

## О ВЛИЯНИИ ДВИЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ЛОКАЦИИ

В.П.Васильев, В.А.Гришмановский, Л.Ф.Плиев, Т.П.Старцев

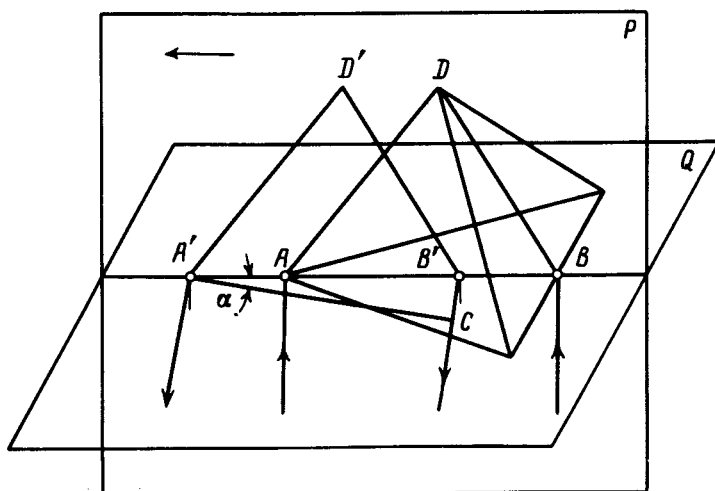
Научно-исследовательский институт прецизионного приборостроения

111250, Москва

Поступила в редакцию 3 февраля 1992 г.

Рассмотрено осуществление опыта Физо по демонстрации "увлечения" света движущейся средой при оптической локации призмных отражателей, установленных на космических аппаратах. Аналитически определена зависимость направления отраженного излучения от скорости движения среды, отличающаяся от общепринятой формулы учета скоростной абберации (эффекта Брэдли) коэффициентом, связанным с показателем преломления заполняющей среды уголкового отражателя. Проверка теоретических выводов реализована в натурном космическом эксперименте, подтвердившем их справедливость.

При оптической локации космических аппаратов, на которых установлены призмные ретрорефлекторы, по существу воспроизводится (в несколько видоизмененном варианте) опыт Физо. Движущейся (вместе с космическим аппаратом), относительно источника излучения и приемника оптической средой, в данном случае является призмный отражатель, обычно имеющий форму тетраэдра с тремя взаимно ортогональными гранями (так называемый "уголковый отражатель"). При этом возникает явление, описание которого нам до сих пор в литературе не встречалось - зависимость угла отклонения отраженного излучения от показателя преломления материала призмы. Рассмотрим подробнее это явление, а также некоторые его практические следствия.



На рис. представлен тетраэдрический отражатель, движущийся справа налево со скоростью  $v$ . Рассмотрим отражение от него света, направленного снизу вверх в плоскости  $P$ , проходящей через ребро  $AD$  и середину противоположащей грани ( $B$ ). Два параллельных луча, попавших внутрь призмы в точках  $A$  и  $B$ , распространяются навстречу друг другу. Из  $A$  луч идет навстречу движению отражателя и в  $B'$  выходит из призмы, встретив пришедшую сюда отражающую грань. Из  $B$  луч идет по направлению движения отражателя и выходит из него в  $A'$ .

Преломление на входной грани для каждого из лучей происходит дважды - при входе и выходе из призмы. В соответствии с законом Снеллиуса для движущихся сред <sup>1</sup> угол преломления связан со скоростью движения призмы и показателем преломления материала для излучения используемой длины волны.

Для обоих лучей условия преломления при входе в призму одинаковые, поэтому углы преломления равны. При выходе из призмы углы падения на поверхность раздела двух сред будут зависеть от направления распространения излучения внутри призмы.

Рассмотрим в связи с этим отражение лучей от двух граней - одной реальной и одной эквивалентной, заменяющей ребро призмы (это упрощение позволяет перейти от трехмерной задачи к двухмерной).

В соответствии с <sup>2</sup> и <sup>3</sup> на одной из граней из-за движения призмы угол отражения будет больше угла падения, а на другой - на ту же величину меньше. В результате оба луча после отражения от двух граней будут иметь одинаковое с исходным и параллельное друг другу направление распространения.

Следовательно, углы падения и преломления при выходе лучей из призмы будут одинаковыми, независимо от длины волны излучения.

Рассмотрим теперь время распространения излучения в материале призмы. Для лучей, ортогональных направлению движения призмы, никакой разницы в скорости, а значит и во времени распространения при одной длине волны, не будет. Иначе обстоит дело с лучами, после отражения от боковых граней идущими вдоль входной грани призмы.

Обозначим через  $\Delta t$  время распространения света в вакууме со скоростью  $c$  на расстоянии, равном длине входной грани призмы  $AB$ . Пусть  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  - время распространения света внутри призмы с учетом скоростей  $U_1$  и  $U_2$  в материале призмы на расстояния  $BA'$  и  $AB'$  соответственно.

$$\Delta t_1 - \Delta t_2 = \frac{A'B}{U_1} - \frac{AB'}{U_2}.$$

$B'C$  - путь в вакууме вошедшего в  $A$  и вышедшего в  $B'$  луча за время, пока луч, вошедший в  $B$  продолжает распространяться до  $A$ . Время распространения лучей от  $A$  до  $C$  через  $B$  и от  $B$  до  $A'$  равны друг другу.

$$B'C = c(\Delta t_1 - \Delta t_2).$$

Отрезки  $BA'$  и  $AB'$  равны соответственно:  $BA' = AB + AA'$ ;  $AB' = AB - AA'$ . Их составные части в линейной мере можно представить так:

$$AB = c\Delta t, \quad AA' = \left(\frac{v}{c}\right) AB = v\Delta t.$$

Тогда  $BA' = c\Delta t + v\Delta t$  и  $AB' = c\Delta t - v\Delta t$ . Учитывая <sup>4</sup>:

$$U_1 = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \left(\frac{v}{c}\right) \frac{c}{n}} \approx \frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right); \quad U_2 \approx \frac{c}{n} - v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right).$$

$$B'C = c\Delta t \left[ \frac{c + v}{\frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)} - \frac{c - v}{\frac{c}{n} - v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)} \right].$$

Углы отклонения выходящего волнового фронта от пришедшего на призму составляют величину:

$$\sin \alpha = \frac{B'C}{A'B'} = \frac{B'C}{AB} = \frac{2vc(n - n^2 + 1)}{c^2 - \frac{v^2}{n^2} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)^2}.$$

Для полых угловых отражателей ( $n = 1$ ) формула приобретает общеизвестный вид <sup>5,6</sup> учета скоростной аберрации (эффект Брэдли):

$$\alpha = \frac{2v}{c}\rho.$$

Для призмных ретрорефлекторных устройств, пренебрегая ввиду малости вторым членом знаменателя относительно первого, получаем:

$$\alpha = \frac{2v}{c}(n + 1 - n^2)\rho.$$

В такой форме учет скоростной аберрации авторы нигде не встречали. Между тем из нее следует, что при выполнении призмы из материала с  $n = 1,618$  отраженное излучение должно направляться к источнику излучения без отклонения направления.

Сложность проверки явления зависимости угла отклонения излучения от  $n$  связана с тем, что, как правило, на космических объектах не устанавливают одиночные призмы. Между тем уже при двух призмах возникают явления, аналогичные наблюдаемым у эшелона Майкельсона - изрезанность диаграммы отражения и смещения максимума излучения от исходного направления при изменении угла падения лучей на призмы. Кроме того, применение призм с полным внутренним отражением на гранях также приводит в изрезанности диаграммы отражения <sup>7</sup>. Поэтому целесообразно использовать одиночные угловые отражатели с алюминированием отражающих поверхностей.

Для проверки справедливости теоретических выводов был выполнен натуральный космический эксперимент. На борту стабилизированного в пространстве по всем трем осям космического аппарата (КА) были установлены 4 угловых отражателя: два полых, для которых должен иметь место только эффект Брэдли (так как показатель преломления  $n = 1$ ), и два выполненных из кварцевого стекла ( $n = 1,45$ ). В последнем случае эффект Брэдли должен частично компенсировать эффект Физо. Отражатели были установлены таким образом, чтобы при облучении космического аппарата с Земли ответный сигнал можно было в данный момент времени получить только от одного отражателя. Например, при наблюдении КА с Земли по одну сторону от плоскости, проходящей через вертикаль и параллельной плоскости орбиты КА, при облучении наблюдается сначала сигнал, отраженный от кварцевого отражателя, а затем, после прохождения точки траверса, от полого отражателя. При наблюдении КА по другую сторону от указанной плоскости последовательность работы отражателей обратна.

Поскольку кривая изменения дальности до КА от времени при любом его прохождении симметрична относительно точки траверса, легко выполнить корректное сравнение интенсивности сигналов, отраженных от полого и кварцевого отражателя. Геометрические размеры отражателей и точность их выполнения таковы, что ширина диаграммы направленности отраженного излучения при облучении лазером с длиной волны 532 нм составляет около 4 угл.с по уровню половинной мощности, а величина углового отклонения, вызванного эффектом Брэдли, с учетом радиальной скорости движения КА и ракурса наблюдения, составляет в среднем около 7 угл.с. Расчетная величина разностного углового отклонения для кварцевого отражателя (с учетом частичной компенсации влияния эффекта Брэдли за счет эффекта Физо) составляет около 2 угл.с. Таким образом, если компенсация действительно имеет место, то сигнал от полого отражателя должен быть значительно (более чем на порядок) слабее, чем сигнал от кварцевого отражателя.

В случае отсутствия влияния эффекта Физо отраженные сигналы от полого и кварцевого отражателей при равных дальностях должны быть одинаковыми.

Натурные эксперименты, проведенные в июне 1989 г. (5 июня, 10 июня и 14 июня), в ходе которых было принято свыше 60 отраженных сигналов, показали, что при одинаковых средних дальностях и идентичных условиях наблюдения, сигналы от кварцевого отражателя оказались в среднем на порядок сильнее (по мощности), чем от полого. Более того, расчетная абсолютная величина принятой энергии сигналов с учетом влияния атмосферы отличалась от наблюдавшейся не более, чем в 2-3 раза во всех сеансах наблюдения (расчет дл кварцевого отражателя проводился в предположении, что имеет место компенсация влияния эффекта Брэдли за счет эффекта Физо). Таким образом, достоверность теоретических выводов подтверждается результатами натурных экспериментов.

Это заключение авторов основывается на следующем. Из измерения диаграмм отраженных сигналов на специальной телевизионной автоколлимационной установке следует, что ошибки двугранных углов всех отражателей не превосходят  $0,2''$  и не могли дать заметных изменений диаграмм. Термовакуумные испытания призм в оправках показали, что даже при термоударе диаграмма отражения изменяется мало, а использованный для эксперимента КА находится на синхронно-солнечной орбите и стабилизирован. Одна пара отражателей (один призмный и один полый) всегда находится на освещенной, а другая на теневой стороне КА. Если бы влияние температуры вызвало большие изменения диаграмм, то сигналы от одинаковых отражателей, расположенных в разных температурных условиях, были бы разными. Однако, по результатам измерений это не обнаружено.

Наиболее убедительным является сам факт увеличения (а не уменьшения) реального сигнала от призмного отражателя по сравнению с реальной и расчетной величиной сигнала от полого отражателя на порядок. При отсутствии компенсации эффекта Брэдли эффектом Физо это возможно только при таком изменении диаграмм отражения, когда: 1) у каждой призмы диаграмма разбилась на два лепестка; 2) один из лепестков отклонился вперед по направлению движения КА; 3) величина отклонения лепестков равна величине отклонения лучей, обусловленной эффектом Брэдли; 4) в двух призмных отражателях отклонения лепестков идентичны во время прохождения КА над локатором. Вероятность такого совпадения слишком мала и опровергается стабильностью результатов измерений.

Для продолжения натурных исследований авторы готовы предоставить необходимую информацию заинтересованным организациям, имеющим локационную аппаратуру.

- 
1. Х.М.Сака, ТИИЭР 68, 126 (1980).
  2. И.Вильчинский, ТИИЭР 68, 91 (1980).
  3. E.Whittaker, A History of the Theories of Aether and Electricity. London: Nelson, 1951, 1, 111.
  4. Г.С.Ландсберг, Оптика. М.: Наука, 1976, с.463.
  5. L.J.Nugent and R.J.Condon, Appl. Opt. 5, 1832 (1966).
  6. П.Навара, Сб. ст.: Применение уголковых отражателей при лазерной локации космических объектов. М.: Астросовет АН СССР, 1973, с.29.
  7. Г.В.Денисюк, В.И.Корнеев, Письма в ЖТФ 7, 635 (1981).