

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЕРОСТИ БЛИКА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

к.т.н. В.Н. Анохин, к.т.н. Е.О. Жилко, А.А. Копылов  
(представил д.т.н., проф. Л.Ф. Купченко)

Предложен метод дистанционного измерения показателя преломления гладкой диэлектрической поверхности (поверхности моря) с использованием оптического сигнала, образованного солнечным бликом и принимаемого датчиком без учета поляризации. Предлагается в качестве признака аномалий морского волнения типа «слик» использовать «коэффициент серости блика», учитывающий априорную информацию о направлении солнечного подсвета и направления визирования каждого фоточувствительного элемента датчика.

Дистанционное зондирование акваторий с летательных аппаратов относится к технологиям двойного назначения. Задачи мониторинга водных ресурсов и их загрязнений, поиск и обнаружение различных объектов можно решать, обнаруживая аномалии в структуре морского ветрового волнения по принятому оптическому излучению.

Высокое пространственно-временное разрешение датчиков типа «сшивка линеек приборов с зарядовой связью» при дистанционном зондировании акваторий с летательных аппаратов дает новую возможность обнаруживать по отдельным бликам аномалии морского волнения типа «слик» (участки поверхности моря с выглаженными высокочастотными волнами). При этом имеется возможность диагностировать «слики», вызванные загрязнением нефтяными пятнами, измеряя показатель преломления вещества  $m$ .

Измерение показателя преломления осуществляется косвенно через измерение коэффициентов отражения оптического излучения от элементов поверхности (фасетов) и по информации об их ориентации, полученной из геометрических условий существования блика.

Простейшим случаем, при котором выполняются геометрические условия существования блика, является падение и отражение света по нормали к фасету. При этом коэффициент отражения  $\rho$  равен

$$\rho = \frac{(m-1)^2}{(m+1)^2}. \quad (1)$$

Показатель преломления  $m$  выражается через  $\rho$  следующим образом:

$$m = (1 + \sqrt{\rho}) / (1 - \sqrt{\rho}). \quad (2)$$

На этой закономерности основаны методы экспресс - анализа загрязнений нефтью водной поверхности при лазерной локации поверхности моря с самолетов. Однако, этот метод имеет ряд ограничений. Одним из них является то, что при слабом ветре сужается полоса просмотра поверхности моря, так как отсутствуют facets, ориентированные перпендикулярно к оси зондирующего пучка при больших отклонениях его от направления местной вертикали. Другое ограничение - соотношение сигнал/фон, определяемое мощностью и расходимостью лазера подсвета, а также уровнем освещенности поверхности моря при применении метода в дневное время.

Эти ограничения преодолеваются в методах дистанционного измерения показателя преломления поверхности моря по солнечным бликам, один из которых был рассмотрен в [1]. Основные положения предлагаемых методов состоят в следующем. В принятом оптическом датчиком изображении поверхности моря интенсивность оптического сигнала бликов определяется коэффициентами отражения Френеля. Они имеют закономерно различные значения для отличающихся направлений визирования фоточувствительного элемента (ФЧЭ) даже для чистой воды из-за разных углов отражения света. Эти углы обеспечиваются при выполнении более сложных по сравнению с лазерной локацией геометрических условий существования бликов. Наличие на поверхности загрязнений или объектов нарушает закономерность зависимости коэффициентов отражения для бликов от направления визирования.

Для нахождения этой закономерности воспользуемся предложенными в [2] модифицированными формулами для коэффициентов отражения Френеля  $\rho_{||}$  и  $\rho_{\perp}$  в следующем виде:

$$\rho_{\perp} = \frac{\left(\sqrt{m^2 - n_x'^2 - n_y'^2} - \sqrt{1 - n_x'^2 - n_y'^2}\right)^2}{\left(\sqrt{m^2 - n_x'^2 - n_y'^2} + \sqrt{1 - n_x'^2 - n_y'^2}\right)^2}; \quad (3)$$

$$\rho_{\Pi} = \rho_{\perp} \cdot \frac{\left(\sqrt{(m^2 - n_x'^2 - n_y'^2) \cdot (1 - n_x'^2 - n_y'^2)} - n_x'^2 - n_y'^2\right)^2}{\left(\sqrt{(m^2 - n_x'^2 - n_y'^2) \cdot (1 - n_x'^2 - n_y'^2)} + n_x'^2 + n_y'^2\right)^2}, \quad (4)$$

где  $(n_x', n_y')$  - координаты вектора нормали к участку поверхности на фазовой визирующей плоскости facets, представляющие собой координаты точки проекции единичного вектора нормали к facetу на плоскость, перпендикулярную направлению визирования ФЧЭ.

Предложенный ранее метод [1], использующий солнечные блики, основывался на том, что из уравнения (3) можно выразить в явной форме зависимость показателя преломления от коэффициента отражения  $\rho_{\perp}$

$$\mathbf{m} = \sqrt{1 + (1 - n'_x{}^2 - n'_y{}^2) \cdot \left( \frac{(1 + \sqrt{\rho_\perp})^2}{(1 - \sqrt{\rho_\perp})^2} - 1 \right)}, \quad (5)$$

которая при падении света по нормали к факету ( $\mathbf{n}'_x = \mathbf{n}'_y = \mathbf{0}$ ) переходит в формулу (2). Измерив ( $\mathbf{n}'_x, \mathbf{n}'_y$ ) и  $\rho_\perp$  можно найти величину показателя преломления отражающей поверхности по формуле (5). Для измерения  $\rho_\perp$  предлагалось использовать обработку оптического сигнала двух совмещенных каналов с ортогональной поляризацией. Значения ( $\mathbf{n}'_x, \mathbf{n}'_y$ ) предлагалось определять из анализа априорной информации о направлении падающего солнечного излучения и о направлении визирования каждого фоточувствительного элемента (ФЧЭ) на основе геометрических условий существования бликовой ситуации: нормаль, падающий и отраженный лучи должны быть в одной плоскости, а угол падения и преломления равны между собой.

Предлагаемый метод также основывается на использовании этой априорной информации, согласно которой фазовые координаты бликующего факета рассчитываются по формулам [1]:

$$\mathbf{n}'_{xj} = S'_{xj} / \sqrt{2 \cdot (1 + S'_{zj})}, \quad \mathbf{n}'_{yj} = S'_{yj} / \sqrt{2 \cdot (1 + S'_{zj})}, \quad (6)$$

где  $S'_{xj}, S'_{yj}, S'_{zj}$  – координаты единичного вектора падения солнечного излучения  $\vec{\mathbf{S}}$  на поверхность моря в системе координат  $\mathbf{j}$ -го ФЧЭ датчика, ось  $\mathbf{Z}$  которой совпадает с единичным вектором его направления визирования  $\vec{\mathbf{r}}_{\mathbf{Bj}}$ .

Однако, в отличие от предыдущего метода предлагается использовать выражение для суммарного коэффициента отражения неполяризованного света. Обозначив  $\mathbf{r}^2 = (\mathbf{n}'_{xj})^2 + (\mathbf{n}'_{yj})^2$  и используя формулы (3) и (4), можно найти выражение для суммарного коэффициента отражения неполяризованного света  $\rho = \frac{1}{2}(\rho_\perp + \rho_\parallel)$  в виде

$$\rho = \frac{\left( \sqrt{(\mathbf{m}^2 - \mathbf{r}^2)} - \sqrt{(1 - \mathbf{r}^2)} \right)^2 \left( (\mathbf{m}^2 - \mathbf{r}^2)(1 - \mathbf{r}^2) + (\mathbf{r}^2)^2 \right)}{\left( \sqrt{(\mathbf{m}^2 - \mathbf{r}^2)} + \sqrt{(1 - \mathbf{r}^2)} \right)^2 \left( \sqrt{(\mathbf{m}^2 - \mathbf{r}^2)}(1 - \mathbf{r}^2) + \mathbf{r}^2 \right)^2}. \quad (7)$$

Используя формулы (6) и то, что  $\vec{\mathbf{S}}$ -единичный вектор, можно записать

$$\mathbf{r}^2 = \frac{1 - \vec{\mathbf{S}}_j \cdot \vec{\mathbf{r}}_{\mathbf{Bj}}}{2}, \quad (8)$$

что позволяет по априорной информации о  $\vec{\mathbf{S}}_j$  и  $\vec{\mathbf{r}}_{\mathbf{Bj}}$  легко находить  $\mathbf{r}^2$ .

Хотя из выражения (7) показатель преломления  $\mathbf{m}$  в явном виде просто не выражается через  $\rho$ , можно протабулировать зависимость  $\rho$  от  $\mathbf{m}$  при заданных  $\mathbf{r}^2$ . А так как эта зависимость монотонная, то ее можно рассчитать, используя таблицы зависимости  $\mathbf{m}$  от  $\rho$ .

Используя формулы (8) и (7) совместно с априорными данными о  $\bar{S}_j$  и  $\bar{r}_{vj}$ , можно рассчитать коэффициент отражения солнечного излучения от чистой воды и сравнить его с результатами измерения коэффициента отражения в зоне блика. Отношение измеренного коэффициента отражения к рассчитанному при данных условиях визирования и освещения предлагается называть «коэффициентом серости блика». Его целесообразно использовать в качестве признака для обнаружения аномалий морского волнения типа «слик». Если коэффициент серости блика меньше единицы, то разрешение недостаточное для визуализации отдельного блика, т.е. на бликующей поверхности моря имеются высокочастотные составляющие и в элемент разрешения кроме блика попадают еще участки поверхности моря без бликов. Если коэффициент серости блика имеет величину около единицы, то имеется «слик» на чистой воде, а если больше единицы - значит на поверхности моря имеется загрязнение или объект с гладкой поверхностью. При этом показатель преломления вещества можно определить из подготовленной таблицы зависимости  $\mathbf{m}$  от коэффициента серости блика.

Предложенный «коэффициент серости блика» является инвариантным к направлению подсвета и направлению визирования признаком аномалии морской поверхности типа «слик». Данный метод является пассивным. Это дает возможность скрытно получать информацию об объектах и сопутствующих им загрязнениях на поверхности моря. По сравнению с методом, описанным в [1], допускается более простая реализация приемной части аппаратуры оптикоэлектронной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов А.А., Сидоренко Н.Ф. О возможности дистанционного измерения показателя преломления поверхности моря по солнечным бликам // Информационные системы. – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1998. – С. 62 - 69.

2. Погорелов А.И., Копылов А.А. Моделирование и обработка оптического сигнала // Информационные системы. – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1995. – С. 16 - 20.