

## **Применение камеры K008 в составе ЛИДАРа для лазерного зондирования водной толщи с воздуха**

В.Б. Лебедев<sup>а</sup>, Г.Г. Фельдман<sup>а</sup>, А.О. Варданян<sup>б</sup>, А.А. Назарян<sup>б</sup>, А.А. Цовьян<sup>б</sup>,  
Ю.А. Едигарян<sup>б</sup>, С.А. Меликян<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Всероссийский НИИОФИ, Компания БИФО; <sup>б</sup> Ереванский НИИОФИ

### **Введение**

В докладе приводятся результаты применения камеры K008 /1,2/ в пробных экспериментах по лазерной локации толщи водной среды с воздуха для определения возможности обнаружения и идентификации предметов, погружённых в воду, а в будущем для обнаружения паразитной водоросли в озере Севан в Армении и составления карты её распределения по глубине на всей акватории озера.

### **Цель экспериментов**

Целью экспериментов являлось исследование возможности создания многоцелевого ЛИДАРа, способного с летательных аппаратов зондировать водную толщу. Для этого совместным армяно-греческим научно-производственным предприятием «ЛТ-ПИРКАЛ» был разработан макет ЛИДАРа.

Греческую сторону больше интересовали возможности применения такого ЛИДАРа в подводной археологии для обнаружения остатков античных построек и предметов под водой, а также в рыболовстве для обнаружения косяков рыбы. Для армянской стороны это были предварительные эксперименты в рамках одного из этапов работы по программе спасения озера Севан. По завершении этого этапа предполагалось создать аппаратуру, позволяющую с воздуха обнаруживать в озере паразитную водоросль и, возможно, измерять её концентрацию на глубине несколько десятков метров.

Уже не один десяток лет эта водоросль, начавшая бурно расти, грозит постепенно превратить прекрасное горное озеро в болото. Для оценки масштабов надвигающегося экологического бедствия и выбора метода (или нескольких методов) его предотвращения необходимо иметь информацию о распределении паразитной водоросли по глубине вплоть до ~30м на всей акватории озера и иметь возможность контролировать её изменение во времени. Одним из наиболее перспективных дистанционных методов оперативного получения такой информации и оперативного контроля за её динамикой является ЛИДАРный метод. В ходе сравнительно несложных экспериментов предстояло определить дальность действия макета будущего ЛИДАРа при обнаружении и идентификации предметов в воде в зависимости от энергии излучения лазера, условий проведения эксперимента (ночь, день пасмурный, день солнечный и др.) и режима работы системы регистрации обратного (отраженного или рассеянного) излучения.

### Устройство макета ЛИДАРа

Лазер макета ЛИДАРа представлял собой задающий импульсный генератор (максимальная частота 10Гц) на алюмо-итриевом гранате (YAG:Nd) с активной электрооптической модуляцией добротности и следующий за ним усилитель (коэффициент усиления энергии до 50 раз). На выходе усилителя был установлен преобразователь длины волны 1060нм в зондирующее излучение с длиной волны 530нм. Максимальная энергия зондирующего излучения при одной продольной моде достигала 50мДж при полуширине импульса 10нс. Расходимость излучения с помощью специального устройства могла регулироваться в широких пределах, что позволяло менять освещаемую площадь поверхности озера. Зондирующее излучение направлялось в нужную точку поверхности озера с помощью зеркального перископа с поворотным по горизонтали и вертикали верхним зеркалом. Координаты лазерного луча в воздухе над поверхностью озера и на поверхности в месте его входа в воду можно было контролировать с помощью теодолита.

Прием обратного излучения производился через этот же перископ. Приемником излучения (изображения) являлась серийная электронно-оптическая камера К008, выпускаемая «Компанией БИФО». Камера использовалась с быстрым блоком управления либо в однокадровом режиме (длительность кадра могла составлять от 10 до 230нс при его размерах  $12 \times 20 \text{мм}^2$  на фотокатоде), либо в режиме линейной развертки регистрируемого изображения (длительность развертки от 2 до 200нс при длине развёртки 2см).

Камера (рис.1) была установлена рядом с выходом лазера (их оптические оси были параллельны друг другу) и всегда «видела» в центре своего поля зрения (кадра) то место на поверхности озера, в которое направлялось зондирующее излучение.



Рис.1. Выходная часть макета ЛИДАРа

Электронная система синхронизации позволяла плавно изменять задержку срабатывания камеры (то есть задержку момента приема обратного излучения) относительно момента излучения зондирующего импульса (время прохождения светом 1 м в воде составляет 4нс).

Система цифровой записи и обработки изображения, получаемого с помощью камеры, позволяла измерять пространственные интервалы в изображении, полученном в однокадровом режиме камеры, и пространственно-временные интервалы в изображении, полученном в режиме линейной развертки.

### **Методика проведения экспериментов**

Макет ЛИДАРа был установлен в одной из комнат 5-го этажа пансионата “Раздан”, расположенного примерно в 30 метрах от озера. На расстоянии около 60м от берега на дно озера был опущен груз с блоком, через который был пропущен тонкий металлический трос. Второй блок был прикреплен к перилам балкона указанной комнаты. После продевания троса через второй блок оба конца троса были соединены друг с другом (рис.2). Это позволяло, протягивая трос через блоки, помещать прикрепленные к тросу предметы в воду и перемещать их в воде вдоль зондируемой трассы.



Рис.2. Выходная часть макета ЛИДАРа на фоне балкона и озера (слева видна камера, в центре теодолит на треноге, а справа внизу трос)

Зондирующее излучение с минимальной расходимостью направлялось на поверхность озера. При этом угол падения – угол между направлением излучения и вертикалью составлял  $\sim 75^{\circ}$ . Таким образом, доля зеркального отражения излучения от водной поверхности, не возвращавшегося к камере К008, была весьма и весьма значительной.

В воде на различном расстоянии от точки входа излучения в воду с помощью протяжки указанного выше троса устанавливалась мишень – баскетбольный мяч в сетке. Регистрация изображения, созданного обратным излучением, производилась как в однокадровом режиме работы камеры К008, так и при линейной развертке. При этом в случае очень слабых входных сигналов, соответствующих предельной дальности действия макета ЛИДАРа, использовался режим накопления изображения или режим накопления с усреднением по числу накопленных кадров.

### **Некоторые результаты экспериментов**

Прозрачность воды в озере во время проведения экспериментов, измеренная с помощью диска Секки, составляла 5,5м.



Рис.3. В. Лебедев и А. Цовьян готовятся к измерению прозрачности воды озера Севан с помощью диска Секки

В ночное время при энергии излучения лазера 50мДж, когда в воде на расстоянии 10м от точки входа излучения в воду был установлен баскетбольный мяч, а полная длина трассы до дна составляла 15м, по мере увеличения задержки срабатывания камеры в однокадровом режиме при длительности кадра 10нс на дисплее можно было наблюдать следующие картины без накопления изображения:

- а) светлое точечное пятно небольшой яркости – свечение воздуха и паров воды под действием лазерного импульса, когда импульс ещё не достиг поверхности воды;
- б) очень яркое точечное пятно – момент касания зондирующего импульса поверхности воды;

в) яркое точечное пятно на фоне слабого круглого диффузного пятна заметно большего диаметра – момент, когда значительная часть зондирующего импульса уже находится в воде и создаёт диффузионное обратное рассеяние из воды, а хвост импульса ещё в воздухе и, частично отражаясь от поверхности воды, создаёт яркую точку в центре круглого диффузионного пятна;

г) слабое круглое диффузное пятно, аналогичное такому же пятну в случае “в” – обратное рассеяние излучения из глубины воды, когда зондирующий импульс уже весь в воде, но ещё не достиг мяча;

д) яркое овальное пятно с довольно четким контуром (рис.4) – изображение мяча, когда зондирующий импульс достиг мяча (овальная форма мяча связана с тем, что зимой из-за низкой температуры воды  $+5^{\circ}\text{C}$  давление воздуха в мяче сильно снизилось и сила Архимеда, выталкивающая мяч из воды, сплюснула его);



Рис.4. Изображение мяча в глубине воды в отражённом от него излучении

е) тёмное овальное пятно с чётким контуром на однородном светлом фоне, когда зондирующий импульс расположен за мячом близко от него (рис.5) – теневое изображение мяча, созданное обратным рассеянием из воды;

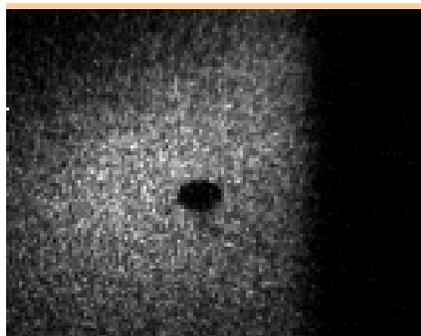


Рис.5. Теневое изображение мяча, созданное обратным рассеянием зондирующего излучения из глубины воды

и наконец

ж) большое темное размытое овальное пятно с размерами, заметно большими чем в случае “е”, на сравнительно светлом неоднородном фоне (светлый неоднородный фон – это отражение зондирующего излучения от

дна озера, то есть – изображение дна, а темное размытое овальное пятно – это тень от мяча на дне озера).

Днём при самых неблагоприятных условиях, когда прямо в объектив камеры К008 светило настолько яркое солнце, что автоматика камеры выключала напряжение питания электронно-оптического преобразователя для защиты его фотокатода от усталости (от потери чувствительности) и на объектив приходилось ставить интерференционный фильтр с пропусканием 30% на  $\lambda=530\text{нм}$ , дальность действия ЛИДАРа составляла 17м длины трассы в воде от ее поверхности до мяча. При этом энергия излучения лазера составляла 22мДж, а регистрация изображения производилась в режиме его линейной развертки длительностью 200нс без щели на входе камеры с накоплением 20-ти кадров.

На рис.6 показаны основные участники экспериментов у аппаратуры управления макетом ЛИДАРа.



Рис.6. Основные участники экспериментов у аппаратуры управления макетом ЛИДАРа

### **Обсуждение результатов и возможностей ЛИДАРа с ЭОП**

Предварительные эксперименты однозначно подтвердили возможность обнаружения и идентификации предметов в воде с воздуха с помощью ЛИДАРа, в котором приёмником излучения (изображения) является электронно-оптическая камера. Такой ЛИДАР в сравнении с ЛИДАром на основе ФЭУ имеет очень важное преимущество – он позволяет получать изображение обнаруженных предметов, что даёт возможность идентифицировать их. В нашем случае форма сплюснутого выталкивающей силой Архимеда баскетбольного мяча определялась чётко.

Эксперименты по лазерному зондированию водной толщ проводились и другими исследователями. Для сравнения наших результатов с другими

приведём данные /3/, полученные с подводным ЛИДАРОм в Баренцевом море. Дальность его действия составила 17м при энергии лазерного импульса 30мДж. Прозрачность воды при этом составляла 8м. Электронно-оптическая камера работала в однокадровом режиме (длительность кадра 20нс) и была синхронизирована с лазером и со считывающей изображение телекамерой, работавшими с частотой 25Гц.

Дальность действия любого ЛИДАРа, работающего с воздуха по подводным целям, при прочих равных условиях зависит от мощности и угла падения зондирующего излучения, угла его расходимости (в той или иной мере), прозрачности воды, а также от чувствительности приёмника излучения. Когда приёмником является ЭОП – сердце электронно-оптической камеры, то чувствительность камеры зависит и от того, в каком режиме работы она используется – в однокадровом или в режиме линейной развёртки, без накопления изображения или с накоплением. Помимо указанных, есть ещё ряд тонкостей в использовании камеры.

Режим линейной развёртки изображения интересен тем, что позволяет получить вдоль зондируемой трассы непрерывную информацию о месте положения находящихся на ней предметов и одновременно в зависимости от отношения размеров предмета к разрешаемому в его плоскости размеру, а также от отношения длительности развёртки к длительности зондирующего импульса идентифицировать в той или иной мере обнаруженный предмет. Конечно, если эти предметы таковы или расположены так, что не затеняют друг друга. В ЛИДАРе, предназначенном для регистрации непрерывного, а не дискретного распределения паразитной водоросли по глубине, этот режим представляется предпочтительным, потому что он позволяет от одного зондирующего импульса сразу получить информацию о распределении. Это очень важно для ЛИДАРа, установленного на высокоскоростном подвижном объекте.

В однокадровом режиме от одного зондирующего импульса информация о концентрации водоросли будет получена только для одной дальности, соответствующей задержке срабатывания камеры относительно лазера. При этом в неподвижном на экране электронно-оптической камеры изображении в течение длительности кадра происходит накопление энергии входного сигнала камеры в отличие от режима линейной развёртки, когда эта энергия размазывается вдоль развёртки. Поэтому дальность действия ЛИДАРа при однокадровом режиме работы камеры должна быть больше чем при развёртке. И тем больше, чем больше скорость развёртки.

Однако регистрация флуоресцентного излучения водоросли – это совсем не то, что обнаружение предметов. Интенсивность флуоресцентного излучения на порядки меньше интенсивности зондирующего лазерного излучения, отражённого от предметов. Поэтому очень вероятно, что для подобного ЛИДАРа серийная электронно-оптическая камера может не подойти. Скорее всего, понадобится специализированная камера, которая должна иметь очень высокую чувствительность, возможно, позволяющую работать в режиме счёта фотонов. Чувствительность должна регулироваться

как вручную, так и автоматически по определённому алгоритму, обеспечивающему надёжное выделение входного сигнала камеры и приемлемую точность измерения его интенсивности на всей дальности действия ЛИДАРа. А приемлемая точность измерения в режиме счёта фотонов может быть достигнута только путём накопления этих фотонов в течение достаточно многократных актов зондирования исследуемой трассы. Поэтому ЛИДАР, предназначенный для составления карты распределения паразитной водоросли на акватории озера Севан от его поверхности до глубины ~30м (ЛИДАР предполагалось установить на вертолёте), должен работать с гораздо более высокой частотой следования зондирующих импульсов, чтобы при сканировании водной поверхности со скоростью полёта вертолёта обеспечить приемлемое пространственное разрешение, как по поверхности, так и по глубине при заданной точности измерения интенсивности входного сигнала. В зависимости от скорости полёта и от требований к пространственному разрешению и точности измерения интенсивности входного сигнала эта частота может составить порядка  $10^3$  -  $10^5$  Гц.

Что касается узкоспециализированной электронно-оптической камеры, необходимой для такого ЛИДАРа, то нет проблем для её разработки в габаритах, ещё меньших, чем габариты миниатюрной камеры К008.

Ясно, что подобный ЛИДАР найдёт применение для решения различных задач. Особенно тех, где в сравнении с аппаратурой, основанной на других методах, он более эффективен, дешёв и мобилен. Это может быть и визуализация изображений в мутных, задымлённых или затуманенных средах, поиск затонувших кораблей, подводные археологические исследования, рыболовство - обнаружение косяков рыбы, “зрение” для подводных подвижных объектов, экология – обнаружение местоположения и определение химического состава вредных выбросов в атмосферу или в воду и многие другие. В последнем случае (экология) такой ЛИДАР в отличие от ЛИДАРа с ФЭУ способен от одного зондирующего импульса обнаруживать одновременно несколько химических веществ, поскольку может анализировать входной сигнал в широком спектральном диапазоне. Несомненным достоинством такого ЛИДАРа явится то, что его можно будет использовать на высокоскоростных подвижных объектах, в том числе на летательных аппаратах. А это означает высокую мобильность его доставки к месту работы и чрезвычайно высокую скорость получения необходимой информации.

Более обширную информацию о теоретических и практических аспектах ЛИДАРной диагностики можно найти в /4/ и /5/.

### **Заключение**

Со времени проведения описанных экспериментов прошло уже около 4-х лет. За это время камера К008 была значительно усовершенствована. Она по желанию потребителя может быть укомплектована различными считывающими устройствами, имеющими, например, высокую

чувствительность, много пикселей, обеспечивающих пространственное разрешение на фотокатоде не менее 20п.л./мм, и соответственно более высокую цену или более скромные параметры и меньшую цену. За счёт форсирования амплитуды импульса, стробирующего МКП на диапазонах развёртки 1 и 3нс/см (при этом в однокадровом режиме длительность кадра составляет 10 и 16нс соответственно), чувствительность камеры может быть установлена близкой к режиму счёта фотонов. Максимальная частота запуска камеры с быстрым блоком управления составляет 100Гц. С такой частотой можно накапливать изображение на ПЗС матрице считывающего устройства, затем вводить его в компьютер и, если необходимо, далее производить накопление таких кадров уже в компьютере. Таким образом, в существующем сегодня виде эту миниатюрную и экономичную камеру (её вес составляет всего 3,5кг, а потребляемая мощность 9Вт) уже можно успешно применять в ЛИДАРах для решения некоторых из перечисленных выше задач.

К сожалению, из-за финансовых трудностей Армении дальнейшие работы по ЛИДАРу не получили продолжения. Однако ЛИДАРЫ с ЭОП, работающие как по подводным, так и по иным целям, представляют интерес и для других потребителей. Поэтому для решения другой конкретной задачи «Компания БИФО» разработала две модификации однокадровой камеры «Уникадр-05» (рис.7) точно в таком же корпусе, как К008, имеющие диапазон спектральной чувствительности от 210 до 850нм, максимальную частоту запуска 300Гц и длительность кадра, изменяемую от 5 до 500нс.



Рис.7. Однокадровые камеры «Уникадр-05-01»

Модель «Уникадр-05-01» содержит в электронно-оптическом тракте одну МКП и обеспечивает на фотокатоде диаметром 18мм пространственное разрешение не менее 22п.л./мм. Модель «Уникадр-05-02» содержит в электронно-оптическом тракте две МКП, обеспечивает пространственное разрешение не менее 15п.л./мм и максимальную чувствительность, позволяющую работать в режиме счёта фотонов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам предприятия «ЛТ-ПИРКАЛ» Армену Франгяну, Георгию Айрапетяну, Эдуарду Беглояну и Давиду Казаряну за помощь в описанных экспериментах.

#### **Литература.**

1. V.V. Lebedev, G.G. Feldman, "Super small single streak and single frame image converter camera", SPIE, Vol. 3516, pp.85-91.
2. K008 Streak and Uniframe Camera, [http: www.bifocompany.com](http://www.bifocompany.com)
3. В.С. Должиков, В.С. Карпов, М.И. Крутик, С.Ю Сухоросов, В.В. Хусточка, Высокочувствительная система подводного лазерного виденья, Тезисы докладов Межотраслевой научно-технической конференции «Проблемы создания технических средств для исследования и освоения мирового океана», Ленинград, 1989г, стр.19.
4. Межерис Р., "Лазерное дистанционное зондирование", М., «Мир», 1987.
5. A.F.Bunkin and K.I. Voliak, "Laser Remote Sensing of the Ocean. Methods and Applications", John Wiley and Sons, Inc., New York, Toronto, 2001, 244p.