

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТ ИНФОРМАЦИОННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ БОЛЬШОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ МЕМБРАНЫ

В. В. Салмин¹, С. В. Карпеев², К. В. Пересыпкин¹, И. С. Ткаченко¹, А. С. Четвериков¹

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

² Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

Приводятся результаты исследования применимости мембранных оптических систем на космических аппаратах наблюдения. Проведён анализ возможности использования дифракционной оптики на космических аппаратах наблюдения, функционирующих на геостационарной орбите. Разработаны конечно-элементные модели конструкций оправы и опоры дифракционной линзы для двух схем: по проекту MOIRE и оригинальной схемы, предложенной в данной работе. Проведено исследование и сравнение жёсткости конструкций для рассматриваемых схем оправы и опоры дифракционной линзы. Получены формы и частоты собственных колебаний оправы линзы.

Ключевые слова: дифракционная оптика, дифракционная мембрана, конечно-элементное моделирование, космический телескоп, геостационарная орбита

Введение

Проблема качественной съёмки поверхности Земли из космоса с помощью космических аппаратов (КА) является наиболее актуальной на сегодняшний день. Все современные КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для съёмки применяют устройства, которые используют в качестве светособирающего элемента линзы или зеркало, что существенно сказывается на массогабаритных характеристиках КА.

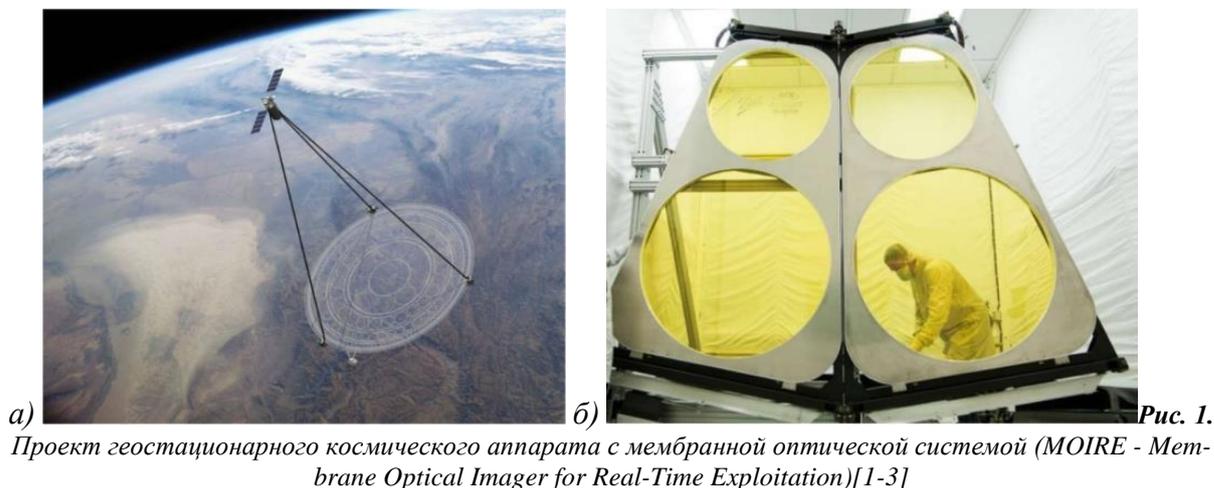
Современные КА ДЗЗ функционируют на низких орбитах, а это создаёт некоторые ограничения на их использование. Так, с помощью них нельзя вести непрерывную съёмку, кроме того, не всегда может оказаться КА над местом съёмки. Для непрерывной съёмки удобно использовать геостационарную орбиту (ГСО).

Вследствие большой высоты орбиты геостационарных аппаратов (около 36000 км) получение изображения высокого разрешения требует использования специальной оптики. Рефракционная либо отражательная оптика, изготовленная из кварца либо ситалла, весьма тяжела, что является проблемой при запуске в космос новых КА ДЗЗ.

В связи с этим Американское агентство по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США DARPA разрабатывает проект современного космического телескопа с мембранной дифракционной оптической системой. Проект получил название MOIRE или Membrane Optical Imager for Real-Time Exploitation ("Мембранное оптическое устройство формирования изображения для работы в режиме реального времени") [1-3].

Для создания оптических элементов в проекте планируют использовать полимерную мембрану. Диаметр входного зрачка орбитального телескопа составит порядка 10-20 метров (рис. 1а). В отличие от обычных линз и зеркал мембрана является дифракцион-

ным оптическим элементом (ДОЭ), фазовое пропускание которого формируется за счёт микроскопических концентрических канавок, выгравированных на пластиковой поверхности. Ширина этих канавок варьируется от нескольких сотен до четырёх микрометров. Оптические мембраны значительно менее эффективны, чем традиционные оптические элементы, но, так как больше нет ограничений на размеры, входной зрачок и относительное отверстие космических телескопов можно будет существенно увеличить, сохраняя или уменьшая их массу. Мембраны будут вмонтированы в тонкие металлические "лепестки" (рис. 1б), которые будут складываться и образовывать КА шириной в 6 метров.



Дифракционная оптика имеет ряд преимуществ перед рефракционной оптикой по таким основным параметрам как масса и размер, а также даёт возможность простого тиражирования элементов для формирования как сферических, так и асферических волновых фронтов. В связи с этим элементы дифракционной оптики интересны как оптические приборы для различных приложений. Большинство имеющихся работ, как правило, рассматривают дифракционные оптические элементы либо как дополнительные элементы для компенсации aberrаций рефракционной изображающей системы [4, 5], либо как элементы для фокусировки в различные области [4-14], например в [6, 7] рассматривается осевое распределение интенсивности для когерентного случая, в [8] рассматривается процесс фокусировки плоской волны линзой Френеля, а в [9] методы компенсации хроматической aberrации ДОЭ.

Исследований применения дифракционной оптики для формирования изображений значительно меньше. Хорошо известна проблема хроматической aberrации ДОЭ, что существенно ограничивает их спектральный диапазон и снижает качество изображения в полихроматическом свете.

В данной статье приводятся результаты исследования применимости мембранных оптических систем, жёсткости конструкции КА наблюдения (КАН), производящего съёмку поверхности Земли с помощью мембранных дифракционных оптических элементов.

1 Возможности коррекции хроматических aberrаций в космических телескопах, включающих ДОЭ

Очевидными требованиями к космическим телескопам являются коррекция хроматических aberrаций и достаточное пространственное разрешение при сравнительно малом (несколько градусов) угловом поле.

На первый взгляд, кажется, что дифракционные оптические элементы, в силу их чрезвычайно большого хроматизма мало чем могут помочь в решении поставленных задач. И в самом деле, создать светосильный полностью дифракционный объектив ахромат с требуемыми свойствами (наилучший вариант в смысле массогабаритных характеристик) не представляется возможным, прежде всего из-за технологических трудностей изготовления светосильных ДОЭ. Наибольшее внимание исследователей привлекали гибридные дифракционно-рефракционные оптические системы [5, 15], обеспечивающие эффективную коррекцию хроматических aberrаций. Однако с точки зрения использования главного преимущества дифракционной оптики – её малого веса, такие системы представляли собой определённый компромисс, так как включали силовые рефракционные элементы весьма больших габаритов и, следовательно, веса.

Ситуация меняется в случае расположения телескопа на геостационарном аппарате, где светосилой можно и пожертвовать, поскольку экспозиции при съёмке можно увеличить. Однако даже при небольшой светосиле создание чисто дифракционных изображающих систем наталкивается на определённые трудности, поскольку невозможно корректировать хроматизм путём комбинации собирающих дифракционных линз, распределяя оптическую силу на несколько элементов. Известный подход к коррекции хроматизма путём комбинирования двух чисто дифракционных линз с разными оптическими силами [16] приводит к увеличению оптических сил входящих в него линз по сравнению с эквивалентной одиночной линзой, что порождает дополнительные технологические проблемы. Нелишне заметить, что такой классический способ борьбы с хроматизмом, как переход к отражающей оптике для дифракционных элементов по понятным причинам неприменим. Однако традиционные оптические элементы, входящие в объектив, вполне можно делать отражающими, тем самым снимая для них проблему хроматизма. Наиболее перспективной в настоящее время является разработка дифракционно-зеркальных изображающих систем, в которых подавление хроматизма осуществлялось бы за счёт архитектуры изображающей системы, а также модификации структуры самих ДОЭ. Примером такой системы может служить оптическая схема телескопа [17] (см. рис. 2), включающего кроме «фотонного сита» 1 ещё и корректирующий ДОЭ 3. ДОЭ 3 имеет 40 мм в диаметре при фокусном расстоянии 158,5 мм. Фокусное расстояние линзы 2 – 400 мм. Зеркала 4, 5 имеют диаметр 200 мм и фокусные расстояния 734 и 807,7 мм соответственно. Полоса частот такой системы составляет около 40 нм (522 – 542 нм).

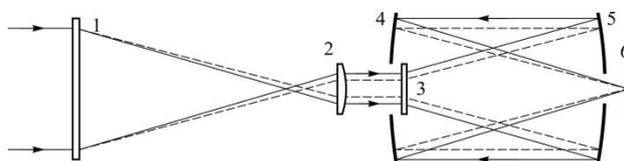


Рис. 2. Оптическая схема зеркально – дифракционного телескопа на основе дифракционного дублета: 1 – «фотонное сито», 2 – согласующая линза, 3 – корректирующий ДОЭ, 4, 5, - зеркала, 6 – плоскость изображения

2 Исследование жёсткости конструкции оправы КА с дифракционной линзой по схеме проекта MOIRE

В проекте MOIRE конструкция крепления линзы к корпусу КА (далее оправы) предполагается в виде трёх прямых раскладывающихся ферм, одним концом закреплённых за

корпус КА, а другим за каркас линзы Френеля (см. рис. 1). Примем эту конструкцию в качестве прототипа. В качестве материала стержней ферм возьмем однонаправленный углепластик.

В [1-3] приводится оценка веса линз на основе дифракционной оптики по сравнению с традиционными первичными зеркалами современных космических телескопов. По оценке авторов дифракционная линза легче в семь раз по сравнению с зеркалом такой же площади.

Оценка массы дифракционной линзы для рассматриваемого КАН составляет 158,5 кг. Корпус КАН представляет собой традиционный КАН, за исключением того, что его оптическая система должна на входе принимать не плоскопараллельный поток света, а сфокусированный.

Линза проекта MOIRE представляет собой в развёрнутом виде плоскую раму, образованную тремя concentрическими кольцами и радиальными балками, соединяющими эти кольца (рис. 3). В рамках, образованных соседними радиальными балками и участками соседних колец, натянуты мембраны с отверстиями, образующими дифракционную линзу. Радиальные балки делят линзу на секции, прикреплённые друг к другу шарнирно. В сложенном положении секции линзы образуют «гармошку». При развёртывании секции поворачиваются друг относительно друга, пока линза не станет плоской. После этого шарниры фиксируются.

Для исключения деформаций линзы при её взаимодействии с оправой линза должна крепиться к последней статически определимо. Для этого фермы оправы должны объединяться в единую конструкцию не через линзу, а посредством специальной конструкции. К этой конструкции (далее будем называть её опора) и предлагается закреплять линзу.

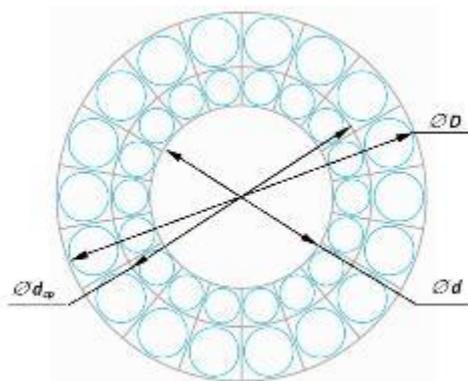


Рис. 3. Конструкция линзы ($D = 10$ м; $d = 4.96$ м; $d_{cp} = 7.04$ м)

Конструкция на рисунке 4 соответствует опубликованной схеме КА из проекта MOIRE, за исключением наличия специальной опоры линзы. Эта опора представляет собой треугольную раму, к вершинам которой подходят фермы. Линза крепится к опоре в трех точках, расположенных на серединах балок опоры. Крепление осуществляется по продольной и окружной степени свободы и является статически определимым.

Жёсткость крепления линзы будет определяться жесткостями протяжённых элементов конструкции КА. В принятой схеме это каркас линзы, опора линзы и раскладывающиеся фермы (оправа). Для оценки жёсткости крепления линзы к корпусу КА создана конечно-

элементная модель, в которой все эти элементы конструкции моделируются балочными конечными элементами.

Материал всех элементов конструкции – однонаправленный углепластик.

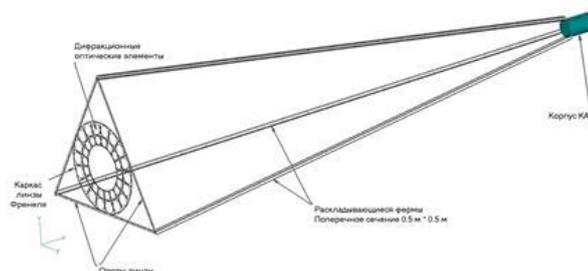


Рис. 4. Конструкция оправы линзы для КА наблюдения по схеме MOIRE. Вариант конструкции с прямыми несущими фермами

Собственные колебания отыскивались в конечно-элементной системе MSC. Nastran. Найдены первые десять упругих форм собственных колебаний. Значение частоты нижнего тона собственных колебаний, движение по которому искажают изображение, составляет 0,0144 Гц (рис. 5). Такое значение собственной частоты слишком низкое, чтобы надеяться на то, что будет возможно оперативно наводить КА на объекты наблюдения. Один период колебаний по этому тону составляет 69 секунд. Если колебания конструкции, вызванные инерционными силами в конструкции в процессе наведения, затухнут за 100 периодов, то прежде чем делать снимок придется ждать почти 2 часа. На практике это означает, что данный космический аппарат может быть использован только за наблюдением за одним объектом с геостационарной орбиты. И даже в этом случае будут возникать неудобства при малейшей коррекции орбиты. Из этого следует вывод, что необходимо радикально увеличить жёсткость конструкции.

Низкая жёсткость оправы по схеме проекта MOIRE обусловлена большой протяжённостью несущих ферм относительно их поперечных размеров. Такие фермы обладают низкой поперечной жёсткостью.

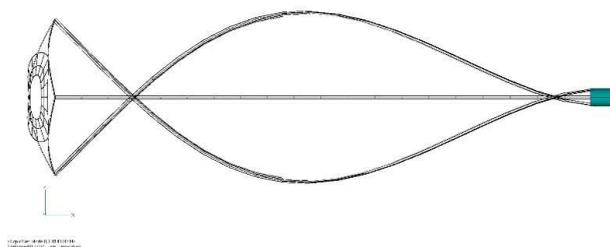


Рис. 5. Вторая упругая форма собственных колебаний оправы линзы для КА по схеме MOIRE (собственная частота 0,0144 Гц)

3 Исследование жёсткости конструкции оправы КА с дифракционной линзой, стянутой тросами

Рассмотрим вариант конструкции, отличающийся от первоначального варианта тем, что несущие фермы имеют форму арки. Радиус изгиба несущих ферм принят равным 60 м. Продольные тросы связывают концы ферменных арок и препятствуют изменению радиусов арок. Благодаря тому, что фермы имеют конфигурацию арок, поперечная нагрузка в

плоскости арок будет вызывать работу ферм на сжатие, а не на изгиб, как для прямых ферм. Это радикально увеличивает поперечную жёсткость ферм в плоскости арок. Увеличение поперечной жёсткости делает возможным попарно стянуть фермы тросами. При достаточном натяжении стягивающих тросов последние работают подобно стержням и объединяют три фермы в одну большую ферму большой поперечной жёсткости (рис. 6).

Вариант конструкции опоры линзы предлагается в виде трёхлучевой звезды.

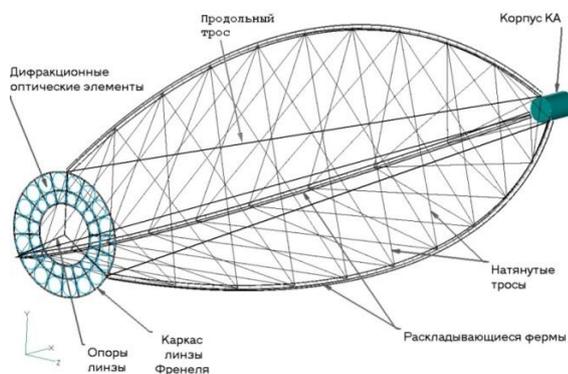


Рис. 6. Конструкция опоры дифракционной линзы для КА наблюдения. Вариант конструкции со стяжкой тросами несущих ферм

Конечно-элементная модель отличается от конечно-элементной модели предыдущего варианта наличием стержневых элементов, моделирующих натянутые тросы. Конфигурация конечно-элементной сетки опоры линзы соответствует новой конструкции этого элемента.

Найдены нижние тона собственных колебаний. Значение частоты нижнего тона собственных колебаний, движение по которому искажают изображение, составляет 1,48 Гц (рис. 7). Такое значение собственной частоты соответствует частотам колебания солнечных батарей традиционных КАН. Следовательно, КА с такой конструкцией опоры можно будет управлять также оперативно, как и традиционными КАН, если силовой гироскопический комплекс будет достаточно мощным. Таким образом, применение арочных ферм и стягивания их тросами позволяет удовлетворительно решить проблему жёсткости.

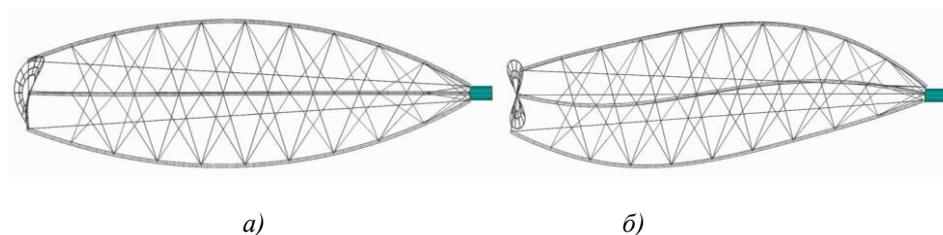


Рис. 7. Нижние тона собственных колебаний опоры линзы Френеля, стянутой тросами: а – пятая упругая форма собственных колебаний (частота 1,48 Гц), б - восьмая упругая форма собственных колебаний (частота 2,06 Гц)

4 Выведение КАН на базе большой дифракционной мембраны на ГСО

КАН на базе большой дифракционной мембраны представляет собой крупногабаритную конструкцию, обладающую малой жёсткостью. При довыведении такой конструкции с помощью химического разгонного блока могут возникнуть значительные перегрузки, которые могут привести к нежелательным изменениям в конструкции космической оптической системы на базе большой дифракционной мембраны.

В этом случае для довыведения КАН на базе большой дифракционной мембраны на геостационарную орбиту предпочтительнее использовать электроракетные двигатели (ЭРД) малой тяги, создающие ускорения порядка $0,5..1,0 \text{ мм/с}^2$. Продолжительность транспортировки с низкой околоземной орбиты на ГСО при этом составит от 100 до 200 суток. Оценка массы космической системы, включающей буксир с солнечной электроракетной двигательной установкой и КАН на базе большой дифракционной мембраны, составляет от 6000 до 8000 кг. Оценка массы КАН на базе большой дифракционной мембраны составляет порядка 3500 кг (из них на саму линзу, которая включает дифракционные мембраны, опору и оправу линзы, приходится 500-600 кг). При этом тяга двигательной установки составит от 2,5 до 4 Н, а необходимая для работы ЭРД мощность - 50-70 кВт.

Заключение

Проведён анализ возможности построения дифракционной изображающей системы. Построение чисто дифракционной изображающей системы на данный момент практически невозможно в виду затруднительности коррекции хроматической аберрации получаемого изображения. Для космических телескопов, расположенных на ГСО, перспективным направлением является использование дифракционно-зеркальных изображающих систем, в которых подавление хроматизма осуществлялось бы за счёт архитектуры изображающей системы, а также модификации структуры самих ДОЭ.

Проведён конечно-элементный анализ конструкции космического телескопа, использующего дифракционные мембраны в качестве основного элемента изображающей системы, по схеме прототипа MOIRE, а также анализ оригинальной конструкции, разработанной авторами, которая отличается от прототипа тем, что фермы, удерживающие линзу (систему «ячеек», в которых натянута дифракционная мембрана) диаметром 10 метров, выполнены в виде арок и стянуты тросами. В результате анализа получены формы и частоты собственных колебаний оправы линзы (фермы). Значение частоты нижнего тона собственных колебаний, движение по которому искажает изображение, для предложенной оригинальной схемы на два порядка больше, чем для схемы прототипа. Применение арочных ферм и стягивания их тросами в КАН, использующих дифракционные мембраны в качестве основных элементов изображающей системы, позволяет удовлетворительно решить проблему жёсткости.

Для транспортировки КАН на базе большой дифракционной мембраны с низкой околоземной орбиты на ГСО в данной работе предлагается использовать ЭРД малой тяги.

Литература

1. Early, J. Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens / J. Early, R. Hyde, R. Baron // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2004. – Vol. 5166. - P. 148-156. - ISSN: 0277786X.
2. Atcheson, P. MOIRE - Initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large light-weight optical telescopes / P. Atcheson, C. Stewart, J. Domber, K. Whiteaker, J. Cole, P. Spuhler, A. Seltzer, L. Smith // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2012. – Vol. 8442, Article number 844221. - ISBN: 978-081949143-5.
3. Atcheson, P. MOIRE - Ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope / P. Atcheson, J. Domber, K. Whiteaker, J. A. Britten, S. N. Dixit, B. Farmer // Proceedings of SPIE - The In-

- ternational Society for Optical Engineering. – 2014. – Vol. 9143, Article number 91431W. - ISBN: 978-081949611-9.
4. Грейсух, Г. И. Принципы построения проекционных и фокусирующих оптических систем с дифракционными элементами / Г. И. Грейсух, И. М. Ефименко, С. А. Степанов // Компьютерная оптика. - 1987. - Т.1. - С. 114-116.
 5. Greisukh, G. I. Aberration properties and performance of a new diffractive-gradient-index high-resolution objective / G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, S. A. Stepanov // APPLIED OPTICS – 2001. - V. 40, - No. 16 2001. p. 2730-2735.
 6. Zapata-Rodriguez, C. J. Axial behavior of diffractive lenses under Gaussian illumination: complex-argument spectral analysis / C. J. Zapata-Rodriguez, M. Martinez-Corral, P. Andres, A. Pons // J. Opt. Soc. Am. A 1999. - V. 16, - N. 10. - P. 2532-2538.
 7. Хонина, С. Н. Бинарная линза: Исследование локальных фокусов / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, Р. В. Скиданов // Компьютерная оптика – 2011.- Т. 35. - № 3. - С. 339-346.
 8. Faklis, D. Spectral properties of multiorder diffractive lenses / D. Faklis, G. M. Morris // APPLIED OPTICS Vol. – 1995. – V. 34, - N. 14. - P. 2462-2468.
 9. Карпеев, С.В. Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / С.В. Карпеев, С. В. Алферов, С.Н. Хонина, С.И. Кудряшов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 689-694.
 10. Kotlyar, V. V. Diffraction computation of focusator into longitudinal segment and multifocal lens / Kotlyar V.V., Khonina S.N., Soifer V.A. // Proceedings of SPIE. - 1993. - Vol. 1780. - P. 263-272
 11. Soifer, V. A. Multifocal diffractive elements / Soifer V. A., Doskolovich L. L., Kazanskiy N. L. // Optical Engineering. - 1994. - Vol.33, № 11. - P.3610-3615.
 12. Dobson, S. L. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging / S. L. Dobson, P. Sun, Y. Fainman // APPLIED OPTICS -1997. - V. 36, - N. 20. - P. 4744-4748.
 13. Mait, J. N. Binary subwavelength diffractive lens design / J. N. Mait, D. W. Prather, M. S. Mirotznik // OPTICS LETTERS. -1998. - V. 23, - N. 17. - P. 1343-1345.
 14. Motogaito, A. Fabrication of Binary Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for Controlling Luminosity Distribution / A. Motogaito, K. Hiramatsu // Optics and Photonics Journal – 2013. - V. 3, - P. 67-73.
 15. Грейсух, Г. И. Ахроматизированные дифракционные и дифракционно-рефракционные системы рентгеновского диапазона [Текст] / Г. И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С. В. Казин, С. А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 188-195
 16. Farn, M.W. Diffractive doublets corrected at two wavelength / M.W. Farn, J.W. Goodman // J. Opt. Soc. Am.A. – 1991. – Vol 8(6). – P. 860-867.
 17. Andersen, G. Broadband antihole photon sieve telescope / G. Andersen, D. Tullson // APPLIED OPTICS / Vol. 46, No. 18 / 20 June 2007, p. 3706-3708.