

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.786.3

НЕРАССТРАИВАЕМЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УГЛОМЕРОВ С НЕПОДВИЖНОЙ ЛИНИЕЙ ВИЗИРОВАНИЯ

© 2010 г. А. Я. Гебгарт, канд. техн. наук; М. П. Колосов, доктор техн. наук

ОАО “НПП “ТЕОФИЗИКА-КОСМОС”, Москва

E-mail: yanuch2003@inbox.ru

Рассматриваются оптические системы статических угломеров, снабженные каналом геометрического эталона. На основе концепции о совмещении в канале геометрического эталона коллиматора и зеркально-призменной системы в виде единого моноблока создан ряд нерасстраиваемых оптических систем угломеров с неподвижной линией визирования. Среди этих систем наилучшей является система с бесклееевым каналом геометрического эталона, выполненным в виде новой призмы с тремя коллиматорами-обскурами.

Ключевые слова: нерасстраиваемые оптические системы статических угломеров, канал геометрического эталона, оптические системы звездных приборов ориентации и навигации космических аппаратов.

Коды OGIS: 120.4570, 220.4830

Поступила в редакцию 15.04.2010

Введение

За время, прошедшее после опубликования статьи [1], разработан ряд новых нерасстраиваемых оптических систем угломеров с неподвижной линией визирования. Как правило, эти оптические системы применяются в звездных приборах ориентации и навигации космических аппаратов (КА) [2]. Такое применение вызывает ряд специфических требований к конструкции прибора. Помимо обеспечения его нерасстраиваемости, необходимо минимизировать габаритно-массовые характеристики прибора и повысить срок его активного существования на КА.

Традиционно нерасстраиваемость статических угломеров обеспечивалась за счет введения в их оптическую систему двух элементов: коллиматора и зеркально-призменной системы (ЗПС) ввода излучения коллиматора во входной зрачок объектива угломера [1, 3]. Этот дополнительный оптический канал в рассматриваемых приборах называют каналом геометрического эталона (КГЭ). Стремление к минимизации

габаритно-массовых характеристик статических звездных приборов привело к идее совмещения указанного коллиматора и ЗПС в едином моноблоке. При этом такие моноблоки для сохранения своих оптических свойств должны быть геометрически стабильными (сохранять свое геометрическое подобие).

Ниже рассмотрены три таких оптических системы, в которых в той или иной мере обеспечиваются рассмотренные приоритеты проектирования статических звездных приборов. Назначение всех трех угломеров – определение координат звезды относительно посадочного места прибора.

1. Оптическая система угломера I

Оптическая система угломера I (рис. 1) содержит объектив 8 с апертурной диафрагмой (входным зрачком) 7, в фокальной плоскости которого установлен матричный приемник излучения (МПИ) 9. Объектив, представляющий многолинзовую конструкцию, на рисунках показан упрощенно в виде его первой и последней

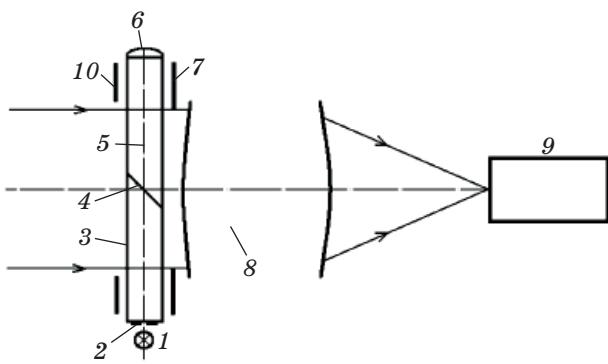


Рис. 1. Оптическая система угломера I: 1 – осветитель, 2 – диафрагма, 3 – призма, 4 – светоделитель с клеевым слоем, 5 – призма, 6 – сферическое зеркало (объектив коллиматора), 7 – апертурная диафрагма, 8 – объектив, 9 – МПИ, 10 – выходное окно бленды.

оптической поверхности. ЗПС, расположенная перед объективом, состоит из точечной диафрагмы 2, призмы 3, светоделителя 4 (клеевой слой), призмы 5, сферического зеркала 6 (объектив коллиматора). Диафрагма 2 и все диафрагмы на призмах, которые рассматриваются ниже, наносятся фотолитографическим методом. Осветитель 1 расположен перед точечной диафрагмой 2, которая совмещена с фокусом сферического зеркала 6. Перед ЗПС расположено выходное окно бленды 10 (ее последняя диафрагма). ЗПС представляет собой склеенный моноблок из оптических деталей, который функционально выполняет еще и роль защитного стекла объектива. Излучение от звезды в угловом поле объектива, пройдя бленду, ЗПС и объектив, сфокусируется на МПИ. При включении осветителя 1 его излучение последовательно проходит элементы 2, 3, 4, 5, 6, 5, 4 и выйдет из ЗПС в виде параллельного пучка лучей, который после объектива 8 создаст на МПИ 9 в центральной зоне его матрицы пикселов изображение диафрагмы 2 (в виде светящейся марки).

Будем считать, что конструктивными мерами обеспечено стабильное угловое положение моноблока ЗПС относительно посадочного места угломера, а пучок лучей, выходящий из ЗПС (от диафрагмы 2), параллелен нормали плоскости посадочного места угломера. Этот пучок формирует визирную линию прибора, которая проходит через главные точки объектива 8 и энергетический центр [4, 2] изображения диафрагмы 2 на матрице пикселов приемника 9. Отметим, что в этом угломере фактическое из-

мерение координат цели осуществляется относительно энергетического центра изображения диафрагмы 2, который является началом отсчетной системы координат (СК) прибора [2] и который, по существу, описывает угловое положение нормали к посадочной плоскости прибора в его угловом поле в пространстве предметов оптической системы. Так как после ЗПС ход лучей от звезды и коллиматора является совместным, то в силу этого любые изменения положения линз объектива 8 и матрицы приемника излучения 9 приводят к одновременному и одинаковому смещению изображений звезды и диафрагмы 2 по указанной матрице. То есть расстояние между изображениями звезды и диафрагмы 2 (началом отсчетной СК) остается неизменным. В силу этого, микроперемещения и микрозаклоны элементов, расположенных после ЗПС, приводящие к совместному перемещению изображений звезды и диафрагмы 2 по матрице пикселов, на точность измерения угломера влияния не оказывают. Поэтому такой угломер считается нерасстраиваемым.

Толщина ЗПС вдоль оптической оси объектива по сравнению с известными оптическими схемами [1, 3] минимальна и, следовательно, входной зрачок объектива и выходное окно бленды максимально приближены, что в свою очередь обеспечивает минимизацию габаритов бленды [4]. Однако изображение звезды в этой оптической системе будет несколько искажено. Это объясняется тем, что лучи от звезды проходят через три отдельные зоны (через пластину 3, через клеевой слой со светоделителем 4, через пластину 5). Так как каждая из этих зон обладает своей остаточной (технологической) клиновидностью, то это приводит к троению изображения звезды, что может приводить к некоторому ухудшению точности измерений прибора.

2. Оптическая система угломера II

Указанное троение изображения звезды исключается в оптической системе угломера II. Она содержит (рис. 2) такие же объектив 8 с апертурной диафрагмой (входным зрачком) 7, в фокальной плоскости которого установлен матричный приемник излучения (МПИ) 9. Ее ЗПС (КГЭ), расположенная перед объективом, состоит из точечной диафрагмы 2, призмы 3, светоделителя 4 (клеевой слой), призмы 5, сферического зеркала 6 (объектив коллиматора). Осветитель 1 расположен перед точечной диафрагмой, которая совмещена с фокусом сферического зеркала.

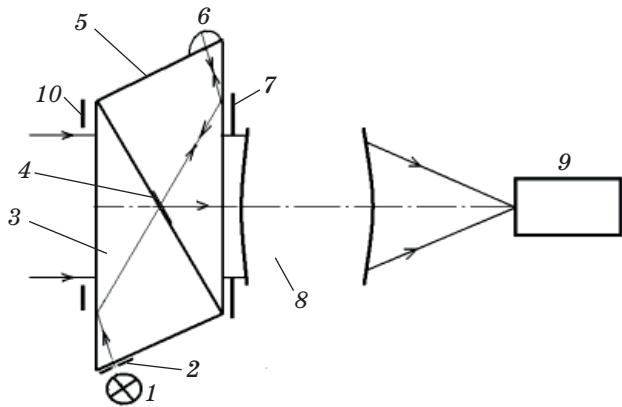


Рис. 2. Оптическая система угломера II: 1 – осветитель, 2 – диафрагма, 3 – призма, 4 – светоделитель с клеевым слоем, 5 – призма, 6 – сферическое зеркало (объектив коллиматора), 7 – апертурная диафрагма, 8 – объектив, 9 – МПИ, 10 – выходное окно бленды.

ла 6. Также перед ЗПС расположено выходное окно бленды 10.

Излучение от звезды в угловом поле объектива, пройдя бленду, ЗПС и объектив, сфокусируется на МПИ. При включении осветителя 1 его излучение последовательно проходит элементы 2, 3, 4, 5, 6, 5, 4 и выйдет из ЗПС в виде параллельного пучка лучей, который после объектива 8 создаст на МПИ 9 в центральной зоне его матрицы пикселов точечное изображение диафрагмы 2.

Оптические системы угломеров I, II отличаются только конструкцией их ЗПС. Как видно из рис. 1, 2, отличие ЗПС угломера II заключается в следующем. Призмы 3, 5 выполнены в виде одинаковых клиньев, которые после склейки образуют плоскопараллельную пластину (защитное стекло). Углы клиньев обеспечивают два дополнительных отражения внутри ЗПС, в которой зона склейки полностью перекрывает световую трубку, образованную выходным окном бленды и входным зрачком объектива. Очевидно, что при такой конструкции ЗПС троение изображения звезды исключено. Однако ее толщина вдоль оптической оси объектива увеличилась.

При использовании оптических систем угломеров I, II в высокоточных звездных приборах необходимо пояснить еще одну возможную проблему. Современные звездные приборы должны работать на космических аппаратах, длительность полета которых может быть более

15–20 лет. Процессы старения и разность величин коэффициентов линейного расширения клея, светоделительной структуры и призм ЗПС при значительных изменениях температуры могут приводить к нарушению геометрического подобия ЗПС. А такое нарушение может приводить к дополнительному угловому отклонению параллельного пучка лучей, выходящих из ЗПС, от направления нормали плоскости посадочного места и, соответственно, к ухудшению точности угломера. С точки зрения эвристики, идеальным конечным результатом этой проблемы было бы создание бесклеевой ЗПС (КГЭ).

Следует также отметить, что в коллиматорах оптических систем I, II излучение от осветителей проходит дважды их светоделители, что, соответственно, приводит к весьма малым коэффициентам пропускания этих коллиматоров. При этом указанные светоделители уменьшают также световой поток рабочей звезды.

3. Оптическая система угломера III

Проблемы оптических систем угломеров I, II оптимально решаются в оптической системе угломера III [5, 6]. Расположение и параметры МПИ 7, объектива 6, выходного окна бленды 8 этой системы практически идентичны двум предыдущим оптическим системам (рис. 3). Отличие этой оптической системы от систем угломеров I, II заключается в конструктивном исполнении апертурной диафрагмы 5 и ЗПС, выполненной в виде одной призмы 3. Эта призма

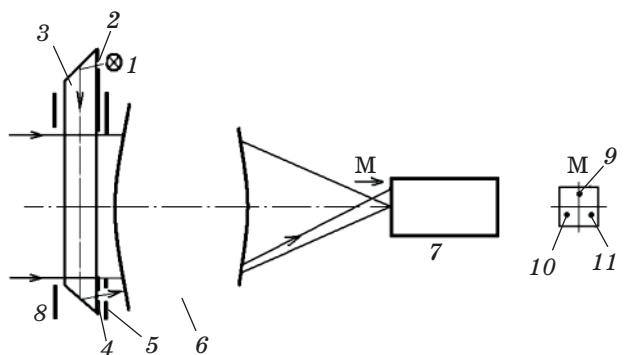


Рис. 3. Оптическая система угломера III: 1 – осветитель, 2 – входная диафрагма (3 шт.), 3 – призма, 4 – выходная диафрагма (3 шт.), 5 – апертурная диафрагма с тремя дополнительными отверстиями, 6 – объектив, 7 – МПИ, 8 – выходное окно бленды, 9, 10, 11 – изображения входных диафрагм на МПИ.

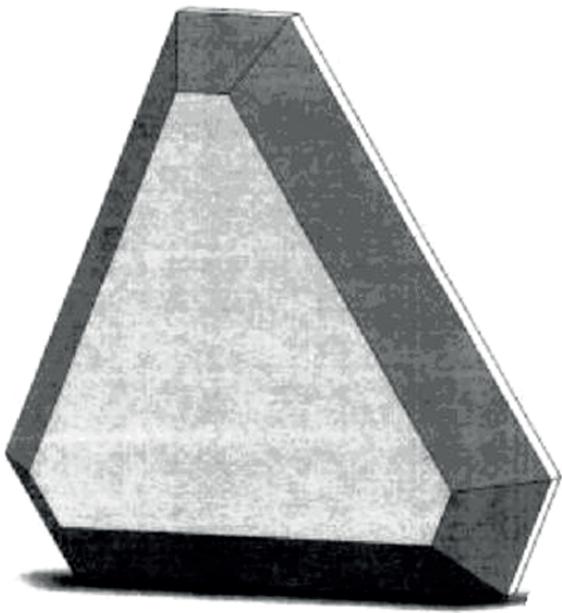


Рис. 4. Призма со стороны выходного окна бленды.

представлена на рис. 4 со стороны выходного окна бленды. Призма устанавливается на посадочной плоскости прибора. На рис. 3 призма 3 показана в виде сечения.

Призма 3 имеет две параллельные преломляющие грани и шесть зеркальных граней, которые попарно образуют три двойных зеркала, меридиональные сечения которых образуют три угла по 120° . На второй преломляющей грани призмы 3 на непрозрачном покрытии (например на хроме) вытравлены фотолитографическим методом шесть точечных отверстий 2, 4 – три входных 2 и три выходных 4. Указанные отверстия попарно образуют три коллиматора-обскуры, у которых соответственно имеются три осветителя 1, расположенные напротив входных диафрагм 2. Также на этой грани имеется прозрачная зона, расположенная концентрично оптической оси, для прохождения излучения от визируемых звезд в объектив поз. 6. Призма 3 расположена перед апертурной диафрагмой 5 объектива 6.

Апертурная диафрагма 5 представляет собой отверстие с центром на оптической оси объектива, формирующее его входной зрачок. Также на некотором расстоянии от края указанного отверстия имеется три небольших отверстия, расположенные под углом 120° друг к другу напротив выходных диафрагм 4 и предназначенные для обеспечения прохождения излуче-

ния от светодиодов 1 через диафрагмы 2, 4 в объектив 6.

Оптическая система работает следующим образом:

излучение от звезды, расположенной в угловом поле объектива 6, пройдя бленду 8, призму 3, апертурную диафрагму 5 (входной зрачок) и объектив 6, фокусируется на МПИ 7. Призма 3 выполняет роль защитного стекла прибора. При включении осветителя 1 излучение последовательно проходит входную диафрагму 2, отражается от зеркальных граней призмы 3, образующих угловое зеркало, и выходит из призмы 3 через выходную диафрагму 4. Далее вышедший из диафрагмы 4 пучок лучей, после прохождения соответствующего отверстия в плоскости апертурной диафрагмы 5 и объектива 6, создает в точке 9 на матрице пикселов приемника 7 точечное изображение диафрагмы 2. На матрице, кроме изображения 9, образуется еще два таких же изображения 10, 11 (см. рис. 3, вид М). Все три изображения симметричны относительно оптической оси объектива и образуют три центральных угла по 120° каждый. Эти три изображения формируются тремя идентичными коллиматорами-обскурами, расположенными под углами 120° .

Углы зеркальных граней призмы 3 относительно выходной преломляющей грани рассчитываются так, чтобы между выходящими из ЗПС пучками лучей и оптической осью объектива 6 был образован угол, обеспечивающий формирование изображения диафрагмы 2 на некотором расстоянии от центра матрицы 7 (см. вид М на рис. 3).

В отличии от ЗПС, используемых в угломерах I и II, в призме 3 отсутствуют kleевые соединения, что обеспечивает высокую стабильность ее геометрии.

Из рис. 3 следует также одна конструктивная особенность объектива 6. Световые размеры его первых линз должны быть несколько увеличены для того, чтобы пропускать нитевидный выходной пучок лучей коллиматора-обскуры. Такой ввод излучения коллиматора позволяет сохранить физическую светосилу объектива 6 по отношению к излучению звезды. В оптических системах других известных угломеров при этом всегда происходит некоторая потеря светового потока от звезды. В угломерах I, II указанный ввод излучения коллиматора осуществляется посредством зон светоделителей, что приводит к уменьшению излучения от звезды на МПИ.

В основе алгоритма определения положения визирной линии этого угломера могут быть положены следующие процедуры.

1. Производится измерение координат энергетических центров (центров тяжести) [2] трех указанных изображений.

2. Определяется положение точки центра тяжести на матрице фигуры из трех указанных точек.

Через полученную точку и главные точки объектива b проходит визирная линия угломера III параллельно нормали к посадочной плоскости прибора. Точка пересечения этой визирной линии с матрицей является началом отсчетной СК прибора.

Современные статические звездные приборы работают по группе звезд, находящейся в его угловом поле [2]. Проведенные исследования показали, что коллиматоры-обскуры с осветителями на основе современных светодиодов обеспечивают потоки излучения, вполне достаточные для нормальной работы КГЭ на фоне визируемых звезд. Экспериментальные исследования проводились с использованием инфракрасного светодиода ЗЛ139БМ и матрицы МПИ STAR-1000.

Для других типов подобных приборов имеются определенные резервы повышения энергетической эффективности:

1. Увеличение времени накопления сигнала МПИ.

2. Использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) вместо выходной диафрагмы коллиматора.

С помощью ДОЭ обеспечивается уменьшение изображения входной точечной диафрагмы на МПИ и тем самым повышается уровень освещенности на засвеченных пикселях приемника. Важность использования ДОЭ объясняется тем, что конструкция призмы с тремя коллиматорами и в этом случае также остается бесклееевой.

Для коллиматора-обскуры справедливы следующие соотношения:

$$\Psi_{\text{геом}} = (D_o + D_k)(L/n)^{-1}, \quad (1)$$

$$\Psi_{\text{диф}} = 2,44\lambda/D_k, \quad (2)$$

где $\Psi_{\text{геом}}$ – геометрическая расходимость лучей на выходе коллиматора-обскуры, $\Psi_{\text{диф}}$ – кругок Эри (дифракционная расходимость лучей на выходе коллиматора-обскуры), D_o – диаметр входной диафрагмы коллиматора-обскуры, D_k – диаметр выходной диафрагмы коллиматора-обскуры, L – оптическая длина пути внутри

коллиматора-обскуры (от входной до выходной диафрагмы), n – показатель преломления призмы, λ – длина волны излучения осветителя.

Размеры призмы 3 (ее высота) и, соответственно, величина L во многом определяются диаметром входного зрачка объектива b . Значения λ и L , в свою очередь, существенно влияют на угловую расходимость излучения после коллиматора-обскуры и, соответственно, на размер его изображения на матрице пикселов приемника излучения. При проектировании коллиматора-обскуры стремятся выбрать размер D_o минимальным. Как правило, он выбирается из технологических соображений.

Будем исходить из формального критерия, что расходимость излучения после коллиматора-обскуры будет близка к минимальной при выполнении условия, что

$$\Psi_{\text{геом}} = \Psi_{\text{диф}}.$$

Из этого условия и формул (1), (2) следует, что значение диаметра выходной диафрагмы, близкого к оптимальному, определяется выражением

$$D_{k\text{opt}} = -0,5D_o + [(0,5D_o)^2 + 2,44\lambda(L/n)]^{0,5}. \quad (3)$$

Рассмотрим следующий пример. Пусть $D_o = 0,05$ мм, $\lambda = 0,0009$ мм, $L = 40$ мм, $n = 1,52$. Тогда, согласно (3), $D_{k\text{opt}} = 0,2166$ мм, а $\Psi_{\text{геом}} = \Psi_{\text{диф}} = \Psi_{\text{min}} = 0,0101$ рад. Этот результат получен из формального критерия. Поэтому при проектировании такого КГЭ диаметр выходной диафрагмы коллиматора-обскуры уточняется после проведения расчета и анализа дифракционного распределения освещенности в изображении входной диафрагмы на матрице пикселов приемника.

То, что угловой размер изображения входной диафрагмы коллиматора-обскуры больше углового изображения звезды, не имеет существенного значения. Важно, что это изображение обладает ярко выраженной симметрией. Следует отметить, что определение центра круглого изображения, диаметр которого может составлять десятки угловых градусов, является решенной проблемой. В качестве такого примера можно сослаться на современные статические приборы ориентации по Земле на основе неохлаждаемых болометрических МПИ [7].

Возможности по минимизации расстояния от бленды до объектива в этой оптической системе очевидны. Формально толщина призмы 3 должна быть больше величины $D_{k\text{opt}}$. На практике используют другие критерии. Например, толщи-

ну призмы 3 выбирают исходя из необходимого отношения указанной толщины к высоте призмы для сохранения качества волнового фронта излучения звезды, идущего в объектив 6.

В работе [1] было показано, что нормаль к защитному стеклу в оптической системе угломера IV параллельна визирной линии этого угломера, что позволяет достаточно просто осуществлять автоколлимационные измерения угла между посадочной плоскостью и этим защитным стеклом. Защитное стекло 3 (рис. 3) позволяет производить автоколлимационный контроль положения угломерного прибора III при его установке на посадочное место под прибор как на точностном стенде, так и на КА.

В принципе, обеспечение стабильного углового положения призмы 3 относительно посадочного можно решить нетрадиционно. Конструкция угломера III выполняется в виде трех отдельных блоков. Первый блок – это призма 3 с осветителями, второй – объектив с МПИ, третий – бленда. Первый блок крепится непосредственно на специальном кронштейне космического аппарата. То есть входная преломляющая грань призмы 3 непосредственно лежит на плоскости посадочного места под нее на КА. Второй блок также крепится на этом кронштейне непосредственно за первым блоком. При этом требования по обеспечению геометрической стабильности второго блока существенно снижаются по сравнению с первым блоком. Третий блок (бленда) устанавливается на кронштейне перед первым блоком.

Заключение

На основе концепции о совмещении в КГЭ коллиматора и ЗПС в виде единого моноблока создан ряд нерасстраиваемых оптических систем угломеров с неподвижной линией визирования. Среди этих систем наилучшей является система с бесклемевым КГЭ, выполненным в виде новой призмы с тремя коллиматорами-обскурами,

отличающаяся повышенной стабильностью геометрической схемы. Этот КГЭ позволяет эффективно минимизировать расстояние от бленды до объектива, что очень важно для широкоугольных звездных приборов. Его использование практически не приводит к уменьшению энергии излучения от цели (звезды) и позволяет осуществлять автоколлимационный контроль положения угломерного прибора при его установке на посадочное место под прибор как на точностном стенде, так и на КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колосов М.П., Лысюк Ю.В. Анализ нерасстраиваемых оптических систем угломеров с неподвижной линией визирования // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 8. С. 61–65.
2. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 248 с.
3. Колосов М.П. Оптика адаптивных угломеров. М.: ООО “СКАН-1”, 1997. 212 с.
4. Якушенков Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М.: Радио и связь, 1981. 180 с.
5. Гебгард А.Я., Колосов М.П., Гусев М.Е. Углоизмерительный прибор // Патент России № 85226. 2009.
6. Гебгард А.Я., Колосов М.П. Оптические системы статических угломеров с каналом нерасстраиваемого моноблочного геометрического эталона // Материалы научно-практической конференции “Оптика, фотоника и оптоинформатика в науке и технике” на V Международном форуме “OPTICS-EXPO 2009”.
7. Пирогов М.Г., Видецких Ю.А., Федосеев В.И., Варламов В.И., Зензинов С.Ю., Колосов М.П., Стрижова Н.М., Гебгард А.Я., Денисов В.В., Терехов М.А. Приборы ориентации по Земле на основе неохлаждаемых микроболометрических матричных приемников для космических аппаратов (ПОЗ) // XX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения // Тез. докл. НПО “Орион”. М.: НПО “Орион”, 2008. С. 66–67.