1966 г. Март *Том 88, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

530.12:531.18

ДОППЛЕР-ЭФФЕКТ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Пусть вращающееся зеркало создает быстрое перемещение изображения источника света на экране.

Перемещение реального источника света вызывает изменение частоты, принимаемой неподвижным наблюдателем (допплер-эффект). Возникает ли такое же изменение частоты света, поступающего от изображения, перемещающегося по экрану?

Интуитивно ясно, что ответ должен быть отрицательный: линейная скорость изображения на экране может быть и больше скорости света. Детальное рассмотрение показывает, что, действительно, нет смещения частоты, которое соответствовало бы скорости изображения. Оказывается, что происходит расширение спектральной линии ω_0, причем ширина соответствует линейной скорости краев зеркала v: $\Delta\omega = \pm\,\omega_0 \frac{v}{c}$, что естественно.

Однако этим не исчерпывается ситуация. Если монохроматический свет источника модулирован по амплитуде низкими частотами ω_m, то амплитуда света, поступающего от движущегося изображения, модулирована частотой, подвергшейся допплеровскому смещению, соответствующему скорости изображения u:

$$\omega'_m = \frac{\omega_m}{1 + \frac{u}{c}\cos\psi}.$$

Если на низких частотах модуляции передается какая-то информация, функция времени $f(t)$, то принята будет информация, сжатая или растянутая во времени, т. е $f(kt)$, где $k = (1 + \frac{u}{c}\cos\psi)^{-1}$, u — скорость перемещения изображения, ψ—угол нормали к экрану и направления к приемнику (см. рис. 2). При этом необходимо только, чтобы модулирующая частота была меньше ширины полосы, возникающей при вращении зеркала, т. е. $\omega_m < \Delta\omega = \omega_0 \frac{v}{c}$.

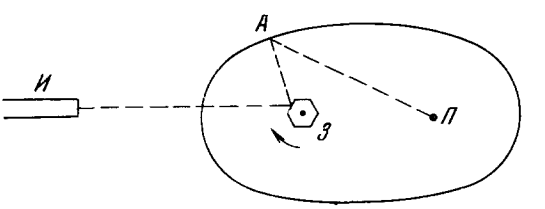

Рис. 1.

Таким образом, явление, которого нет на основной, несущей частоте ω_0, полностью проявляется на модулирующей частоте. В частности, не является помехой и сверхсветовая скорость изображения: если $\frac{u}{c}\cos\psi < -1$, $k < 0$, то информация, передававшаяся в порядке $A, B, C, \ldots$, будет принята в обратном порядке $\ldots, C, B, A$.

Обратимся к доказательству высказанных утверждений. Никакой допплер-эффект ни на ω_0, ни на ω_m, очевидно, невозможен, когда свет отражается от экрана к приемнику по геометрической оптике: пусть вращающееся зеркало $З$ находится в одном фокусе, а приемник $П$ — в другом фокусе эллипсоидального зеркала (рис. 1). Такое расположение обеспечивает то, что при любом повороте $З$ и при любом положении A свет попадает в $П$. Однако именно в этом случае время пробега света по линии $ЗАП$ не зависит от положения A, а следовательно, при перемещении A не происходит никакого допплер-эффекта ни на частоте ω_0, ни на частоте ω_m, и временные

интервалы модуляции без изменения приходят к *П*. Изохронность при отражении по геометрической оптике не случайна, она является следствием принципа Ферма́.

Поэтому нужно рассматривать другую схему, связанную с диффузным рассеянием света. На рис. 2 показано, как луч отражается зеркалом *З* на матовый экран, выполненный в виде кругового цилиндра с осью в *З*. Луч падает нормально и, если бы на месте экрана было зеркало, отразился бы обратно в *З*. Благодаря диффузному рассеянию часть света попадает в *П*. В этом случае время пробега света по пути *ЗАП* зависит от положения *А* на *Э* и меняется при вращении *З*. Пусть *И* испускает монохроматический свет (ω_0). В окрестности *А* в лучшем случае свет сфокусирован в пятно размером $\delta \sim \lambda/\alpha$, где α — угол, под которым из *А* видна грань *З*, $\alpha \sim l/R$ (рис. 3). Когда изображение *А* пробегает по экрану, то в фиксированной точке экрана длительность импульса порядка $\tau = \delta/u$.

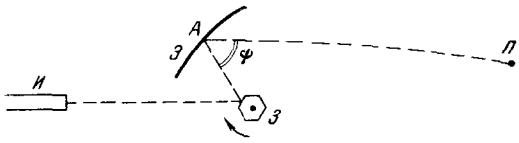

Рис. 2.

Диффузное рассеяние рассмотрим как некогерентное сложение полей, возникающих при действии падающего света на отдельные осцилляторы (пылинки, микронеровности и т. п.). Поле на неподвижной пылинке имеет вид приблизительно $\exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2} - i\omega_0 t\right)$, его спектр имеет ширину $\Delta\omega = \frac{1}{\tau} = \frac{u\alpha}{\lambda}$; подставляя $\lambda \sim c/\omega_0$, получим $\Delta\omega \sim \frac{u\alpha}{c}\omega_0$.

При диффузном рассеянии свет, принятый *П*, является некогерентной суммой излучения отдельных пылинок, значит, спектр, принятый *П*, также имеет вид полосы ширины $\Delta\omega$ с центром в ω_0. Никакого допплер-эффекта, соответствующего движению изображения, не возникло. В частности, спектр одинаково расширен в обе стороны независимо от знака u, т. е. независимо от того, удаляется или приближается изображение к приемнику.

Преобразуем выражение $\Delta\omega$, замечая, что $\alpha = \frac{l}{R} = \frac{v}{u}$:

$$|\Delta\omega| \omega_0 \frac{v}{c},$$

где v — скорость движения граней. Это выражение получается вполне естественно, если представить себе, что кванты меняют энергию (частоту) при отражении от движущейся поверхности зеркала.

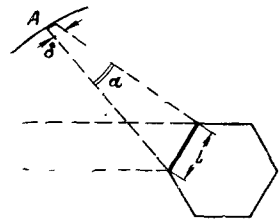

Рис. 3.

Любопытно отметить, что мы получили такое же выражение $\Delta\omega$ совсем из других соображений.

Наличие допплер-эффекта на модулирующей частоте получается естественно при рассмотрении времени прохождения информации от источника через *З* и экран к *П*. При этом ясно, что можно рассматривать изменение времени лишь для интервалов больше τ, когда сменяется рассеивающая частица. Это и приводит к условию $\omega_m < \Delta\omega$.

П. Парадоксов