

# Угловые отражатели с интерференционным диэлектрическим покрытием

А.Л.Соколов, В.В.Мурашкин, А.С.Акентьев, Е.А.Карасева

*Рассматриваются угловые отражатели (УО) со специальным интерференционным диэлектрическим покрытием, предназначенные для кольцевой ретрорефлекторной системы космических аппаратов с одноосной ориентацией. Исследуются дифракционные картины излучения, отраженного от УО с различным покрытием граней. Показано, что выбор угла между гранями, размера и покрытия граней УО позволяет существенно изменять вид дифракционной картины и тем самым оптимизировать ее для различных навигационных задач.*

**Ключевые слова:** угловой отражатель, дифракционная картина, кольцевая ретрорефлекторная система, диаграмма направленности, интерференционное диэлектрическое покрытие.

## 1. Введение

Ретрорефлекторные системы [1–8], состоящие из угловых отражателей (УО) (рис.1), устанавливаются на геодезических и навигационных спутниках для отражения луча лазерного дальномера. Измерение времени распространения лазерного импульса позволяет с высокой точностью определить дальность до спутника и рассчитать параметры орбиты [3].

Излучение, отраженное от ретрорефлекторной системы, характеризуется определенной диаграммой направленности, т.е. зависимостью энергии от угла между оптической осью и направлением наблюдения. Специфика применения УО в системах спутниковой дальнометрии заключается в том, что отраженный лазерный луч отклоняется от направления на передатчик вследствие так называемого явления скоростной абберации, причем величина угла отклонения составляет  $2u/c$ , где  $u$  – тангенциальная составляющая скорости движения спутника, а  $c$  – скорость света. Это отклонение зависит от высоты орбиты спутника и изменяется примерно от 1" для Луны до 10" для низкоорбитальных спутников. Поэтому в общем случае энергия отраженного лазерного луча должна быть сосредоточена не на оптической оси, т.е. в центральном лепестке, а в боковых лепестках. Соответственно максимум интенсивности в дифракционной картине должен быть смещен от оси на угловое расстояние, равное угловой абберации для данного спутника. Для трехосно ориентированных спутников (не изменяющих свое положение относительно плоскости орбиты) оптимальная дифракционная картина в дальней зоне (FFDP) имеет вид двух пятен, разнесенных на требуемое расстояние, а для одноосно ориентированных вращающихся спутников (например, ГЛОНАСС) – вид кольца.

А.Л.Соколов, В.В. Мурашкин, А.С.Акентьев, Е.А.Карасева. ОАО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», Россия, 111024 Москва, ул. Авиамоторная, 53; e-mail: alsokolov@bk.ru

Поступила в редакцию 29 мая 2013 г., после доработки – 1 июля 2013 г.

Дифракционная картина в дальней зоне в первую очередь зависит от размера призматических угловых отражателей, образующих ретрорефлекторную систему спутника, и угла между их гранями. В случае УО с металлизированными гранями при изменении (развале) одного двухгранного угла на величину  $\phi$  относительно  $\pi/2$  угловое расстояние между пятнами дифракционной картины составляет  $4\sqrt{6}n\phi/3$ , где  $n$  – показатель преломления материала УО.

Одним из эффективных способов изменения и оптимизации диаграммы направленности является управление сдвигом фаз компонент вектора  $\mathbf{E}$  при преломлении и отражении света на гранях УО, что определяется видом покрытия граней или его отсутствием [8].

Количество УО в ретрорефлекторной системе является компромиссом между необходимой величиной эквивалентной поверхности рассеяния, которая в данном случае составляет  $10^7$ – $10^9$  м<sup>2</sup>, и допустимым весом системы. Кольцевая ретрорефлекторная система обладает рядом преимуществ, и цель данной работы – анализ параметров различных УО и обсуждение критериев, по которым можно выбрать оптимальный УО для такой системы.

## 2. Поляризационная структура излучения, отраженного от УО

Специфика поляризационных характеристик УО определяется тем, что луч на своем пути внутри УО претерпевает три отражения, каждое из которых характеризуется сдвигом фазы между ортогональными компонентами вектора  $\mathbf{E}$ :  $\delta = \delta_s - \delta_p$ , при этом плоскости падения луча на грани не совпадают.

Зададим систему координат, продольная ось  $z$  которой совпадает с падающим лучом, а поперечные оси вращаются, «подстраиваясь» под плоскости падения света на отражающие грани УО, причем ось  $x$  лежит в плоскости падения. После отражения система координат остается правой. На выходе из УО положительное направление оси  $z$  изменяется на противоположное.

При нормальном падении света на УО угол падения на каждую его грань  $\arctan \sqrt{2} \approx 54.7^\circ$ , а угол  $\alpha$  между

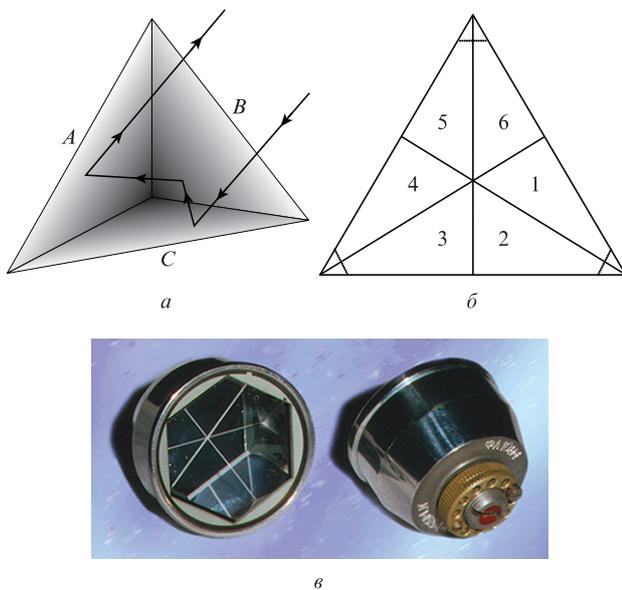


Рис.1. Ход лучей в УО (а), секторы входной грани УО, попадания в которые определяют шесть различных способов хода лучей в УО (б), и внешний вид УО, изготавливаемых в ОАО «НПК «Системы прецизионного приборостроения»» (в).

плоскостями падения на соседние грани равен  $\pm 60^\circ$ . Кроме того, следует учитывать углы между осью  $x$  и плоскостями падения на входе и выходе из УО.

Луч может пройти путь внутри УО шестью разными способами, в зависимости от того, на какой из шести секторов входной грани он попадает. Например, луч входит в сектор 2, последовательно отражается от граней  $C$ ,  $A$  и  $B$  (см. рис.1) и выходит из сектора 6. Последовательность углов кручений для шести возможных комбинаций отражающих граней на пути луча указана в [5–8].

Комплексные амплитуды ортогональных компонент вектора  $E$  излучения в ближней зоне УО вычисляются методом Джонса. Для описания поляризационных свойств УО необходимо рассматривать шесть результирующих матриц Джонса для различных комбинаций хода луча с учетом поворотов системы координат и сдвига фазы  $\delta$  на отражающих гранях. Соответствующие шесть секторов, на которые делится апертура УО, характеризуются определенными амплитудно-фазовыми коэффициентами про-

пускания для ортогональных компонент вектора  $E$ . Таким образом, волновой фронт падающей плоской волны разделяется при отражении от УО на шесть частей. Эти пучки с различным состоянием поляризации и сдвигом фазы, расширяясь вследствие дифракции, интерferируют и образуют сложную дифракционную картину в дальней зоне, при этом пространственная поляризационная структура излучения зависит как от состояния поляризации падающего света, так и от параметров УО [1–8].

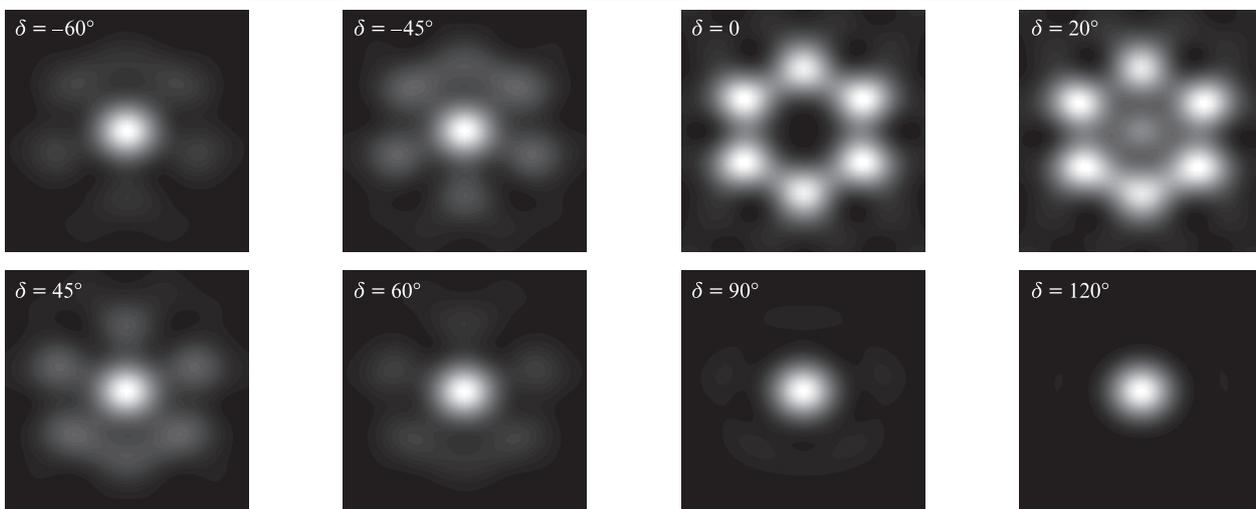
### 3. Диаграмма направленности УО с интерференционным диэлектрическим покрытием

Дифракционная картина в дальней зоне существенно зависит от сдвига фаз ортогональных компонент при отражении, который определяется видом покрытия граней УО. Например, в случае отсутствия покрытия (при полном внутреннем отражении (ПВО))  $\delta \approx -40^\circ$  (в выбранной нами системе координат), при металлическом покрытии граней  $\delta = 150^\circ - 170^\circ$ , а при интерференционном покрытии сдвиг фаз можно плавно изменять в широких пределах – от 0 до  $180^\circ$ . Таким образом, все типы УО должны классифицироваться по сдвигу фаз компонент на каждой грани  $\delta_A, \delta_B, \delta_C$ . Определенной комбинации  $\delta_i$  соответствует определенная дифракционная картина в дальней зоне [8].

Результаты расчета дифракционной картины в зависимости от сдвига фаз ортогональных компонент на гранях УО для линейного горизонтального состояния поляризации падающего света приведены в табл.1. Отметим, что при нулевом сдвиге фаз ( $\delta_A = \delta_B = \delta_C = 0$ ) в центре картины отсутствует центральное пятно.

Покрытия на базе тонких диэлектрических слоев, в том числе градиентных, наносимых на отражающие грани УО, могут обеспечить любой заданный сдвиг фаз. Первый диэлектрический слой, примыкающий к поверхности призмы, должен иметь больший показатель преломления, чем материал призмы, например  $n_1 = 2$ . На границе раздела последнего слоя с воздухом всегда наблюдается ПВО, и при этом, как известно, возникает существенный сдвиг фаз между ортогональными компонентами вектора  $E$ :  $|\delta| = 20^\circ - 50^\circ$  (в зависимости от угла падения и показателя пре-

Табл.1. Дифракционные картины в дальней зоне для УО с различным сдвигом фаз компонент поля на гранях.



ломления среды). В многослойной среде деление волн с  $r$ - и  $s$ -компонентами вектора  $E$  на вторичные волны происходит по-разному вследствие различных коэффициентов пропускания на границе сред, и результат суммирования получается разный. Например, в случае, если волна падает на отражающую грань призмы под углом Брюстера, то волна с  $r$ -компонентой проходит до последнего слоя, практически не испытывая отражений, и возвращается в призму, набрав определенный сдвиг фазы. В то же время волна с  $s$ -компонентой претерпевает многочисленные отражения, и результирующая волна в призме является суперпозицией когерентных волн с различными сдвигами фаз.

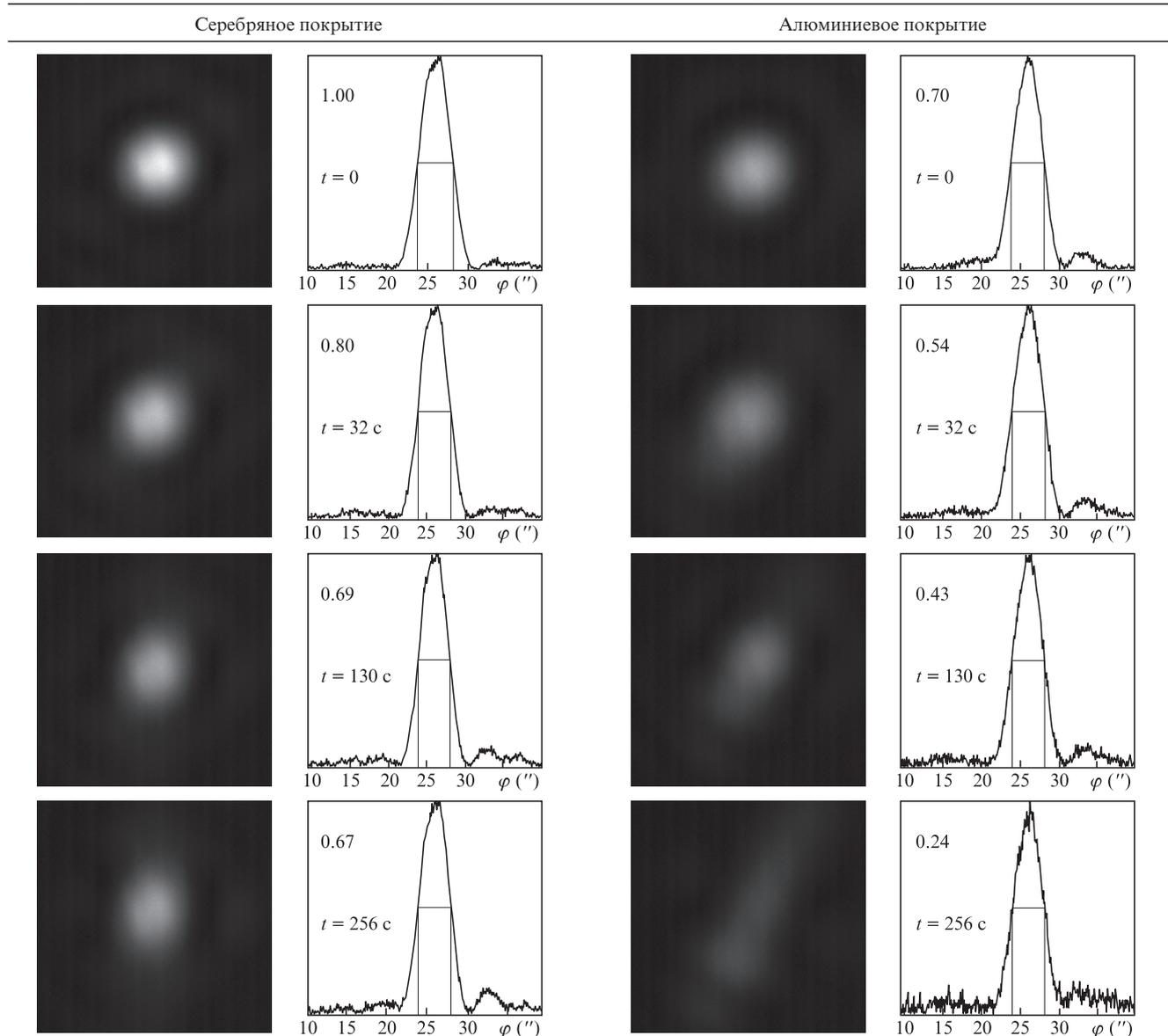
Таким образом, в УО с интерференционным диэлектрическим покрытием (ИДП) многолучевая интерференция волн с различными амплитудой и фазой, которые отражаются от границ слоев покрытия, приводит к дополнительному сдвигу фаз между ортогональными компонентами на каждой грани УО [9]. Требуемый сдвиг фаз может быть обеспечен при разном числе слоев (при всего

одном слое величина сдвига ограничена). Потери УО при таком покрытии в идеале равны нулю, т. к. на последней границе обеспечивается условие ПВО. Однако на практике потери составляют несколько процентов. В этой связи использование градиентного покрытия представляется весьма перспективным способом уменьшения потерь, обусловленных рассеянием.

В ряде случаев (геостационарные спутники, Луна) необходимо, чтобы ретрорефлекторная система формировала в дальней зоне отраженного излучения дифракционную картину Эйри. Как следует из табл.1, для получения такой картины необходим сдвиг фаз  $|\delta| \geq 90^\circ$  (в выбранной системе координат), что обычно обеспечивается нанесением металлического покрытия на отражающую грани.

Преимущества использования диэлектрического покрытия вместо металлического обусловлены несколькими факторами. Во-первых, в среднем коэффициент отражения диэлектрического покрытия на 30%–40% больше, чем у алюминиевого покрытия, и на 5% больше по сравнению

Табл.2. Дифракционные картины света, отраженного от УО с серебряным и алюминиевым покрытиями при их нагреве, в различные моменты времени, а также соответствующие угловые распределения интенсивности в дифракционных максимумах.



Примечание: Цифры на распределениях – отношения интенсивностей в центре дифракционной картины к соответствующей интенсивности при использовании УО с серебряным покрытием в момент времени  $t = 0$ .

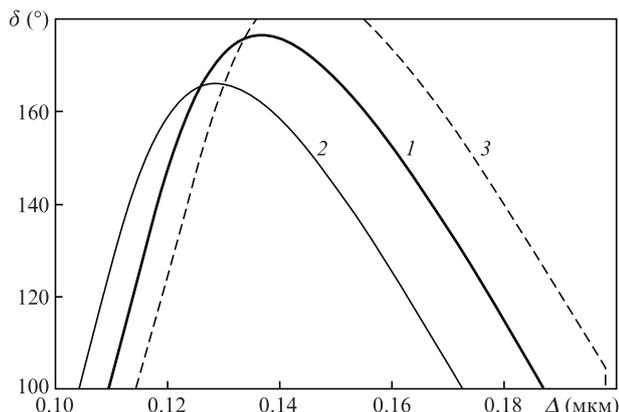


Рис.2. Сдвиг фаз ортогональных компонент вектора  $E$  при отражении света от диэлектрических покрытий различной оптической толщины  $\Delta$ ; 1 – нормальное падение, 2, 3 – отклонения от нормали на  $\pm 8^\circ$ .

с серебряным. Во-вторых, диэлектрическое покрытие обладает лучшей устойчивостью к внешним механическим воздействиям, чем серебряное. Особенно чувствительно серебряное покрытие к влажной атмосфере при наличии малейших повреждений защитного слоя (окись кремния, бакелитовый лак). В-третьих, термоискажения диаграммы направленности значительно меньше для диэлектрического покрытия, поскольку оно мало поглощает видимое излучение Солнца. В табл.2 показаны дифракционные картины света, отраженного от УО с серебряным и алюминиевым покрытиями в различные моменты времени в ходе нагрева излучением ксеноновой лампы со спектром, близким к солнечному. Дифракционная картина света, отраженного диэлектрическим покрытием в аналогичных условиях, не меняется.

Недостатком диэлектрического покрытия является зависимость сдвига фаз ортогональных компонент вектора  $E$  от длины волны и от угла падения света на входную грань УО. Кроме того, существует ограничение на допустимые углы падения света – при угле падения, превышающем  $18^\circ$ , в общем случае нарушается ПВО. Однако для высокоорбитальных спутников (спутники ГЛОНАСС, геостационарные спутники, Луна) данная проблема не столь существенна. Именно в этих случаях диэлектрическое покрытие может быть с успехом использовано вместо металлического, т.к. угол падения на УО этих спутников не превышает  $\pm 15^\circ$ . Что касается длины волны света для лазерных дальномеров, то она, как правило, имеет фиксированное значение 0.532 и 1.06 мкм.

В результате эффект, состоящий в формировании однопестиковой диаграммы направленности, достигается уже при использовании трех интерференционных слоев. На рис.2 показана зависимость сдвига фаз  $\delta$  от оптической толщины слоев  $\Delta = n_h h_h = n_s h_s$ , которая выбрана одинаковой для слоя с высоким ( $n_h$ ) и низким ( $n_s$ ) показателями преломления, при трех углах падения на входную грань УО (нормальное падение и отклонение от него на  $\pm 8^\circ$ ).

#### 4. Оптимальные параметры УО для формирования двухпятенной дифракционной картины

Принцип работы перспективной кольцевой ретрорефлекторной системы (КРС) состоит в том, что отраженный сигнал лазерного дальномера формируется не всеми

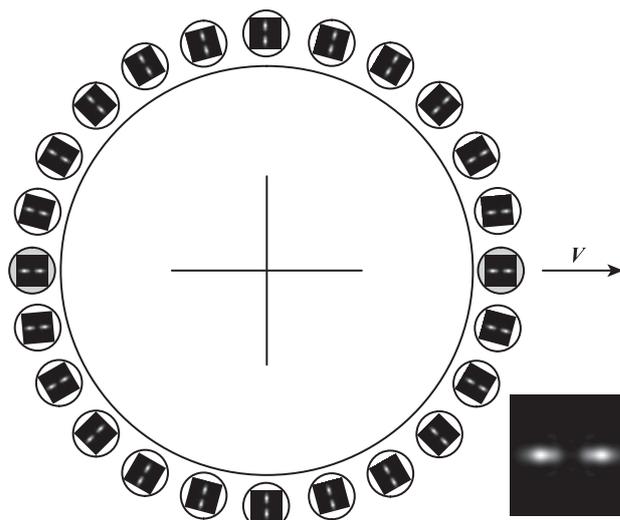


Рис.3. Кольцевая ретрорефлекторная система. Показано, как ориентируются диаграммы направленности для каждого УО. Для направления на приемник отраженное излучение формируется всего двумя УО (некоторый вклад в интенсивность могут также давать соседние УО);  $V$  – вектор скорости космического аппарата.

УО системы, как для плоской панели из УО без покрытия, а только несколькими, в идеале двумя, на противоположных сторонах КРС (рис.3). Это, как установлено в ОАО «НПК «Системы прецизионного приборостроения»», позволяет более точно определить расстояние до геометрического центра панели и тем самым более точно (до 1 мм) – расстояние от заданной точки лазерного дальномера до центра масс космического аппарата.

При создании КРС должны использоваться нестандартные УО: требуется произвести «развал» одного из двухгранных углов на заданную величину с точностью до  $0.2''$ , что приводит к возникновению в дифракционной картине в дальней зоне двух пятен вместо одного. Вообще такие «двухпятенные» УО с алюминиевым покрытием отражающих граней давно применяются для трехосно ориентированных низкоорбитальных космических аппаратов. Угол развала при этом достаточно велик и составляет  $4''-5''$ , так что вместо одного пятна Эйри получают два, разнесенных на нужное расстояние для компенсации аберрации скорости.

Специфика КРС состоит в том, что поскольку для навигационных спутников ГЛОНАСС угловая аберрация скорости равна примерно  $5''$ , угол развала для компенсации аберрации должен быть всего  $\sim 2.5''$ . В этом случае при использовании УО с апертурой примерно 28 мм вместо двух пятен наблюдается дифракционная картина в виде гантели, и значительная часть отраженной энергии теряется, не попадая на приемник.

Очевидно, что увеличение размера УО приводит к уменьшению углового размера пятен, при этом возникает необходимая двухпятенная диаграмма направленности отраженного излучения (табл.3). Вместе с тем размер УО должен быть оптимальным, т.к. чрезмерное его увеличение приводит к возрастанию массы КРС и повышению ее чувствительности к температурным воздействиям. Расчеты показывают, что оптимальный размер апертуры УО для КРС находится в пределах 42–48 мм.

Кварц КУ-1 является идеальным материалом для УО благодаря ряду важных характеристик, таких как высокая однородность, малый коэффициент линейного расшире-

Табл.3. Дифракционные картины в дальней зоне при отражении света от КРС и одиночных УО с различными параметрами.

Отклонение (развал) двугранного угла УО	Диаметр апертуры УО 28 мм		Диаметр апертуры УО 50 мм	
	Один УО	КРС	Один УО	КРС
2.2"				
2.4"				
2.6"				

ния, радиационная устойчивость и т. д. Линии поглощения КУ-1 находятся в ИК области спектра, поэтому при солнечном освещении только малая часть световой энергии поглощается в материале УО. Основной нагрев происходит в случае, если отражающие грани УО металлизированы. В результате разность температур между входной гранью и вершиной УО (2–4°C) приводит к изменению показателя преломления внутри УО, что может быть описано моделью линзы, возникающей на выходе излучения из УО. Линза имеет весьма малую оптическую силу (сотые доли диоптрии), однако этого достаточно, чтобы угловой размер диаграммы направленности увеличился в два и более раз; при этом интенсивность в центре пятна может уменьшиться на порядок [10, 11].

Серебряное покрытие в этом смысле предпочтительнее алюминиевого, поскольку потери излучения в УО в первом случае составляют 20% против 40% во втором. Переход к интерференционному диэлектрическому покрытию, как показывают эксперименты [11], приводит к существенному уменьшению градиента температуры и искажений диаграммы направленности.

## 5. Выводы

Распределение интенсивности излучения, отраженного от углового отражателя, в дальней зоне существенно зависит от вида покрытия граней УО или его отсутствия (в этом случае отражение происходит за счет ПВО). Это обусловлено различным сдвигом фаз ортогональных ком-

понент вектора  $E$  при отражении. Кардинальным способом управления диаграммой направленности являются ИДП, позволяющие, в частности, формировать однолепестковую диаграмму направленности отраженного излучения (пятно Эйри в дифракционной картине), которая обычно обеспечивается нанесением металлического покрытия на отражающие грани УО. Использование ИДП приводит к уменьшению влияния термических воздействий на УО. Особенно это важно для «двухпятенных» УО увеличенного размера, применяемых в кольцевой ретрорефлекторной системе с улучшенными точностными и энергетическими характеристиками.

1. Коротаяев В.В., Панков Э.Д. *Опт.-мех. пром.*, № 1, 9 (1981).
2. Денисюк Г.В., Корнеев В.И. *Опт.-мех. пром.*, № 9, 1 (1982).
3. Degnan J.J. <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/1993/MillimeterAccuracySatelliteLaserRangingReview.pdf>.
4. Arnold D. [http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/1979/Arnold\\_SAO\\_SpcL\\_Rpt\\_382.pdf](http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/1979/Arnold_SAO_SpcL_Rpt_382.pdf).
5. Садовников М.А., Соколов А.Л. *Оптика и спектроскопия*, **107** (2), 213 (2009).
6. Садовников М.А., Соколов А.Л., Шаргородский В.Д. *Успехи современной радиоэлектроники*, №8, 55 (2009).
7. Crabtree K., Chipman R. *Appl. Opt.*, **49** (30), 5882 (2010).
8. Соколов А.Л., Мурашкин В.В. *Оптика и спектроскопия*, **111**, 900 (2011).
9. Ищенко Е.Ф., Соколов А.Л. *Поляризационная оптика* (М.: Физматлит, 2012).
10. Соколов А.Л., Мурашкин В.В., Шкурский Б.Б. *Электромагнитные волны и электронные системы*, **16**, 42 (2011).
11. Соколов А.Л., Мурашкин В.В., Аментьев А.С. *Электромагнитные волны и электронные системы*, **18**, 47 (2013).