

УДК 535.417 : 551.463

С. БАБИЧЕНКО, А. ДУДЕЛЬЗАК, К. СААР

ВЛИЯНИЕ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ НА ЭХО-СИГНАЛ ДИСТАНЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Волнение поверхности моря является неустранимым фактором, приводящим к стохастизации параметров эхо-сигнала дистанционного зондирования. Влияние эффектов двукратного прохождения света через взволнованную поверхность моря подробно исследовалось в задачах формирования изображения оптическими системами [1] и пассивного дистанционного зондирования [2, 3]. Ряд особенностей возникает при лазерном зондировании моря.

Состояние поверхности моря влияет как на параметры лазерного пучка [4], так и на временную структуру ответного сигнала. В результате экспериментов по лазерному зондированию океана обнаружены аномальные колебания амплитуды эхо-сигнала во времени [5]. В рамках аналитических моделей временная структура эхо-сигналов активного зондирования исследована в работах [6, 7]. Определена область параметров системы излучение—поверхность, в которой наблюдается усиление принимаемого сигнала.

Практический интерес представляют анализ влияния параметров реальной приемной системы на величину сигнала при зондировании через взволнованную поверхность и исследование возможностей уменьшения этого влияния.

В настоящем сообщении представлены результаты численного моделирования приема сигнала в условиях маловысотного зондирования водной толщи. Рассмотрена моностатическая схема судового лидара с конечными апертурой и фокусным расстоянием приемного телескопа. При выполнении условий

$$R \operatorname{tg} \theta \ll \Lambda, \quad A_z^{1/2} \ll (Rm + z) \quad (1)$$

для оценки мощности принимаемого сигнала можно пользоваться геометрикооптическим приближением. Здесь R — средняя высота зондирования, θ — расходимость излучения источника, $A_z^{1/2}$ — линейный размер возбуждаемой области на глубине z , m — показатель преломления воды, Λ — характерный масштаб неоднородностей поверхности. Условия (1) при маловысотном зондировании выполняются практически для всех видов волнения кроме капиллярного.

В отсутствие волнения мощность сигнала на входе спектрального прибора имеет вид:

$$P_0 = \frac{\pi P e^{\gamma G}}{G a^2 / f^2} E_2(\gamma G) h_0^2, \quad G = Rm - m \frac{f}{a} (f + a), \quad (2)$$

где P — мощность в импульсе лазера, γ — коэффициент эффективного ослабления в воде за счет поглощения и рассеяния, f — фокусное расстояние приемного телескопа, $2h_0$ — линейная апертура входного зрачка спектрального прибора, $E_2(x)$ — экспоненциальный интеграл 2-го рода. Параметр a характеризует абсолютную линейную отстройку

входной плоскости спектрального прибора от фокальной плоскости телескопа. Анализ выражения (2) показывает, что для приема сигнала всей водной толщи существует оптимальное значение a_{opt} , соответствующее максимуму сигнала: $a_{\text{opt}} = f^2 / (R - f)$.

Введем параметр расстройки $\xi = a / a_{\text{opt}}$, определяющий фокусировку приемного телескопа на заданную глубину.

В условиях волнения поверхности флуктуация сигнала на приемнике обусловлена как изменением телесного угла приема, так и изменением углов прихода лучей. При конечном фокусном расстоянии и апертуре телескопа эффективное освещение входного зрачка спектрального прибора определяется мощностью сигнала из приосевой области на поверхности воды, существенно меньшей поля зрения телескопа. В этом случае можно записать

$$z \operatorname{tg} \theta' \ll \Lambda, \quad (3)$$

где θ' — плоский угол, соответствующий телесному углу приема эхосигнала. При выполнении (1) и (3) форма взволнованной поверхности несущественна, волнение определяется случайными параметрами \tilde{a} , \tilde{R} , где \tilde{a} — наклон нормали поверхности, \tilde{R} — высота зондирования. Мощность сигнала, соответствующая одному импульсу лазера, имеет вид:

$$\tilde{P} = PK(\tilde{a}) \int_{-\infty}^0 \frac{S^* b_0}{S_0} \exp \left\{ -\frac{\gamma z}{\cos(\Delta\tilde{a})} \right\} \Delta\tilde{\Omega}(\tilde{R}, \tilde{a}, z) dz. \quad (4)$$

Функция $k(\tilde{a})$ включает в себя френелевские потери на отражение от поверхности, пропускание приемной оптики, эффективность наблюдаемого процесса (флуоресценции, СКР и т. д.). В выражении (4) $\Delta\tilde{\Omega}$ — телесный угол приема, являющийся в условиях волнения случайной величиной, $S(x, y, z)$ — функция светового пятна, S_0 — его площадь для сигнала из слоя dz на глубине z ; $b_0(x, y) = \begin{cases} 1, & x, y \leq h_0 \\ 0, & x, y > h_0 \end{cases}$ — функция зрачка спектрального прибора, $S^* b_0$ — свертка по координатам x, y ; $\Delta\tilde{a}$ — разность углов наклона падающего и преломленного лучей. Значение телесного угла $\Delta\tilde{\Omega}$ определяется решением трансцендентного уравнения хода лучей для заданных параметров \tilde{R}, \tilde{a} .

Нахождение средних величин $\bar{P}(\tilde{a}, \tilde{R})$ из соотношения (4) производилось методом статистических испытаний. Использовано нормальное распределение \tilde{a}, \tilde{R} с заданными дисперсиями $\sigma_{SL}^2, \sigma_R^2$.

В численных оценках рассмотрены значения параметров приемной системы, характерные для судовых лидаров: $\bar{R} = 10$ м; $f = 50$ см, $2h_0 = 1$ мм, диаметр телескопа $d = 30$ см. Для удобства сравнения результатов все линейные размеры нормированы на среднюю высоту зондирования \bar{R} .

На рис. 1 представлены зависимости средней по реализациям мощности принимаемого сигнала всей водной толщи при различных значениях параметра расстройки ξ . Характерным является уменьшение величины \bar{P} с одновременным ростом σ_p при увеличении волнения. Как и в отсутствие волнения, средняя мощность сигнала максимальна при настройке приемного телескопа на средний уровень поверхности ($\xi = 1$). Однако в этом случае максимальна и дисперсия сигнала. Расположение входного зрачка спектрального прибора в фокальной плоскости приемной системы ($\xi = 0$) приводит к значительному снижению \bar{P} (при выбранных параметрах оптики $\bar{P}(\xi = 1) / \bar{P}(\xi = 0) \sim 100$) при незначи-

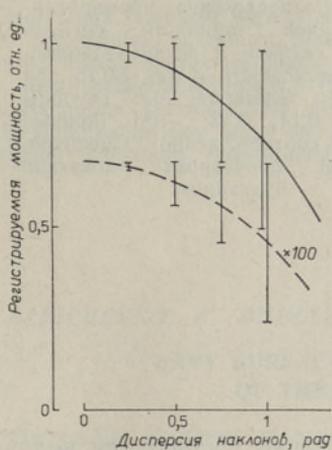


Рис. 1. Зависимость средней мощности сигнала \bar{P} дистанционного зондирования водной толщи от дисперсии наклонов взволнованной поверхности σ_{SL} при настройке телескопа на бесконечность ($\xi=0$ — пунктирная кривая) и на средний уровень поверхности ($\xi=1$ — сплошная кривая).

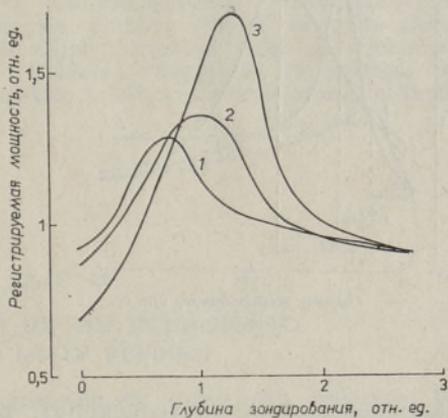


Рис. 2. Распределение нормированной средней мощности сигнала \bar{P}/P_0 по глубине для различных дисперсий наклонов взволнованной поверхности σ_{SL} (1 — $\sigma_{SL}=0,5$; 2 — $\sigma_{SL}=0,75$; 3 — $\sigma_{SL}=1$). Первоначальная настройка на глубину $z_0/\bar{R}=0,32$.

тельном уменьшении σ_p . При регистрации слабых световых потоков, что имеет место в реальном лидарном эксперименте, возрастание σ_p с ростом σ_{SL} может привести к выходу сигнала в отдельных реализациях за пределы динамического диапазона приемной системы. Вследствие этого неэффективным становится накопление сигнала.

Помимо уменьшения средней мощности сигнала, волнение поверхности приводит к эффективной перефокусировке оптической системы. В соответствии с определением параметра расстройки величина ξ связана с глубиной z_0 плоскости наилучшей фокусировки приемного телескопа в пространстве предметов (предметная плоскость) соотношением

$$z_0 = R(1 - \xi)(1 - f/R)m/\xi.$$

В случае взволнованной поверхности реальное значение \tilde{z}_0 возрастает. На рис. 2 приведены кривые распределения относительной мощности принимаемого сигнала по глубине зондируемого слоя. С ростом дисперсии наклонов σ_{SL} координата максимума \tilde{z}_0 в зависимости от $\bar{P}(z)$ смещается в сторону больших z . При выбранных параметрах приемной оптики величина смещения предметной плоскости достигает 15 м. Для фиксированного значения σ_{SL} это смещение проявляется сильнее с увеличением глубины z_0 . На рис. 3 приведены сдвиги плоскости фокусировки при различной настройке телескопа ($\xi(\sigma_{SL}=0,75)$). Полученные данные качественно согласуются с результатами экспериментов [8].

Фактически данный эффект связан со средним уменьшением телесного угла приема сигнала из слоя dz в условиях волнения. Это соответствует эффективному «удалению» слоя. Случайный сдвиг плоскости наилучшей фокусировки, обусловленный волнением поверхности, является дополнительным фактором, снижающим эффективность приема сигнала в условиях стратификационных измерений. Для уменьшения влияния волнения проводилась оптимизация настройки приемной системы по параметру ξ . Анализ результатов показал, что наиболее эффективной является настройка на «отрицательные» глубины z_0 (входная плоскость спектрального прибора находится на расстоянии $a > a_{opt}$ от

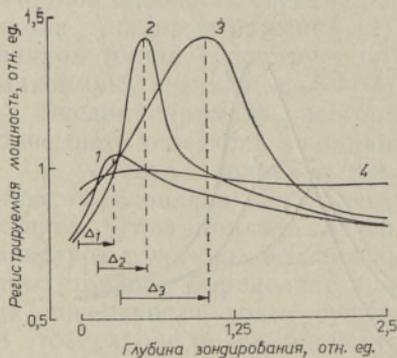


Рис. 3. Распределение нормированной средней мощности сигнала P/P_0 по глубине в случае взволнованной поверхности с $\sigma_{SL}=0,75$ при настройке телескопа на глубины $z_0/\bar{R}=0; 0,14; 0,32; -0,1$ (кривые 1, 2, 3, 4 соответственно). Смещение плоскостей фокусировки показано пунктиром.

фокальной плоскости телескопа). В этом случае абсолютная величина мощности сигнала уменьшается в пределах порядка по отношению к мощности при $\xi=1$, а распределение $\bar{P}(z)$ не имеет выраженных максимумов (рис. 3).

В приведенных результатах высота зондирования R оставалась постоянной. Флуктуации \bar{R} приводят к увеличению средней мощности сигнала с одновременным ростом дисперсии σ_p , при этом описанные выше эффекты сохраняются. Таким образом, влияние поверхностного волнения необходимо учитывать как при создании оптических схем в системах дистанционного зондирования, так и при интерпретации результатов натуральных экспериментов. Оптимизация настройки приемной системы, как показано выше, позволяет частично элиминировать это влияние. Полное его устранение возможно при использовании специальных оптических схем, не чувствительных к увеличению расстояния до предметной плоскости, начиная с характерных дистанций порядка высоты зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лучинин А. Г. Изв. АН СССР. Сер. физ. атм. и океана, **18**, 330—333 (1982).
2. Guinn, A., Plass, G. N., Kattawar, W. Appl. Opt., **18**, 842—849 (1979).
3. Шифрин К. С., Гардашов Р. Г. Изв. АН СССР. Сер. физ. атм. и океана, **21**, 162—169 (1985).
4. Guern, Y., Lotrian, J., Budean-Mehu, A., Carion, J. Appl. Opt., **24**, 655—659 (1985).
5. Hoge, F. E., Swift, R. N. Appl. Opt., **22**, 3778 (1983).
6. Власов Д. В. Изв. АН СССР. Сер. физ., **29**, № 3, 433—442 (1985).
7. Бакут П. А., Бункин Ф. В., Власов Д. В., Мандросов В. И., Некрасов А. И. Сб. тезисов докл. XII конф. КиНО. М., 1985, 562.
8. Власов Д. В. Автореф. док. дис. М., 1985.

Специальное конструкторское бюро
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
16/X 1986

S. BABITSENKO, A. DUDELZAK, K. SAAR

MEREPINNA LAINETUSE MÕJU LASERDISTANTSSONDEERIMISE KAJASIGNAALILE

Artiklis on käsitletud signaali vastuvõtu arvulist modelleerimist merepinna laserlähisondeerimisel laeva pardalt. Statistiline analüüs tehti lidarivõrandi alusel geomeetrilise optika meetodil.

Merëpinna lainetuse tagajärjel väheneb kasuliku signaali keskmine võimsus ja suureneb dispersioon. Sealjuures täheldatakse, et vastuvõtuteleskoobi parima fokuseerimise tasapind nihkub suuremate sügavuste suunas, mis vähendab signaali vastuvõtu efektiivsust stratifikatsioonmõõtmistel. Nihke suurus sõltub merepinna kalde dispersioonist ja vastuvõtuooptika parameetritest ning ulatub käsitletud tingimustel 15 meetrini. Selle efekti elimineerimiseks, nagu on näidatud artiklis, tuleks vastuvõtuteleskoop häälestada vajalikule kõrgusele merepinnast.

S. BABICHENKO, A. DUDELZAK, K. SAAR

WAVY SURFACE EFFECT ON THE ECHO-SIGNAL OF THE REMOTE LASER SENSING

The results of numerical modelling of receiving the signal with low-height laser sensing of the sea from aboard a research vessel are presented. The statistical analysis has been made on the basis of the lidar equation within the geometrical-optical approximation.

Wavy surface effects lead to the decrease of the mean signal power with the increase of the signal dispersion, the level of the best focusing of the receiving telescope shifting towards greater depths, decreasing thus the efficiency of receiving the signal under stratification measurements. The shift value is determined by the dispersion of random slopes of the sea surface and the parameters of the receiving optics, and reaches 15 m under the conditions chosen. To eliminate this effect the receiving telescope should be focused on the near-water atmosphere layer.