

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ЗЕРКАЛЬНЫХ ТОЧЕК

**Т.М.ТАТАРАЕВ<sup>1</sup>, Т.Г.ГАРДАШОВА<sup>1</sup>, Ш.О.ЭМИНОВ<sup>2</sup>**

*Азербайджанское Национальное Аэрокосмическое Агентство НАН Азербайджана<sup>1</sup>  
AZ 1106, г.Баку, пр.Азадлыг, 159  
Институт Физики НАН Азербайджана<sup>2</sup>  
AZ 1143, г.Баку, пр.Г.Джавида 33*

На основе усовершенствованного метода зеркальных точек (МЗТ) проведены расчеты статистических характеристик числа зеркальных точек  $\langle N_{11} \rangle$  и радиусов кривизны  $\langle r \rangle$  в зеркальных точках. Изучены зависимости этих характеристик от разных типов морского волнения и показано, что они очень чувствительны к изменениям скорости ветра  $v$  и могут быть использованы для дистанционного определения скорости ветра. Однако, из-за конечности разрешающей способности любой оптической системы, дистанционное определение параметров  $\langle N_{11} \rangle$  и  $\langle r \rangle$  возможно до определенной высоты зондирования. При высотах зондирования, не превышающих 4000м, для индикации состояния морской поверхности может быть применен дистанционный метод, использующий бликовые изображения морской поверхности, а для высот, превышающих 4000м, может быть применен дистанционный метод, использующий среднее значение и дисперсии обратно отраженного оптического сигнала.

### ВВЕДЕНИЕ

Морская поверхность (МП) является окном, через которое мы смотрим в океан. Процессы, происходящие в океане, отражаются на состоянии его поверхности, изучая которую мы сможем получить информацию об этих процессах.

МП практически всегда взволнована. Структура волнения зависит от ряда факторов: от поля ветра над морем, от рельефа дна, от наличия загрязняющих веществ (особенно нефтяной пленки) на поверхности, от наличия внутренних волн и течений, а так же волн зыби и т.д. Все эти факторы вносят свой вклад в неровности МП. Изучение структуры МП, особенно дистанционными методами, имеет большое значение как для мониторинга океана и морей, так и для военных целей (обнаружение и контроль подводных лодок). Особенно чувствительны к состоянию МП характеристики оптического излучения, отраженного от МП.

Для разработки эффективных дистанционных оптических методов необходимо теоретическое продвижение в области дифракции электромагнитных волн на статистически неровной поверхности. Строгого решения задачи дифракции на неровной поверхности не имеется. Существуют приближенные методы решения задачи дифракции, которые применимы при определенных соотношениях между длиной электромагнитных волн  $\lambda$  и характерного размера неровностей  $a$ . Если длина волны  $\lambda$  намного больше, чем высота неровностей  $h$ , то задача решается методом возмущений [1], основным следствием которого является резонансное рассеяние - из всего спектра морского волнения только одна гармоника участвует в рассеянии. Эта гармоника определяется длиной волны  $\lambda$  и углом падения  $\psi$  излучения.

В другом предельном случае, когда длина волны  $\lambda$  намного меньше, чем характерные радиусы кривизны  $\rho$ , задача решается так называемым методом Кирхгофа (методом касательной плоскости) [3,4], приводящим к основному

заклучению о том, что угловое распределение средней интенсивности отраженного излучения определяется функцией распределения наклонов отражающей поверхности. К этому же результату приводит и приближение геометрической оптики.

Другое приближение есть сочетание метода возмущений и метода Кирхгофа, в котором предполагается, что поверхность состоит из крупных и пологих неровностей (рассеяние от которых можно рассчитать методом Кирхгофа), покрытых мелкой рябью (рассеяние от которой можно рассчитать методом возмущений). Такая 2-х масштабная модель, впервые предложенная Курьяновым [5], в дальнейшем развивалась в других работах (например, [6]).

Более строгая теория, которая справедлива для всех длин волн излучения и размеров неровностей, называемая методом интегрального уравнения, имеет очень громоздкое и сложное выражение [7].

Когда речь идет об отражении оптического излучения, где длина волны  $\lambda$  измеряется в микронах, а радиусы кривизны в сантиметрах, достаточно хорошим приближением является метод Кирхгофа. Однако, в рамках этого метода обозримые результаты получаются только для средней интенсивности, а для вычисления флуктуации интенсивности необходимо вычисление восьмикратных интегралов и получить обозримые результаты очень трудно.

Другой подход, являющийся развитием метода зеркальных точек (МЗТ), пригодный для расчета средней интенсивности, ее флуктуации и плотности распределения, разработан в [8]. Согласно МЗТ интенсивность излучения, отраженного от поверхности, определяется радиусами кривизны  $\rho$  в точках зеркального отражения и числом зеркальных точек  $N$ . Суть предлагаемого в работе [8] развития МЗТ заключается в том, что отражение от точек поверхности, где кривизна отлична от нуля, рассчитывается по геометрической оптике, а для точек с нулевой кривизной ("каустические точки") - с привлечением волновой оптики. Если поверхность статистически неровная, то эта операция осуществляется введением эффективной плотности распределения радиусов кривизны. Преимуществом МЗТ является то, что он имеет дело с чисто геометрическими и наблюдаемыми характеристиками ( $\rho$  и  $N$ ) поверхности и причем очень чувствительными ко всяким изменениям структуры поверхности. Поэтому эти характеристики могут быть использованы для разработки эффективных дистанционных оптических методов изучения структуры поверхности. Кроме того, для случайных гауссовых поверхностей, к числу которых с большой точностью можно отнести и морскую поверхность, статистические характеристики радиусов кривизны  $\rho$  в точках зеркального отражения и их числа  $N$ , поддаются сравнительно полному теоретическому анализу.

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ

Плотность распределения  $W(\rho)$  радиусов кривизны  $\rho$  для гауссовой одномерной поверхности  $z = \zeta(x)$  в точках зеркального отражения с наклоном  $\zeta'(x) = \gamma$  выведена в работе [9]. Выражение для  $W(\rho)$ , написанное для

нормированного радиуса кривизны  $X = \sqrt{\pi} \frac{|\rho|}{\langle |\rho| \rangle}$  имеет очень простой вид:

$$W(X) = \frac{2}{X^3} e^{-\frac{1}{X^2}}. \quad (1)$$

Средний радиус кривизны определяется по формуле:

$$\langle |\rho| \rangle = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(1 + \gamma^2)^{\frac{3}{2}}}{\sigma^2}, \quad \langle X \rangle = \sqrt{\pi}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  - дисперсия величины  $\zeta''(x)$ .

Отметим, что вторые и более высокие моменты распределения  $W(\rho)$  обращаются в бесконечность.

Как видно, (1) не содержит какого-либо параметра. Отсюда следует важное заключение: плотность  $W(X)$  универсальна для всех гауссовых поверхностей  $z = \zeta(x)$ .

В случае двумерной гауссовой поверхности  $z = \zeta(x, y)$  в работе [10] для плотности распределения  $W(\Omega)$  гауссовой кривизны  $\Omega$  в точках зеркального отражения с наклоном  $\zeta_x(x, y) = \gamma_x$ ,  $\zeta_y(x, y) = \gamma_y$ , получено выражение в виде интегрального представления, содержащее функции ошибок и удобное для расчетов. Плотность  $W(\Omega)$  несимметрична, ее отрицательная ветвь спадает быстрее, чем положительная. Это есть общее свойство двумерной гауссовой поверхности  $\zeta(x, y)$ , отражающее различия по структуре эллиптической зеркальной точки (положительная кривизна) от седлообразной (отрицательная кривизна) поверхности. Отметим, что в отличие от двумерной для одномерной поверхности  $z = \zeta(x)$ , "положительная" или "отрицательная кривизна" определяется условно.

Асимптоты и разные частные случаи плотности  $W(\Omega)$  исследованы в работе [11]. Для среднего от "квадрата радиуса кривизны"  $\langle \mathcal{R}^2 \rangle = \frac{1}{|\Omega|}$ , вычисленного по плотности  $W(\Omega)$  имеем:

$$\langle \mathcal{R}^2 \rangle = \frac{\pi(1 + \gamma_x^2 + \gamma_y^2)^2}{4l_1 \Phi\left(-\frac{l_2}{l_1}\right)}, \quad (3)$$

здесь  $l_1, l_2$  параметры, определяемые моментами энергетического спектра морского волнения, а  $\Phi(t)$ ,  $(0 \leq t \leq 1/2)$  есть очень медленно, монотонно убывающая функция с максимальными и минимальными значениями соответственно равными:  $\Phi(0) = 1$ ,  $\Phi(1/2) \approx 0,907$ . В этом случае вторые и более высокие моменты распределения  $W(\mathcal{R}^2)$  обращаются в бесконечность.

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧИСЛА ЗЕРКАЛЬНЫХ ТОЧЕК

Выражение для плотности распределения  $W(N)$  числа зеркальных точек  $N$  пригодное для практического применения, имеется только для двух предельных случаев: 1) на рассматриваемом участке поверхности вероятность появления зеркальной точки мала, и появление следующей зеркальной точки статистически не зависит от прежней. В этом случае зеркальные точки будут распределены по закону Пуассона; 2) на рассматриваемом участке поверхности много зеркальных точек статистически независимых друг от друга. В этом случае зеркальные точки будут распределены по закону Гаусса.

Среднее число зеркальных точек  $\langle N_1 \rangle$ , приходящееся на единицу длину, для одномерной гауссовой поверхности  $z = \zeta(x)$  определяется выражением

$$\langle N_1 \rangle = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \exp \frac{\gamma^2}{\sigma_1^2}, \quad (4)$$

где  $\sigma_1$  - дисперсия величины  $\zeta'(x)$ .

Среднее число зеркальных точек  $\langle N_{11} \rangle$ , приходящееся на единицу площади, для двумерной гауссовой поверхности  $z = \zeta(x, y)$  определяется как

$$\langle N_{11} \rangle = \frac{4}{\pi} l_1 \Phi \left( -\frac{l_2}{l_1} \right) W_2(\gamma_x, \gamma_y) \quad , \quad (5)$$

где  $W_2(\gamma_x, \gamma_y)$  - плотность распределения наклонов поверхности, которая является нормальным распределением.

### РАСЧЕТЫ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕРКАЛЬНЫХ ТОЧЕК

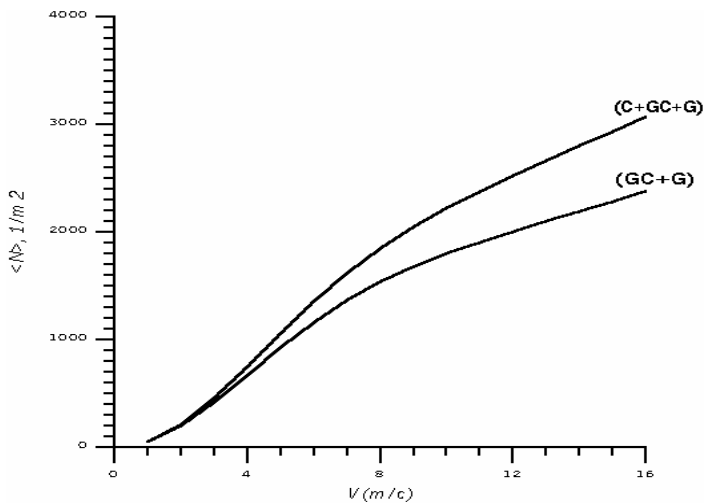
Чтобы показать чувствительность рассматриваемых характеристик к изменениям состояния морской поверхности, мы провели расчеты  $\langle N_{11} \rangle$  и  $\langle R \rangle$  при условии, что взволнованность поверхности обусловлена только ветром, т.е. волнение чисто ветровое. Для изучения влияния разных участков спектра волнения спектр обрезался так, чтобы имели место следующие типы волнения:

- 1°. гравитационные волны (G) (длины волн  $\Lambda \geq 60m$ );
- 2°. гравитационно-капиллярные(GC) + гравитационные волны (GC+G) (длины волн  $\Lambda \geq 0.7m$ );
- 3°. Капиллярные (C)+ гравитационно-капиллярные + гравитационные волны (C+GC+G) (длины волн  $\Lambda \geq 0.2m$ );
- 4°. Гравитационные волны ( $G_{\Lambda \geq 60}$ ) с длинами волн  $\Lambda \geq 60m$ ; Последний тип ( $G_{\Lambda \geq 60}$ ) волнения соответствует поверхности, покрытой нефтяной пленкой. Отметим, что из-за неопределенности верхней границы частот обрезание спектра при полном спектре (C+GC+G), именно на длине волн  $\Lambda_{\min} \geq 0.2m$ , не может быть строго обосновано, и  $\Lambda_{\min} \geq 0.2m$  выбрано для получения оценок. Однако, "гидродинамическое обрезание" с  $\Lambda_{\min} \geq 60m$  спектра происходит, если морская поверхность покрыта нефтяной пленкой (тип волнения  $G_{\Lambda \geq 60}$ ). Кроме этого, при наблюдении поверхности оптической системой происходит и "оптическое обрезание", из-за конечности разрешающей способности оптической системы, зеркальные точки, расстояние  $l$  между которыми меньше, чем разрешающая способность  $l_*$ , не будут различаться оптической системой.

На Рис.1 приведены зависимости числа зеркальных точек  $\langle N_{11} \rangle$  от скорости ветра  $v$  для волнения C+GC+G и GC+G типов. Как видно из рисунка, с ростом скорости ветра  $v$  число зеркальных точек сильно растет. С появлением на поверхности более коротких капиллярных (C) волн (кривая C+GC+G) это число также значительно растет.

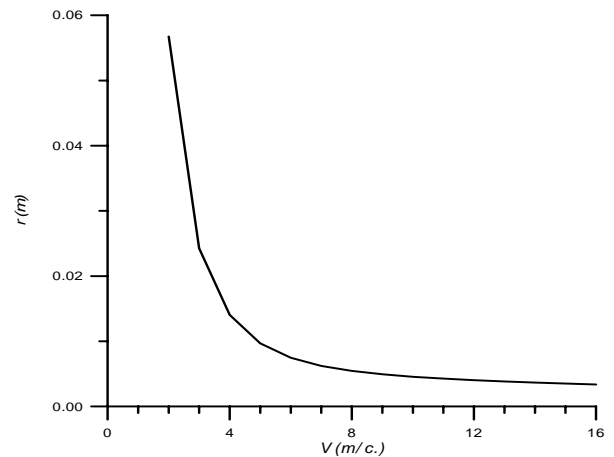
На Рис.2 показаны зависимости радиуса кривизны  $r = \sqrt{\langle R \rangle}$  от скорости ветра  $v$  для волнения C+GC+G типа. Как следует из рисунка, с ростом скорости ветра радиус кривизны существенно уменьшается, однако, при скоростях ветра близких к  $12m/c$  спад кривой прекращается.

Следует отметить, что поведения кривых на Рис.1 и Рис.2 хорошо согласуются с данными измерений, проведенных в открытом океане и в баке (экспериментальном водоеме) [12]. Экспериментально установленным фактом является то, что как раз при  $v > 12m/c$  структура волнения нарушается, волны разрушаются и появляется пена.



**Рис. 1.**

Зависимость среднего числа зеркальных точек  $\langle N_{11} \rangle$  от скорости ветра  $v$  для волнений C+GC+G и GC+G типов.



**Рис. 2.**

Зависимость среднего радиуса кривизны  $\langle r \rangle$  от скорости ветра  $v$  для волнения C+GC+G типа.

### ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА ПО ПАРАМЕТРАМ $\langle N_{11} \rangle$ и $\langle r \rangle$

Анализ Рис.1 и Рис.2 показывает, что параметры  $\langle N_{11} \rangle$  и  $\langle r \rangle$  очень чувствительны к изменениям скорости ветра  $v$ . Поэтому они могут быть использованы для дистанционного определения скорости ветра. Однако, из-за конечности разрешающей способности любой оптической системы, дистанционное определение параметров  $\langle N_{11} \rangle$  и  $\langle r \rangle$  (т.е. числа бликов и размеров бликов) возможно до определенной высоты зондирования. Как известно, угловая разрешающая способность  $\beta$  оптической системы определяется диаметром объектива  $d$  и длиной волны  $\lambda$  по формуле:

$$\beta = 1.22 \frac{\lambda}{d}. \quad (6)$$

При этом линейное разрешение  $l_*$  на объекте при наблюдении с высоты  $H$  определяется выражением:

$$l_* = \beta H = 1.22 \frac{\lambda}{d} H. \quad (7)$$

Если потребовать от оптической системы с размером объектива  $d$  различить зеркальные точки, находящиеся друг от друга на расстоянии  $l$ , при зондировании видимым излучением с длиной волны  $\lambda$ , то из (6) для максимальной высоты  $H_{max}$  зондирования найдем:

$$H_{max} = \frac{1}{1.22} \frac{d}{\lambda} l. \quad (8)$$

Следовательно, до высот зондирования  $H_{max}$  может применяться метод зондирования морской поверхности, основанный на изучении характеристик зеркальных точек. Например, при  $d = 10\text{cm}$ ,  $l = 3\text{mm}$ ,  $\lambda = 0.55\mu\text{m}$  для максимальной высоты зондирования имеем  $H_{max} \approx 4500\text{m}$ . Задача определения

скорости ветра  $v$  (если априори известно, что поверхность чистая и взволнованность поверхности обусловлена только ветром и скоростью ветра  $v \leq 12 \text{ м/с}$ ) может быть решена с помощью Рис.1, например, обрабатывая бликовое изображение морской поверхности. Используя компьютерные программы, по этим изображениям возможно определить число бликов, размеры бликов и их статистические характеристики. Определив по изображению среднее число бликов  $\langle N_{11} \rangle$ , из Рис.1, можно далее определить соответствующее им значение скорости ветра  $v$ . Более сложные задачи, такие как одновременное определение скорости ветра, наличие нефтяной пленки, течений и внутренних волн, зыби и т.д., могут быть решены посредством изучения, наряду со средними величинами (числа блика и их размера), также их дисперсии и плотности распределения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подробные и детальные расчеты, выполненные в [8-11] и в настоящей работе, а также прямые серийные измерения в открытом океане и на баке, выполненные Носовым с коллегами [12], показывают, что характеристики зеркальных точек очень чувствительны ко всяким изменениям поверхности. Поэтому эти характеристики могут быть индикаторами состояния морской поверхности при дистанционном зондировании. Изучая дистанционно характеристики зеркальных точек, в принципе, возможно определить поле ветра и волнения, наличие загрязнений, течений, внутренних волн, волн зыби. При этом для повышения точности дистанционных методов необходимы надежные знания о влиянии всех этих факторов на спектр чисто ветрового волнения. Отметим, что при скоростях ветра  $v > 12 \text{ м/с}$  зависимость параметров  $\langle N_{11} \rangle$  и  $\langle r \rangle$  от скорости ветра слабеет, причем как раз для  $v > 12 \text{ м/с}$  структура волнения нарушается: волны разрушаются, появляется пена. Поэтому для скоростей ветра  $v > 12 \text{ м/с}$  должна быть разработана методика, учитывающая эти эффекты.

1. А.А.Андронов, М.А.Леонтович, *К теории молекулярного рассеяния света на поверхности жидкости, Собр. труд. А.А.Андропова, Издательство АН СССР*, (1956) 5.
2. F.T.Ulabu, R.K.Moore, and A.K.Fung, *Microwave Remote Sensing; Active and Passive*, 2, (Norwood, MA: Artech House), (1982).
3. М.А.Исакович, *ЖЭТФ*, **23** (1952) 305.
4. S.O.Rice, *Communications in Pure and Applied Mathematics*, **4** (1951) 361.
5. Б.Ф.Курьянов, *Акустический журнал*, No3 (1962) 325.
6. S.T.Wu., A.K.Fung, *Journal of Geophysical Research*, **77** (1972) 5917.
7. A.K.Fung, Z.Li, K.S.Chen, *I.E.E.E. Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, **GE-30** (1992) 356.
8. Т.Г.Гардашова., Р.Г.Гардашов, *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*, **37** (2001) 2939.
9. Л.Н.Ахмедов, Р.Г.Гардашов, К.С.Шифрин, *Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана*, **26** No I (1990) 99.
10. R.G.Gardashov, *Int.J. Remote Sensing*, **21** (2000) 2917.
11. T.G.Gardashova, *Rgos.of IMM of NAS Azerbaijan*, **XIV (XXII)** (2001)149.
12. В.Н.Носов, С.Ю.Пашин, *Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана*, **26** (1990) 1161.

**DƏNİZ SƏTHİNİN GÜZGÜ NÖQTƏLƏR ÜSULU İLƏ ZONDLANMASI**

**T.M.TATARAYEV, T.H.QARDAŞOVA, Ş.O.EMİNOV**

Təkmilləşdirilmiş güzgü nöqtələr üsulu əsasında  $\langle N_{11} \rangle$  güzgü nöqtələri sayının və  $\langle r \rangle$  dəniz səthinin güzgü nöqtələrindəki əyrilik radiuslarının statistik xarakteristikaları hesablanmışdır. Bu xarakteristikaların müxtəlif dalğa tiplərindən asılılığı öyrənilmişdir. Göstərilmişdir ki, onlar küləyin sürətinin dəyişməsinə qarşı çox həssasdır və buna görə də onlardan küləyin sürətinin məsafədən təyin edilməsində istifadə etmək olar. Bununla belə istənilən optik sistemin ayırma qabiliyyəti məhdud olduğundan,  $\langle N_{11} \rangle$  və  $\langle r \rangle$ -ni yalnız müəyyən zondlanma hündürlüyündən təyin etmək mümkündür. Müəyyən edilmişdir ki, 4000 metri aşmayan zondlama hündürlüyündə dəniz səthinin vəziyyətini aşkar etmək üçün güzgü nöqtələr təsvirinə əsaslanan distansion üsul tətbiq oluna bilər, 4000 metrədən yuxarı zondlama hündürlüyündə isə dəniz səthinin vəziyyətini aşkar etmək üçün geri qayıdan optik signalın dispersiyasına və orta qiymətinə əsaslanan distansion üsulu tətbiq etmək olar.

**REMOTE SOUNDING OF SEA SURFACE BY METHOD OF SPECULAR POINTS**

**T.M.TATARAYEV, T.G.GARDASHOVA, SH.O.EMINOV**

On basis of modified method of specular points calculations of statistical characteristics of specular points number  $\langle N_{11} \rangle$  and radiuses of curvature  $\langle r \rangle$  in specular points have been lead. Dependences of these characteristics on different types of sea rough have been studied and it was shown, that they were very sensitive to changes of wind speed. Therefore they could be used for remote definition of wind speed. However, due to finiteness of resolution of any optical system, remote definition of parameters  $\langle N_{11} \rangle$  and  $\langle r \rangle$  were possible up to the certain height of sounding. At the heights of sounding which were not exceeding 4000m, for indication of a condition of a sea surface the remote method using flash images of a sea surface could be applied; for the heights exceeding 4000m, the remote method using average value and dispersions back of the reflected optical signal could be applied.

Редактор: Э.Гусейнов