятельств и сложности в плане эксплуатации космических аппаратов, главную роль играет выбор оптимальной оптической схемы, что при этом является очень сложным и трудоемким процессом на этапе создания космических телескопов.

V. Выбор принципиальной оптической схемы

Схема Ричи-Кретьена

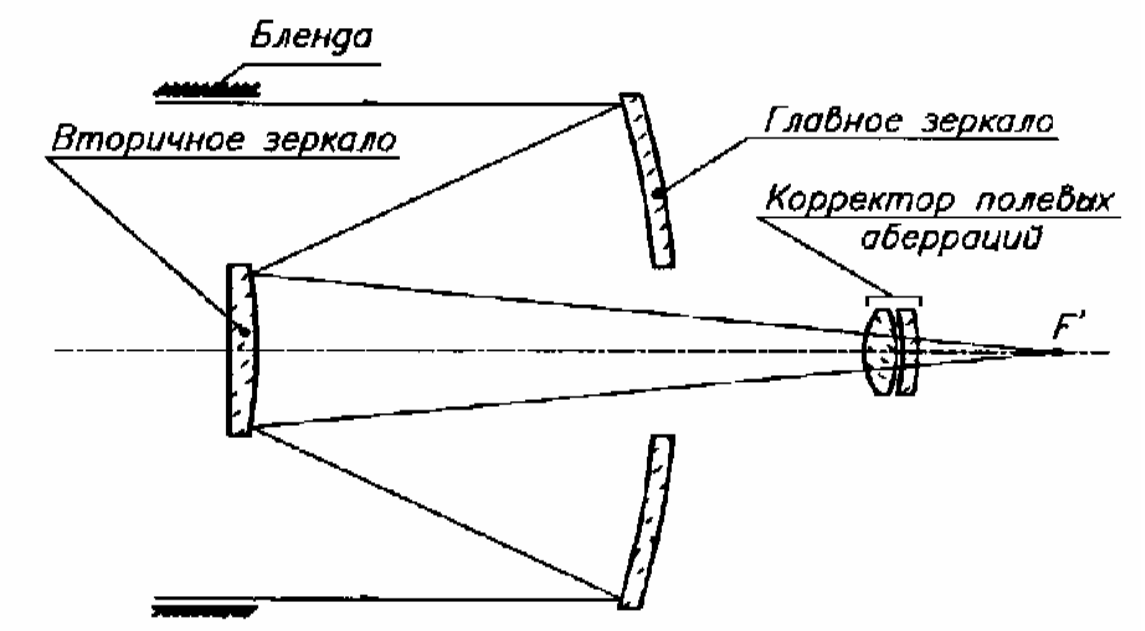

Рис. 3 схема Ричи-Кретьена

Состоит из главного и вторичного зеркал, бленды, а так же корректора полевых аберраций. К достоинствам данной схемы можно отнести в первую очередь технологичность конструкции и значительный опыт создания, и использования. Данная схема позволяет осуществлять высокодетальное наблюдение в ДВ диапазоне. Недостатками же являются: ограниченный спектральный диапазон и наличие длинной бленды.

V. Выбор принципиальной оптической схемы

Схема трех-зеркальный триплет

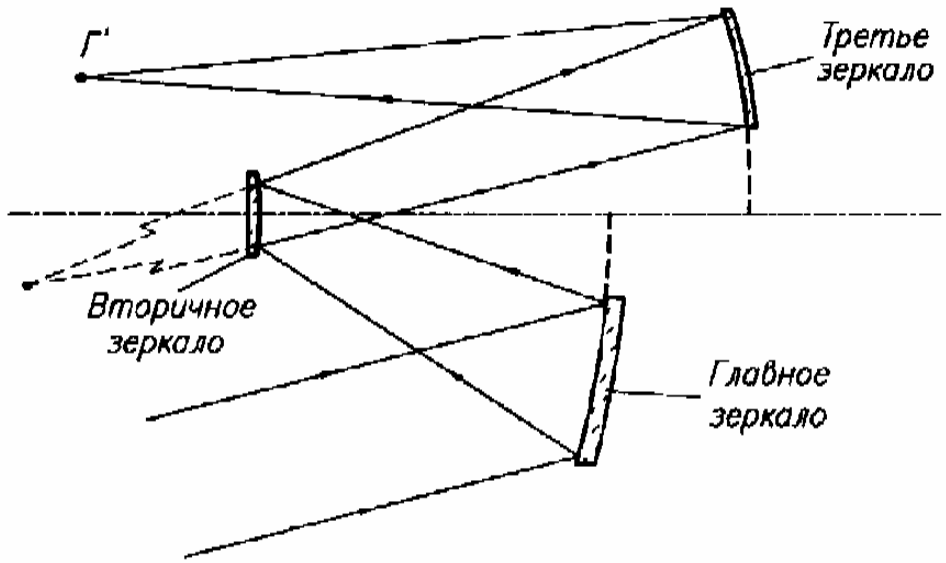

Рис. 4 Трех-зеркальный триплет.

Состоит из главного зеркала, вторичного зеркала и третьего зеркала. Соответственно из-за наличия третьего зеркала вытекает первый же недостаток, это очень большие габариты оптической схемы. Вторым ключевым недостатком является сложность в изготовлении внеосевых зеркал. К достоинствам данной схемы относятся: большое угловое поле зрения (до 10°) и сверхмалая дисторсия (менее 0,1%). Схема трехзеркального триплета используется в системах высоко детального многоспектрального наблюдения для топографии.

V. Выбор принципиальной оптической схемы

Схема Корша.

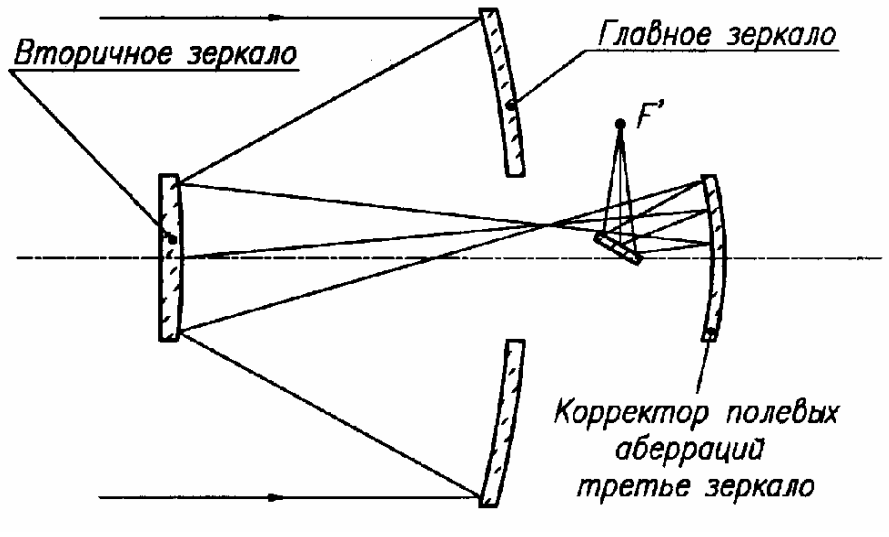

Рис. 5 Схема Корша

Состоит из главного зеркала, вторичного зеркала и корректора полевых аберраций третьего зеркала. Достоинствами схемы Корша являются съемка в широком спектральном диапазоне и отсутствие бленды. К недостаткам можно отнести экранирование центральной части поля и сложность в изготовлении асферических зеркал. Применяется в системах высокодетального наблюдения в широком спектральном диапазоне (видимый и ИК диапазоны).

V. Выбор принципиальной оптической схемы

В результате сравнительного анализа было принято решение остановиться на выборе схемы Д. Корша, обеспечивающей требуемые габаритно-массовые характеристики (хорошая компактность, отсутствие внешних бленд, наличие действительного изображения входного зрачка). В качестве ФПУ для ПХ канала были выбраны устройства, базирующиеся на ПЗС-матрицах с размером ($\delta_{ПХ}$) пиксела 6×6 мкм^2, а для ИК-канала рассмотрен ИК-модуль, базирующийся на приёмниках с размером пиксела 28×25 мкм^2, числом шагов накопления (ЧШН), равным 8, и общей длиной фоточувствительной зоны (ФЧЗ), равной ≈ 64,5 мм, предложенный предприятием «Сапфир» [4].

Световой диаметр ГЗ объектива ОМ был принят равным 0,75 м.

Исходя из вышеперечисленных требований и выбранных ФПУ, было определено фокусное расстояние $f'_{ОБпх}$ объектива. Действительно, исходя из зависимости:

$$f'_{ОБпх} = \frac{H \cdot \delta_{пх}}{Пр_{пх}}, \qquad (1)$$

получаем:

$$f'_{ОБпх} = \frac{0{,}7 \cdot 10^{6} \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{0{,}7} = 6 \text{ м.}$$

VI. Скорость бега изображения (СБИ).

Скорость бега изображения $V_{СБИ}$ определяется из следующей зависимости

$$V_{из} = \frac{f'_{об}}{H} \cdot \frac{R_З}{H + R_З} \sqrt{\gamma \cdot \frac{M}{R_З + H}}, \quad (2)$$

где $R_З$ – радиус Земли, $6{,}38 \cdot 10^3$ км;
M – масса Земли, $\approx 6 \cdot 10^{24}$ кг;
γ – гравитационная постоянная, $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ м^3/кг·с^2.

Таким образом скорость, в ПХ-канале:

$$V_{из\text{-}ПХ} = \frac{6}{0{,}7 \cdot 10^6} \cdot \frac{6{,}38 \cdot 10^3}{0{,}7 \cdot 10^3 + 6{,}38 \cdot 10^3} \sqrt{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{6 \cdot 10^{24}}{6{,}38 \cdot 10^6 + 0{,}7 \cdot 10^6}} =$$

$$= 5{,}81 \cdot 10^{-2} \text{ м/с} = 58{,}1 \text{ мм/с}.$$

Соответственно в ИК-канале $V_{ИЗ\text{-}ИК} \approx 43{,}6$ мм/с.

VI. Скорость бега изображения (СБИ).

Для стабильного получения сигнала необходимо найти скорость бега изображения в движении КА. Для нахождения скорости возьмем КА на высоте $H = 550$ км, с шагом набора высоты 1 км, где фокусное расстояние телескопа $F_{кт} = 3{,}3$ м. Для начала найдем скорость КА, а затем скорость бега изображения:

$$V_{КА} = \sqrt{\frac{G \cdot M_з}{R_з + H}}, \text{ (м/сек)} \qquad (3)$$

G = 6,67430(15)·10−11 м3·с−2·кг−1

$M_з = 5{,}97E + 24$ кг

$R_з = 6\,371$ км

$$V_{рг} = \frac{V_{КА} \cdot R_З}{R_З + H \cdot 1000}, \text{(м/сек)} \qquad (4)$$

VI. Скорость бега изображения (СБИ).

Зависимость СБИ от высоты полета

G	6,67E-11		
Масса Земли	5,97E+24		**Расчет СБИ**
Радиус Земли	6380000		
Высота полета	550	Hkm (км)	Vka (м/сек)
Шаг высоты полета	1		
Фокусное расстояние телескоп	3,3	550	7581,72
		551	7581,174
		552	7580,627
		553	7580,08
		554	7579,533
		555	7578,987
		556	7578,44
		557	7577,894
		558	7577,348
		559	7576,802
		560	7576,256
		561	7575,71
		562	7575,165
		563	7574,619
		564	7574,074
		565	7573,528
		566	7572,983
		567	7572,438
		568	7571,893
		569	7571,348
		570	7570,804
		571	7570,259
		572	7569,715
		573	7569,17
		574	7568,626
		575	7568,082
		576	7567,538

G	6,67E-11			
Масса Земли	5,97E+24		**Расчет СБИ**	
Радиус Земли	6,38E+06			
Высота полета	550	Hkm (км)	Vka (м/сек)	Vpr (м/сек)
Шаг высоты полета	1			
Фокусное расстояние телескоп	3,3	550	7581,72	6979,9966
		551	7581,174	6978,4861
		552	7580,627	6976,9761
		553	7580,08	6975,4666
		554	7579,533	6973,9577
		555	7578,987	6972,4493
		556	7578,44	6970,9415
		557	7577,894	6969,4342
		558	7577,348	6967,9275
		559	7576,802	6966,4213
		560	7576,256	6964,9156
		561	7575,71	6963,4105
		562	7575,165	6961,9059
		563	7574,619	6960,4019
		564	7574,074	6958,8984
		565	7573,528	6957,3955
		566	7572,983	6955,8931
		567	7572,438	6954,3912
		568	7571,893	6952,8899
		569	7571,348	6951,3891
		570	7570,804	6949,8888
		571	7570,259	6948,3891
		572	7569,715	6946,89
		573	7569,17	6945,3913
		574	7568,626	6943,8932
		575	7568,082	6942,3957
		576	7567,538	6940,8987

Рис. 6 Скорость КА и скорость бега изображения в регистре

VI. Скорость бега изображения (СБИ).

Далее находим скорость бега изображения в фокальной плоскости, по формуле (5):

$$V_{fp} = \frac{V_{ПР} \cdot F}{H}, (мм/сек) \qquad (5)$$

G	6,67E-11				
Масса Земли	5,97E+24		Расчет СБИ		
Радиус Земли	6,38E+06				
Высота полета	550	Hkm (км)	Vka (м/сек)	Vpr (м/сек)	Vfp (мм/сек)
Шаг высоты полета	1				
Фокусное расстояние телескоп	3,3	550	7581,72	6979,9966	41,87998
		551	7581,174	6978,4861	41,79493
		552	7580,627	6976,9761	41,71018
		553	7580,08	6975,4666	41,62575
		554	7579,533	6973,9577	41,54163
		555	7578,987	6972,4493	41,45781
		556	7578,44	6970,9415	41,37429
		557	7577,894	6969,4342	41,29108
		558	7577,348	6967,9275	41,20817
		559	7576,802	6966,4213	41,12556
		560	7576,256	6964,9156	41,04325
		561	7575,71	6963,4105	40,96124
		562	7575,165	6961,9059	40,87952
		563	7574,619	6960,4019	40,79809
		564	7574,074	6958,8984	40,71696
		565	7573,528	6957,3955	40,63612
		566	7572,983	6955,8931	40,55556
		567	7572,438	6954,3912	40,47529
		568	7571,893	6952,8899	40,39531
		569	7571,348	6951,3891	40,31561
		570	7570,804	6949,8888	40,2362
		571	7570,259	6948,3891	40,15706
		572	7569,715	6946,89	40,07821
		573	7569,17	6945,3913	39,99964
		574	7568,626	6943,8932	39,92134
		575	7568,082	6942,3957	39,84331
		576	7567,538	6940,8987	39,76557
				3,3	м - фокусное расстояние объектива

Рис. 7 Скорость бега изображения в фокальной плоскости

VI. Скорость бега изображения (СБИ).

Зависимость СБИ от фокусного расстояния

G	6,67E-11			
Масса Земли	5,97E+24			
Радиус Земли	6,38E+06			
Высота полета	550	км	F(м)	Vfp (мм/сек)
Фокусное расст. телескопа F =	4	м	4	50,76361
Шаг фокусного расстояния	0,1	м	4,1	52,0327
			4,2	53,30179
			4,3	54,57088
			4,4	55,83997
Vka =	7581,7205	м/сек	4,5	57,10906
			4,6	58,37815
Vpr =	6,98E+03	м/сек	4,7	59,64724
			4,8	60,91633
			4,9	62,18542
			5	63,45451
			5,1	64,72361
			5,2	65,9927
			5,3	67,26179
			5,4	68,53088
			5,5	69,79997
			5,6	71,06906
			5,7	72,33815
			5,8	73,60724
			5,9	74,87633
			6	76,14542
			6,1	77,41451
			6,2	78,6836
			6,3	79,95269
			6,4	81,22178
			6,5	82,49087
			6,6	83,75996

VII. Преобразование фотона света в электрический сигнал.

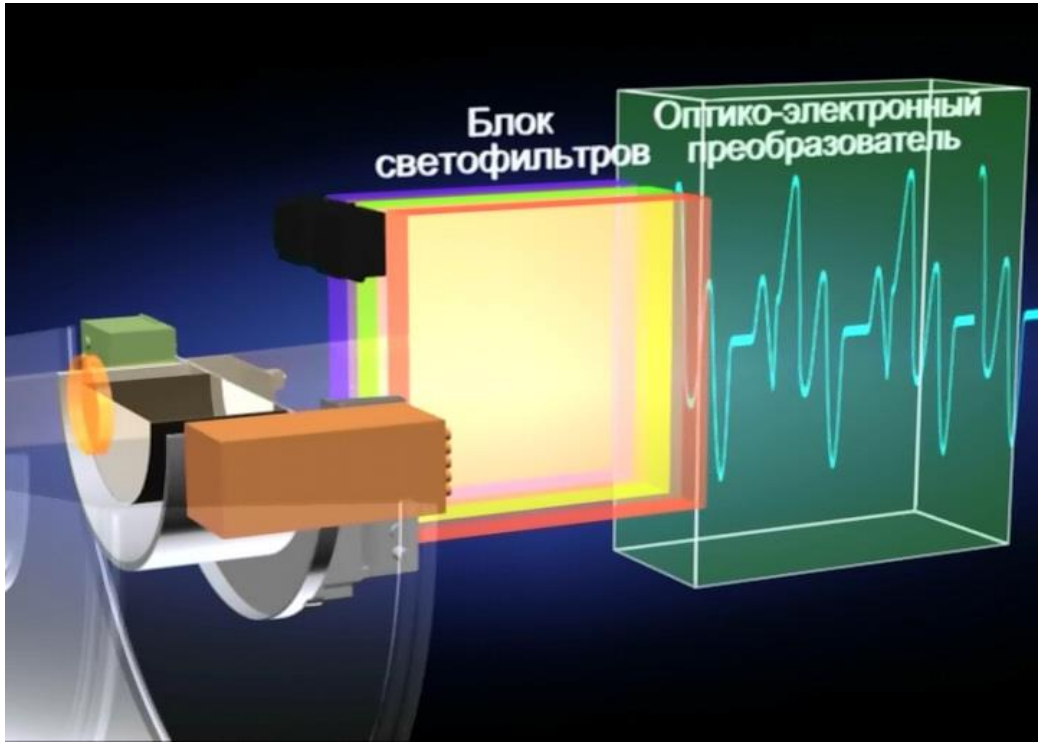

Рис. 8 Генерируемая форма сигнала ПЗС - матрицы

В мультиспектральном блоке ОЭП спектральные диапазоны обеспечиваются за счёт узкополосных светофильтров, устанавливаемых над каждой матрицей. Светофильтр наноситься на стеклянную подложку с нанесённым слоем хрома, в котором методом фотолитографии выполнены прозрачные окна на которые наноситься интерференционные покрытия с необходимым пропусканием.

VII. Преобразование фотона света в электрический сигнал.

Каждая световая зона соответствует своему спектральному каналу. Заштрихованные области – области со спектральными характеристиками, приведенными в (таблице 1).

Таблица 1.- Спектральные характеристики.

№ световой зоны	$\tau_{ср}$ %	$\Delta\lambda_{0,5}$, нм	$\Delta\lambda_{0,1}$, нм	$\Delta\lambda_{0,9}$, нм	$\tau_{Ф}$ среднее %
1	≥ 70	500 ÷ 600	487 ÷ 586	513 ÷ 614	≤ 0,5
2	≥ 70	600 ÷ 700	585 ÷ 682	615 ÷ 718	≤ 0,5
3	≥ 70	700 ÷800	682 ÷ 780	718 ÷ 820	≤ 0,5
4	≥ 70	800 ÷1100	780 ÷ 1100	820 ÷ 1100	≤ 0,5

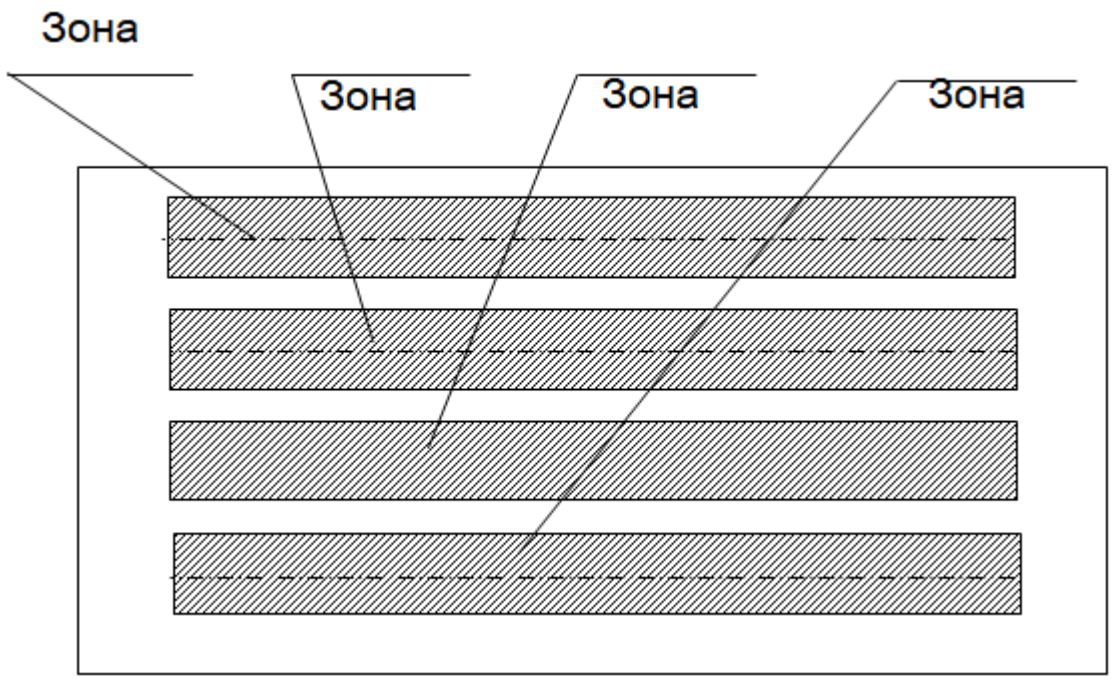

Рис.9 Схема размещения световых зон на подложке светофильтра

VII. Преобразование фотона света в электрический сигнал.

Далее выполним расчеты информационного потока на выходе ОЭП (рис.10).

$V_{СБИ} = 116$ мм/сек – скорость бега изображения в фокальной плоскости.

$D_{lt} = 12$ мкм – размер фоточувствительного элемента

$L = 1800$ шт. – количество элементов в одной строке фотоприемника

$N = 4$ шт. – количество фотоприемников в ОЭП

Разрядность линейного кодирования сигнала одного фоточувствительного элемента равна 10. Найдем строчную частоту ОЭП.

$$F_{СТР} = \frac{V_{СБИ} \cdot 1000}{D_{lt}}, \text{(Гц)} \qquad (6)$$

Далее находим значение информационного потока на выходе ОЭП

$$P_{ОЭП} = F_{СТР} \cdot L \cdot N \cdot 10, \text{(бит/сек)} \qquad (7)$$

Расчет информационного потока на выходе ОЭП

116	Vсби (мм/сек) - скорость бега изображения в фокальной плоскости
12	Dlt (мкм) - размер фоточувствительного элемента
18000	L (шт.) - количество элементов в одной строке фотоприемника
4	N (шт.) - количество фотоприемников в ОЭП
10	Разрядность линейного кодирования сигнала от одного фоточувствительного элемента
9666,66667	Fстр (Гц) - строчная частота ОЭП
6960000000	Роэп (бит/сек) - информационный поток на выходе ОЭП

Рис.10 Расчет информационного потока на выходе ОЭП

VIII. Заключение

В этой работе были изучены и описаны особенности строения космического телескопа. В данной работе были учтены особенности выбора температурного режима и обеспечения работоспособности оборудования КТ.

Проведен сравнительный анализ оптических схем космического телескопа, описаны преимущества и недостатки наиболее часто используемых схем. Сделан выбор схемы Корша. Были исследованы особенности формирования фокального узла для дальнейшего преобразования фотона света в электрический сигнал.

В этой работе описана схема преобразования фотона света и передача информации. Вычислены параметры скорости бега изображения при изменении высоты полета, и при увеличении фокусного расстояния, была выявлена зависимость и выполнены расчеты. Получено значение информационного потока на выходе ОЭП, где $P_{ОЭП} = 6960000000\ (\frac{бит}{сек})$.

IX. Литература

1. Нугманов Р.Н. Прикладные задачи оптической космической системы дистанционного зондирования земли. 2-ое издание — 2018.— С. 80-114.
2. Белоблоцкая А. А., Титов М. И. Разработка формирователя сигнала высокоскоростной радиолинии передачи информации «Космос-Земля» // Молодой ученый. — 2016. — №14. — С. 121-124.
3. Кащеев А.А.. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ.— М.: Мир, 1989. — С. 323–326.
4. Ларин С.А., Кащеев А.А., Бутко А.В., Ефимов С.И. Оценка длительности сеан-сов связи космического аппарата с наземными пунктами приёма информации // Сбор-ник тезисов 17-ой международной научно-технической конференции «Проблемы пере-дачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: Рязан-ский государственный радиотехнический университет, 2012. С. 119-121.
5. Варакин Л.Е. А., Титов М. И. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 344 с.
6. Кащеев А.А. Пирсол А. Системный подход к выбору пропускной способности высокоскоростной радиолинии для современных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 180-186. – DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-180-186
7. AD9739 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9739.pdf, свободный. — Загл. с экрана (дата обращения 08.12.16).
8. Окунев, Ю. Б.. Системы электросвязи. 1987. 192 с.
9. Модуляция радиосигнала [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://habrahabr.ru/company/yota/blog/119047, свободный. — Загл. с экрана (дата обращения 31.03.17)

IX. Литература

10. Мордухович Л.Г., Степанов А.П Цифровая передача информации фазоманипулированными сигналами. — М.: Радио и связь — 1991.
11. Патент РК № 2014125524/07, 25.06.2014. Дятлов С.А., Прохоров М. Е. Захаров А. И.,. Высокоскоростная радиолиния передачи информации с космических аппаратов дистанционного зондирования земли с адаптивной бортовой аппаратурой // Патент Росии № 2551900 C1. Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт точных приборов». 10.06.2015. Бюл. №16
12. Песков С.Н., Ищенко А.Е. Расчёт вероятности ошибки в цифровых каналах связи // Теле-Спутник. 2010. № 11 (181). С. 70-75.
13. естирование прототипа миниатюрного солнечного датчика на основе APS-технологии// 2005. С. 30. Мирер С.А.
14. Тепляков, И. М. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Уч. пособие. — М.: МИЭТ, 2003. — 264 с.: ил.
15. «МУЛЬТИБОРТ» — отечественный комплект радиационно-стойких микросхем с каналами SpaceWire/GigaSpaceWire/SpaceFibre для аэрокосмических применений [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://multicore.ru/fileadmin/user_upload/mc/publish/multiboard_chipset.pdf, свободный. — Загл. с экрана (дата обращения 15.12.16).
16. AD9739 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9739.pdf, свободный. — Загл. с экрана (дата обращения 08.12.16).
17. ADCLK914 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADCLK914.pdf, свободный. — Загл. с экрана (дата обращения 08.12.16).
18. DAC5670-SP 14-Bit 2.4-GSPS Digital-to-Analog Converter (DAC) (Rev. F) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.ti.com/product/DAC5670-SP/datasheet, свободный. — Загл. с экрана (дата обращения 08.12.16).
19. Hittite.com ICs — Amplifiers — Low Noise (ИМС малошумящих усилителей) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://hittite.com/products/index.html/category/242, свободный. — Загл. с экрана (дата обращения 20.12.16).
20. «Энергетические характеристики космических радиолиний» под ред. О.Л. Зенкевича, Москва, изд-во «Советское радио», 1972, стр. 5÷8, 18÷27, 29÷34.