

В.С. Шаманаев, И.Э. Пеннер

ТОЧНОСТЬ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрены погрешности, возникающие при преобразовании поляризационных компонентов лидарного сигнала двухканальным аналого-цифровым преобразователем. Получены аналитические выражения для погрешностей, рассчитаны возможные величины ошибок измерения деполаризации эхо-сигналов при зондировании лидаром моря, плотных облаков, подстилающей поверхности. Приведены результаты эксперимента по поляризационной локации плоской мишени.

В литературе описан типоряд поляризационных лидаров, предназначенных для исследования различных рассеивающих объектов [1, 2]. В них используется единая идеология построения оптического тракта для приема эхо-сигналов, что позволяет использовать общую методологию анализа их работы.

Вопросам точности лидарных измерений с точки зрения работы фотодетекторов в литературе уделено достаточно много внимания [3, 4]. Однако с точки зрения автоматизированной системы обработки, с учетом особенностей дискретизации сигналов по времени и амплитуде, этот вопрос исследован пока слабо.

На работу лидара в режиме анализа поляризации оказывают влияние следующие источники погрешностей:

- временное разрешение и динамический диапазон аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- стабильность момента фиксации уровня сигнала в каждом стробе АЦП;
- идентичность каналов АЦП, используемых при поляризационном приеме, и особенно синхронность моментов фиксации уровня сигналов.

Важность знания и учета этих в общем-то обычных параметров становится нетривиальной, если учесть малую длительность и большой динамический диапазон эхо-сигналов от облаков, морской воды или иной подстилающей поверхности.

В поляризационных лидарах наиболее распространенным является режим работы с линейной поляризацией. В этом случае измеряется степень линейной деполаризации [5]

$$Q(r) = \frac{U_2(r)}{U_1(r)}, \quad (1)$$

где r — расстояние от лидара; U_1 и U_2 — значения соответственно поляризованного и кросс-поляризованного компонентов полного лидарного отклика.

Погрешность вычисления деполаризации для каждого расстояния r складывается из нескольких источников, относительная роль которых зависит от характера исследуемого объекта.

1. Относительная погрешность первого рода δQ_1 анализируется чаще всего. Из (1) имеем

$$\delta Q_1 = (\delta^2 U_2 + \delta^2 U_1)^{1/2}. \quad (2)$$

В силу тривиальности анализировать (2) нецелесообразно. Отметим только, что погрешность δQ_1 может быть уменьшена путем усреднения по циклу измерений.

2. Относительная погрешность второго рода δQ_2 является погрешностью округления значения сигнала в АЦП. Формально она совпадает с предыдущей, но причина ее появления другая. Умеренные флуктуации мощности излучения лазера P_0 величиной δP_0 будут приводить к пропорциональным флуктуациям значений принимаемых компонентов сигнала $U_1(r)$ и $U_2(r)$. Но на меньшем по абсолютной величине деполаризованном сигнале $U_2(r)$ эти флуктуации могут не выйти за пределы одной единицы кода АЦП. В то же время больший сигнал $U_1(r)$ отреагирует на вариацию δP_0 и вычисленное значение Q будет иметь величину, не имеющую физического обоснования для исследуемого объекта.

Так, если при первой вспышке лазера измерено «истинное» значение $Q_n = U_2/U_1$, то во второй вспышке будет получено смещенное флуктуацией P_0 значение

$$Q_{см} = \frac{U_2(1 + \delta P_0) - \Delta_2}{U_1(1 + \delta P_0) - \Delta_1}, \quad (3)$$

где Δ_1 и Δ_2 — ошибки округления АЦП для первого и второго каналов.

Получим относительную погрешность $\delta Q_2 = (Q_{\text{н}} - Q_{\text{см}})/Q_{\text{н}}$. Учтем, что максимальные значения Δ_1 и Δ_2 не превосходят по абсолютной величине одной единицы кода АЦП. Оценка по максимуму дает

$$\delta Q_2 < \left| \frac{Q_{\text{н}} - 1}{U_2(1 + \delta P_0) - Q_{\text{н}}} \right|. \quad (4)$$

То есть этот вид погрешности зависит как от величины эхо-сигнала U_2 , так и от значения самой деполаризации. В табл. 1 приведено построенное по (4) семейство характеристик для δQ_2 , когда параметром можно рассматривать либо величину флуктуации мощности лазерного излучения δP_0 , либо значение деполаризации лидарного сигнала $Q_{\text{н}}$. Компонент U_2 равен 5 единицам кода 6-разрядного АЦП. Имеется более сильная зависимость от $Q_{\text{н}}$, чем от флуктуации δP_0 .

Таблица 1

Значения погрешности измерения деполаризации δQ_2 в зависимости от параметров δP_0 и $Q_{\text{н}}$

$Q_{\text{н}}$	δP_0	Значения погрешности, δQ_2			
0,05	0,05	0,18	0,17	0,16	0,13
0,10	0,10	0,17	0,17	0,15	0,12
0,25	0,20	0,14	0,09	0,13	0,10
0,50	0,50	0,10	0,05	0,09	0,07
0,75	—	0,05	0,05	0,04	0,03

3. Относительная погрешность третьего рода δQ_3 проявляется за счет того, что у АЦП в обоих поляризационных каналах имеется сдвиг во времени Δt между моментами фиксации значений сигналов U_1 и U_2 в исследуемом временном стробе. Эта погрешность становится более заметной при зондировании облаков и особенно водной среды.

Пусть в приближении однократного рассеяния света истинное значение деполаризации сигнала от исследуемого объекта (облако, вода) на глубине z от его границы равно $Q_{\text{н}}$. За счет сдвига Δt между глубинами фиксации значений компонентов сигнала возникает оптическая толщина величиной $0,5c\epsilon\Delta t n^{-1}$, где c — скорость света; n — показатель преломления воды; ϵ — показатель ослабления излучения. Тогда, например, при зондировании верхнего слоя моря на выходе лидара будет измерена величина

$$Q = Q_{\text{н}} \exp\left(-\frac{c \epsilon \Delta t}{n}\right). \quad (5)$$

Относительную погрешность измерения деполаризации в этом случае можно записать в виде

$$\delta Q_3 = \left| \frac{Q - Q_{\text{н}}}{Q_{\text{н}}} \right| = \exp\left(-\frac{c \epsilon \Delta t}{n}\right) - 1. \quad (6)$$

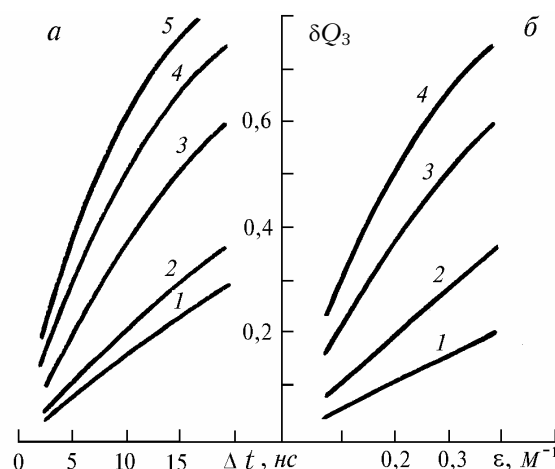


Рис. 1. Зависимость погрешности δQ_3 от Δt и ϵ : (а) кривая 1 — $\epsilon = 0,075 \text{ м}^{-1}$; 2 — $\epsilon = 0,1 \text{ м}^{-1}$; 3 — $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$; 4 — $\epsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$; 5 — $\epsilon = 0,4 \text{ м}^{-1}$. (б) кривая 1 — $\Delta t = 2,5 \text{ нс}$; 2 — $\Delta t = 5 \text{ нс}$; 3 — $\Delta t = 10 \text{ нс}$; 4 — $\Delta t = 15 \text{ нс}$

На рис. 1, *a* приведено семейство погрешностей δQ_3 в зависимости от величины сдвига Δt . Параметром является показатель ослабления воды ϵ . Рис. 1, *б* показывает влияние изменения прозрачности зондируемой воды на погрешность δQ_3 , когда параметром является сдвиг Δt в АЦП. Этот вид погрешности достигает больших абсолютных значений и может рассматриваться как основной в задаче зондирования воды и плотных облаков.

4. Этот же сдвиг Δt проявляется и при локации подстилающей поверхности. Если для наглядности и простоты рассуждений принять форму отраженного от плоской подстилающей поверхности сигнала $U(t)$ гауссовой, то для каждого поляризационного компонента

$$U_i(t) = U_{0i} \exp \left[-2 \frac{(t_i - t_0)^2}{\tau^2} \right], \quad (7)$$

$$Q_{ii} = U_{02}/U_{01}$$

где U_{0i} — амплитуда i -го поляризационного компонента отраженного импульса; t_0 — истинное расстояние во времени до подстилающей поверхности; t_i — моменты фиксации отсчетов сигнала; τ — полуширина импульса от мишени; Q_{ii} — истинная величина деполаризации. Если для компонентов U_1 и U_2 моменты фиксации отсчетов есть t_1 и t_2 , и $\Delta t = t_2 - t_1$ то из (7)

$$\delta Q_4 = U_2(t)/U_1(t) - Q_{ii} = \left| \exp \left\{ \frac{2 \Delta t [(t_0 - t_1) + (t_0 - t_2)]}{\tau^2} \right\} - 1 \right|. \quad (8)$$

Относительная погрешность измерения деполаризации подстилающей поверхности δQ_4 имеет особенность, связанную с взаимным положением моментов t_1 и t_2 . Если оба они находятся по одну сторону от момента t_0 , то эта погрешность постоянна и $\delta Q_4 = \exp[-2(\Delta t)^2 \tau^{-2}] - 1$. При постоянной времени фотоумножителя $\tau = 20$ нс, длительности строба АЦП 25 нс и сдвиге $\Delta t = 12,5$ нс $\delta Q_4 = 0,54$. При сдвиге $\Delta t = 7,5$ нс $\delta Q_4 = 0,25$. Если моменты t_1 и t_2 находятся по разные стороны от t_0 , то погрешность выражается в виде (8) и сильно зависит от соотношения Δt и τ , а также от сдвига $t_0 - t_1$. В табл. 2 приведены значения δQ_4 для двух значений Δt , когда момент фиксации t_1 смещается относительно момента t_0 , и $t_1 < t_0$. Величина $t_2 = t_1 + \Delta t > t_0$.

Таблица 2

Значения погрешности δQ_4 измерения деполаризации при локации подстилающей поверхности в зависимости от момента фиксации значения сигнала t_1 . Постоянная времени $\tau = 20$ нс; длительность строба АЦП 25 нс; $t_0 - t_1 = \Delta t - (t_0 - t_2)$

$\Delta t = 12,5$ нс		$\Delta t = 5$ нс	
$(t_0 - t_1)$, нс	δQ_4	$(t_0 - t_1)$, нс	δQ_4
0	0,54	0	0,12
2,5	0,37	1	0,05
5,0	0,14	2	0,03
6,25	0	2,5	0
7,5	0,14	3	0,03
—	—	5	0,11

При симметричном расположении точек взятия отсчетов относительно момента t_0 $\delta Q_4 = 0$. Максимальная ошибка возникает, когда один из сигналов замеряется именно в момент t_0 .

Приведенные в табл. 2 оценки имеют в значительной мере иллюстративный характер, так как форма реального сигнала от плоского объекта отличается от гауссовой. Однако эти оценки полезны тем, что заставляют более критически подходить к анализу получаемых материалов. Кроме того, измерив в эксперименте реальную форму сигнала от плоской мишени, можно по аналогии с (8) получить более конкретную формулу для погрешности.

Экспериментальная оценка погрешности поляризационных измерений выполнялась следующим образом. Один из самолетных лидаров [1] производил локацию в горизонтальном направлении. Импульс излучения лазера имел длину волны 539,8 нм. На расстояниях от 110 до 250 м от лидача укреплялась диффузная мишень. Локационный сигнал от мишени, наблюдаемый с помощью осциллографа с шириной полосы пропускания 350 МГц, имел следующие характеристики. Длительность импульса по уровню 0,5 равна 25 нс; по уровню 0,1 — 52 нс; передний фронт равен 8 нс по уровню 0,1 — 0,9; задний фронт равен 34 нс по уровню 0,1 — 0,9. Мишень могла перемещаться вдоль луча лазера с шагом 0,75 м (5 нс).

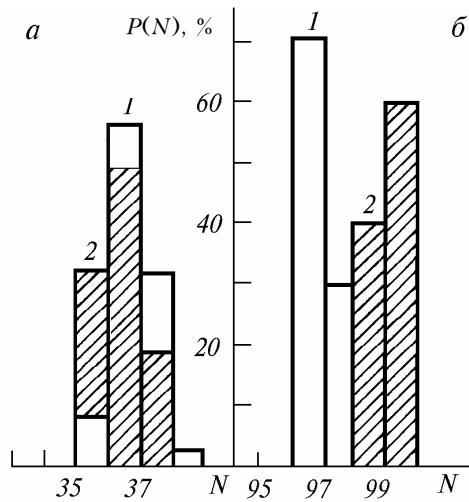


Рис. 2. Эмпирическое распределение вероятности измеренного расстояния до мишени. N —номер отсчета АЦП от момента вспышки лазера. 1 и 2—поляризационные каналы АЦП: a —шаг квантования АЦП 25 нс, каждое значение N соответствует расстоянию 3,75 м; b —шаг квантования АЦП 8 нс, каждое значение N соответствует расстоянию 1,20 м

Информационная система лидача была выполнена на базе микро-ЭВМ. В эксперименте использовались 2 двухканальных АЦП, общая методология построения которых описана в работе [6]. Один из них имел шаг квантования 25 нс, разрядность 6, ширину временных ворот фиксации уровня сигнала 5 нс. Второй АЦП имел шаг квантования 8 нс, разрядность 7, ширину временных ворот 3 нс.

На рис. 2 представлены результаты измерения расстояния до неподвижной мишени по 100 вспышкам лазера по обоим каналам АЦП. Для рис. 2, a , когда шаг квантования равен 25 нс, для обоих каналов наиболее вероятное измеренное значение расстояния до мишени приходится на 36-й строб (расстояние от 135 до 138,75 м). Длительность лидарного эхо-сигнала, сравнимая с шагом квантования АЦП, и флуктуации положения временных ворот внутри строба АЦП приводят к получению измеренного расстояния до мишени, распределенного вокруг некоторого среднего значения. Размах неопределенности измерения расстояния составляет 3 строба, т.е. 8,4 м. Отсюда абсолютная погрешность измерения расстояния составляет 4,2 м, или 1,12 от величины строба АЦП.

Для 8-наносекундного АЦП все значения измеренных расстояний сосредоточены в двух стробах (начало отсчета номер 97 соответствует дистанции 116,4 м). Таким образом, погрешность равна 1,2 метра или ровно одному стробу АЦП. Хотя между обоими каналами имеется систематический сдвиг по расстоянию, он легко устраняется при дальнейшей обработке.

Результаты эксперимента по перемещению мишени при использовании 25-наносекундного АЦП приведены на рис. 3. Начальное расстояние до мишени 127,5 м, \bar{A}_1 и \bar{A}_2 — средние по серии из 60 вспышек значения амплитуд сигналов для 1-го и 2-го каналов АЦП, измеренные на каждой фиксированной позиции. Расположение стробов АЦП вдоль луча лазера примерно стабильно. Поэтому при перемещении мишени достаточно хорошо прослеживаются границы раздела между соседними стробами по провалу в значениях \bar{A}_1 и \bar{A}_2 . Нестабильность момента фиксации значения сигнала приводит к размытости границ измерительных стробов, длина которых изменяется от 3,0 до 3,75 м.

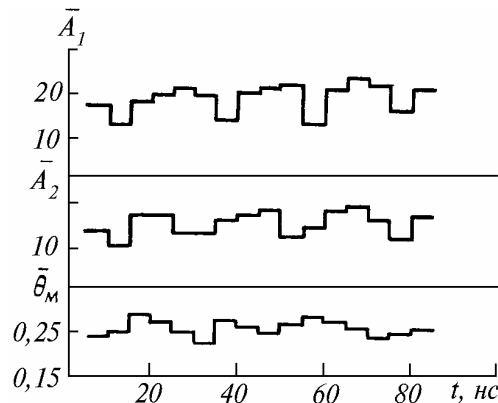


Рис. 3. Результаты локализации диффузной мишени, перемещаемой вдоль луча лазера с шагом 5 нс (0,75 м). \bar{A}_1 и \bar{A}_2 — средние по серии вспышек амплитуды сигналов. \bar{Q}_m — средняя по серии вспышек деполяризация сигнала от мишени

Для этой же серии измерений приведены средние значения деполяризации от мишени \bar{Q}_m . Рассмотренные выше явления, особенно погрешность δQ_4 , приводят к разбросу значений Q_m . Вторичное усреднение по длине всей трассы перемещения мишени дает $Q_m = 0,79 \pm 0,09$, т.е. 11%-ную вариацию.

Наиболее полную информацию о точности поляризационных измерений в автоматизированном режиме дает график распределения вероятности значения деполяризации. Из рис. 4,а видно, что для 25-наносекундного АЦП наиболее вероятное значение деполяризации сигнала от мишени $0,75 \leq Q_m \leq 0,80$. Поскольку в данном АЦП внутрискановая нестабильность момента фиксации значения сигнала сравнима с длительностью самого сигнала от фотодетектора, распределение $P(Q)$ достаточно широкое. Наличие второго локального максимума свидетельствует о неидентичности каналов АЦП, что видно непосредственно из рис. 3.

На рис. 4, б приведена аналогичная характеристика, но для 8-наносекундного АЦП. Уменьшение абсолютной нестабильности в стробе АЦП привело к значительному сужению распределения $P(Q)$. Значение $0,70 \leq Q_m \leq 0,75$ является наиболее вероятным.

По итогам проведенного рассмотрения можно констатировать следующее.

При поляризационном лазерном зондировании оптически плотных сред (облака, морская вода) и подстилающей поверхности существуют несколько источников формирования погрешностей. Их относительная роль может перераспределяться в зависимости от характера зондируемого образования. Возможные абсолютные значения погрешностей оценены расчетным и экспериментальным путями.

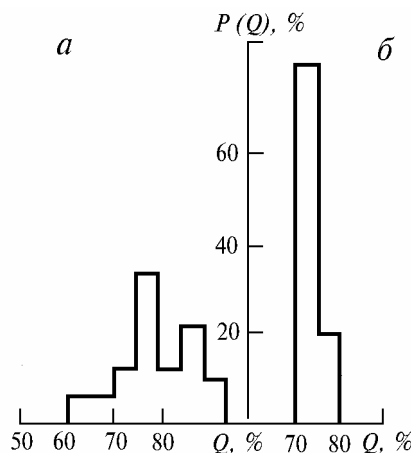


Рис. 4. Распределение вероятности значений деполяризации эхо-сигнала при локации плоской мишени: а – АЦП 25-наносекундный 6-разрядный; б – АЦП 8-наносекундный 7-разрядный

Для зондирования морской воды наиболее опасен с точки зрения погрешности неучтенный сдвиг между моментами фиксации значений сигналов в обоих каналах АЦП. При этом достижение стабильности и синхронности моментов фиксации становится важнее, чем укорочение шага квантования.

В задаче поляризационной локации подстилающей поверхности шаг АЦП, равный постоянной времени фотодетектора, является, вероятно, низшим пределом применимости (учитывая трудности создания скоростных АЦП).

Для малоразрядных АЦП к значительной погрешности могут привести флуктуации мощности излучения лазера, даже если импульсная мощность контролируется независимым устройством.

1. Абрамочкин А.И., Занин В.В., Пеннер И.Э. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 2. С. 94.
2. Байрашин Г.С., Бурков В.В., Кауль Б.В. и др. // В кн.: V Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Тез. докл. Ч. 4. Томск: ИОА СО АН СССР. 1978. С. 249.
3. Воробьев В.И. Оптическая локация для радиоинженеров. М.: Радио и связь. 1983. 176 с.
4. Глазов Г.Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука. 1987. 312 с.
5. Физическая оптика. Обозначения основных величин. ГОСТ 7601-55.
6. Бурков В.В., Байрашин Г.С. // В кн.: VIII Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Тез. докл. Ч. 2. Томск: ТФ СО АН СССР. 1984. С. 306.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
28 апреля 1988 г.

V. S. Shamanaev, I. E. Penner. **Polarization Lidar Measurement Accuracy.**

The relative errors due to the polarization lidar component transformation by an AD converter are examined. Analytic expressions for the observation errors are derived. The lidar depolarization measurement errors are calculated for laser sounding of dense clouds, underlying and sea surfaces. Representative experimental data on the polarization detection and ranging of flat targets are reported.