

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

д.т.н. проф. А.И. Погорелов, А.А. Копылов

Для моделирования ТВ - сигнала высокого пространственного разрешения предложен метод траекторий на фазовой визирующей плоскости вектора нормали к фацету, получены формулы для расчета коэффициентов отражения от гладкой поверхности

Отражение электромагнитного излучения видимого и ближнего ИК - диапазонов происходит по законам геометрической оптики, если для поверхности - отражателя соблюдается соотношение: $a \cdot \sin^3(\beta / \lambda) \gg 1$, где a - характерный размер неоднородностей, β - угол скольжения. В этом случае поверхность можно считать гладкой (стекла, водная поверхность и т. д), отражение от каждого фацета (плоского элемента поверхности) - зеркальным с коэффициентами $K_{||}$ и K_{\perp} для составляющих световой волны с интенсивностями $I_{||}$ и I_{\perp} соответственно параллельно и перпендикулярно плоскости падения, которые количественно выражаются через формулы Френеля:

$$K_{||} = \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \gamma)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \gamma)}; \quad K_{\perp} = \frac{\sin^2(\alpha - \gamma)}{\sin^2(\alpha + \gamma)}, \quad (1)$$

где γ - угол преломления световой волны, связанный с углом падения α при коэффициенте преломления вещества поверхности n законом преломления Снеллиуса $n \cdot \sin \gamma = \sin \alpha$. Интенсивность отраженного оптического потока от фацета равна

$$I_{\text{отр}} = K_{||} \cdot I_{||} + K_{\perp} \cdot I_{\perp}, \quad (2)$$

а если падающий оптический поток с интенсивностью I неполяризован, то $I_{\text{отр}} = 1/2 (K_{||} + K_{\perp}) \cdot I = K_{\text{отр}} \cdot I$, где $K_{\text{отр}}$ - коэффициент отражения неполяризованного излучения.

Телевизионный датчик преобразует оптический поток в электрический сигнал. При этом возможны ситуации, когда на один фоточувствительный

элемент (ФЧЭ) приходит отраженный оптический поток от большого числа facets, т.е. в элемент разрешения на поверхности - отражателе попадает совокупность различным образом ориентированных facets. Возможен и другой случай, когда можно считать, что в элемент разрешения попадает один facet. Модель оптического сигнала для первого случая применяется для телевидения невысокого пространственного разрешения и разработана в работе [1]. С появлением датчиков типа многоэлементных линейных и матричных массивов фоточувствительных приборов с зарядовой связью возникла необходимость разработки модели формирования оптического сигнала с учетом его тонкой структуры. При этом задача формулируется следующим образом. Задана реализация поверхности в явной $z = f(x,y,t)$ или в неявной форме $F(x,y,z,t) = 0$ в момент времени t . Необходимо найти пространственный или пространственно - временной оптический сигнал от нее $I_{отр}(\theta, \alpha, t)$, где θ, α - направления визирования ФЧЭ. Подобная задача рассматривалась в работе Загородникова [2], где было показано, что при малых отклонениях вектора нормали к водной поверхности от вертикали и при малом поле зрения оптической системы сигнал $I_{отр} = k \cdot \frac{\partial z}{\partial \rho}$ с точно-

стью до константы k пропорционален частной производной поверхности в направлении визирования ρ . Для общего решения предлагается использовать разработанный ниже метод фазовых траекторий вектора нормали к facetу.

Направление ориентации facetа в пространстве задается единичным вектором нормали \vec{n} . В общем случае для аналитического определения этого вектора необходимо иметь координаты (n_x, n_y, n_z) . Рассмотрим этот вектор в визирующей системе координат с осью z вдоль направления визирования ФЧЭ, ортогональной ей осью x , лежащей в плоскости вертикали и осью y , выбранной таким образом, чтобы образовалась правая ортогональная декартова система координат. Тогда с учетом физических ограничений решаемой задачи (угол падения не может быть тупым) в этой системе координат для однозначного описания единичного вектора нормали достаточно иметь две координаты (n_x, n_y) . Третья координата n_z однозначно вычисляется по двум заданным: $n_z = \sqrt{(1 - n_x^2 - n_y^2)}$. Назовем плоскость, перпендикулярную направлению распространения оптического сигнала, фазовой визирующей плоскостью, а координаты (n_x, n_y) - фазовыми координатами вектора нормали к facetу. С точки зрения получателя ТВ - сигнала это будет случайный двумерный вектор. Если на поверхности - отражателе выбрать линию пересечения с плоскостью, об-

разованной множеством направлений визирования ТВ - строки, то каждой ее визируемой точке на фазовой плоскости будет соответствовать своя случайная точка, а их множество даст случайную фазовую траекторию. Множество ТВ -строк проецируется на совокупность линий поверхности - отражателя. Им соответствует совокупность случайных траекторий на фазовой плоскости (рис. 1).

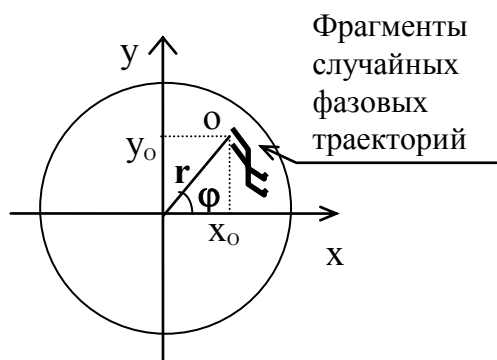


Рис. 1

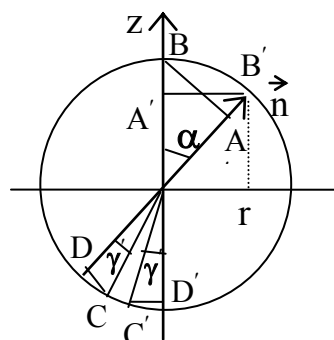


Рис. 2

Если на фазовой визирующей плоскости перейти от координат (n_x, n_y) к полярным координатам r, φ (рис.2):

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(n_x^2 + n_y^2)}; \\ \varphi &= \text{arctg}(n_x / n_y), \end{aligned} \quad (3)$$

то координата r будет определять значение коэффициентов отражения Френеля, а угол φ - направление поляризации после отражения падающего неполяризованного оптического потока. Поляризация происходит из-за неодинаковости $K_{||}$ и K_{\perp} , которые выражаются через r следующим образом:

$$K_{||} = \frac{(\sqrt{n^2 - r^2} - \sqrt{1 - r^2})^2}{(\sqrt{n^2 - r^2} + \sqrt{1 - r^2})^2};$$

$$K_{\perp} = \frac{(\sqrt{n^2 - r^2} - \sqrt{1 - r^2})^2}{(\sqrt{n^2 - r^2} + \sqrt{1 - r^2})^2} \cdot \frac{(\sqrt{(n^2 - r^2) \cdot (1 - r^2)} - r^2)^2}{(\sqrt{(n^2 - r^2) \cdot (1 - r^2)} + r^2)^2}. \quad (4)$$

При выводе формул (4) из - за симметрии (рис.2) $AB = A'B'$ и $CD = C'D'$ была выполнена замена направления нормали к факету и направления визирования. Из закона преломления Снеллиуса и замены направлений получили $\alpha = \arcsin(r)$, $\gamma = \arcsin(r/n)$. Полученные α и γ для дальнейших преобразований подставлены в формулы (1).

Результаты расчета по выражениям (4) совпадают с расчетами по (1). Применение для расчетов формул (4) удобнее, так как они являются не трансцендентными, а алгебраическими функциями. В них учитывается закон преломления и они наглядно поясняют процесс модуляции оптического потока на случайной фазовой траектории вектора нормали к факету.

Как известно, единичный вектор \mathbf{n} нормали к поверхности $\mathbf{F}(x, y, z) = 0$ можно найти следующим образом:

$$\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{grad}(\mathbf{F}(x, y, z)) / |\mathbf{grad}(\mathbf{F}(x, y, z))|.$$

Отсюда фазовые координаты вектора нормали к факету равны:

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{\frac{\partial F}{\partial x} \cdot \mathbf{sign}\left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}}; \\ n_y &= \frac{\frac{\partial F}{\partial y} \cdot \mathbf{sign}\left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{sign}\left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)$ - функция равная знаку аргумента. Тогда для моделирования

ТВ - сигнала высокого пространственного разрешения необходимо иметь линию, образованную пересечением поверхности - отражателя $\mathbf{F}(x, y, z) = 0$ и плоскостью множества θ , α - направлений визирования элементов ТВ - строки (при этом один из параметров - переменный, а другой - фиксиро-

ванный). Для каждой точки линии пересечения можно найти по (5) фазовые координаты. Их множество представляет собой случайную фазовую траекторию. Приращение зафиксированного параметра приводит к следующей фазовой траектории и т.д., что в итоге дает всю совокупность. Затем по формулам (3) осуществляется переход к полярным координатам, по (4) находятся значения коэффициентов отражения, а по (2) - интенсивность оптического сигнала. При подсвете неполяризованным источником с известной яркостью решается и обратная задача - нахождение из принятого оптического потока с учетом его поляризации случайных фазовых траекторий вектора нормали к факету, не зависящие от условий освещения и направления визирования. Это позволит создавать широкоугольные ТВ - системы обнаружения и распознавания гладких поверхностей, инвариантные в широком диапазоне освещенностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мулламаа Ю. Р. Атлас оптических характеристик взволнованной поверхности моря. -Тарту: Изд. Ин - та физики и астр. АН ЭССР, 1964. -384 с.
 2. Загородников А. А. Радиолокационная съемка морского волнения с летательных аппаратов. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. - 239 с.
-