

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ ИСКУССТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ**

Рассмотрены методы дистанционного определения формы поверхности искусственных космических объектов (ИКО) с помощью телевизионного лазерного локатора (ТВЛЛ). Описан метод телевизионной лазерной локации. Предложена трехконтурная система наведения и формирования луча подсветки ТВЛЛ. Приведено описание различных режимов работы ТВЛЛ: одно- и многозональные, одно- и многоимпульсные. Дана оценка разрешающей способности ТВЛЛ по глубине.

**Ключевые слова:** трехмерное изображение, определение рельефа поверхности, форма ИКО, оптическое зондирование спутников

### **Введение**

Количество и разнообразие искусственных космических объектов (ИКО) продолжает увеличиваться. Все более актуальной становится задача идентификации ИКО по выбранному ряду признаков. Признаками ИКО являются: местоположение, скорость, направление движения, размер, очертания, цвет, вид деталей конструкции, надписи и, наконец его пространственная форма. Пространственная (трехмерная) форма поверхности объекта наблюдения является его наиболее информативным признаком.

Существуют различные методы определения пространственной формы объектов, которые можно разделить на активные с лазерной подсветкой объектов и пассивные с использованием естественной подсветки. Пассивные методы привлекательны большей скрытностью и меньшим энергопотреблением. Наибольшее распространение получили пассивные многокурсовые методы, в основе которых лежит метод триангуляции для определения глубины рельефа поверхности объектов. В соответствии с этими методами в каждый момент времени объект

наблюдения фиксируется под некоторым углом (ракурсом) наблюдения. В зависимости от положения наблюдателя и поворота объекта угол наблюдения может изменяться. Серия снимков объекта под различными углами в ряде случаев позволяет определить его пространственную форму. Многоракурсный метод определения формы характерен для фотограмметрии [1]. Минимально необходимое количество снимков объекта различных ракурсов равно двум, что соответствует стереоскопической съемке с получением стереопары изображений объекта. Рассматривание стереопары с помощью стереоскопа позволяет человеку во многих случаях ощутить трехмерный характер формы объекта наблюдения и сделать правильное заключение о форме его поверхности. Особенностью зрения человека является не только наличие механизма нейронального анализа величины диспаратности (различий) стереопары, образованной на сетчатках двух глаз, но и наличие механизма воображения, работающего на основе опыта (памяти) восприятия сходных с наблюдаемым объектов. Последнее свойство зрения (мозга человека) не используется в автоматической фотограмметрии [2], нацеленной на быструю фиксацию новых пространственных форм. При автоматическом восстановлении (моделировании) формы объекта используются алгоритмы выявления соответствующих точек на обоих изображениях стереопары. При решении задач идентификации объектов с известными вариантами формы, в принципе, появляется возможность распознавать такие объекты с помощью оптимальных пространственных фильтров, в частности с использованием технологий обучаемых нейронных сетей.

Подчеркнем, что при любом способе многокурсного воспроизведения формы объекта, необходимо наличие достаточного количества отождествляемых (соответствующих) точек на изображениях анализируемой серии фотоснимков. В частности, этим способом не представляется возможным определить форму однородно окрашенного и освещенного объекта наблюдения [3].

Космические объекты, как правило, находятся на большом удалении от точки наблюдения, и для получения качественной стереопары необходима достаточно большая база стереоскопического наблюдения для относительно неподвижных объектов. При относительном движении объекта и наблюдателя такая база может быть получена с задержкой на время их относительного смещения или поворота (облета) на необходимую величину [4]. Наличие временной задержки при определении формы объектов (снижение времени реакции) в ряде случаев может представляться нежелательным фактором.

Отмеченные недостатки многокурсных методов определения пространственной формы ИКО могут быть преодолены с использованием метода телевизионной лазерной локации.

### Метод телевизионной лазерной локации

Метод телевизионной лазерной локации (ТВЛЛ), разработанный в Научно-исследовательском институте телевидения (Россия) [5], позволяет получить карту глубины удаленного объекта наблюдения за двойное время пролета одного импульса света от точки наблюдения до

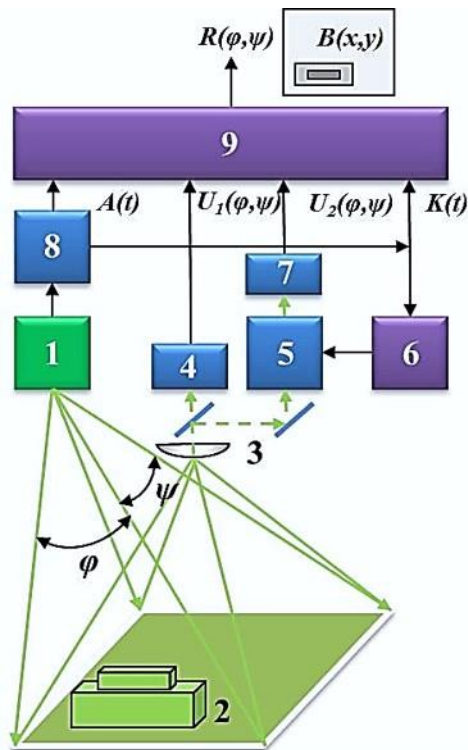


Рис. 1 Функциональная схема телевизионного лазерного локатора.

объекта. Разрешение по углу изображения карты глубины при этом ограничено лишь разрешением телевизионного (фото) датчика, а разрешение по глубине для объектов типа ИКО единицами сантиметров. По сравнению с другими активными (лазерными) методами определения пространственной формы объектов метод ТВЛЛ обладает уникальным сочетанием высокой угловой разрешающей способности телевизионной

(фото) системы и быстродействием со временем экспозиции в десятки наносекунд.

На рис. 1 приведена функциональная схема телевизионного лазерного локатора (ТВЛЛ). Источник света 1 широким пучком подсвечивает поверхность 2 трехмерного объекта короткими импульсами излучения. Отраженное от поверхности излучение поступает через оптическую систему 3, состоящую из объектива и разделяющей поток излучения пары зеркал, на два фотодатчика (приемника излучения). Датчик 4, например, ПЗС (КМОП) матрица формирует на своем выходе пропорционально экспозиции излучения, прошедшего через полупрозрачное зеркало, на каждый из ее сенселей, обычное изображение объекта. Другой датчик 5, например, электронно-оптический преобразователь (ЭОП), используя излучение, отраженное от пары зеркал, также формирует на своем выходе (экране) изображение. Однако изображение на экране ЭОП необычное, поскольку во время прихода отраженного от объекта излучения ЭОП быстро меняет (модулирует) свое усиление при воздействии сигнала блока управления б. Например, при линейном увеличении усиления ЭОП в процессе приема излучения дальние точки однородно окрашенной поверхности объекта на экране ЭОП будут выглядеть более яркими по сравнению с ближними, поскольку импульс света от них приходит позже, когда усиление ЭОП уже сильно увеличилось. Необычность изображения на экране ЭОП обусловлена одновременным воздействием двух факторов на его формирование: тона раскраски и рельефа поверхности объекта наблюдения. Яркость элемента изображения определяется как коэффициентом отражения импульса света от элемента поверхности объекта, так и запаздыванием прихода этого импульса на приемник пропорционально удаленности элемента поверхности. Подчеркнем, что запаздывание влияет на яркость элемента изображения в основном из-за модуляции усиления ЭОП и незначительно из-за уменьшения энергии света приходящего на приемник пропорционально квадрату расстояния до элемента объекта. Изображение с экрана ЭОП репродуцируется сочлененным с ним фотодатчиком 7, например, ПЗС (КМОП) матрицей, обеспечивающей его последующую развертку. Момент излучения импульса света источника подсветки фиксируется специальным быстродействующим одноэлементным фотодатчиком 8, сигнал которого запускает счетчик времени задержки начала формирования сигнала модуляции ЭОП. Система формирования карты глубины рельефа поверхности объекта наблюдения 9 обеспечивает поэлементное

вычисление отношения сигналов соответствующих элементов (сенселей) фотодатчиков 7 и 4. Полученная матрица отношений с учетом формы импульсов излучения подсветки и закона модуляции усиления ЭОП служит основой для формирования карты глубины –  $V(x,y)$  удаленного объекта наблюдения.

С использованием ТВЛЛ появляется возможность синтеза цветного объемного изображения объекта наблюдения. При этом исходная информация о цвете элементов объекта кодируется как обычно тремя R (красная), G (зеленая) и B (синяя) компонентами полного изображения, а информация о дальности этих элементов дополнительной компонентой дальности – D [6]. D-компоненту в литературе по обработке изображений

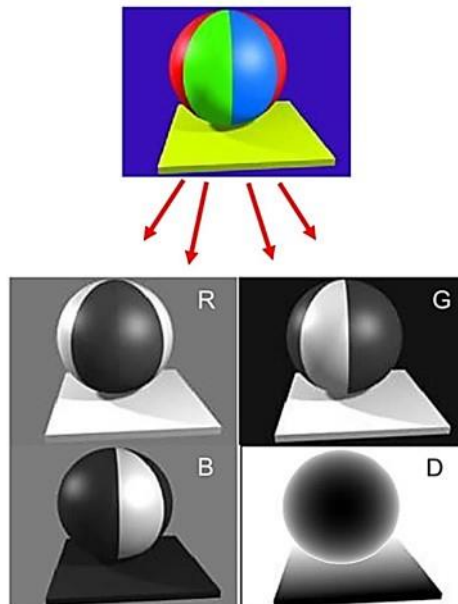


Рис. 2. Четыре компоненты полного RGBD телевизионного изображения

принято называть картой глубины. Полное четырехкомпонентное RGBD изображение, приведенное на рис. 2, может быть воспроизведено на четырех одноцветных мониторах или на одном цветном стереоскопическом для его визуального анализа. Для быстрой идентификации объектов наблюдения следует использовать автоматическое распознавание их образов в виде R, G, B и D компонент.

Метод ТВЛЛ может использоваться для получения телевизионного изображения карт глубины с частотой кадров, например, 50 Гц или отдельных карт глубины объектов без создания видеопотока. В качестве импульсных источников света для освещения ИКО удобно использовать лазеры.

Приведем математическое описание метода телевизионной лазерной локации. Сигнал датчика 4 (рис. 1) можно представить выражением:

$$U_1(\varphi, \psi) = M \frac{I(\varphi, \psi) \rho(\varphi, \psi)}{f[r^2(\varphi, \psi)]} \int_{t_1}^{t_2} A \left[ t - \frac{2r(\varphi, \psi)}{c} \right] dt \quad (1)$$

где:  $\varphi$  – горизонтальная, а  $\psi$  – вертикальная угловые координаты точки поверхности трехмерного объекта (начало координат, излучатель и фотодатчик находятся в одной точке пространства),  $M$  – постоянная определяемая в частности параметрами оптической системы ТВЛЛ,  $I(\varphi, \psi)$  – угловое распределение интенсивности лазерного излучения,  $\rho(x, y)$  – распределение коэффициента отражения поверхности объекта,  $r(\varphi, \psi)$  – координата дальности точки поверхности объекта,  $f[r^2(\varphi, \psi)]$  – функция, учета зависимости освещенности объекта от расстояния до него,  $A(t)$  – форма импульса лазерного излучения;  $t$  – время,  $c$  – скорость распространения лазерного излучения. Пределы интегрирования:  $t_1$  и  $t_2$  взяты с учетом конечности длительности импульса лазерного излучения и расстояния до объекта наблюдения.

При условии нормировки (надлежащем выборе значения постоянной –  $M$ ):

$$\int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = 1, \quad (2)$$

При этом:

$$U_1(\varphi, \psi) = M \frac{I(\varphi, \psi) \rho(\varphi, \psi)}{f[r^2(\varphi, \psi)]}, \quad (3)$$

Сигнал датчика 7 (рис. 1) можно представить выражением:

$$U_2(\varphi, \psi) = M \frac{I(\varphi, \psi) \rho(\varphi, \psi)}{f[r^2(\varphi, \psi)]} \int_{t_1}^{t_2} A \left[ t - \frac{2r(\varphi, \psi)}{c} \right] K(t) dt, \quad (4)$$

где  $K(t)$  – выбранный закон модуляции ЭОП.

С учетом выражений (1) и (4) отношение сигналов фотодатчиков 7 и 4 определяется равенством:

$$O(\varphi, \psi) = \frac{U_2(\varphi, \psi)}{U_1(\varphi, \psi)} = \int_{t_1}^{t_2} A \left[ t - \frac{2r(\varphi, \psi)}{c} \right] K(t) dt \quad (5)$$

Если  $K(t)$  и  $A(t)$  выбраны так, что правая часть этого равенства взаимно-однозначная функция от  $r(\varphi, \psi)$  на выбранном интервале дальности, то и  $O(\varphi, \psi) = O[r(\varphi, \psi)] = O(r)$  – взаимно-однозначная функция дальности на данном интервале дальностей. При этом можно однозначно определить пространственную форму удаленного объекта:

$$R(\varphi, \psi) = r(\varphi, \psi) - r_0 \quad (6)$$

где:  $r_0$  – дальность до ближайшей точки объекта. Определить значение  $r_0$  можно различными способами, обсуждение которых выходит за рамки настоящей статьи.

Приведенное ограничение на выбор функций  $K(t)$  и  $A(t)$  допускает большое разнообразие вариантов их возможного выбора. Рассмотрим некоторые из этих вариантов.

### Однозональный вариант ТВЛЛ

При предельно малой длительности, но конечной энергии импульса излучения лазера его форму можно представить функцией Дирака –  $A(t) = \delta(t)$ . Выберем линейный закон модуляции усиления ЭОП –  $K(t) = at$ , тогда, подставляя эти значения в выражение (5) и используя фильтрующее свойство  $\delta$  – функции, получим:

$$O(\varphi, \psi) = \int_{t_1}^{t_2} \delta \left[ t - \frac{2r(\varphi, \psi)}{c} \right] at dt = \frac{2ar(\varphi, \psi)}{c}, \quad (7)$$

где:  $a$  – постоянная.

При этом пространственная форма объекта определяется простым выражением:

$$R(\varphi, \psi) = \frac{c}{2a} O(\varphi, \psi) - r_0 \quad (8)$$

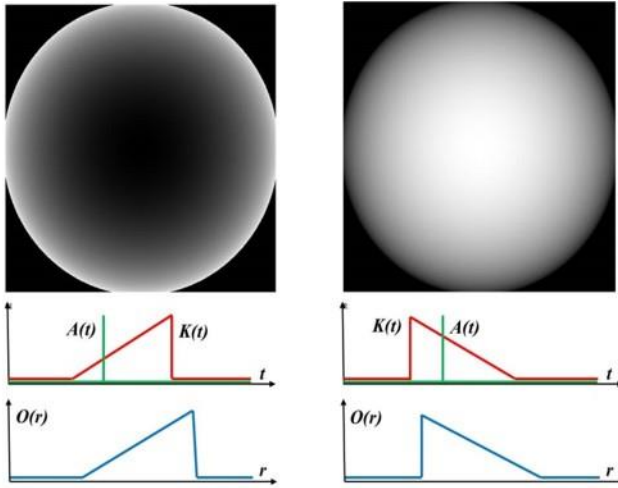


Рис. 3 Прямая (слева) и инверсная (справа) карты глубины пространственной формы сферического объекта наблюдения и графики функций:  $A(t)$ ,  $K(t)$  и  $O(r)$ .

На рис. 3 приведены прямая и инверсная карты глубины объекта наблюдения со сферической формой поверхности, при этом под каждой из них приведены соответствующие формы: светового импульса, сигнала модуляции и сигнала отношения  $O(r)$ . Карта глубины представляет собой изображение, яркость которого:

$$B(x, y) = \beta R(\varphi, \psi), \quad (9)$$

где:  $x = \eta\varphi$  и  $y = \eta\psi$ , а  $\beta$  и  $\eta$  – постоянные.

Инверсную карту глубины можно определить выражением:

$$B_I(x, y) = B_{\max}(x, y) - B(x, y), \quad (10)$$

где:  $B_{\max}(x, y)$  – максимальное значение  $B(x, y)$ .

Важной характеристикой ТВЛЛ является его разрешающая способность. Угловая разрешающая способность ТВЛЛ определяется разрешающей способностью его телевизионных фотодатчиков. Разрешающая способность ТВЛЛ по глубине в основном определяется уровнем шумов этих фотодатчиков, который, в свою очередь, определяются значением дисперсии их фотонных или дробовых (для ЭОП) шумов.



Приведем оценку разрешающей способности ТВЛЛ по глубине с учетом фотонных шумов. Известно, что фотонные шумы описываются статистикой Пуассона, которая при достаточно большом числе фотонов хорошо аппроксимируется статистикой Гаусса. При этом дисперсия нормального закона распределения определяется равенством  $\sigma = \sqrt{n}$ , где  $n$  – среднее число фотонов (математическое ожидание распределения), приходящихся на сенсель фотодатчика к концу цикла накопления, при его заданной постоянной засветке. Выберем шкалу квантования фотосигнала сенселя с шагом  $2a\sigma_k$ , при матожидании  $\bar{n}_k$  приходящимся на середину шага между уровнями  $k$  и  $k+1$ . Вероятность нахождения фотосигнала между этими уровнями, например, при  $a=1$  равна 0,683, а при  $a=2$  равна 0,954 и может быть получена при численном расчете для любого значения  $a$ . При условии равенства вероятностей нахождения фотосигнала между указанными уровнями, при любом  $k$ , шкала квантования является нелинейной.

Значение величины  $k$  – того уровня шкалы в фотонах определяется выражением:

$$n_k = a^2 k(k+1). \quad (11)$$

Максимальное число уровней такой шкалы (элементов разрешения по глубине) –  $k_{\max}$  определяется заданием максимального значения числа фотонов на сенсель фотодатчика –  $n_{\max}$  и постоянной –  $a$  с помощью выражения:

$$k_{\max} \approx \frac{\sqrt{n_{\max}}}{a}. \quad (12)$$

Например, для  $a=1$  и 1000 фотонов на сенсель  $k_{\max} \approx 31$ , для 10000 фотонов на сенсель  $k_{\max} = 100$ .

Число элементов разрешения по глубине, согласно выражению (13) приходится на всю зону по глубине, определяемую длительностью сигнала модуляции ТВЛЛ, такого как приведенный на графиках рис. 3. Последнее означает, что для увеличения числа элементов разрешения по глубине поверхности объекта наблюдения следует максимально сужать размер зоны наблюдения по глубине, уменьшая длительность сигнала модуляции, но сохраняя его размах для максимально возможного отношения видеосигналов фотодатчиков –  $O(r)$ .

### Многозональный вариант ТВЛЛ

Для увеличения разрешения ТВЛЛ по глубине можно наряду с уменьшением размера зоны наблюдения по глубине увеличить число зон приходящихся на рельеф поверхности объекта.

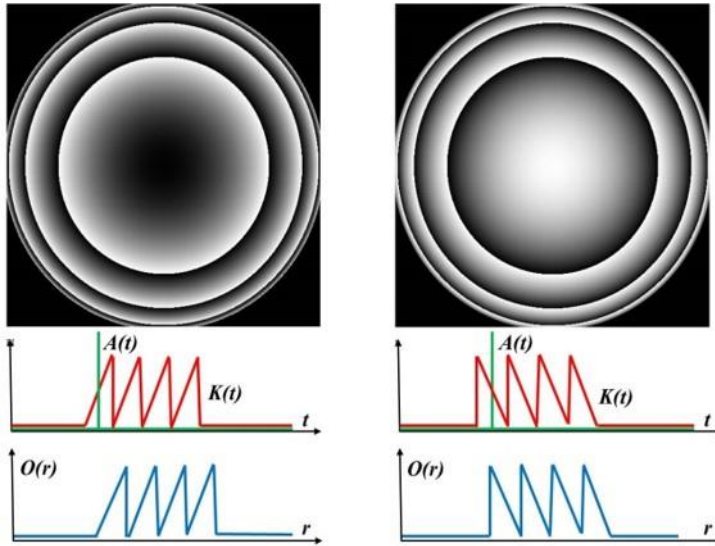


Рис. 4. Прямая (слева) и инверсная (справа) многозональные карты глубины пространственной формы сферического объекта наблюдения и графики функций:  $A(t)$ ,  $K(t)$  и  $O(r)$ .

На рис. 4 приведены прямая и инверсная многозональные карты глубины объекта наблюдения со сферической формой поверхности. Там же приведены соответствующие графики сигналов модуляции и отношения видеосигналов фотодатчиков –  $O(r)$ . Увеличение числа элементов разрешения ТВЛЛ по глубине пропорционально числу зон разрешения, приходящихся на глубину рельефа поверхности объекта. Однако, при многозональном режиме работы в общем случае возникает проблема отождествления принадлежности данного элемента поверхности объекта соответствующей зоне наблюдения. Такое отождествление можно выполнять, используя межзональные границы на картах глубины, которые, выполняя роль изолиний на топографических картах, позволяют производить определение номера зоны наблюдения для данного элемента поверхности. После отождествления появляется

возможность построения единой карты глубины поверхности объекта с высоким разрешением по глубине без разделения ее на зоны глубины. Решение задачи отождествления зон и синтеза цифровой модели рельефа поверхности объекта наблюдения требует разработки соответствующего программного обеспечения. Рассмотренные выше варианты ТВЛЛ предполагают использование коротких мощных импульсов лазерного излучения.

### Импульсный лазер

На рис. 5 приведена функциональная схема импульсного твердотельного лазера с полупроводниковой торцевой накачкой. Эти лазеры, обладая небольшими габаритами и хорошим ресурсом, способны генерировать мощные (единицы мегаватт) короткие (единицы наносекунд) импульсы света с частотой телевизионных кадров. Такие характеристики являются идеальными для освещения ИКО, движущихся с любыми реальными скоростями. Действительно, за время экспозиции, при освещающей вспышке длительностью 10 наносекунд, объект, движущийся на встречных курсах с инспектором, сблизится с ним на величину не более 0,1 мм, что гарантирует отсутствие искажений его пространственной формы по глубине.

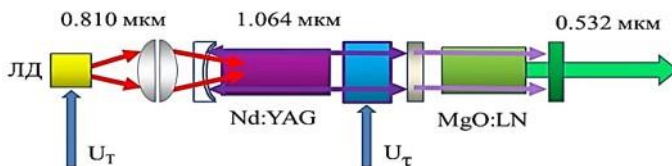


Рис. 5 Функциональная схема импульсного твердотельного лазера с полупроводниковой торцевой накачкой

Согласно функциональной схеме, во время действия токового импульса –  $U_T$ , импульс излучения лазерного диода (ЛД) через концентрирующие линзы и прозрачное для длины волны – 0,810 мкм зеркало резонатора лазера попадает через торец в активный элемент гранатового лазера, осуществляя его накачку. По заднему фронту электрического импульса –  $U_T$  оптического затвора происходит лавинообразное высвечивание накопленной энергии активного элемента

в виде короткого мощного импульса инфракрасного (ИК) излучения с

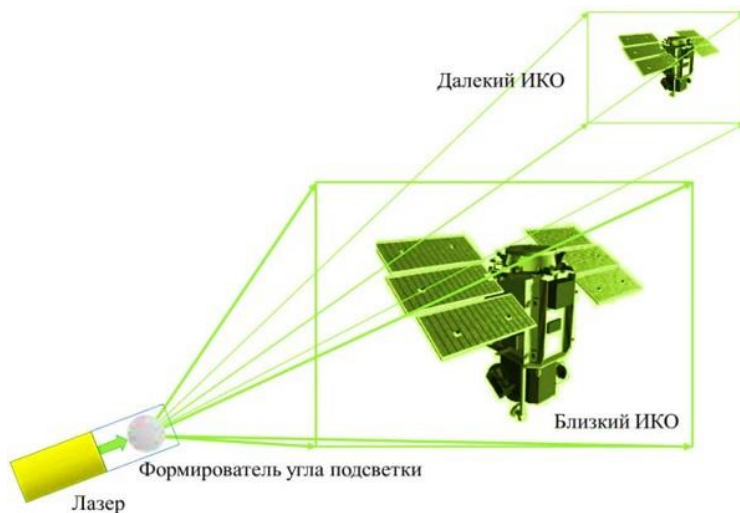


Рис. 6 Схема формирования угла луча подсветки ИКО

длиной волны 1,064 мкм. Этот импульс через полупрозрачное выходное зеркало резонатора лазера попадает в нелинейный оптический элемент, где значительная часть его энергии преобразуется в импульс излучения с длиной волны 0,532 мкм (зеленого цвета), который проходит через зеленый светофильтр, подавляющий ИК излучение. Преобразование длины волны света лазера полезно потому, что современные фотокатоды ЭОП значительно более эффективны в зеленой области спектра, чем в ИК диапазоне [7].

Импульс излучения лазера можно моделировать зависимостью:

$$I(t) = \frac{b^2 t e^{\frac{-bt}{T}}}{T^2}, \quad (13)$$

где:  $b = 1,8$ ,  $T = (2 \div 10)$  нс – длительность импульса на уровне 0,7,  $t = (0 \div \infty)$ . В интервале  $t$  импульса от 0 до  $T$  сосредоточена половина энергии импульса.

## **Формирование луча освещения объекта**

Как известно, луч лазера имеет малую расходимость излучения и для того, чтобы осветить ИКО полностью необходимо расширить пучок излучения лазера на необходимый угол расхождения. При этом для далекого ИКО должен быть сформирован узкий, а для близкого – широкий луч подсветки, как на рис. 6, так чтобы энергия луча максимально расходовалась на освещение объекта, а не пустого пространства.

При формировании луча следует обеспечивать максимальную равномерность освещенности по полю подсветки. Хотя, метод ТВЛЛ допускает как неравномерность окраски, так и неравномерность подсветки объекта, следует принимать в расчет то, что в условиях ограниченности энергии импульса подсветки (10...100 мДж), влияние фотонных и дробовых шумов фотодатчиков на процесс определения пространственной формы объектов наблюдения усиливается при уменьшении их яркости. Это влияние выражается в снижении разрешающей способности метода по глубине (дальности) или обмене разрешения по дальности на разрешение по углу, при соответствующей обработке исходных изображений ТВЛЛ:  $U_1(\varphi, \psi)$  и  $U_2(\varphi, \psi)$ .

## **Наведение луча освещения объекта**

Мало сформировать ширину луча подсветки с учетом дальности до объекта наблюдения, необходимо быстро и правильно навести луч на объект. Оптимальной представляется трехконтурная система наведения луча, показанная на рис. 7.

В качестве первого контура управления наведением можно использовать наземную систему наблюдения за космическим пространством в сочетании с системой ориентации космического аппарата – платформы установки средств инспекции ИКО. Задача этого контура состоит в том, чтобы обеспечить наведение на объект широкоугольной телевизионной камеры, установленной на платформе, как путем наведения телекамеры, так и ориентации самой платформы.

Во второй контур входит указанная широкоугольная телекамера и система управления наведением телевизионного лазерного локатора (ТВЛЛ), оснащенного узкоугольным варифокальным объективом. Задача этого контура состоит в том, чтобы обеспечить наведение на объект одного из фотодатчиков ТВЛЛ, работающего в пассивном режиме малой чувствительности при солнечной подсветке объекта и адаптировать его с

помощью варифокального объектива к наблюдению ИКО в необходимом масштабе.

Третий контур управления – самый быстрый, поскольку оперирует устройством наведения луча ТВЛЛ предельно малой массы. В этот контур входит фотодатчик ТВЛЛ в пассивном режиме и устройство наведения луча ТВЛЛ. Задача этого контура состоит в наведении центральной оси луча подсветки ТВЛЛ на ИКО.

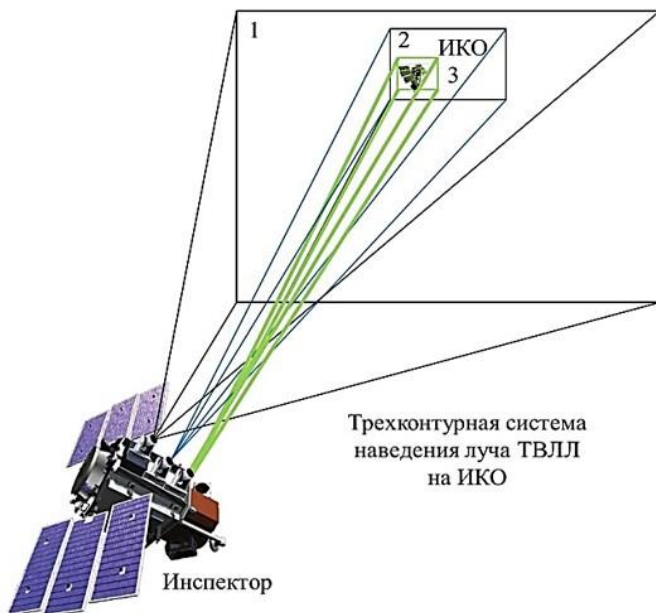


Рис. 7 Трехконтурная схема наведения ТВЛЛ на ИКО

Все контуры управления могут предусматривать либо участие в них оператора, либо наличие в них автоматических систем распознавания образов целей наведения, либо того и другого одновременно. Телевизионная информация всех контуров управления, при наличии автоматических систем распознавания образов целей наведения, позволяет осуществлять не только предварительное наведение ТВЛЛ на ИКО, но и непрерывно отслеживать ИКО в условиях его перемещения относительно инспектора, после захвата ИКО на сопровождение по заданному алгоритму.

## Прием отраженного излучения лазера

Если ИКО не находятся в зоне тени земли, то телевизионный лазерный локаатор будет вынужден работать по нему в условиях интенсивной солнечной засветки ИКО. Средняя энергия отраженного от ИКО излучения Солнца при этом на много порядков превосходит среднюю энергию отраженного лазерного излучения. Для обеспечения нормальной работы ТВЛЛ следует организовать его действие таким образом, чтобы экспозиция отраженного от ИКО солнечного излучения на его фотодатчиках была во много раз меньше чем экспозиция отраженного лазерного излучения. Поскольку экспозиция пропорциональна времени действия излучения, следует оснастить фотодатчики электронными затворами, открываемыми лишь на время прихода на фотодатчики коротких импульсов отраженного лазерного излучения. При использовании такого режима работы ТВЛЛ, солнечное излучение будет восприниматься лишь в течении времени не превышающего, например, 20 наносекунд. В этом случае, при пятидесяти лазерных импульсов в секунду, мощность солнечного излучения будет подавляться в миллион раз. Возможность достижения подобных коэффициентов подавления является наиболее привлекательной характеристикой одноимпульсного (на телевизионный кадр) варианта ТВЛЛ.

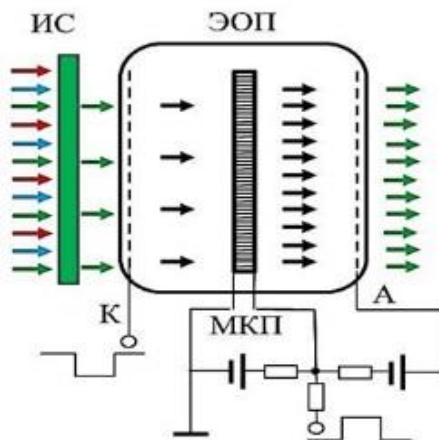


Рис. 8 Электронно-оптический преобразователь (ЭОП)

На рис. 8 приведена функциональная схема ЭОП с микроканальной пластиной (МКП). При подаче на МКП прямоугольного импульса напряжения через времязадающий резистор –  $R$ , происходит заряд емкости МКП –  $C$  по экспоненциальному закону, с постоянной времени:  $\tau=RC$ . Коэффициент усиления ЭОП –  $K(t)$ , согласно графику на рис. 9,

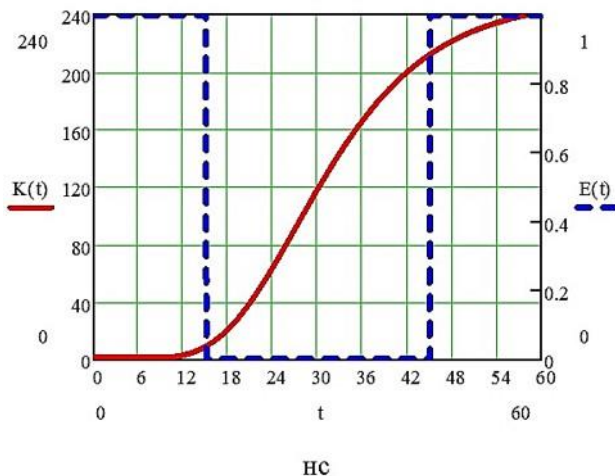


Рис. 9 Зависимость коэффициента усиления ЭОП от времени –  $K(t)$  и график работы его затвора –  $E(t)$  (пунктир).

практически линейно зависит от напряжения на МКП. На этом же рисунке приведен график работы затвора ЭОП –  $E(t)$  в условных единицах. Для организации режима затвора ЭОП удобно использовать подачу импульса напряжения на промежуток катод (К) – МКП, как показано на рис. 8, поскольку для этого достаточно импульса сравнительно небольшого напряжения в несколько сотен вольт. Поскольку ЭОП является чувствительным к свету прибором, работающем в узком диапазоне длин волн лазерного излучения, можно ослабить действие на него солнечного излучения, установив перед его фотокатодом интерференционный светофильтр – ИС (рис. 8) с полосой пропускания соответствующей длине волны лазерного излучения.



## Многоимпульсные варианты ТВЛЛ

Выше был описан одноимпульсный режим работы ТВЛЛ, когда для получения одного телевизионный кадра используется один импульс подсветки объекта. В ряде приложений ТВЛЛ может оказаться удобным использование его многоимпульсного варианта, при котором объект подсвечивается множеством сравнительно слабых импульсов излучения. Энергия отраженных импульсов суммируется фотоприемниками ТВЛЛ в течении времени кадра. Обязательным условием в этом случае является синхронность принимаемых импульсов излучения и импульсов модуляции усиления фотоприемника.

В условиях отсутствия существенных паразитных засветок гораздо

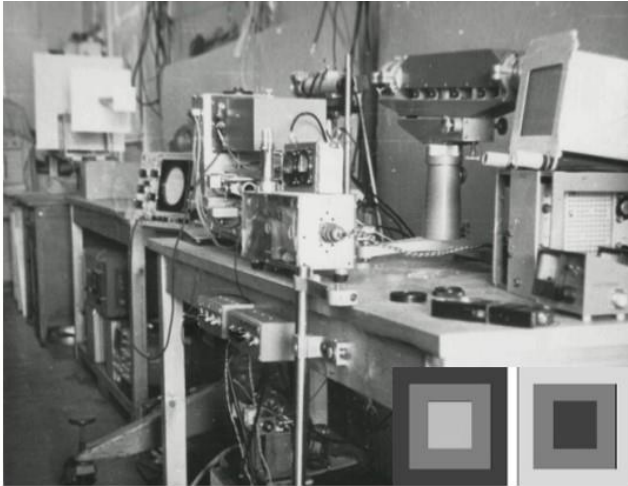


Рис. 10 Макет телевизионного лазерного локатора (ТВЛЛ) НИИ Телевидения.

дешевле использовать лазер непрерывного излучения с внешним модулятором. Например, при создании действующего макета ТВЛЛ в НИИ Телевидения использовалось синусоидально модулированное лазерное излучение и близкая к синусоидальной модуляция МКП ЭОП. При этом модулятор лазера и МКП питались от одного генератора, с установленной частотой – 100 МГц. На рис. 10 приведена фотография этого макета. В правом нижнем углу рисунка приведены карты глубины зондируемого тест-объекта в прямом и инверсном виде, которые воспроизводились на экране черно-белого монитора. При указанной частоте модуляции пространство объекта разбивается на зоны глубины

величиной по семьдесят пять сантиметров вдоль оптической оси ТВЛЛ. При переводе тест-объекта, установленного на специальные рельсы, из одной зоны в соседнюю его тональная раскраска на экране монитора менялась на инверсную.

При синусоидальной модуляции между зонами образуются

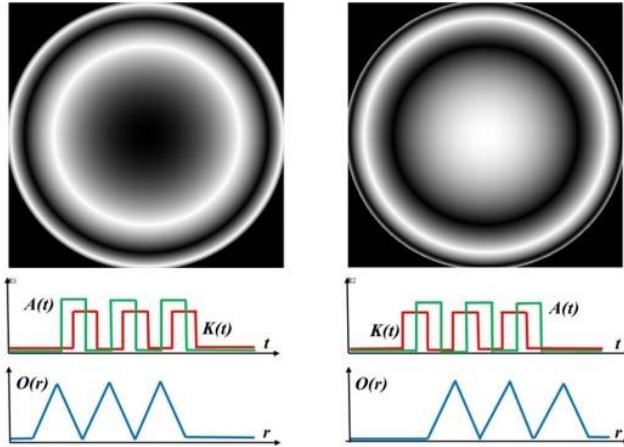


Рис. 11 Прямая (слева) и инверсная (справа) многозональные карты глубины сферического объекта и графики функций:  $A(t)$ ,  $K(t)$  и  $O(r)$  при многоимпульсном режиме ТВЛЛ и прямоугольной модуляции.

межзональные промежутки низкого разрешения по глубине и для их уменьшения вместо синусоидальной желательнее использовать прямоугольную модуляцию света и коэффициента усиления фотоприемника ТВЛЛ в виде меандра. На рис.11 приведены прямая и инверсная карты глубины сферического объекта при работе ТВЛЛ в режиме прямоугольной модуляции. В данном случае поверхность объекта попадает в четыре зоны глубины – две прямые и две инверсные. Поскольку функция отношения –  $O(r)$  здесь не имеет резких скачков, межзональные границы на картах глубины не выражены, что затрудняет их выявление, решение задачи отождествления зон и синтеза цифровой модели рельефа поверхности объекта наблюдения. Однако, следует заметить, что задача идентификации объекта наблюдения, т.е. отнесение его к известному классу может не требовать знания точной копии рельефа его поверхности, если в распоряжении классификатора находятся многозональные эталоны объекта.

Описанный многоимпульсный режим работы ТВЛЛ принципиально отличается от моноимпульсных тем, что в первом случае энергия света

суммируется в фотоприемнике, а во втором в рабочем теле импульсного лазера. В любом случае этой энергии должно быть достаточно для формирования хорошего изображения в фотоприемниках ТВЛЛ.

### Пространственное суммирование подсветки

Вместо одного лазера с внешним модулятором для многоимпульсной подсветки объекта можно использовать решетки лазерных светодиодов, работающие в синхронном импульсном режиме, которые обеспечивают необходимую освещенность объекта. Такое

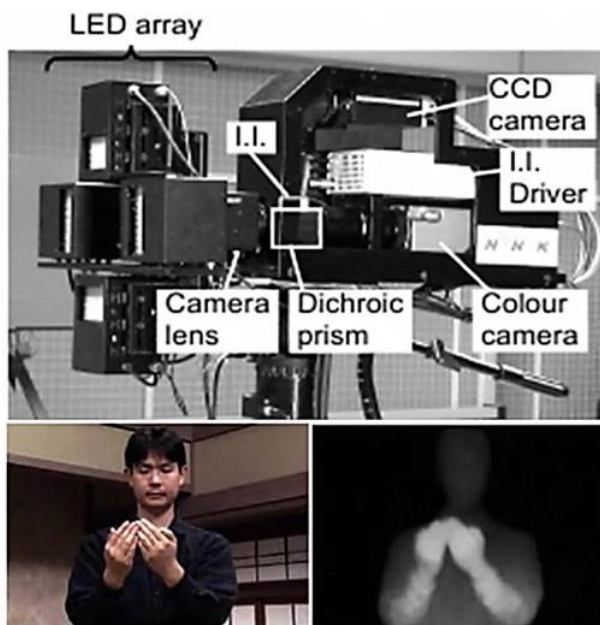


Рис. 12 Японский макет ТВЛЛ сочлененный с цветной телекамерой высокой четкости (вверху), изображение разработчика и его карта глубины (внизу).

решение использовалось в японском макете ТВЛЛ [8]. На рис 12. приведены фотографии макета и его разработчика Масахиро Кавакиты, а также карта глубины автора разработки, полученная с использованием макета. В макете применялась равносторонняя пилообразная модуляция излучения света с частотой от 10 до 50 МГц и прямоугольная модуляция усиления (затворный режим) фотодатчика – ЭОП с МКП, с длительностью импульсов от 1 до 20 нс. Цветная телекамера высокой четкости макета обеспечивала формирование цветовых компонент

изображения объекта. Таким образом, макет обеспечивал формирование RGBD изображения объекта наблюдения аналогичного показанному на рис. 2. При использовании решеток светодиодов осуществляется пространственное суммирование энергии подсветки объекта.

В заключение отметим возможность организации работы матричных фотодатчиков, в режиме электронного затвора. Хотя сегодня быстродействие таких затворов не позволяют обеспечивать необходимое для работы ТВЛЛ по ИКО разрешение по дальности (глубине), в будущем, по-видимому, можно рассчитывать на прогресс в увеличении их быстродействия в рамках основных направлений технологического развития космического телевидения [9], что позволило бы отказаться от использования в ТВЛЛ высоковольтных фотодатчиков – электронно-оптических преобразователей.

Ранее статья опубликована в [10].

### Литература

1. Краснощекова И. А. и др. *Фотограмметрия*. М., Недра, 1978.
2. Лобанов А. Н., Журкин И. Г. *Автоматизация фотограмметрических процессов*. М., Недра, 1980.
3. Валюс Н. А. *Стереоскопия*. М., Издательство академии наук СССР, 1962.
4. Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Тарнопольский В. И. и др. *Телевизионная съемка кометы Галлея*. М.: Наука, 1989. 295 с.
5. Варгин П. С. *Способ определения пространственной формы объектов*. АС СССР № 174185, заявка № 3015625 от 06.04.1981 г., опубликовано 27.05.2012 г. Бюл. № 15, SU 1 840 824 A1.
6. Варгин П.С. *Объемное телевидение – символ XXI века*, *Broadcasting* №№ 4-8, 2011, №1, 2012, <http://telenavt.ru>
7. Грузевич Ю. К. *Опτικο-электронные приборы ночного видения*. М., Физматлит, 2014.
8. M. Kawakita, T. Kurita, H. Hiroshi, and S. Inoue: "HDTV Axi-vision Camera," *Proc. IBC (International Broadcasting Convention) 2002, September, Amsterdam pp. 397-404 (2002)*.
9. *Теория и практика космического телевидения*. Под ред. А. А. Умбиталиева, А. К. Цыцулина. СПб.: АО «НИИ телевидения», 2017, 368 с.
10. Варгин П. С., Умбиталиев А. А., Черногубов А. В. *Определение пространственной формы искусственных космических объектов методом телевизионной лазерной локации*. *Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения*. 2019. Вып. 2. С. 10 – 23.