

Кольцевая ретрорефлекторная система из уголковых отражателей со специальным покрытием

В.Б.Бурмистров, М.А.Садовников, А.Л.Соколов, В.Д.Шаргородский

Рассматривается кольцевая ретрорефлекторная система (РС), состоящая из уголковых отражателей (УО) со специальным покрытием отражающих граней, для навигационных спутников, одноосно ориентированных на Землю. Исследуется погрешность измерения дальности, обусловленная как задержкой лазерного импульса в УО, так и его расположением в пространстве (конфигурацией РС). Показано, что кольцевая РС, образованная УО с двухлетней диаграммой направленности, позволяет существенно снизить погрешность измерения дальности.

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

1. Введение

На всех современных навигационных и геодезических космических аппаратах (КА) размещают панели уголковых отражателей (УО) – так называемые ретрорефлекторные системы (РС) [1–6]. Назначение данных систем состоит в отражении луча лазерного дальномера для прецизионного измерения дальности до КА с целью уточнения параметров орбиты и координат оптико-лазерной станции, а также для калибровки наземных радиотехнических измерительных средств.

Существуют три типа ретрорефлекторных систем. К первому типу относятся сферические РС – совокупность УО на поверхности тяжелых металлических шаров-спутников, предназначенных для калибровки лазерных дальномеров, а также для исследования геопотенциала Земли (КА Эталон, Ларец, Lares, Lageos и др.). Второй тип – плоские панели УО, которые устанавливаются на навигационных спутниках ГЛОНАСС, Галилео и др. Количество УО в такой ретрорефлекторной системе определяется компромиссом между необходимым коэффициентом отражения и допустимым весом системы на борту КА. Для более точного измерения дальности стараются использовать симметричные панели, при этом УО необходимо располагать максимально компактно вокруг линии, соединяющей центр масс КА и центр Земли. И, наконец, третий тип – стеклянные шарообразные спутники, представляющие собой одиночный линзовый отражатель (Блиц) [7].

Как известно, лазерный дальномер измеряет время τ_{meas} распространения короткого (до 10 пс) лазерного импульса, которое складывается из времени распространения импульса в атмосфере, в космическом пространстве и внутри одиночного УО.

В.Б.Бурмистров, М.А.Садовников, А.Л.Соколов, В.Д.Шаргородский.
ОАО «НПК "Системы прецизионного приборостроения"», Россия,
111024 Москва, ул. Авиамоторная, 53; e-mail: alsokolov@bk.ru

Поступила в редакцию 25 мая 2013 г., после доработки – 1 июля 2013 г.

В настоящее время в международной сети лазерных станций в основном используются лазерные дальномеры с так называемым одноэлектронным режимом работы, при этом частота следования импульсов может достигать 10 кГц [3, 4]. Это означает, что от каждого лазерного импульса приемная система воспринимает не более одного фотона отраженного излучения. Данный фотон, очевидно, если пренебречь малыми интерференционными и квантовыми эффектами, приходит от какого-то одного УО панели. Поскольку в общем случае УО в РС находятся на разных расстояниях от приемника, причем эти расстояния зависят от угла падения света, то времена прихода различных сигнальных фотонов не совпадают.

В приемном тракте лазерного дальномера сигнальные фотоэлектроны от совокупности принятых импульсов «складываются» в одинаковые временные ячейки с учетом сдвига импульсов во времени. Совокупность фотоэлектронов за время измерения, которое включает более тысячи импульсов, формирует ответный протяженный сигнал с измеряемыми параметрами: положением так называемого центра тяжести (математическим ожиданием) на временной оси, длительностью (среднеквадратичным отклонением – СКО) и т. д.

Основная задача дальнометрии состоит в том, чтобы на основе анализа и обработки полученного сигнала определить дальность до центра масс КА. Для этого необходимо учесть задержку лазерного импульса в РС, искажение формы и смещение центра тяжести ответного импульса, а также рефракционную поправку.

Целью настоящей работы является анализ точностных характеристик кольцевых ретрорефлекторных систем (КРС). Особенность таких систем состоит в том, что УО располагаются внутри кольца и центральная часть КРС свободна от отражателей. При использовании специально сконструированных отражателей КРС позволяет уменьшить погрешность измерения дальности.

2. Расчет дальности до выбранной точки одиночного отражателя

Любая ретрорефлекторная система характеризуется систематической погрешностью, под которой мы будем

понимать смещение центра тяжести (математического ожидания) ответного импульса, и СКО, характеризующим уширение импульса. СКО обусловлено различной задержкой лазерного импульса при отражении от УО в РС с определенными габаритами и симметрией.

Систематическая погрешность определяется задержкой лазерного импульса в одиночном УО и любыми видами асимметрии параметров РС, например различием поляризационных характеристик отдельных участков РС. Кроме того следует учитывать, что точка пространства, до которой рассчитывается дальность, не совпадает с геоцентрическими координатами центра масс спутника, изменяющимися в процессе движения.

Энергетический потенциал как одиночного УО, так и всей РС в лазерной локации принято характеризовать эквивалентной поверхностью рассеяния (ЭПР), которая для навигационных спутников должна составлять не менее $60 \times 10^8 \text{ м}^2$. Это позволяет определять дальность с СКО одиночного измерения не более 1 см на орбитах высотой $\sim 20000 \text{ км}$ в диапазоне углов места более 30° при коэффициенте пропускания атмосферы в зените 0.7 и точности ориентации КА на центр Земли не хуже $\pm 0.5^\circ$.

Систематическая погрешность, обусловленная задержкой импульса в УО, может быть рассчитана при известных значениях угла места и азимута КА, поэтому фактически является поправкой, учитываемой при расчете дальности. Существуют по крайней мере два равнозначных способа этого учета. Один из них базируется на понятии плоскости эквивалентного отражения – плоскости, до которой дошел бы фазовый фронт импульса за общее время распространения импульса, деленное пополам. Зная положение этой плоскости в зависимости от угла падения, можно рассчитать дальность до центра масс КА. Другой подход состоит в расчете поправки к значению дальности до какой-либо выбранной базовой точки РС и затем в перерасчете (редукции) этого значения к центру масс.

Рассмотрим оба эти способа. Вначале получим формулу, определяющую время распространения импульса лазерного дальномера до базовой точки S одиночного УО. Данное значение – это измеряемый промежуток времени между центрами тяжести передаваемого и принимаемого импульсов, т.е. между математическими ожиданиями распределения принятых фотонов во времени для этих импульсов. При этом не будем анализировать поправки, связанные с задержкой импульса в атмосфере [1], и искажения сигнала в фотоприемном устройстве [8].

Рассмотрим одиночный УО с вершиной S , представляющей собой точку, оптический путь до которой определяет время измерения τ_{meas} (рис.1). Полагаем, что импульсная функция такого УО является δ -функцией, т.е. форма и протяженность лазерного импульса в одном УО не искажается.

Угол падения θ_i лучей, образующих плоскую волну от лазерного передатчика, изменяется от нуля (нормальное падение на входную грань УО) до $\sim 13^\circ$. Рассчитаем дальность Z_S от лазерного передатчика до точки S по времени распространения импульса:

$$\tau_{\text{meas}} = 2\tau_A + 2\tau_{AS}, \quad (1)$$

где τ_A – время распространения луча до точки A ; τ_{AS} – время распространения луча между точками A и S .

Время распространения импульса до точки S в вакууме обозначим τ_S . Искомая истинная дальность и есть

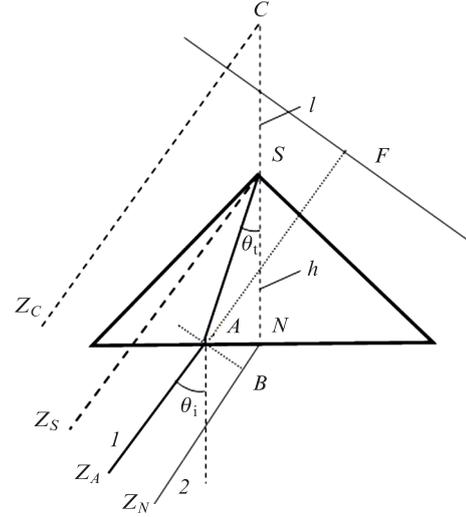


Рис.1. Схема измерения дальности с помощью одиночного УО: S – точка УО, оптический путь до которой равен оптическому пути всех лучей, попавших в апертуру УО; A – точка входа луча, проходящего в точку S ; N – основание перпендикуляра, опущенного из точки S ; $SN = h$ – геометрическая высота УО; C – точка, до которой необходимо вычислить дальность; F – плоскость эквивалентного отражения; $1, 2$ – лучи, исходящие от лазерного передатчика.

$$Z_S = \tau_S c = Z_N + h \cos \theta_i, \quad (2)$$

где Z_N – истинная, геометрическая дальность до точки N . Свяжем эту величину с τ_{meas} .

Расстояние между точками A и S есть $Z_{AS} = h / \cos \theta_i$, где θ_i – угол преломления, h – высота УО. Оптический путь луча внутри УО зависит от угла падения и показателя преломления материала УО n : $\Delta_{AS} = nh / \cos \theta_i$. Заметим, что следует учитывать эффекты, связанные с различием групповой и фазовой скоростей в материале УО.

Умножив левую и правую части (1) на скорость света в вакууме c и разделив пополам, получим дальность Z_A до точки A , равную разности $\tau_{\text{meas}} c / 2$ и оптического пути главного луча внутри УО:

$$Z_A = \tau_{\text{meas}} c / 2 - \Delta_{AS} = \tau_{\text{meas}} c / 2 - hn / \cos \theta_i. \quad (3)$$

Дальность Z_N до точки N отличается от дальности Z_A до точки A на длину отрезка $BN = \Delta_{BN}$, где точка B является основанием перпендикуляра, опущенного из точки A на луч 2:

$$Z_N = Z_A + \Delta_{BN} = \tau_{\text{meas}} c / 2 - \Delta_{AS} + \Delta_{BN}.$$

Поскольку $AN = h \tan \theta_i$, находим

$$\Delta_{BN} = AN \sin \theta_i = h \tan \theta_i \sin \theta_i = h \frac{\sin^2 \theta_i}{n \cos \theta_i}.$$

После несложных преобразований получаем

$$\begin{aligned} -\Delta_{AS} + \Delta_{BN} &= -\frac{hn}{\cos \theta_i} + h \frac{\sin^2 \theta_i}{n \cos \theta_i} = -\frac{h(n^2 - \sin^2 \theta_i)}{n \cos \theta_i} \\ &= -h \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$Z_N = \tau_{\text{meas}} c / 2 - h \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}.$$

Из (2) с учетом (4) находим искомую истинную дальность до точки S

$$Z_S = \tau_{\text{meas}}/2 + h \cos \theta_i - h \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}. \quad (5)$$

Для времени распространения импульса до точки S можно записать следующую формулу:

$$\tau_S = \tau_{\text{meas}} c/2 + (h \cos \theta_i - h \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i})/c. \quad (6)$$

Разность $\tau_{\text{meas}}/2$ и τ_S определяет систематическую погрешность нахождения времени распространения импульса до базовой точки S , обусловленную одиночным УО,

$$\Delta \tau_S = h(-\cos \theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i})/c, \quad (7)$$

и систематическую погрешность соответствующего расчета дальности

$$\Delta_S = \tau_{\text{meas}} c/2 - Z_S = h \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i} - h \cos \theta_i. \quad (8)$$

Расстояние от точки N входной грани УО до плоскости эквивалентного отражения есть

$$NF = \tau_{\text{meas}} c/2 - Z_N = h \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}. \quad (9)$$

3. Расчет дальности до базовой точки РС

Пусть необходимо привязать измерения дальности до КА к дополнительной точке C , заданной на посадочной плоскости РС (см. рис.1). Очевидно, что геометрическая длина пути до любой точки в пространстве, в том числе числе до точки C , находится из векторного соотношения

$$\mathbf{Z}_C = \mathbf{Z}_S + \mathbf{L}_{SC}. \quad (10)$$

Здесь векторы \mathbf{Z}_C , \mathbf{Z}_S направлены от лазерного передатчика в точки C и S соответственно, вектор \mathbf{L}_{SC} – от точки S к точке C , при этом $|\mathbf{L}_{SC}| = l$ – расстояние от точки S до точки C . Для расчета $|\mathbf{Z}_C|$ необходимо задать систему координат, связанную с РС.

В простейшем случае, когда точка C находится на перпендикуляре NS , получаем истинное значение дальности до этой точки

$$Z_C = Z_S + l \cos \theta_i = \tau_{\text{meas}} c/2 - \Delta_S + l \cos \theta_i,$$

откуда следует формула для поправки к расчету дальности до точки C :

$$\Delta_C = Z_C - \tau_{\text{meas}} c/2 = -\Delta_S + l \cos \theta_i = (h + l) \cos \theta_i - h \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}. \quad (11)$$

Эту величину необходимо прибавить к измеренному значению дальности $\tau_{\text{meas}}/2$. Проведем численную оценку величины Δ_C для $h = 19.1$ мм и $l = 25.9$ мм. Зависимость Δ_C от угла падения θ_i приведена на рис.2, из которого следует, что изменение систематической погрешности не превышает 1 мм, а ее среднее значение составляет ~ 16.2 мм.

В общем случае вектор \mathbf{L}_{SC} определяется конструкцией РС и задается в приборной системе координат, связан-

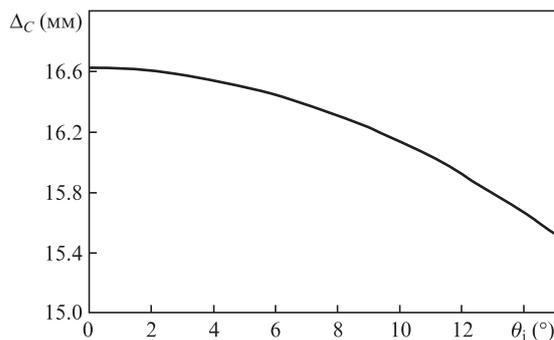


Рис.2. Зависимость систематической поправки к определению дальности до точки C от угла падения света на РС.

ной со спутником. В этой же системе координат может быть осуществлен переход от точки C к центру масс спутника, при этом следует учитывать изменение положение центра масс в процессе полета КА.

Рассчитаем расстояние L_{CF} от точки C посадочной плоскости РС до плоскости эквивалентного отражения. Очевидно, что

$$L_{CF} = Z_C - \tau_{\text{meas}} c/2 = (h + l) \cos \theta_i - h \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}. \quad (12)$$

Из сравнения (12) и (11) следует, что L_{CF} в точности равно систематической поправке Δ_C расчета дальности до точки C . Это означает тождественность рассмотренных выше способов корректировки «измеренного» значения дальности с помощью единичного УО.

4. Систематические и случайные поправки измерения времени распространения импульса, обусловленные размером и конфигурацией РС

Рассмотрим погрешности, обусловленные совместным действием УО в РС. При отражении симметричного зондирующего импульса от РС в общем случае происходит удлинение импульса, нарушение симметричности его формы и смещение центра тяжести [8,9]. Ограничимся исследованием трех видов плоских симметричных РС, а именно прямоугольной панели, кольцевой РС с УО без покрытия и РС с так называемыми двухъярусными УО увеличенного размера (рис.3). Сравним искажения сигнала этими РС применительно к спутниковым лазерным дальномерам, в которых используется одноэлектронный режим приема ответных импульсов.

Проведем приближенный анализ, полагая, что одиночный УО не искажает лазерный импульс, а только задерживает его в соответствии с (7), и отраженные от УО импульсы некогерентны, т.е. их интенсивности складываются без учета фазовых соотношений. В этом случае необходимо учитывать только индивидуальные смещения импульса на временной оси, определяемые каждым УО. Примем, что нулевым индивидуальным смещением обладает импульс, отраженный от УО в центре симметрии панели.

Зададим систему координат x, y, z с началом в центре симметрии РС, причем оси x и y лежат в плоскости, которая проходит через вершины S_i всех УО, а ось z направлена перпендикулярно этой плоскости (см. рис.3). Для кольцевой РС будем также использовать полярную систему координат (r, ψ) .

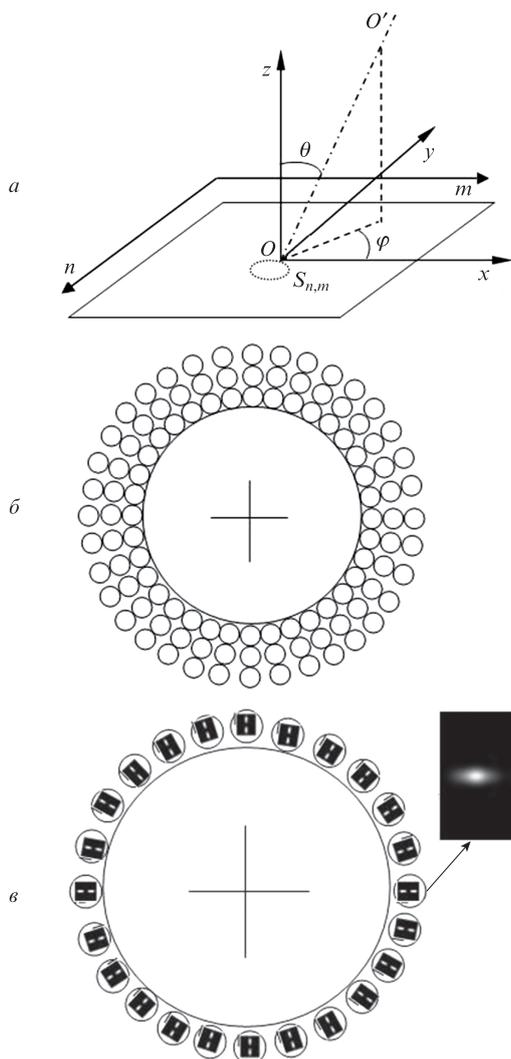


Рис.3. Виды ретрорефлекторных систем: плоская прямоугольная панель (а), кольцевая ретрорефлекторная система (КРС), образованная УО без покрытия (б), и КРС из двухугловых УО (в). Показано, как ориентируются диаграммы направленности для каждого УО.

Каждый УО в обоих случаях характеризуется вектором \mathbf{r} на плоскости, направленным из начала координат в точку S_i . Временную задержку импульса (как со знаком плюс, так и со знаком минус) для данного УО определяет проекция \mathbf{r} на линию визирования, т.е. на вектор \mathbf{R} , направленный от лазерного передатчика в центр симметрии РС. Зададим этот вектор в системе xuz углами θ_i (угол падения) и φ (азимутальный угол). Обозначим угол между векторами $\mathbf{r}_i (r_x, r_y, 0)$ и $\mathbf{R}(\sin\theta \cos\varphi, \sin\theta \sin\varphi, \cos\theta)$ как α_i ; тогда проекция \mathbf{r}_i на \mathbf{R} находится по формуле $|\mathbf{r}_i| \cos\alpha_i = r_x \sin\theta \cos\varphi + r_y \sin\theta \sin\varphi$, а соответствующая временная задержка $\Delta\tau_i = |\mathbf{r}_i| \cos\alpha_i / c$.

Рассмотрим вначале плоскую панель, состоящую из 117 УО: это 13 рядов УО, параллельных оси x , и 9 рядов УО, параллельных оси y . Каждому УО припишем два индекса, характеризующих его положение в панели: m – вдоль оси x , n – вдоль оси y , причем нулевым значениям индексов соответствует положение УО в центре панели. Пусть расстояние d между точками S_i УО равно, например, 50 мм (одинаково вдоль осей x и y). Для временной задержки импульса, отраженного от УО с индексами m, n , с учетом (7) получим следующее выражение:

$$\Delta\tau_{mn} = \frac{d}{c} \sin\theta (m \cos\varphi + n \sin\varphi) + \Delta\tau_S. \tag{13}$$

Используя (13), определим интенсивность одиночного отраженного лазерного импульса в виде гауссовой функции с шириной 2τ по уровню уменьшения интенсивности в e раз:

$$I_{mn}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\tau} \exp\left[-\frac{(t - \Delta\tau_{mn})^2}{\tau^2}\right]. \tag{14}$$

Общий отраженный импульс находится как сумма всех $I_{mn}(t)$:

$$I(t) = \sum_{m=-4}^4 \sum_{n=-6}^6 I_{mn}(t). \tag{15}$$

Результат суммирования показан на рис.4 для различных значений углов φ и θ , а также для разной длительности импульсов 2τ . Если проекция лазерного луча на панели не параллельна оси x или y ($\varphi \neq 0, 90^\circ$), то при ко-

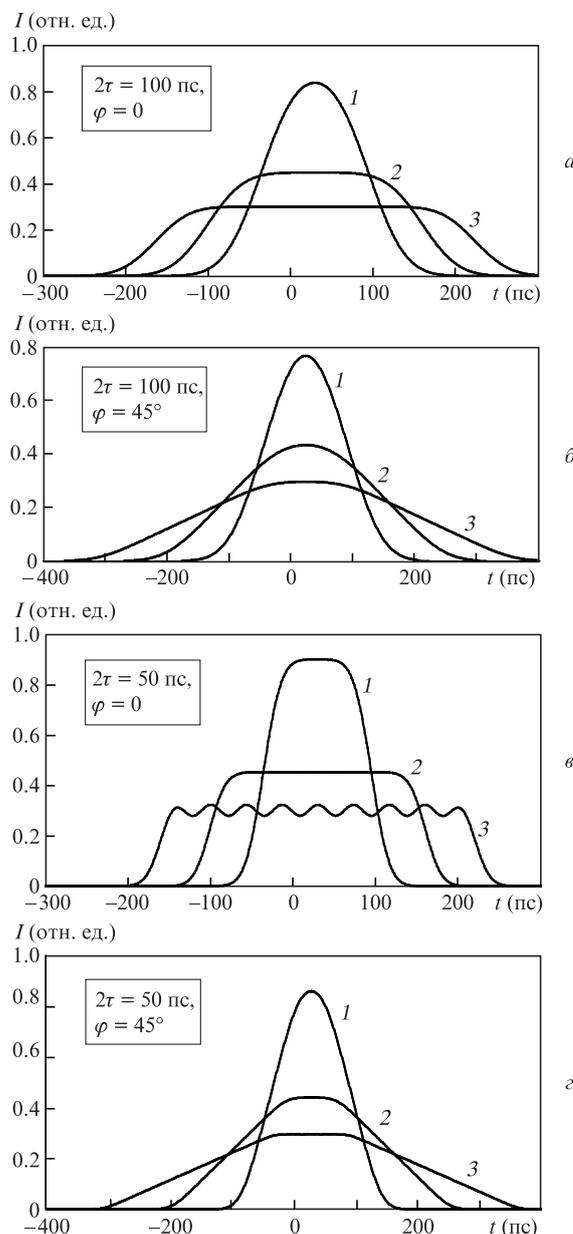


Рис.4. Уширение импульсов гауссовой формы при различных значениях 2τ и φ ; $\theta = 5^\circ$ (1), 10° (2) и 15° (3).

ротком (например, 1 пс) падающем импульсе отраженный импульс имеет форму трапеции. В противном случае (при параллельности) – прямоугольника. Уширение падающего импульса сглаживает эту закономерность. Уменьшение длительности исходного импульса приводит к возникновению модуляции отраженного импульса, обусловленной влиянием отдельных УО панели.

Центры тяжести всех кривых имеют одинаковое смещение на временной оси, связанное с задержкой импульса в единичном УО. Таким образом, в идеале размер панели и азимут падающего луча не приводят к ошибке измерения дальности. Необходимо учитывать только систематическую поправку (7).

Рассмотрим КРС, состоящую из трех рядов УО с гранями без покрытия. Как известно, при полном внутреннем отражении света от граней УО дифракционная картина отраженного излучения в дальней зоне имеет вид одного центрального и шести периферийных пятен. Специальный разворот каждого УО в плоскости панели позволяет получить кольцо интенсивности, которое формируется боковыми пятнами каждого УО. Поскольку дифракционная картина РС образована всеми УО, то и на приемное устройство приходят фотоны, отраженные от всех УО. Пусть данная КРС состоит из трех рядов УО по 36 штук в каждом (см. рис.3,б), n – номер УО в кольце ($n = 0, 1, \dots, 35$), m – номер ряда ($m = 0, 1, 2$), R – радиус КРС. Учитывая кольцевую симметрию КРС, без потери общности можно принять $\varphi = 0$.

Тогда для временной задержки импульса, отраженного от УО с индексами m и n , и с учетом (7) получим следующее выражение:

$$\Delta\tau_{mn} = -\frac{R}{c} \sin\theta \cos\left(\frac{\pi}{18}n\right)(1 + dm) + \Delta\tau_S. \quad (16)$$

Суммарный отраженный импульс в этом случае находится из выражения

$$I(t) = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^{35} I_{mn}(t); \quad (17)$$

он представлен на рис.5 для различных значений углов падения θ и длительностей исходных импульсов 50 и 100 пс при $R = 230$ мм и $d = 40$ мм.

Из рис.4 и 5 следует, что центр тяжести распределения времени прихода ответных импульсов смещается только на величину, равную задержке импульса в одиночном УО. Если число ответов достаточно велико, то среднее время появления фотоэлектрона в приемном тракте лазерного дальномера совпадает с центром тяжести ответного импульса. Другими словами, систематическая погрешность измерений (смещение времени), обусловленная размерами панели, равна нулю, а случайная погрешность равна среднеквадратичной длительности ответного импульса. Сохранение точности измерений требует соответствующего увеличения частоты следования зондирующих импульсов. Так называемые нормальные точки получаются путем усреднения измерений на временном интервале 300 с. СКО, полученные по нормальным точкам, оказываются меньше в \sqrt{N} раз.

Итак, в одноэлектронном режиме регистрации при числе измерений $N > 100$ систематическая составляющая поправки измерений дальности теряет зависимость от размеров симметричной РС, но требуемая точность может быть достигнута только путем усреднения многократных измерений. На практике из-за воздействия внеш-

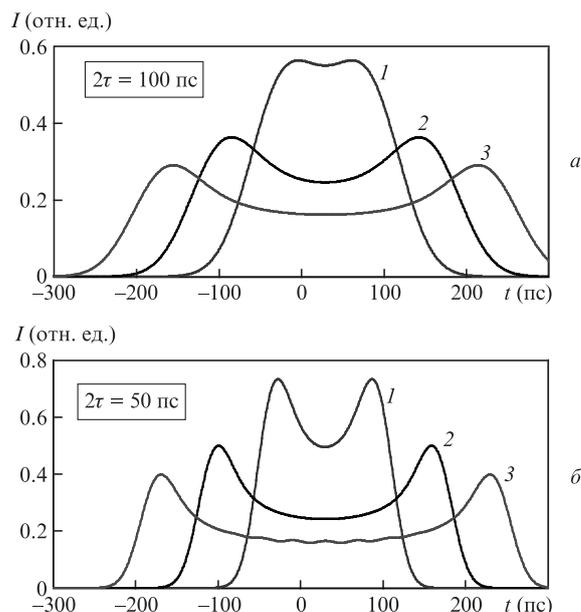


Рис.5. Уширение импульсов гауссовой формы при различных значениях 2τ ; $\theta = 5^\circ$ (1), 10° (2) и 15° (3).

них факторов (например, погодных условий) число измерений может составлять всего 10–20, и тогда важную роль приобретает СКО одиночного измерения.

5. Кольцевая ретрорефлекторная система, состоящая из двухпятенных УО увеличенного размера

Рассмотрим проблему уменьшения случайной погрешности одиночного измерения при увеличении энергии отраженного сигнала в направлении приемника лазерного дальномера.

Для увеличения энергии ЭПР увеличивают в нужном направлении. Как известно, явление абберации скорости [1] при движении космического аппарата приводит к тому, что отраженный луч отклоняется в плоскости, образованной вектором скорости КА и линией визирования. Это означает, что диаграмма направленности отраженного излучения, или зависимость ЭПР от угловых координат, должна быть адаптирована к КА с определенными параметрами и высотой орбиты. Спутники ГЛОНАСС имеют только одноосную ориентацию, поэтому РС вращается в плоскости, ортогональной направлению на Землю. Угловая абберация скорости для этих спутников равна примерно $5''$.

Одним из перспективных способов решения проблемы увеличения ЭПР является использование кольцевой РС, состоящей из двухпятенных УО увеличенного размера. Двухпятенная дифракционная картина формируется за счет контролируемого изменения одного из двугранных углов (рис.6). Грани таких УО должны быть покрыты специальным диэлектрическим покрытием для того, чтобы, с одной стороны, сформировать нужную диаграмму направленности, а с другой – уменьшить ее термические искажения.

Оптимальная диаграмма направленности обеспечивается выбором размера УО (42–48 мм) и угла развала (отклонения угла между отражающими гранями УО от 90°)

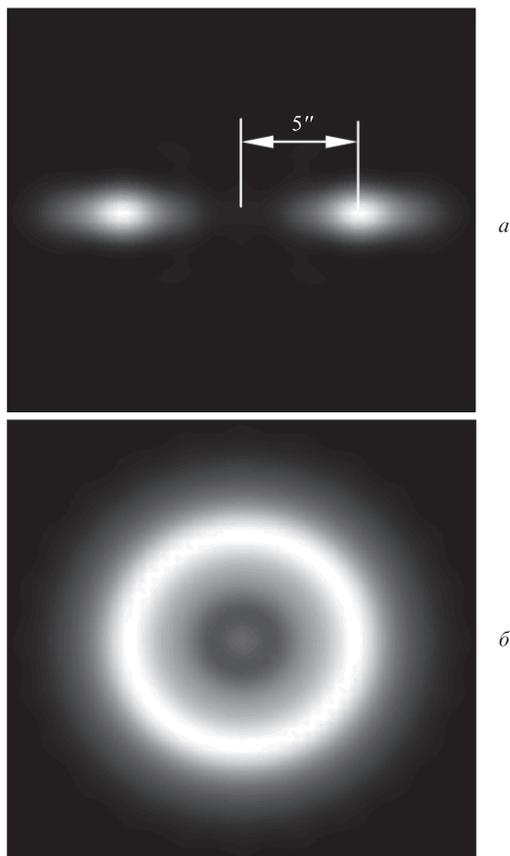


Рис.6. Диаграмма направленности двухпятенного УО (а) и всей КРС (б).

2.2''–2.5''. Если линия, соединяющая пятна, также располагается в этой плоскости, то при угловом расстоянии между пятнами, равном удвоенному значению угловой абберации, одно из пятен как раз попадет на приемник отраженного сигнала. Это позволяет снизить потери его энергии, возникающие, если дифракционная картина имеет вид одного или семи пятен [6, 10].

Однако целесообразность применения КРС не исчерпывается увеличением ЭПР. Покажем, что в этом случае можно уменьшить СКО одиночного измерения.

Зададим ориентацию УО в КРС проекцией ребра двугранного угла, который отличается от 90° , на плоскость, образованную всеми основаниями УО. Для того чтобы хотя бы один УО отразил свет в нужном направлении, необходимо все УО в панели разворачивать относительно друг друга на определенный угол; например, для 18 УО этот угол равен 10° . Угловой размер каждого пятна по отношению к центру дифракционной картины зависит от размеров УО: чем больше УО, тем он меньше (например, для диаметра апертуры УО, равного 48 мм, это около 30° по уровню половины интенсивности). Таким образом, соседние пятна складываются и образуется дифракционная картина в виде кольца.

Принцип работы КРС с развернутыми двухпятенными УО заключается в следующем. Рассмотрим гипотетическую ситуацию, когда тангенциальная составляющая скорости КА равняется нулю и угловая абберация отсутствует. В этом случае центр кольцевой дифракционной картины на Земле совпадает с приемником, и отраженного сигнала нет. При движении спутника в ту или иную сторону со скоростью, для которой угловая абберация

равна угловому размеру дифракционной картины, какая-то часть кольца «наезжает» на приемник. Эта часть образована одним из двух пятен УО, определенным образом ориентированного в РС. Таких УО в принципе может быть несколько.

Таким образом, сигнал, отраженный в направлении лазерного дальномера на Земле, формируется не всеми УО, как, например, для плоской панели УО без покрытия [6, 10], а только несколькими, в идеале двумя УО на противоположных сторонах КРС, которые имеют примерно одинаковую ориентацию (см. рис.3). Использование не одного, а двух УО с одинаковой ориентацией, разнесенных на некоторое расстояние, позволяет решить важную задачу снижения СКО одиночных измерений дальности.

Если в КРС используются 36 УО, то при развороте каждого из них на 10° относительно следующего с каждой стороны КРС суммируются сигналы от трех соседних УО. Вообще выбор оптимального размера УО и их общего числа позволяет получить максимально возможное значение ЭПР для такой КРС независимо от азимута и угла места наблюдения КА.

Сравним погрешности однократных измерений для двух КРС, состоящих из УО без покрытия (рис.5) и из двухпятенных УО (рис.7). В первом случае СКО σ однократного измерения пропорционально размерам панели. Если сигнал имеет длительность 50 пс (ширина по уровню уменьшения сигнала в e раз), то в зависимости от угла падения θ на временной шкале возникают следующие уширения: при $\theta = 5^\circ, 10^\circ$ и 15° СКО $\sigma = 54, 103$ и 153 пс соответственно (см. рис.5). С учетом того, что задержка импульса на 10 пс приводит к изменению дальности на ~ 3 мм, для СКО однократного измерения дальности по-

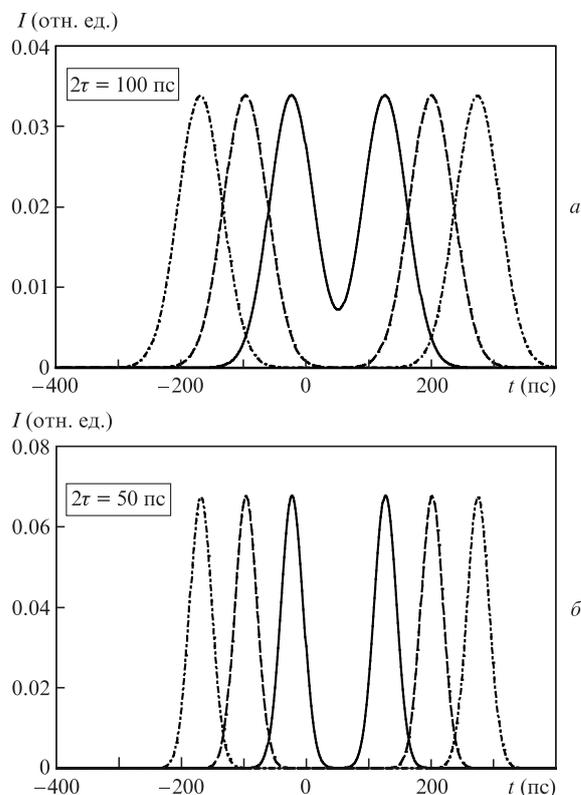


Рис.7. Уширение импульса гауссовой формы при различных значениях 2τ : $\theta = 5^\circ$ (сплошная кривая), 10° (штриховая кривая) и 15° (штрихпунктир).

лучаем 16, 31 и 46 мм соответственно. При длительности сигнала 100 пс уширения составляют 62, 108 и 156 пс.

В случае КРС из двухпятенных УО (рис. 7), в отличие от прямоугольной панели и КРС из УО без покрытия, отраженный импульс не растягивается, а распадается на два, сохраняя в идеале исходную гауссову форму. Каждое СКО определения центра тяжести этих двух сигналов равно корню из суммы квадратов их СКО (при наличии сигнальных фотонов от УО с двух сторон РС), т.е. для длительности исходного импульса 50 пс это $18\sqrt{2} = 25$ пс, а для длительности 100 пс это $35\sqrt{2} = 49$ пс, независимо от угла падения. При угле падения $\theta = 15^\circ$ и длительности импульса 50 пс СКО для двухпятенных УО с апертурой 48 мм в шесть раз меньше, чем СКО для УО без покрытия с апертурой 28 мм.

6. Выводы

Систематическая погрешность измерения дальности до симметричных ретрорефлекторных систем с помощью лазерного дальномера определяется задержкой лазерного импульса в одиночном уголковом отражателе. В то же время СКО однократных измерений дальности определяется размерами РС и расположением УО, а также в общем случае – параметрами УО: размерами, углами между гранями УО, типом покрытия граней. СКО однократных измерений уменьшается, если кольцевая ретрорефлекторная систем образована двухпятенными УО увеличенного размера. Дифракционная картина в этом случае форми-

руется за счет заданного угла между двумя отражающими гранями УО и специального интерференционного покрытия граней, обеспечивающего определенный сдвиг фаз ортогональных компонент электрического вектора при отражении. Теоретически СКО может быть уменьшена в несколько раз при использовании УО с апертурой 42–48 мм и «развалом» двухгранного угла $2.4''$. Преимущество такой КРС реализуется при использовании коротких зондирующих импульсов (до 100 пс) и больших углов падения света на КРС (более 5°).

1. Degnan J.J. <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/1993/MillimeterAccuracySatelliteLaserRangingReview.pdf>.
2. Arnold D. http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/1979/Arnold_SAO_Spcl_Rpt_382.pdf.
3. Васильев В.П., Шаргородский В.Д. *Электромагнитные волны и электронные системы*, № 7, 6 (2007).
4. Садовников М.А. *Электромагнитные волны и электронные системы*, № 12, 13 (2009).
5. Корнеев В.И. *Опт.-мех. пром.*, № 12, 6 (1985).
6. Садовников М.А., Соколов А.Л., Шаргородский В.Д. *Успехи современной радиоэлектроники*, № 8, 55 (2009).
7. Белов М.С., Васильев В.П., Гашкин И.С., Пархоменко Н.Н., Шаргородский В.Д. *Электромагнитные волны и электронные системы*, № 7, 11 (2007).
8. Садовников М.А. *Электромагнитные волны и электронные системы*, № 12, 7 (2009).
9. Otsubo T., Appleby G.M., Gibbs P. *Surveys in Geophysics*, № 22, 509 (2001).
10. Соколов А.Л., Мурашкин В.В. *Оптика и спектроскопия*, **111**, 900 (2011).