

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Составной частью систем дистанционной диагностики состояния океана являются подсистемы лидарного зондирования приповерхностного слоя воды. Согласно данным [1, 2] существует принципиальная возможность определения различных распределений характеристик приповерхностного слоя, таких, как профиль температуры, зависимость коэффициента рассеяния от глубины, а также целого ряда гидрофизических, биологических и других параметров. Несмотря на все достоинства лидарного дистанционного зондирования (ЛДЗ), одним из главных факторов, сдерживающих его развитие, является трудность построения систем регистрации сигнала обратного рассеяния (СОР) и его обработки в реальном масштабе времени. Это связано с малой длительностью СОР (сотни наносекунд) и необходимостью дискретизации его по времени с частотой в сотни мегагерц для достижения приемлемого разрешения по глубине. Целью данной работы является сравнительный анализ существующих способов регистрации быстропотекающих процессов применительно к задачам ЛДЗ приповерхностного слоя океана с борта авианосителя, разработка и создание устройства автоматизированной регистрации СОР, а также методик его калибровки и предварительной обработки сигнала.

Основные временные соотношения при зондировании полубесконечной среды точечным источником, излучающим  $\delta$ -импульс с малой начальной расходимостью, определяются следующим выражением:

$$t_2 - t_1 = \frac{2n(z_2 - z_1)}{c}, \quad (1)$$

где  $t_2$  и  $t_1$  - моменты регистрации приемником откликов с глубин  $z_2$  и  $z_1$  соответственно;

$n$  - показатель преломления воды, для простоты полагаемый постоянным;  
 $c$  - скорость света в вакууме.

При этом предполагается, что приемник пространственно совмещен с источником и находится на границе среды.

В задачах ЛДЗ, даже таких относительно простых, как лазерная батиметрия, требуется точность определения  $z$  не хуже  $0,1$  м [2, 3]. Из (1) нетрудно получить соответствующий интервал временной дискретизации СОР - не более  $0,8$  нс.

Амплитудные характеристики СОР в основном определяются экспоненциальным законом ослабления света водной средой. Параметры лидара обычно выбираются такими, что наиболее информативный участок СОР при  $70 < t < 400$  нс может быть достаточно точно описан приближенной формулой из [4]:

$$P(t) = At^{-2} \exp(-\kappa ct), \quad (2)$$

где  $P(t)$  - мощность СОР в зависимости от времени;

$\kappa$  - показатель поглощения воды.

$A$  - не зависящая от времени константа.

При зондировании с борта авианосителя существенное влияние на амплитудные характеристики СОР оказывает мощный блик от поверхности воды, в результате чего и с учетом (2) динамический диапазон (ДД) СОР составляет 5-6 порядков. Существующие сегодня оптические системы и приемники излучения, применяемые в ЛДЗ, имеют ДД, не превышающий 4 порядков. Данное обстоятельство вынуждает принимать меры к уменьшению ДД СОР как в оптической, так и в электронной части тракта регистрации. Последнее означает необходимость наличия в электронной части тракта высококачественной подсистемы масштабирования сигнала.

Рассмотрим существующие способы регистрации быстротекущих процессов с точки зрения обоснованных выше требований к временным и амплитудным характеристикам системы регистрации СОР.

На сегодняшний день наибольшее временное разрешение обеспечивает высокочастотная кинематография [5], однако необходимость мокрого фотохимического процесса сводит практически на нет возможность применения этого способа для регистрации СОР, так как не позволяет производить оперативный контроль получаемой информации, что существенно в условиях бортового эксперимента.

Наблюдение СОР на экране электронно-лучевого осциллографа и фотографирование с экрана, которое широко используется сегодня при работе с лидарами, неудобно по той же причине. Кроме того, хотя фотопленка и превосходит все остальные носители по объему регистрируемой информации, для обработки сигнала требуется ввести изображение в вычислитель, а этот процесс является источником дополнительных погрешностей.

Непосредственное аналого-цифровое преобразование с требуемой частотой существующие твердотельные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) обеспечить не могут [6-8]. Построение распараллеленной системы регистрации на основе твердотельных АЦП, в которой несколько АЦП стробируются сдвинутыми друг относительно друга на величину временного интервала дискретизации импульсами, требует применения схем выборки и хранения (СВХ) аналогового сигнала с апертурным временем менее  $0,8$  нс. Кроме того, что создание столь быстродействующих СВХ само по себе является чрезвычайно сложной задачей [9], построенный на этом принципе АЦП состоял бы, с учетом реального быстродействия составляющих его элементов, не менее чем из 16 параллельных каналов. Надежность такой системы, а это особенно важно в условиях бортового эксперимента, оказалась бы недопустимо низкой.

Классический стробоскопический метод, применяемый для регистрации с высоким временным разрешением периодически повторяющихся процессов, используется

иногда в ЛДЗ, но только либо в стационарных корабельных лидарах, либо в авиационных при регистрации сигнала от какого-нибудь одного заданного слоя. Поэтому данный метод не может быть положен в основу системы, которая должна регистрировать СОР на всем его протяжении при единственной реализации, как это имеет место в авиационном лидаре в отличие от судового. Это обусловлено существенно более высокой скоростью авианосителя и случайным характером взаимодействия зондирующего импульса с поверхностью воды.

Наконец, используемый в ядерной физике метод регистрации с помощью двухкадной электронно-лучевой трубки представляется наиболее перспективным для применения в системе регистрации СОР. Суть метода (10) заключается в объединении в одном электровакуумном приборе запоминающей осциллографической трубки и считывающей телевизионной. На основе этого принципа построен, например, прибор УВН-92 с временной разрешающей способностью 0,25 нс. К недостаткам существующих приборов этого типа следует отнести отсутствие устройства масштабирования регистрируемого сигнала и визуального контроля осциллографического изображения.

В результате анализа перечисленных методов было признано целесообразным положить в основу устройства регистрации СОР авиационного лидара последний из приведенных выше принципов. Отличием предлагаемого метода регистрации является сочетание возможностей отображения сигнала, присущих широкополосному осциллографу (ШО), с относительной легкостью ввода в ЭВМ телевизионного изображения. Суть метода достаточно проста и заключается в следующем: изображение сигнала на люминофоре осциллографа считывается с помощью телевизионной камеры, после чего видеосигнал дискретизируется на два уровня и запоминается в устройстве памяти (либо вводится непосредственно в ЭВМ для обработки и регистрации на штатном носителе). При этом люминофор служит своего рода аналоговым запоминающим устройством, позволяющим растянуть во времени процесс оцифровки сигнала. Очевидным недостатком этого метода является невозможность обработки импульсов малой скважности, что для решения задачи регистрации СОР несущественно. Функциональная схема устройства регистрации приведена на рис. 1 (1 - осциллограф, 2 - объектив, 3 - электронно-оптический усилитель яркости, 4 - фотоэлектронный преобразователь на основе матрицы ПЗС, 5 - устройство связи с ЭВМ, 6 - видео-контрольное устройство).

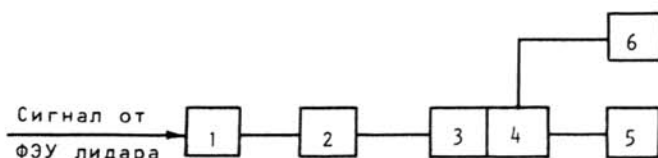


Рис. 1

Рис. 1. Функциональная схема устройства регистрации

В качестве ШО был использован прибор С1-97 со следующими техническими данными:

- 1) рабочая часть экрана прибора, мм: 100 - по горизонтали, 80 - по вертикали;
- 2) ширина линии луча не более 0,8 мм;
- 3) время нарастания переходной характеристики не более 1 нс;

4) пределы перемещения луча по горизонтали обеспечивают совмещение начала и конца рабочего участка развертки с центральной вертикальной осью шкалы экрана прибора.

В качестве фотоэлектронного преобразователя использовалась телевизионная камера на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС) типа ЦМ-7 с усилителем яркости (электронно-оптическим преобразователем). Использование ПЗС в данном случае вызвано тем, что, в отличие от вакуумных приборов, он обладает жестким растром разложения изображения и, соответственно, меньшими случайными геометрическими искажениями. Оптическая система - объектив "Гелиос-44".

Камера ориентирована относительно экрана осциллографа таким образом, что направление вертикальной развертки осциллографа совпадает с направлением строчной развертки телекамеры. Тогда за время развертки одной строки происходит однократное считывание изображения луча осциллографа, что позволяет сократить объем буферной памяти, необходимый для записи изображения, до  $M N$ -разрядных слов, где  $M$  - количество строк в кадре,  $2^N$  - количество синхросимволов временной сетки за время строки. Поступающий с выхода ТВ-камеры видеосигнал квантуется на два уровня и считывается в ПЭВМ. Функциональная схема устройства квантования и связи с ЭВМ приведена на рис. 2 (1 - буферный усилитель и селектор кадровых (КСИ) и строчных (ССИ) синхроимпульсов, 2 - компаратор, 3 - счетчик элементов строки, 4 - генератор временной сетки, 5 - регистр данных, 6 - регистр состояния).

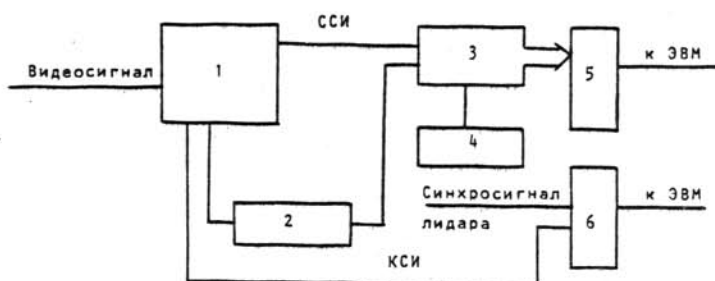


Рис. 2. Функциональная схема устройства квантования и связи с ЭВМ

Для достижения высокой точности измерения с помощью телевизионной измерительной системы (ТВИС) необходима коррекция систематических и минимизация случайных искажений сигнала в ней. Амплитудные искажения были минимизированы в соответствии с методикой, изложенной в [11].

В соответствии с [12], геометрические искажения в ТВИС приводят к систематическим ошибкам в определении отсчетов значений сигнала. Для коррекции ошибок, возникающих из-за геометрических искажений, необходимо для каждого отсчета  $(x'_i, y'_j)$  уметь находить поправки  $X(x'_i, y'_j)$  и  $Y(x'_i, y'_j)$ , при этом истинные координаты могут быть рассчитаны как:

$$x_i = x'_i + X(x'_i, y'_j), \quad y_j = y'_j + Y(x'_i, y'_j). \quad (3)$$

Для определения таблицы поправок  $(X, Y)$  была предложена и производилась калибровка тракта системы по следующей методике:

1. Определение  $X(x'(i), y'(j))$ .

На вход осциллографа подавалось постоянное напряжение от стабилизированного источника; при этом органы управления вертикальной разверткой устанавливались в такое положение, чтобы нулевому напряжению на входе соответствовало крайнее нижнее положение луча в рабочей части экрана. После этого входное напряжение увеличивалось до такого значения  $U$ , что луч перемещался в крайнее верхнее положение. Принимая количество опорных синхроимпульсов в строке видеосигнала  $2^N$ , определяем  $u = U \times 2^{-N}$ .

После этого напряжение  $U_i$  изменяем степенями по  $u$  и на выходе системы получаем отсчеты  $x_i^!$ . Тогда

$$X(x_i^!, y_j^!) = U_i - x_i^! \quad (4)$$

где  $0 \leq i \leq 2^N - 1$  для нескольких значений  $y_j^!$ .

## 2. Определение $Y(x_i^!, Y_j^!)$ .

На вход осциллографа подавался сигнал от генератора прямоугольных импульсов; частота генератора и органы управления осциллографа устанавливались таким образом, чтобы на экране был виден горизонтальный отрезок (вершина прямоугольного импульса), причем конец отрезка совпадал с левым краем рабочей части экрана. После этого регулировкой длительности импульса производилось совмещение конца отрезка с правым краем рабочей части экрана. Определялась степень изменения длительности

$$t = \frac{T_2 - T_1}{M} \quad (5)$$

где  $T_1$  - длительность импульса при совпадении его конца с левым краем рабочего участка экрана;

$T_2$  - длительность для правого края;

$M$  - количество строк разложения рабочей части ТВ-кадра.

Затем длительность импульса изменялась степенями по  $t$  и для каждой из них фиксировалось значение  $y_j^!$ . Измерения длительности импульса, также как и измерения напряжения, производились аттестованным прибором типа ЦУИП. Операция повторялась для различных положений по вертикали вершины прямоугольного импульса.

Таким образом,

$$Y(x_i^!, y_j^!) = T_j - y_j^! \quad (6)$$

для нескольких (например, пяти) значений  $x_i^!$ .

Промежуточные значения (для всех остальных значений  $y_j^!$  при определении  $X$  и  $x_i^!$  для  $Y$ ) получались интерполяцией измеренных значений. Таким образом получалась таблица поправок, используемых при коррекции геометрических искажений в тракте системы; таблица содержит  $2 \times 2^N M$  элементов и хранится в памяти ЭВМ. Коррекция производится в ЭВМ с использованием этой таблицы.

Анализ полученной таблицы поправок показал, что в терминах, принятых для описания характеристик АЦП, интегральная нелинейность системы регистрации составила не более 5 единиц младшего значащего разряда (МЗР), дифференциальная нелинейность - 1 МЗР (при  $N=8$ ,  $M=256$ ), а после проведенной коррекции не превышала 0,5 МЗР.

При работе системы в динамическом режиме на максимальных скоростях развертки Ш0 было отмечено наличие случайных выбросов регистрируемого тестового сигнала рис. 3. На рисунках 3-5 по осям абсцисс отложено время в наносекундах, а по осям ординат - интенсивность сигнала в относительных единицах. Анализ воз-

возможных источников такого рода искажений позволяет отнести их за счет шумов электронно-оптического усилителя яркости изображения, входящего в состав ТВИС. Исходя из характера шумов, была применена обработка зарегистрированного сигнала, которая заключалась в последовательном использовании медианной фильтрации [13] с апертурой в 5 элементов и фильтрации методом скользящего среднего с апертурой в 3 элемента. Такой алгоритм ранговой фильтрации наиболее экономичен с точки зрения вычислительных ресурсов и в то же время приводит к уменьшению среднеквадратичного отклонения обработанного сигнала от исходного (заведомо известного тестового) до величины, существенно меньшей, чем значение МЗР, то есть практически не ведет к потере информации. Это не противоречит теореме дискретизации, так как частота дискретизации в данном случае более чем вдвое превосходит верхнюю граничную частоту регистрируемого сигнала. На рис. 3 представлен необработанный тестовый сигнал. Результат обработки сигнала приведен на рис. 4. Система регистрации была испытана в натуральных условиях в составе лидарного комплекса "Макрель-2" на борту самолета ИЛ-18 ДОРР. Характерный вид экспериментально зарегистрированного СОР приведен на рис. 5.

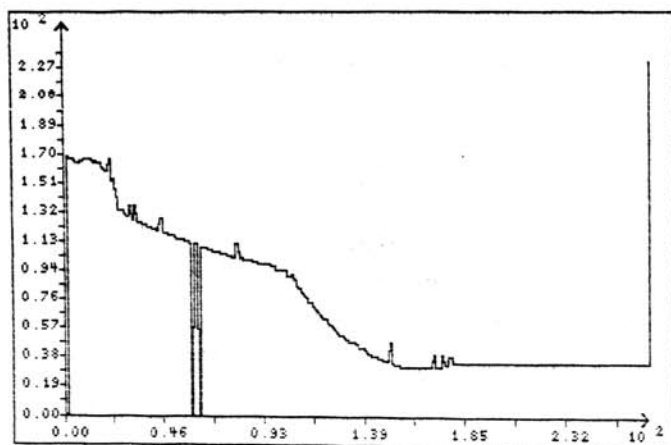


Рис. 3. Необработанный тестовый сигнал

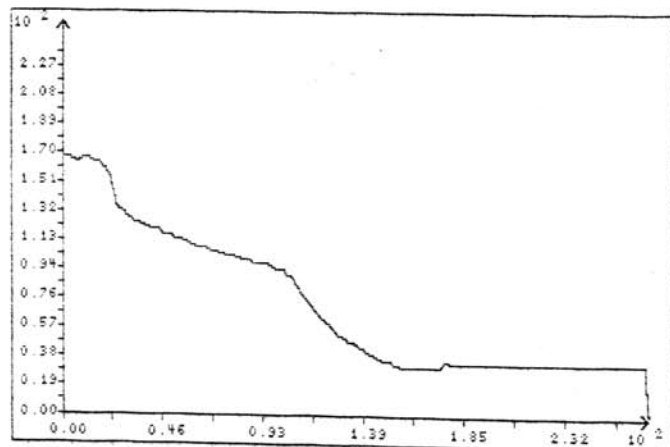


Рис. 4. Результат обработки тестового сигнала

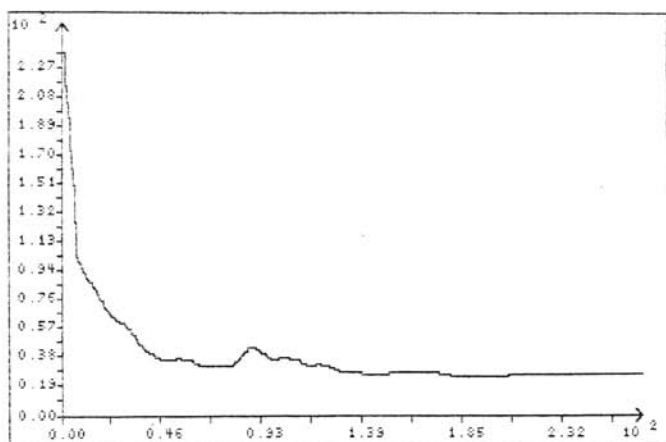


Рис. 5. Реальный сигнал, регистрируемый в натурном эксперименте

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ существующих способов регистрации быстропротекающих процессов применительно к построению устройства регистрации СОР авиационного лидара. Предложен способ автоматизированной регистрации, сочетающий преимущества осциллографии и цифровой регистрации сигнала. Создано устройство регистрации СОР, проанализированы источники искажения сигнала, предложена методика калибровки устройства, которая легко реализуется в бортовых условиях в автоматическом режиме. Разработанная методика позволяет снизить погрешность преобразования СОР до величины 0,5 МЗР. Применение электронно-оптического усилителя яркости в сочетании с предложенной методикой предварительной обработки сигнала дает основания полагать, что достигнутая частота временной дискретизации, ограничиваемая в реализованной системе полосой пропускания осциллографа, может быть существенно увеличена за счет использования более широкополосного осциллографа. Для осциллографа С1-97 временной интервал дискретизации составил около 4 наносекунд, что, согласно (1), соответствует пространственному разрешению около 0,5 м. Испытания системы регистрации в натуральных условиях показали, что использование оператором временного и пространственного масштабирования регистрируемого сигнала с возможностью контроля его формы на экране видеоконтрольного устройства существенно повышает достоверность и информативность экспериментальных данных.

### Л и т е р а т у р а

1. М е ж е р и с Р.М. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.
2. Дистанционные методы изучения океана: Сб. научных трудов. Горький, 1987.
3. Р e n n y М.Ф. a/o. Airborne laser hydrography Australia. Applied optics / Vol. 25, No. 13/1 July 1986, p. 2046-2058.
4. Б р а в о - Ж и в о т о в с к и й Д.М. и др. Определение поглощения и рассеяния морской воды по некоторым характеристикам светового поля искусственных источников света. - В кн.: Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. М.: Наука, 1974, с. 153-158.

5. Физика быстропротекающих процессов: Сб. статей. М.: Мир, 1971.
  6. Я к у б о в с к и й С.В. и др. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы. М.: Радио и связь, 1985.
  7. М а р ц и н к я в и ч ю с А.-И.К. Быстродействующие АЦП и ЦАП для обработки широкополосных сигналов. - Электронная промышленность, вып. 10, 1986, с. 5-6.
  8. З а х а р о в П.Ф., С в и с т у н о в А.П. Устройство регистрации сигналов субмикросекундной длительности на базе АЦП 1107ПВЗ. Электронная промышленность, вып. 10, 1986, с. 16-18.
  9. А л е к с е н к о А.Г. и др. Применение прецизионных аналоговых микросхем. М.: Радио и связь, 1985.
  10. Б у т с л о в М.М. и др. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М.: Наука, 1978.
  11. Б о р д ю г о в Л.Г., Р о м а н о в А.А. Измерительные свойства фотоприемников на основе ПЗС. - В сб.: Аэрофизика и геокосмические исследования. М.: изд. МФТИ, 1983, с. 112-114.
  12. Г о р е л и к С.Л. и др. Телевизионные измерительные системы. М.: Связь, 1980.
  13. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. П/ред. Т.С. Хуанга. М.: Мир, 1984.
-