

В.С. Шаманаев

ПРИМЕНЕНИЕ САМОЛЕТНОГО ЛИДАРА ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

Несколько образцов отечественных и зарубежных лазерных локаторов авиационного базирования, работающих на эффекте упругого рассеяния света, рассмотрены с точки зрения их применения для оценки оптических параметров воды. Проведен анализ результатов по измерению гидрооптических характеристик.

Лидары для зондирования верхнего слоя моря применяют достаточно давно, более десяти лет. Это направление стало развиваться применительно к фундаментальным (в климатологии) и прикладным проблемам (измерение глубины дна на мелководье, поиск биопродуктивных районов в океане, контроль нефтяных и иных загрязнений).

Основное достоинство самолета как платформы для размещения лидара очевидно – это высокая скорость обследования акваторий. Кроме того, возможность работы над мелководьем, где опасно ходить судам. Во многих случаях это искупает недостатки: высокую стоимость собственно полетов, зависимость от погодных условий.

Большое внимание уделяется флуоресцентному зондированию, т.к. оно позволяет технически относительно просто обнаруживать органические соединения в воде. Это различные хлорофиллы, нефтепродукты и т.п. Из-за сложности химико-физического состояния этих веществ проблема их идентификации и количественных измерений пока что далека от полного разрешения. (Ею занимаются многие организации, в частности, входящие в Европейскую ассоциацию лабораторий дистанционного зондирования [1]). Однако глубина зондирования при люминесцентном приеме сигнала достигает лишь нескольких метров, т.к. это излучение сосредоточено в красной области спектра, для которой велико поглощение в воде. Поэтому рассмотрим некоторые результаты, полученные на упругом рассеянии излучения зеленого диапазона, где достигнуты наибольшие глубины зондирования.

В прикладном аспекте лазерного гидрооптического зондирования наибольшие успехи были достигнуты в Австралии при решении задачи измерения глубины дна [2]. Здесь же возникла необходимость определения светорассеивающих характеристик воды, т.к. многократное рассеяние света влияет на точность батиметрических измерений. Разумеется, параметры светорассеяния имеют и собственную ценность, т.к. все особенности индикатрисы и матрицы рассеяния света водой задаются ее микрофизическим и химическим составом. В ряде работ, например [3], сделано серьезное продвижение вперед по пути идентификации подводных лидарных сигналов, хотя до количественных решений обратных задач еще имеется огромная дистанция.

Так, в 1980 г. исследователи группы Хога [4] с лидаром на маломощном лазере («горячая» зеленая полоса неона) смогли достичь глубины зондирования морской воды в несколько метров и выявить наличие придонных гидрозольных слоев, дающих заметные по мощности сигналы.

В лагуне Венеции до глубины 12 м также было обнаружено слоистое строение воды [6]. Для зондирования использовался лазер на длине волны 450 нм. Принимала рамановский сигнал на длине волны 533 нм, представляющий сейчас наибольший интерес, и из него определялся показатель ослабления с разрешением 1 м. Точность восстановления не слишком велика, но позволяет отслеживать изменения свойств воды на расстояниях до 25 км.

Уже упомянутая австралийская группа получила интересные данные с помощью лидара WRELADS-II [2]. Рис. 1 иллюстрирует глубинный ход эхосигнала в чистой морской воде у побережья Австралии при высоте полета 500 м. Сигнал получен с пространственным разрешением в воде 0,60 м до глубины около 15 м. Весьма отчетливо выделяются по всплескам

мощности слои на глубинах 5 и 11 м. В серии экспериментов получен горизонтальный разрез моря (рис. 2) длиной около 30 км. Лидар не был прокалиброван по мощности, поэтому показатель обратного рассеяния $\hat{\sigma}_\pi$ приведен в некоторых относительных единицах. Показатель ослабления ϵ получен методом логарифмической производной и калибровки не требует.

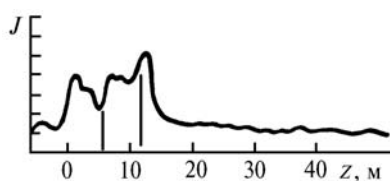


Рис. 1. Эхосигнал лидара WRELADS-II, полученный из-под воды. Глубина 0 м соответствует границе раздела воздух-вода. Пространственное разрешение по глубине 0,6 м

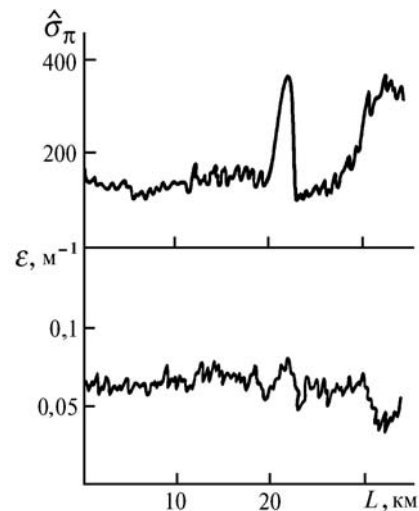


Рис. 2. Горизонтальный разрез верхнего слоя моря. L – полетная дистанция; ϵ – показатель ослабления излучения в воде; $\hat{\sigma}_\pi$ – показатель обратного рассеяния излучения в относительных единицах

На дистанции полета около 19 км вода имеет флуктуирующие оптические характеристики. В районе 20–22 км налицо ярко выраженное повышение отражательной способности водной толщи. На более дальних расстояниях обратное рассеяние и ослабление антикоррелировано. То есть здесь налицо пример идентификации трех различных участков моря. Подобная методика распознавания этих участков в заливе Сент-Винсент [6] в координатах ϵ – $\hat{\sigma}_\pi$ иллюстрируется на рис. 3 [6].

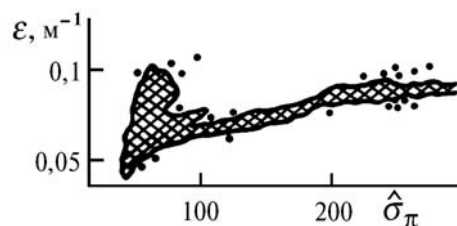


Рис. 3. Взаимосвязь обратного рассеяния и ослабления излучения в воде по данным одной из полетных линий

Наряду с участком с линейной регрессией имеется область (слева), где зависимость $\epsilon = \epsilon(\hat{\sigma}_\pi)$ не проявляется явно. Можно предположить наличие на этой полетной линии двух водных типов, тем более что полет проходил от глубин 35 м к 6 м, т.е. изменялась роль придонной минеральной фракции гидрозоля. (Как известно, индикатрисы рассеяния мелкодисперсной минеральной и грубодисперсной органической фракций существенно различаются).

Выше рассматривалась обработка сигналов, полученных с относительно высоким пространственным разрешением по глубине. Иной подход изложен в [7]. Здесь в каждой вспышке лазера регистрировалась мощность эхосигнала, принятого на двух фиксированных глубинах с интервалом 11 м. На рис. 4 показаны данные по двум полетным линиям. В относительных единицах приведена мощность эхосигнала с обеих глубин, усредненная по последовательности вспышек лазера. Для каждой последовательности вычислен коэффициент корреляции B . В этом случае подход к диагностике водных масс можно усмотреть в следующем. На рис. 4, а сигналы с глубин 11 и 22 м флуктуируют сильно, но между ними существует поло-

жительная корреляция. На рис. 4, \bar{b} мощности сигналов вдоль полетной линии флуктуируют слабее, однако коэффициент корреляции между ними имеет знакопеременный характер.

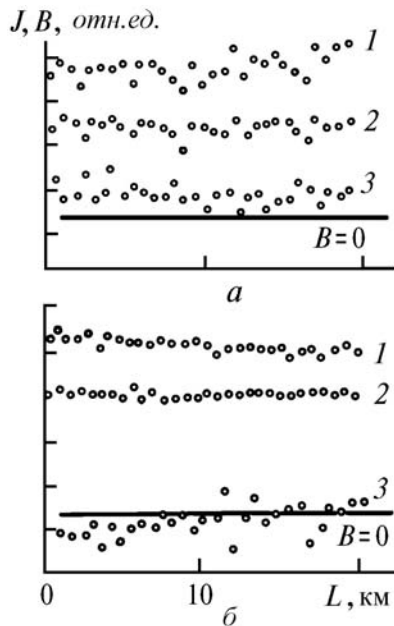


Рис. 4. Результаты зондирования воды на двух полетных линиях (*a* и *б*). 1 и 2 – мощности сигналов с глубин 11 и 22 м в относительных единицах; 3 – коэффициент корреляции B между сигналами

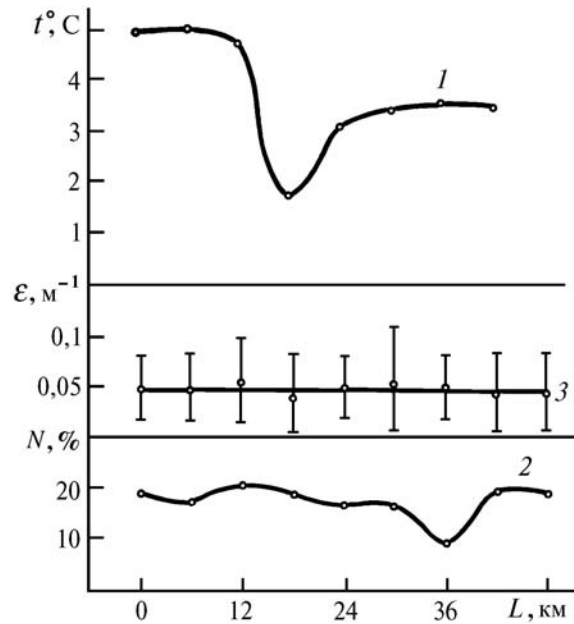


Рис. 5. Горизонтальный разрез верхнего слоя моря: L – полетная дистанция; 1 – профиль температуры поверхности воды; 2 – относительная частота N появления подводных импульсов; 3 – показатель ослабления на волне 532 нм со стандартным отклонением

В наших полетах также производились горизонтальные разрезы моря с разрешением по глубине 2,8 [8] и 1,1 м [9]. В условиях температурных градиентов поверхности моря вдоль полетной линии наблюдается нестабильность верхнего слоя воды. Пример такой нестабильности показан на рис. 5 [8], где N – доля эхосигналов, содержащих подводные импульсы на заднем фронте (по типу рис. 1), в общей серии всплесков. Глубина моря была несколько сот метров, т.е. это не были сигналы от дна. Во всяком случае, здесь проявляется детерминированная, хотя и неявная, связь неоднородностей верхнего слоя моря с его температурным строением.

В [9] приведены результаты зондирования области моря, в которой на глубине 5–10 м была повышенная соленость, и горизонтальные размеры этой локальной неоднородности достигали 30 км. До 40% сигналов имели всплеск на заднем фронте, соответствующий глубине 10–15 м. Их распределение (группировка) говорит о наличии ячеек неоднородности с размерами в десятки и сотни метров.

Ячеистая структура светорассеивающих свойств воды вдоль полетных линий была отмечена также в эксперименте группы Хога [10]. Слои с повышенными значениями показателя ослабления были отмечены на глубинах от 6 до 24 м.

Имеющегося к настоящему времени экспериментального материала по лазерному зондированию светорассеивающих структур в верхнем слое моря пока что не достаточно для построения каких-либо моделей. Такие эксперименты являются дорогостоящими. Однако ясно, что с помощью лидаров можно быстро исследовать степень однородности приповерхностного слоя моря до глубин в десятки метров. Можно также проводить некоторую классификацию подводных неоднородностей, используя либо статистический анализ сигналов, как в некоторых рассмотренных выше работах, либо поляризационный анализ [11]. Все это позволяет рекомендовать авиационный лидарный метод контроля состояния верхнего слоя моря не только в чисто научных целях, но и для решения различных прикладных задач.

1. Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea. EARSEL. Florence, Italy, May 6–8, 1991. IROE-CNR.
2. Penny M. E., Abbot R. H., Phillips D. M. et al. // Appl. Opt. 1986. V. 25. №13. P. 2046–2058.

3. Картин Б.А., Креков Г.М., Крекова М.М. //Оптика атмосферы и океана. 1992 Т. 5 № 3. С. 292–299.
4. Hoge F.E., Swift R.N., Frederick E.B. //Appl. Opt. 1980. V. 19. № 6. P. 871–883.
5. Diebel-Longohr D., Hengstermann T., Penner R. Depth Profiles of Hydrographic Parameters – Measurement and Interpretation of Lidar Signals. // «Laser/Optoelectron. Techn. Vorr. 7 Int. Kongr. Laser 85 Optoelectron. München, Nov., 1985», Berlin e. a., 648–651.
6. Billard B., Abbof R.H., Penny M.F. //Appl. Opt. 1986. V. 25. № 13. P. 2080–2088.
7. Власов Д.В. //Изв. АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 50. № 4. С. 724–735.
8. Пеннер И.Э., Самохвалов И.В., Шаманаев В.С. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 12. С. 60–66.
9. Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Опыт одновременного зондирования моря судовым и самолётным лидарами //Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 2. С. 107–111.
10. Hoge F.E., Wright C.W., Krabill W.B. et al. //Appl. Opt. 1988. V. 27. № 19. P. 3969–3977.
11. Дистанционный контроль верхнего слоя океана /Под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
4 декабря 1992 г.

V. S. Shamaev. The Use of Airborne Lidar for Sensing the Sea Water Areas.

Some prototypes of domestic and foreign airborne lidars operating on the basis of the elastic light scattering effect have been considered from the standpoint of their application for estimating water optical parameters. The results of measurements of hydrooptical characteristics have been analyzed.