

БЛИКОВЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВОЙ ТРАЕКТОРИИ ФАЦЕТА

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

Предложен метод дистанционного измерения параметров фазовой траектории facets, характеризующих форму гладкой диэлектрической поверхности (поверхности моря) с использованием оптического сигнала, образованного солнечным бликом.

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. Метод формирования из оптического сигнала одного из них - показателя преломления среды m , представляющей морскую поверхность, рассмотрен в работе [1]. В данной работе рассматриваются принципы формирования признаков аномалий морской поверхности, связанных с ее формой.

В работе [2] была предложена фазово - траекторно - facetsная (ФТФ) модель формирования оптического изображения гладкой поверхности (поверхности моря). Модель описывает преобразование поля возвышений $\zeta(x, y, t)$ в поле единичных векторов нормали к facetsу

$$\vec{N}(x, y, t) = \frac{\text{grad}\zeta(x, y, t)}{|\text{grad}\zeta(x, y, t)|}$$

и сокращение размерности его описания $\vec{n}_M(x, y, t)$ в местной системе координат путем отбрасывания координаты $N_z(x, y, t)$. Затем осуществляется преобразование от него к аналогичному описанию $\vec{n}(x, y, t)$ в визирующей системе координат. В местной системе координат ось z_M направлена по нормали к геоиду, а в визирующей системе координат ось z направлена из оптического центра в визируемую точку поверхности моря M . Рассматривается "замороженная" в момент времени $t = t_0$ поверхность, представляемая в виде $\vec{n}_M(x_I, y_I, t_0)$ совокупности прилегающих друг к другу пространственных фазовых траекторий facetsа. Под пространственной фазовой траекторией facetsа (ПФТФ) понимается последовательность состояний facetsа

тов, упорядоченная вдоль координатной линии l из выбранного семейства координатных линий поверхности l, \mathbf{m} в пространстве объекта. При необходимости выбора отдельного facets указывается пара координатных линий l, \mathbf{m} . Состояние отдельного facets в местной системе координат описывается двумерным вектором фазовых координат facets $\vec{\mathbf{n}}_{\mathbf{M}}(\mathbf{x}_{l\mathbf{m}}, \mathbf{y}_{l\mathbf{m}}, \mathbf{t}_0)$, представляющим проекцию единичного вектора нормали к facetу на плоскость (фазовую плоскость facets), перпендикулярную оси \mathbf{z} , а в визирующей системе координат описывается вектором визируемых фазовых координат $\vec{\mathbf{n}}(\mathbf{x}_{l\mathbf{m}}, \mathbf{y}_{l\mathbf{m}}, \mathbf{t}_0)$, представляющим проекцию единичного вектора нормали к facetу на плоскость, перпендикулярную оси \mathbf{z}' . Удобно использовать объемное представление пространственной ФТФ в трехмерном пространстве, где одной из координат является расстояние $\mathbf{r} = \sqrt{x_l^2 + y_l^2}$ вдоль координатной линии l , а две другие - фазовые либо визируемые фазовые координаты facets на ФПФ.

ФТФ-модель поясняет формирование строки оптического сигнала $\mathbf{S}(\mathbf{x}_l, \mathbf{y}_l, \mathbf{t}_0)$ на входе оптической системы как преобразование пространственной фазовой траектории facets $\vec{\mathbf{n}}_{\mathbf{M}}(\mathbf{x}_l, \mathbf{y}_l, \mathbf{t}_0)$ в визируемую пространственную фазовую траекторию $\vec{\mathbf{n}}(\mathbf{x}_l, \mathbf{y}_l, \mathbf{t}_0)$ и модуляцию на ней отражаемого оптического потока подсвета $\mathbf{S}_{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{e}}_{\mathbf{S}}, \mathbf{t}_0)$. Для отраженного от морской поверхности оптического сигнала существенно влияние двух факторов. Первый фактор присутствует всегда - это выражаемая через визируемые фазовые координаты facets $\vec{\mathbf{n}}(\mathbf{x}_l, \mathbf{y}_l, \mathbf{t}_0)$ зависимость коэффициентов отражения Френеля [2]:

$$\kappa_{\parallel} = \frac{\left(\sqrt{\mathbf{m}^2 - \mathbf{n}^2} - \sqrt{1 - \mathbf{n}^2}\right)^2}{\left(\sqrt{\mathbf{m}^2 - \mathbf{n}^2} + \sqrt{1 - \mathbf{n}^2}\right)^2};$$

$$\kappa_{\perp} = \frac{\left(\sqrt{\mathbf{m}^2 - \mathbf{n}^2} - \sqrt{1 - \mathbf{n}^2}\right)^2}{\left(\sqrt{\mathbf{m}^2 - \mathbf{n}^2} + \sqrt{1 - \mathbf{n}^2}\right)^2} \cdot \frac{\left(\sqrt{(\mathbf{m}^2 - \mathbf{n}^2) \cdot (1 - \mathbf{n}^2)} - \mathbf{n}^2\right)^2}{\left(\sqrt{(\mathbf{m}^2 - \mathbf{n}^2) \cdot (1 - \mathbf{n}^2)} + \mathbf{n}^2\right)^2}.$$

Вторым фактором является угловая неоднородность самого подсвета $\mathbf{S}_{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{e}}_{\mathbf{S}}, \mathbf{t}_0)$. Пространственное распределение оптического сигнала вдоль выбранной линии l в пространстве объекта можно представить в виде произведения $\mathbf{S}(\mathbf{x}_l, \mathbf{y}_l, \mathbf{t}_0) = \kappa(\vec{\mathbf{n}}(\mathbf{x}_l, \mathbf{y}_l, \mathbf{t}_0)) \cdot \mathbf{S}_0(\mathbf{S}_{\mathbf{n}}(\vec{\mathbf{e}}_{\mathbf{S}}, \mathbf{t}_0), \vec{\mathbf{e}}_{\mathbf{V}}(\mathbf{x}_l, \mathbf{y}_l, \mathbf{t}_0), \vec{\mathbf{n}}(\mathbf{x}_l, \mathbf{y}_l, \mathbf{t}_0))$, где второй сомножитель есть результат выбора пространственной фазовой траекторией из всех направлений подсвета тех, оптический поток которых отража-

ются фацетами в сторону оптического центра системы. Солнечные блики - характерный пример влияния второго фактора.

Используя ФТФ модель, предлагается следующее объяснение пространственно - временных размеров солнечных бликов. Пусть задано некоторое направление визирования. Тогда каждому направлению подсвета на фазовой плоскости facets соответствует "бликующая точка", т.е. такая единственная ориентация facets, когда выполняются условия зеркального отражения. Для нахождения координат "бликующей точки" достаточно отбросить координату z от отнормированной суммы единичных векторов, противоположных направлению визирования \vec{r}_v и направлению подсвета \vec{r}_s :

$$\vec{N}_b = - \frac{\vec{r}_v + \vec{r}_s}{|\vec{r}_v + \vec{r}_s|} \quad (1)$$

Если источником подсвета является солнце (его угловые размеры $\Delta \approx 30'$), то совокупности направлений подсвета на фазовой плоскости facets будет соответствовать замкнутая область фазовых координат facets - так называемая "бликующая зона", т.е. совокупность "бликующих точек" на ФПФ. Для математического описания "бликующей зоны" рассматривается множество единичных векторов подсвета, принадлежащее краю солнечного диска - "конус подсвета" с основанием в виде окружности радиуса $\sin(\Delta/2)$. Граница "бликующей зоны" на ФПФ представляет собой эллипс, границы которого при условии размещения солнечного диска полностью над горизонтом находятся из следующих соображений. К единичному направлению визирования на полусфере с радиусом единица прибавляется "конус подсвета", центральная проекция основания с центром в начале координат на единичную сферу образует "бликующий конус" с основанием в виде эллипса. Проекция "бликующего конуса" на ФПФ образует границу "бликующей зоны". Если задать уравнение "конуса подсвета" в параметрической форме с параметром φ и математически выполнить все описанные выше геометрические преобразования, то можно получить уравнение границ "бликующей зоны" на ФПФ:

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha + b \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha + x_0; \\ y = -a \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha + b \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha + y_0, \end{cases}$$

где: большая полуось эллипса $a = \sin \Delta / M$; (2)

малая полуось эллипса $b = e_{sx} \cdot \sin \Delta / M$; (3)

угол, который малая полуось образует с направлением на север, равен углу азимута солнца, т.е. $\alpha = \alpha_s$;

координаты центра эллипса равны:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{e_{sx} \cdot \cos \Delta + e_{vx}}{M}; \\ y_0 = \frac{e_{sy} \cdot \cos \Delta + e_{vy}}{M}, \end{cases} \quad (4)$$

а длина суммы единичных векторов направлений визирования и оси подсвета равна $M = \sqrt{2 \cdot (1 + \vec{e}_s \cdot \vec{e}_v)}$.

Отдельный фаcet будет бликовать, если его фазовые координаты находятся внутри "бликующей зоны". Координатной линии l на поверхности моря будет соответствовать упорядоченная последовательность направлений визирования, каждому из которых соответствует своя "бликующая зона". Если в системе координат объемного представления ПФТФ или ВПФТФ изобразить последовательность всех "бликующих зон", упорядоченных вдоль линии l , то образуется "бликующая труба". Блики будут наблюдаться на тех участках линии l в пространстве объекта, где фазовая траектория факета находится внутри "бликующей трубы".

Если теперь рассмотреть реализацию поверхности моря в моменты времени $t_p = t_0 + \Delta t \cdot P$, где P - целое число, представляющее номер отсчета момента времени, то данной координатной линии будут соответствовать другие реализации ФТФ $\vec{n}(x_l, y_l, t_p)$. Их совокупность будет представлять некоторую поверхность - пространственно-временную совокупность фазовых траекторий факета в системе координат объемного представления ПФТФ или ВПФТФ. Сечение этой поверхности плоскостью, перпендикулярной оси l в точке r , будет представлять собой временную фазовую траекторию факета на соответствующей ФПФ или ВФПФ. Блик будет существовать в точке r , пока временная ФТФ будет находиться внутри "бликующей зоны".

При съемке морского волнения с ЛА наивысшего пространственно - временного разрешения можно достичь, используя щелевой способ. При этом строка датчика из упорядоченных вдоль линии фоточувствительных элементов располагается поперек направления полета ЛА и на нее проецируется оптический сигнал от поверхности моря вдоль соответствующей линии. Развертка же в поперечном направлении осуществляется за счет движения ЛА. При подобной съемке в следующий момент времени будет наблюдаться оптический сигнал от линии, смещенной относительно первоначальной, на вектор $\vec{V} \cdot \Delta t_n$, где \vec{V} - горизонтальная скорость полета ЛА, а Δt_n - время накопления оптического сигнала.

В качестве датчика в современной технике используют линейки фоточувствительных приборов с зарядовой связью с временем накопления 10^{-3} - 10^{-4} с. За это время с учетом фазовой скорости капиллярно - гравитационных волн [3] фаза капиллярных и капиллярно - гравитационных волн на по-

верхности моря сдвинется на расстояние не более $10^{-3} - 10^{-4}$ метра и поэтому при наблюдении аномалий типа "слик" поверхность моря можно считать "замороженной". В этом случае поверхность моря можно представить совокупностью пространственных фазовых траекторий facets в последовательные моменты съемки, что будет представлять собой некоторую поверхность в системе координат объемного представления ПФТФ. "Бликующая труба" пронизывает эту поверхность, а ее участок внутри "бликующей трубы" определяет пространственно - временные размеры блика. Сечение этой поверхности плоскостью, параллельной ФПФ, даст временную фазовую траекторию facets и "бликующую зону". Интервал времени между моментами пересечения "бликующей зоны" временной фазовой траекторией равен временному размеру блика.

Анализ пространственно - временных размеров солнечных бликов дают новые возможности оценки параметров фазовых траекторий facets. Такими параметрами в точке центра блика являются фазовые координаты facets и модуль средней скорости их изменения по времени и по пространству.

Благодаря координатно - временному обеспечению ЛА можно определить направление солнечного подсвета \vec{r}_s в текущий момент съемки. Зная положение оптической оси и определив координаты центра блика, можно найти \vec{r}_v . Затем по формуле (1) рассчитать ФКФ в точке центра блика.

Средние скорости изменения по времени ФКФ в области блика можно приближенно оценить, исходя из следующих соображений. Если рассмотреть последовательность изменений временного размера пространственных сечений одного блика, то обычно временной размер имеет один максимум. Ввиду малых размеров полуосей \mathbf{a} и \mathbf{b} "бликующей зоны" можно аппроксимировать внутри ее временную фазовую траекторию facets отрезком прямой линии. Очевидно, что наибольший временной размер блика будет в том сечении, которое проходит через центр "бликующей зоны". Однако нельзя предсказать ориентацию этого сечения относительно большой полуоси эллипса "бликующей зоны". Поэтому для грубой оценки скорости изменения ФКФ в точке ФТФ, дающей блик, можно использовать средний диаметр "бликующей трубы"

$$\bar{d} = 0,5 \cdot (\mathbf{a} + \mathbf{b}), \quad (5)$$

где \mathbf{a} и \mathbf{b} находятся по известным \vec{r}_s и \vec{r}_v с использованием (2) и (3) соответственно. Отсюда средняя скорость изменения по времени ФКФ равна

$$\dot{n} = \frac{\dot{\bar{d}}}{\Delta t}. \quad (6)$$

Относительная погрешность ее оценки в первом приближении определяется погрешностью оценки диаметра "бликующей трубы" и равна

$$\delta \dot{n} = \frac{\mathbf{a} - \mathbf{b}}{\mathbf{a} + \mathbf{b}}. \quad (7)$$

Средние скорости изменения по пространству ФКФ в области блика можно приближенно оценить исходя из соображений, аналогичных вышеуказанным. Если рассмотреть последовательность изменений пространственного размера временных сечений одного блика, то обычно пространственный размер имеет один максимум. Ввиду малых размеров полуосей \mathbf{a} и \mathbf{b} сечений "бликующей трубы" можно аппроксимировать внутри нее пространственную фазовую траекторию facets отрезком прямой линии. Очевидно, что наибольший временной размер блика будет в том сечении, которое проходит через ось "бликующей трубы". Однако нельзя предсказать ориентацию этого сечения относительно большей полуоси эллипса сечения "бликующей трубы". Поэтому для грубой оценки скорости изменения ФКФ в точке ФТФ, дающей блик, можно также использовать средний диаметр "бликующей трубы" \bar{d} , найденный по формуле (5). Отсюда модуль средней скорости изменения по пространству ФКФ равен

$$\dot{n}_L = \frac{\bar{d}}{\Delta L}. \quad (8)$$

Однако в этом случае относительная погрешность ее оценки в первом приближении хуже чем (7) и определяется кроме погрешности оценки диаметра "бликующей трубы" погрешностью за счет сдвига $\Delta \vec{r} = \vec{n}_A - \vec{n}_e$ относительно друг друга центров "бликующих зон" в точках начала \mathbf{A} и конца \mathbf{B} блика. Координаты центров бликов \vec{n}_A и \vec{n}_e , соответствующим точкам визирования \mathbf{A} и \mathbf{B} , находятся по формулам (4). Таким образом, в первом приближении относительная погрешность оценки модуля скорости изменения ФКФ по пространству равна

$$\delta \dot{n}_L = \frac{\mathbf{a} - \mathbf{b} + \Delta \mathbf{r}}{\mathbf{a} + \mathbf{b}}. \quad (9)$$

Предложенные методы позволяют формировать из обычного яркостного сигнала принятого оптической системой с высоким пространственно-временным разрешением оценки параметров фазовых траекторий facets однозначно связанные с формой поверхности. При этом не только формируются признаки инвариантные в широком диапазоне условий подсвета и визирования, но и при использовании координат векторов визирования и подсвета в местной системе координат автоматически устраняется влияние перспективных искажений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов А.А., Сидоренко Н.Ф. О возможности дистанционного измерения показателя преломления поверхности моря по солнечным

бликам // Сб. научн. тр. Информационные системы. – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1998. – С. 62 - 69.

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

3. Кононкова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн. – М.: МГУ, 1985. – 298 с.
