

О ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ ПО СОЛНЕЧНЫМ БЛИКАМ

А. А. Копылов, Н.Ф. Сидоренко
(Представил д.т.н. проф. Л.Ф. Купченко)

Предложен метод дистанционного измерения показателя преломления гладкой диэлектрической поверхности (поверхности моря) с использованием оптического сигнала, образованного поляризованным солнечным бликом. Найден алгоритм обработки сигналов двух совмещенных каналов с ортогональной поляризацией, учитывающий геометрические условия существования бликов.

Из оптического сигнала, отраженного от поверхности моря и принятого с высоким пространственным разрешением, можно извлечь несколько признаков, инвариантных к условиям освещения и направлению визирования. Эти признаки характеризуют свойства самой отражающей поверхности. Одним из них является n - показатель преломления среды, представляющей морскую поверхность. Отличие его от показателя преломления чистой морской воды $n_w = 1,33$ будет индикатором наличия на поверхности загрязнений либо каких-нибудь объектов (например, для нефти рассмотренный выше показатель преломления имеет значение около 1.5).

Измерение показателя преломления осуществляется косвенно через измерение коэффициентов отражения оптического излучения от элементов поверхности (фацетов) 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 фацету. При этом коэффициент отражения ρ не зависит от поляризации падающего пучка и рассчитывается по следующей формуле, приведенной ниже:

© А. А. Копылов, Н.Ф. Сидоренко, 1998

$$\rho_n = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}. \quad (1)$$

Согласно этой формуле коэффициент отражения нефти в два раза больше, чем для воды, и составляет 4%.

Показатель преломления n выражается через ρ следующим образом:

$$n = \frac{1 + \sqrt{\rho}}{1 - \sqrt{\rho}}. \quad (2)$$

На этой закономерности основаны методы экспресс - анализа загрязнений нефтью водной поверхности при лазерной локации поверхности моря с самолетов. Однако этот метод имеет ряд ограничений. При слабом ветре сужается полоса просмотра поверхности моря, так как отсутствуют фацеты, ориентированные перпендикулярно к оси зондирующего пучка при больших отклонениях его от направления местной вертикали ("от надира"). А при штиле и отсутствии волнения полоса просмотра вырождается в линию, так как геометрические условия отражения выполняются только для направления "в надир".

Возможно некоторое увеличение полосы просмотра при слабом ветре за счет увеличения высоты полета летательного аппарата. Однако дальность метода ограничена кроме требования по пространственно - временному разрешению (время накопления сигнала меньше 10^{-3} сек позволяет считать поверхность "замороженной", а размеры лазерного блика на морской поверхности должны быть больше элемента пространственного разрешения датчика), еще и требованием по соотношению сигнал/фон (определяемым мощностью и расходимостью лазера подсвета, а также уровнем освещенности поверхности моря при применении метода в дневное время).

Эти ограничения преодолеваются в предлагаемом методе дистанционного измерения показателя преломления поверхности моря по солнечным бликам. Возможность реализовать его появляется при наличии высокого пространственно - временного разрешения оптического сигнала, например, датчика типа линейки фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ЛФПЗС).

Основные положения предлагаемого метода состоят в следующем. В принятом оптическим 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 каких - нибудь объектов нарушает закономерность зависимости коэффициентов отражения для бликов от разных направлений визирования.

Для нахождения этой закономерности воспользуемся предложенными в [1] координатами (n'_x, n'_y) вектора нормали к факету на фазовой визирующей плоскости ФЧЭ. Они представляют собой координаты точки проекции единичного вектора нормали к факету на плоскость, перпендикулярную направлению визирования ФЧЭ (рис.1).

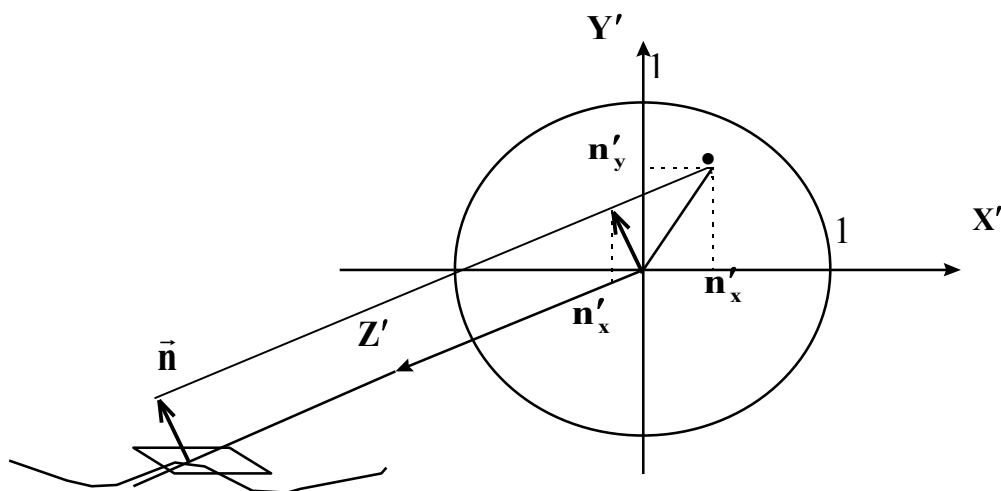


Рисунок 1- Координаты вектора нормали к факету на фазовой визирующей плоскости ФЧЭ

При использовании этих координат в [1] выведены с учетом закона преломления Снеллиуса новые формулы для коэффициентов отражения Френеля ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} соответственно параллельной и перпендикулярной плоскости падения составляющей вектора электрического поля световой волны. В результате удалось избавиться от трансцендентных тригонометрических функций и найти выражения для ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} в следующем виде [1]:

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

$$\rho_{\Pi} = \rho_{\perp} \cdot \frac{\left(\sqrt{(\mathbf{n}^2 - \mathbf{n}'_x{}^2 - \mathbf{n}'_y{}^2) \cdot (1 - \mathbf{n}'_x{}^2 - \mathbf{n}'_y{}^2)} - \mathbf{n}'_x{}^2 - \mathbf{n}'_y{}^2 \right)^2}{\left(\sqrt{(\mathbf{n}^2 - \mathbf{n}'_x{}^2 - \mathbf{n}'_y{}^2) \cdot (1 - \mathbf{n}'_x{}^2 - \mathbf{n}'_y{}^2)} + \mathbf{n}'_x{}^2 + \mathbf{n}'_y{}^2 \right)^2}. \quad (4)$$

Из формулы (3) следует, что зависимость показателя преломления от коэффициента отражения ρ_{\perp} можно выразить в явной форме

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

которая при падении света по нормали к фазете ($\mathbf{n}'_x = \mathbf{n}'_y = \mathbf{0}$) переходит в формулу (2). Измерив $(\mathbf{n}'_x, \mathbf{n}'_y)$ и ρ_{\perp} можно найти величину показателя преломления отражающей поверхности по формуле (5). Значения $(\mathbf{n}'_x, \mathbf{n}'_y)$ определяются из анализа геометрических условий существования бликовой ситуации: нормаль, падающий и отраженный лучи должны быть в одной плоскости, а угол падения и преломления равны между собой. Для нахождения единичной нормали $\vec{\mathbf{n}}$ к поверхности достаточно отнормировать сумму единичных векторов противоположных направлению визирования $\vec{\mathbf{r}}_B$ и направлению подсвета $\vec{\mathbf{S}}$:

$$\vec{\mathbf{n}} = (\vec{\mathbf{r}}_B + \vec{\mathbf{S}}) / |(\vec{\mathbf{r}}_B + \vec{\mathbf{S}})|.$$

В \mathbf{j} -ой визирующей системе координат (СК), ось \mathbf{z}' которой направлена вдоль линии визирования \mathbf{j} -го ФЧЭ датчика,

$$\vec{\mathbf{r}}_{Bj} = (0, 0, 1), \quad \text{а} \quad \vec{\mathbf{S}} = (S'_{xj}, S'_{yj}, S'_{zj}).$$

Откуда координаты $(\mathbf{n}'_{xj}, \mathbf{n}'_{yj})$ нормали к бликующему фазету на фазовой визирующей плоскости \mathbf{j} -го ФЧЭ находятся по формулам:

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

После подстановки их в формулы (3 - 5) и учитывая, что

$$(S'_{xj})^2 + (S'_{yj})^2 + (S'_{zj})^2 = 1 \quad \text{и} \quad S'_{zj} = (\vec{\mathbf{r}}_{Bj} \cdot \vec{\mathbf{S}}),$$

получаем зависимость коэффициентов отражения для бликов от направления визирования \mathbf{j} -го ФЧЭ \mathbf{r}_{Bj} :

$$\rho_{\perp}(\vec{\mathbf{r}}_{Bj}) = \frac{\left(\sqrt{2\mathbf{n}^2 + \vec{\mathbf{r}}_{Bj} \cdot \vec{\mathbf{s}} - 1} - \sqrt{\vec{\mathbf{r}}_{Bj} \cdot \vec{\mathbf{s}} + 1} \right)^2}{\left(\sqrt{2\mathbf{n}^2 + \vec{\mathbf{r}}_{Bj} \cdot \vec{\mathbf{s}} - 1} + \sqrt{\vec{\mathbf{r}}_{Bj} \cdot \vec{\mathbf{s}} + 1} \right)^2}, \quad (7)$$

$$\rho_{\Pi}(\vec{r}_{\text{Bj}}) = \rho_{\perp} \cdot \frac{\left(\sqrt{(2n^2 + \vec{r}_{\text{Bj}} \cdot \vec{s} - 1) \cdot (\vec{r}_{\text{Bj}} \cdot \vec{s} + 1) - (\vec{r}_{\text{Bj}} \cdot \vec{s} - 1)} \right)^2}{\left(\sqrt{(2n^2 + \vec{r}_{\text{Bj}} \cdot \vec{s} - 1) \cdot (\vec{r}_{\text{Bj}} \cdot \vec{s} + 1) + (\vec{r}_{\text{Bj}} \cdot \vec{s} - 1)} \right)^2}. \quad (8)$$

А зависимость показателя преломления от коэффициента отражения ρ_{\perp} выражается в виде

$$n(\rho_{\perp}) = \sqrt{1 + 0,5 \cdot (\vec{r}_{\text{Bj}} \cdot \vec{s} - 1) \cdot \left(\frac{(1 + \sqrt{\rho_{\perp}})^2}{(1 - \sqrt{\rho_{\perp}})^2} - 1 \right)}. \quad (9)$$

В выражения (7 - 9) входит скалярное произведение $\vec{r}_{\text{Bj}} \cdot \vec{S}$, которое не зависит от выбора системы координат. Поэтому при расчете этих величин нет необходимости пересчитывать координаты при текущем изменении \vec{S} к визирующей СК каждого ФЧЭ и затем рассчитывать указанное скалярное произведение. Достаточно в одной и той же системе координат (например, привязанной к осям ЛА) определить текущее значение \vec{S} и воспользоваться подготовленной заранее и зашитой в память таблицей скалярных произведений для каждого ФЧЭ.

Для расчета n по формуле (9) необходимо еще измерить ρ_{\perp} , воспользовавшись информацией о фазовых визирующих координатах, найденных по формулам (6) из геометрических условий существования блика. Но прежде необходимо определиться с положением осей визирующих СК каждого ФЧЭ.

Удобно ось x' визирующих СК для всех ФЧЭ выбрать одной и той же (перпендикулярно всем осям z'_j и линии, вдоль которой расположены фоточувствительные элементы ЛФПЗС). для i -го блика угол γ_i отклонения плоскости отражения от плоскости $0x'z'$: $\gamma = \arctg(n_x/n_y)$. Зная γ_i , можно было бы определить ρ_{\perp} , соответствующим образом сориентировав поляризатор П1 перед оптическим датчиком (рис.2) и найти отношение интенсивности принятого оптического сигнала к интенсивности падающего на поверхность моря оптического потока. Однако у каждого бликающего facets свое значение γ_i . Поэтому осуществить ориентацию одного поляризатора на входе оптической системы одновременно для всех γ_i невозможно.

Предлагается для определения ρ_{\perp} от каждого визируемого facets использовать для приема оптического сигнала два совмещенных канала X и Y с ортогональными поляризаторами П1 и П2 на их входах (рис. 3). Для этого надо

обработать сигнал двух каналов с учетом информации об угле γ_i между плоскостью отражения и осью поляроида для каждого бликующего facets. Результатом обработки является решение системы уравнений, описывающей интенсивности сигналов I_x, I_y принятых согласно закону Малюса соответственно в каналах x и y :

$$\begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \gamma_i & \sin^2 \gamma_i \\ \sin^2 \gamma_i & \cos^2 \gamma_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I \cdot \rho_{\parallel} \\ I \cdot \rho_{\perp} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где I - интенсивность оптического потока, падающего на поверхность моря.

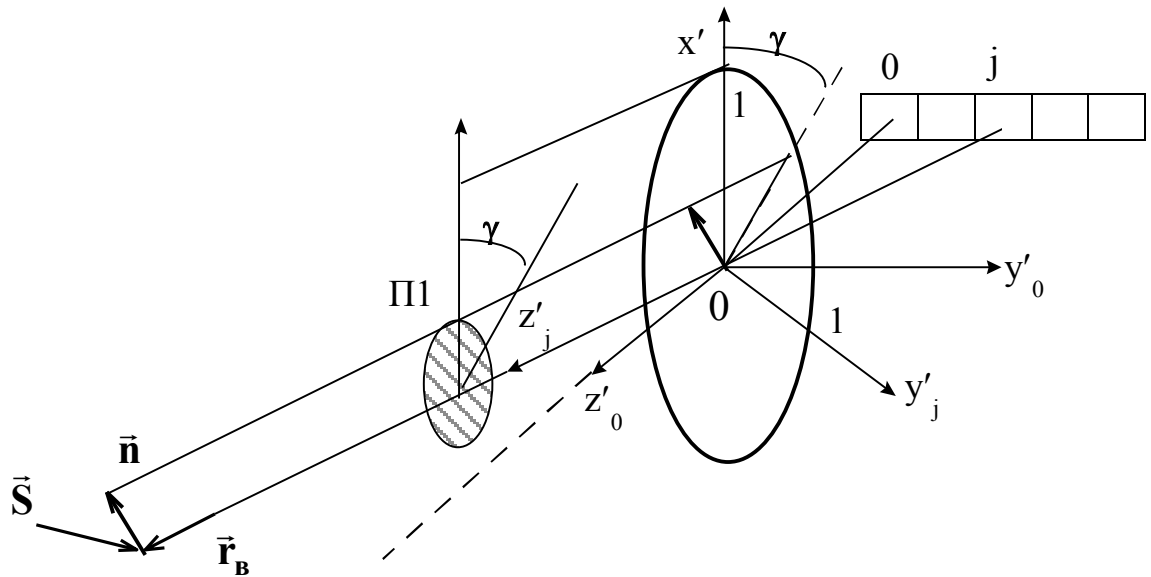


Рисунок 2. Измерение ρ_{\perp} для одного ФЧЭ с помощью ориентированного поляроида

Решение этой системы уравнений:

$$\begin{pmatrix} I \cdot \rho_{\parallel} \\ I \cdot \rho_{\perp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma_i} & \frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \gamma_i} \\ \frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \gamma_i} & \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma_i} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Откуда с учетом того, что $\operatorname{tg} \gamma_i = n_x / n_y$ а также (6) имеем

$$\rho_{\perp} = \frac{1}{\left(1 + \frac{S'_{y_j}}{S'_{x_j}}\right) \cdot \frac{I_x}{I}} + \frac{1}{\left(1 + \frac{S'_{x_j}}{S'_{y_j}}\right) \cdot \frac{I_y}{I}}. \quad (12)$$

Таким образом алгоритм дистанционного определения \mathbf{n} следующий:

1) измеряется либо вычисляется (по времени и географическим координатам) единичный вектор прихода излучения солнца $\vec{S} = (S'_x, S'_y, S'_z)$ в визирующей системе координат ФЧЭ принадлежащего оси оптической системы оптико - электронного многоэлементного датчика;

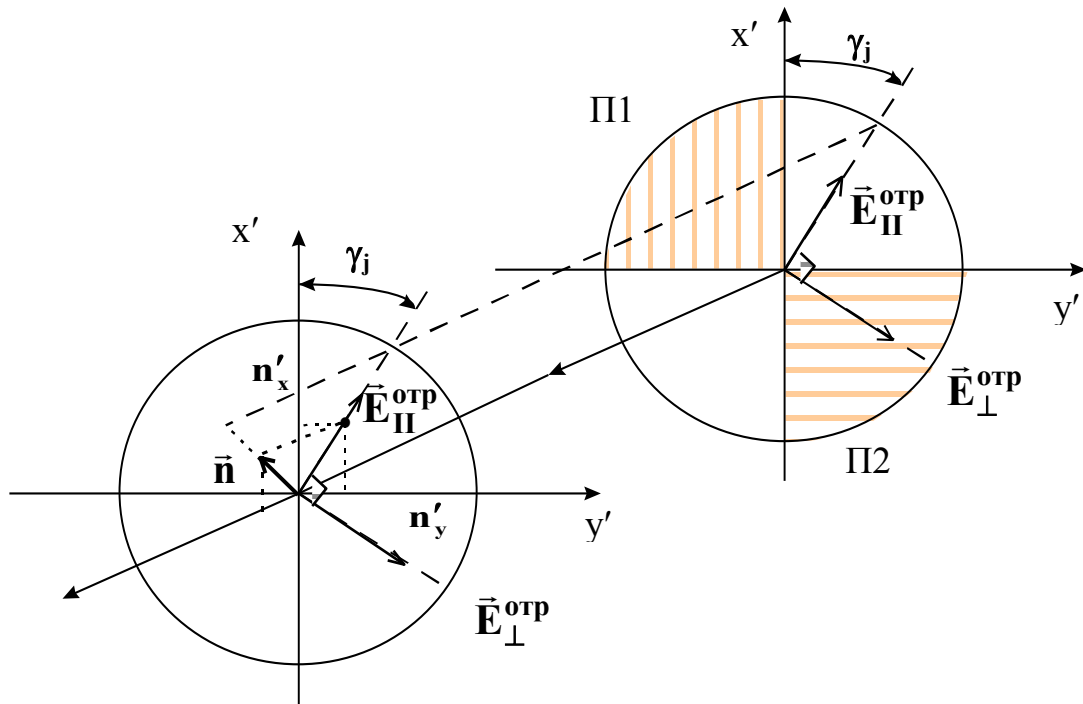


Рисунок 3. Одновременное измерение ρ_{\perp} для всех ФЧЭ расщеплением оптического потока на два канала с ортогональными поляроидами

2) определяются координаты вектора $\vec{S} = (S'_{x_j}, S'_{y_j}, S'_{z_j})$ переходом к визирующей системе координат каждого j -го ФЧЭ методом электронных таблиц, предложенным в [2];

3) для каждого блика вычисляется ρ_{\perp} по принятой интенсивности оптического сигнала в каналах с ортогональной поляризацией I_x, I_y и по сигналу датчика интенсивности солнечного излучения I согласно (12);

4) по формуле (9) вычисляется показатель преломления n по ρ_{\perp} и координате S'_{z_j} , т. к. $S'_{z_j} = (\mathbf{r}_{vj} \cdot \mathbf{S})$.

С реализацией описанного алгоритма появляется возможность в реальном времени получать изображения с панорамой показателей преломления и тем самым выявлять участки загрязнения водной поверхности и их изменение во времени.

Предложенный метод имеет следующие преимущества по сравнению с существующими методами лазерного зондирования:

- так как коэффициент отражения при этом может быть на порядок больше по сравнению со случаем отражения оптического луча, перпендикулярного к поверхности, то следует ожидать более сильный сигнал;

- так как нет необходимости производить сканирование источником подсвета, а оптический сигнал накапливается одновременно во всех фоточувствительных элементах массива, то можно рассчитывать на меньшее время исследования участка поверхности при том же пространственном разрешении;

- дальность работы при выполнении геометрических условий отражения определяется угловым разрешением и состоянием волнения поверхности моря, а не мощностью источника подсвета и соотношением сигнал / фон как при лазерной локации;

- участок пространства на котором одновременно выполняются геометрические условия зеркального отражения гораздо больше, что дает возможность контроля загрязнения требуемых участков поверхности моря с неподвижных платформ и увеличивает полосу обзора при установке датчика на летательном аппарате (даже при отсутствии волнения возможен просмотр полосы шириной около 30 угловых минут);

- метод является пассивным, что дает возможность скрытно получать информацию об объектах и сопутствующих им загрязнениях на поверхности моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Погорелов А.И., Копылов А.А. Моделирование и обработка оптического сигнала.- Сб. науч. тр. Информационные системы. - Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1995. - С.16 - 20.

2. Погорелов А.И., Копылов А.А. Повышение скорости преобразования координат. //Сб. науч. тр. Управление и связь. - Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1997. - С.10 - 12.
