

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 535.42

В. В. КОРОБКИН, С. Д. ФАНЧЕНКО  
(Москва)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗМ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ КОНЕЧНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

В последние годы при использовании высокоскоростных электронно-оптических камер в лазерных исследованиях было реализовано временное разрешение электронно-оптической хронографии  $\tau = (5 \div 10) \cdot 10^{-13}$  с [1, 2]. Как известно, для наилучших свето- и электронно-оптических систем в принципе можно довести  $\tau$  до  $10^{-13}$ — $10^{-14}$  с [3, 4]. Проникновение электронно-оптической фотографии в субпикосекундный диапазон делает весьма актуальным рассмотрение детальных характеристик процессов установления оптических и электронных изображений [5, 6]. Эти характеристики являются следствием самых общих и давно известных законов оптики и механики.

Для общего случая стигматического изображения точечного источника любой природы выполняется принцип таутохронизма Ферма — Гамильтона: расходящаяся из источника строго сферическая волна (электромагнитная волна, волна Де Бройля,  $\psi$ -функция) преобразуется в пространстве изображений в строго сферическую сходящуюся волну. Если источник испускает волновой пакет с временной зависимостью, имеющий вид  $\delta$ -функции, то и сигнал в точке изображения имеет такой же вид. Неточечность изображения за счет неточечности источника (либо за счет аберраций при точечном источнике) приводит к затягиванию времени установления изображения на некоторую величину  $\Delta t$ . И действительно, в опытах, где передаваемое изображение имело вид прямой линии конечной длины, была замечена несинхронность прихода на люминесцентный экран ЭОП электронов, составляющих различные точки линии  $\sim 5 \cdot 10^{-12}$  с [2].

Пусть со всей площади некоторой поверхности  $S_1$  в предметном пространстве объекта одновременно испускается сигнал, и каждая точка поверхности  $S_1$  стигматически отображается в соответствующую точку поверхности  $S_2$  в пространстве изображений. Необходимо дать ответы на следующие два вопроса. Существуют ли пары поверхностей  $S_1$ ,  $S_2$ , для которых сигнал появляется одновременно во всех точках изображения  $S_2$  (изохронное изображение)? Каковы будут отклонения от синхронизма для обычного случая систем, откорректированных для плоских объекта и изображения?

В качестве ответа на первый вопрос укажем два примера изохронных изображений.

1. Вогнутое сферическое зеркало с центром в точке 0; сферический объект  $S_1$  и сферическое изображение  $S_2$  с центром в той же точке 0. Изображение строго изохронно, т. е. время прохождения светового сигнала в точности одно и то же для всех сопряженных пар точек на  $S_1$  и  $S_2$ .

2. Электрическое и магнитное поля, однородные в пространстве и параллельные оси симметрии электронно-оптической системы  $z$ . Электронное изображение строго изохронно, если  $S_1$  и  $S_2$  — две плоскости, нормальные к оси  $z$ .

Для ответа на второй вопрос в общем случае протяженного светового изображения воспользуемся следующим приемом. Пусть на оптическую систему падает волновой фронт  $S'$ , являющийся образом точечного объекта\*, причем по форме он совпадает с  $S_1$ . Изображающую систему будем считать осесимметричной и ограниченной в пространстве: все отражающие и преломляющие элементы находятся в пределах  $x_1 \leq x \leq x_2$ , а  $S_1$  и  $S_2$  — в области свободного пространства ( $x < x_1$  либо  $x > x_2$ ). В пространстве изображений рассмотрим преобразованный волновой фронт  $S''$  точечного объекта и оценим временной разброс  $\Delta t_{пр}$  пересечения фронтом  $S''$  поверхности изображения  $S_2$ . Поскольку к каждой паре сопряженных точек поверхностей  $S_1$ ,  $S_2$  применим обычный принцип таутохронизма, несинхронность изображения  $\Delta t$  будет выражаться только величиной  $\Delta t_{пр}$ . Рассмотрим центрированную оптическую систему, откорректированную таким образом, что предметная плоскость  $S_1$  отображается плоскостью  $S_2$  в пространстве изображений без каких-либо аберраций. Такая

\* Для объектива, отображающего плоскость на плоскость,  $S'$  — плоскость, для рассмотренного сферического зеркала  $S'$  — сфера.

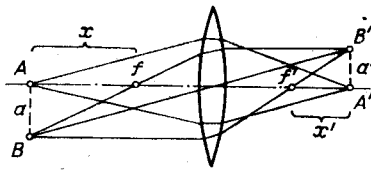


Рис. 1.

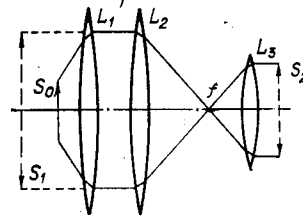


Рис. 2.

система может быть охарактеризована двумя главными плоскостями и двумя фокусами  $f, f'$  (рис. 1), причем поперечное увеличение системы  $k$  составляет величину

$$k = a'/a,$$

где  $a, a'$  — поперечные размеры предмета и изображения соответственно. Заметим, что  $k$  — положительная величина для действительного и отрицательная для мнимого изображений. Воспользовавшись пробной плоской волной  $S'$ , получим  $S''$  в виде сферической волны, расходящейся из заднего фокуса  $f'$ . Тогда запаздывание прихода сигнала в точку  $y = a'$  по сравнению с точкой изображения на оптической оси, очевидно, составит

$$\Delta t = (a')^2/2kf'c, \quad (1)$$

$c$  — скорость света в вакууме. Подставив  $a' = ka$ , имеем

$$\Delta t = a^2k/2f'c. \quad (2)$$

Например, для действительного изображения, данного обычным фотообъективом с  $f=5$  см,  $a=1$  см,  $k=+1$   $\Delta t \approx 3 \cdot 10^{-12}$  с, причем край изображения запаздывает относительно центра. Если тем же объективом построить мнимое изображение, центр будет запаздывать относительно края.

Интересно отметить, что телескопическая система с  $f \rightarrow -\infty, f' \rightarrow +\infty$ , исправленная на плоское изображение, является строго изохронной. Это сразу видно из уравнений (1), (2). Комбинация из линзы  $L_1$  (рис. 2), строящей промежуточное изображение с внесением того или иного запаздывания или опережения прихода сигнала на край изображения относительно центра, и телескопической системы линз  $L_2, L_3$ , строящей выходное изображение, строго изохронное с промежуточным, обладает интересными свойствами. Она позволяет при заданном оптическом увеличении регулировать по желанию задержку края изображения относительно центра. В частности, установив такую систему перед ЭОП электронно-оптической камеры, можно полностью скомпенсировать задержку края электронного изображения относительно центра, вносимую электронной линзой.

Очевидно, что описанная система может обеспечить пространственно-временной синхронизм изображений лишь в приближении геометрической оптики и с точностью до погрешностей, обусловленных геометрическими и хроматическими аберрациями.

Из всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Принцип тауохронизма точечных изображений может быть обобщен на случай протяженных изображений. Среди всех видов изображений существует класс изохронных протяженных изображений, переносящих сигнал без фазовых искажений.

2. Проведенные оценки показывают, что для обычных изображающих систем неизохронность протяженных изображений может выражаться как в запаздывании, так и в опережении края относительно центра.

3. Комбинируя неизохронный оптический объектив с изохронной телескопической системой переноса, можно обеспечить временное разрешение покадровой съемки в пикофemtосекундном диапазоне, равное временному разрешению непрерывной развертки точечного изображения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н. Г. и др. Прямое наблюдение пикосекундной структуры импульсов излучения неодимового лазера с самосинхронизацией мод. — ЖЭТФ, 1973, т. 65, с. 907.
2. Брюхевич Г. И. и др. Электронно-оптическая регистрация лазерного излучения с субпикосекундным временным разрешением. — Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, с. 1009.
3. Завойский Е. К., Фанченко С. Д. Физические основы электронно-оптической хронографии. — ДАН, 1956, т. 108, с. 218; Пикофemtосекундная электронно-оптическая хронография. — ДАН, 1976, т. 226, с. 1062; Appl. Opt., 1956, vol. 4, p. 1155.
4. Бутлов М. М. и др. — In: IV Intern. Congr. on High-Speed Photography (Köln, 1958). Darmstadt, 1959, S. 230.
5. Коробкин В. В., Фанченко С. Д. — В кн.: Тез. 14-го Международного конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике. М., 1980.
6. Fanchenko S. D., Korobkin V. V. Preprint/I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy. A. E. I — 3428/7. М., 1981.

Поступило в редакцию 1 апреля 1982 г.