

В. И. ВЛАД \*

(Бухарест)

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ОБЫЧНОЙ И РВ-ГОЛОГРАФИИ \*\*

В 1965 году Е. Н. Лейт с коллегами [1] предложили телевизионную систему, которая обеспечивала получение РВ-голограмм и передачу их по телевизионным каналам. Основные трудности в этой системе возникли из-за большой полосы пространственных частот при малом разрешении всего тракта (телевизионная камера, фотодетекторы с большой апертурой и др.) и из-за большой скорости передачи элементов РВ-голограмм по телевизионному каналу.

Для решения первой из этих проблем мы предлагаем использовать аналого-детерминистский метод уменьшения полосы пространственных частот в 8 раз. Это уменьшение достигается путем совместного использования трех известных способов подавления избыточной информации (рис. 1—3):

1) осевая голография с временным синтезом опорного пучка (несущей) для разделения сопряженных членов [2—7];

2) сканирование голограмм для исключения постоянных составляющих членов, которые не участвуют в образовании голографического изображения, оставаясь в области низких частот \*\*\*;

3) голография с одной боковой полосой пространственных частот.

Каждый из этих методов уменьшает пространственную полосу частот в два раза, и в случае правильной комбинации обеспечивается общее уменьшение в 8 раз. Это максимальное значение коэффициента сжатия. Оно может быть увеличено, если применить дополнительно статистические методы обработки информации с использованием ЭВМ.

Система, отражающая свойства упомянутых методик, показана на рис. 2. Регистрируемый объектный волновой фронт имеет комплексную форму, так что сопряженные члены не подавлены. Вследствие этого система регистрации имеет два канала соответственно для правой и левой боковых полос. Регистрация производится с переключаемым во времени опорным пучком. Линза  $L_1$  осуществляет Фурье-преобразование, и ножи-экраны, находящиеся в правом и левом каналах в Фурье-плоскостях, вырезают соответствующие полосы частот. Линзы  $L_2$  и  $L_3$  выполняют второе Фурье-преобразование в плоскости фотодетекторов, где получается оптический сигнал в пространственной области. Мы рассмотрим голографическую регистрацию с помощью телевизионной камеры (с электронным сканированием), хотя могли бы применить фотодетектор с большой апертурой и оптическим сканированием, осуществляемым точечным опорным источником \*\*\*\*. На рис. 2 изображены также два затвора, работающих последовательно в течение времени, определяемого телевизионным приемником, который восстанавливает изображение.

\* Материал доложен на 5-й Всесоюзной школе по физическим основам голографии, проходившей с 29 января по 3 февраля 1973 года в г. Новосибирске.

\*\* РВ-голография — голография в реальном времени.

\*\*\* В нашем методе это исключение достигается за счет низкочастотной фильтрации.

\*\*\*\* В последнем случае опора может вводиться после фильтрации боковых полос перед фотодетектором.

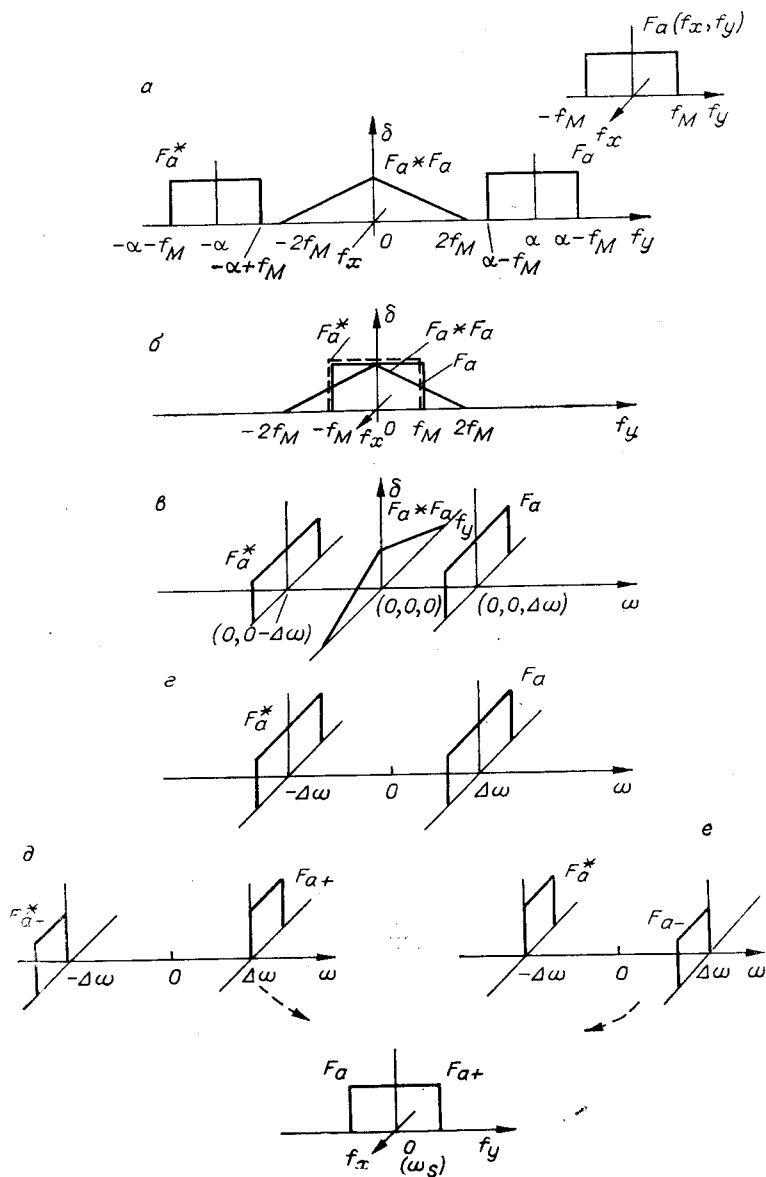


Рис. 1. Последовательность операций по преобразованию пространственной полосы частот при регистрации и восстановлении изображения объекта:

*a* — неосевая голограмма; *b* — осевая голограмма ( $\alpha=0$ ); *c* — осевая голограмма со сдвинутой во времени опорой; *г* — после сканирования или низкочастотной фильтрации; *д* — электрический сигнал, правый канал, момент  $t_0$ ; *е* — электрический сигнал, левый канал, момент  $t_0+\Delta t$ .

На стадии восстановления (см. рис. 3) мы вводим электрическую несущую с целью более простого разделения боковых полос. После этого сигнал первого канала электрически фильтруется и задерживается на время переключения в левом канале ( $\Delta\tau$ ). Сигнал левого канала фильтруется и вводится одновременно с задержанным на вход суммирующего устройства. На выходе сумматора появляется видеосигнал для кинескопа.

Математическое пояснение этой методики представлено в нашей работе [8].

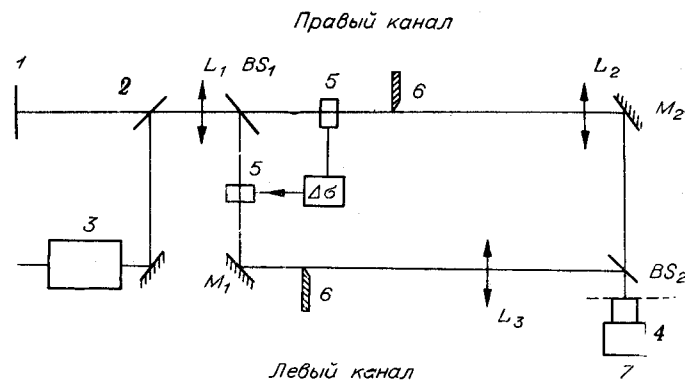


Рис. 2. Схема для регистрации РВ-голограмм и оптической обработки информации, которая снижает требования к разрешающей способности в 8 раз:

1 — плоскость объекта; 2 — сигнальный луч; 3 — фазовращатель; 4 — плоскость изображения; 5 — затвор; 6 — оптический нож; 7 — телекамера.

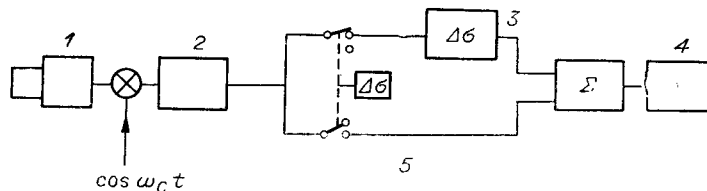


Рис. 3. Электронный процессор, предназначенный для восстановления сигнала:

1 — телекамера; 2 — широкополосный фильтр; 3 — задержка  $\Delta t$ ; 4 — кинескоп; 5 — синхронизированная логика с регистрацией и стабилизацией задержки.

Следует отметить, что при использовании предложенного метода требования к разрешающей способности устройств передачи и преобразования оптической информации понижаются в 8 раз, что находится вблизи возможностей реальных компонентов [9]. Наш метод может быть использован в совокупности со статистической обработкой для получения еще большего уменьшения полосы частот и улучшения разрешающей способности.

Покажем теперь некоторые из возможных применений метода для получения РВ-голограмм с уменьшенной пространственной полосой пропускания. Во-первых, из рис. 2 следует, что предложенная конфигурация может быть применена при оптической фильтрации. Мы можем ввести оптический фильтр с необходимой передаточной функцией  $H(f_x, f_y)$  в Фурье-плоскости каждого из каналов рядом с ножами. В результате можно отфильтровать от периодического сигнала случайный шум, повысить контраст и т. д. В частности, если

$$H(f_x, f_y) = \bar{O}^*(-f_x, -f_y), \quad (1)$$

где  $\bar{O}$  — спектр объекта, то предложенная конфигурация выполняет согласованную фильтрацию, при которой объективная автокорреляционная функция и свертка могут быть записаны отдельно (и переданы по телевизионному каналу). В этом случае телевизионная камера должна разрешать всю полосу частот объекта, потому что автокорреляционная функция и свертка имеют двойную пространственную полосу частот.

Другая возможность заключается в получении и отображении преобразования Гильберта для импульсной характеристики объекта. Пред-

положим, что импульсная характеристика объекта  $O(x, y)$  имеет преобразование Гильберта  $H_0(x, y)$  (т. е. она представляется вещественной или мнимой частью аналитической комплексной функции) и для простоты  $O(x, y)$  примем вещественной. В этом случае интенсивность света, падающего на фотодетектор от правого канала (с опорой, введенной после  $BS_2$ ), будет составлять

$$\begin{aligned} I_R &= \left| R_0 \exp(i\Delta\omega t) + O(x, y) + \frac{1}{2} \left[ \delta(y) + \frac{i}{\pi y} \right] \right|^2 = \\ &= \left| R_0 \exp(i\Delta\omega t) + \frac{1}{2} \left[ O(x, y) + \frac{1}{2} H_{0y}(x, y) \right] \right|^2 = \\ &= R_0^2 + \frac{1}{4} [O^2 + H_{0y}^2] + \frac{1}{2} R_0 \exp(-i\Delta\omega t) [O(x, y) + iH_{0y}(x, y)] + (2) \\ &+ \frac{1}{2} R_0 \exp(i\Delta\omega t) [O(x, y) - iH_{0y}(x, y)] = I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3} + I_{R_4}, \end{aligned}$$

где  $R_0$  — амплитуда опорной волны. Левый канал обеспечивает

$$\begin{aligned} I_L &= R_0^2 + \frac{1}{4} [O^2 + H_{0y}^2] + \frac{1}{2} R_0 \exp(-i\Delta\omega t) [O(x, y) - iH_{0y}(x, y)] + (3) \\ &+ \frac{1}{2} R_0 \exp(i\Delta\omega t) [O(x, y) + iH_{0y}(x, y)] = I_{L_1} + I_{L_2} + I_{L_3} + I_{L_4}. \end{aligned}$$

$I_{R_3}$  отделяется, задерживается на  $\Delta\tau$  и меняется по знаку. Результат вместе с  $I_{L_3}$  подается на сумматор. На выходе сумматора получается видеоток для кинескопа

$$i_k = KR_0 \exp(-i\omega_s x) iH_{0y}(x, y). \quad (4)$$

Рассмотрим теперь фазовый объект, который вносит малый фазовый сдвиг, т. е.

$$O(x, y) = \exp[i\varphi(x, y)] \approx 1 + i\varphi(x, y). \quad (5)$$

Проводя аналогичные рассуждения, получаем для видеотока выражение

$$i_k = KR_0 \exp(-i\omega_s x) H_{\varphi y}(x, y). \quad (6)$$

Если  $H_{\varphi y}(x, y)$  является достаточно гладкой и меняется много медленнее, чем  $y^{-2}$  [т. е. мы аппроксимируем  $y^{-2}$  выражением  $\delta(y)$ ], то можно записать

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{1}{\pi} \int H_{\varphi}(y) (p - y)^{-2} dp = \frac{1}{\pi} H_{\varphi}(y) * y^{-2} \approx \frac{1}{\pi} H_{\varphi}(y). \quad (7)$$

Тогда равенство (6) принимает вид

$$i_k \cong \pi KR_0 \exp(-i\omega_s x) \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad (8)$$

что дает отображение фазового градиента по оси  $y$ . Поворачивая опорную призму на  $90^\circ$ , мы можем визуализировать фазовый градиент в направлении оси  $x$ . Это очень полезный вывод в отношении градиента коэффициента преломления прозрачной среды (в частности, в аэродинамике).

Результаты экспериментов по визуализации звуковых полей и полей скоростей течения, базирующейся на оптическом гетеродинном детектировании, опубликованы в наших статьях [8, 10]. На основании этих результатов можно рекомендовать систему, описанную в качестве эффективного электрооптического устройства для обработки информации в реальном времени.

Значимость РВ-голограмм в том, что они обеспечивают интегральное использование емкости световой несущей в пространственном и вре-

менном отношении. Световая несущая может передаваться на расстояния, ограничиваемые лишь параметрами канала и терминалов. С другой стороны, РВ-голограммы могут быть зафиксированы на фотоэмульсиях, фотохромных материалах и т. д. Прогресс РВ-голограмм связан с исследованием новых фоточувствительных материалов, которые не требовали бы больших затрат времени на стадии обработки до или после экспонирования.

Опишем некоторые материалы и методы, которые мы использовали в наших экспериментах, связанных с получением РВ-голограмм, хотя, естественно, этот перечень не будет исчерпывающим: фотоэлектрические и фотохромные материалы, жидкие кристаллы, фотополимеры и, наконец, нелинейные поглотители.

Запись РВ-голограмм на фотоэлектрических детекторах в приемлемой форме была описана выше, и мы не будем рассматривать ее здесь. Упомянем лишь некоторые из достоинств фотоэлектрических устройств: простота, обеспечиваемая использованием существующей электронной техники, хорошая линейность, возможность моделирования опорного волнового фронта на стадии восстановления электрическим способом. В числе характерных трудностей следует упомянуть относительно малую апертуру, неоднородность чувствительности по фотокатоду и малую разрешающую способность (примерно  $10^2$  мм<sup>-1</sup>). Метод получения РВ-голограмм на фотоэлектрических детекторах основывается обычно на одном из видов сканирования и является моделью гетеродинного детектирования [10, 2, 3].

Фотохромные материалы [11—17] представляют собой органические молекулярные пленки или неорганические вещества, внедренные в кристаллы или стекла. Они обеспечивают два состояния с различными орбитальными электронными структурами и с различной шириной полосы поглощения (обычно в ультрафиолетовой и видимой областях). Активация (запись) производится в ультрафиолетовой, а считывание (демодуляция) — в видимой области (рис. 4, а, б). Стирание записи производится с помощью нагревания или инфракрасного облучения, причем материал является обратимым (см. рис. 4, в и г). Считывание происходит без разрушения материала (до  $10^4$  циклов). При этом не требуется какой-либо химической, тепловой или электрической обработки. Время хранения составляет от 1 до 80 ч.

Фотохромные материалы в ряде случаев имеют более высокую разрешающую способность, нежели фотоэмульсии (более 3000 мм<sup>-1</sup>) при емкости памяти  $10^5$  бит/см<sup>2</sup> и при постоянных времени от  $10^{-7}$  до  $10^{-13}$  с). Представителями таких материалов являются, в частности, монокристаллы LiNbO<sub>3</sub> [18], CaF<sub>2</sub> [19] и др.

В последнее время для получения РВ-голограмм был использован процесс расстекловывания в тонких и толстых стеклянных пленках серного мышьяка [18, 20]. Для записи используется аргоновый лазер (0,49 мкм, 10 мВт/см<sup>2</sup>, 10—15 мин), а считывание производится гелий-неоновым лазером (0,63 мкм) (рис. 5). Дифракционная эффективность

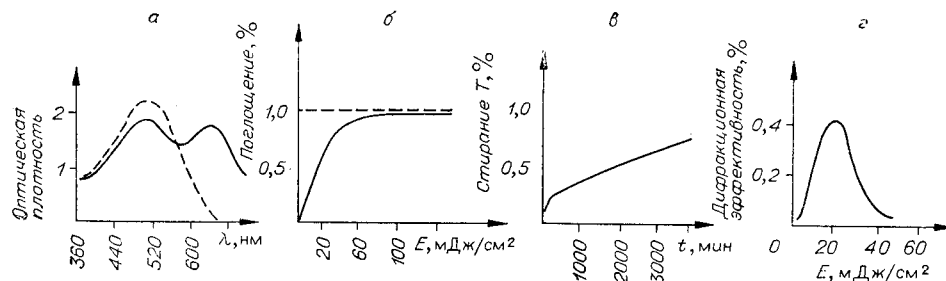


Рис. 4. Параметры фотохромных материалов.

достигает 18% (см. рис. 5), а разрешение может быть до 3000 мм<sup>-1</sup>.

Жидкие кристаллы [19, 21—23] представляют собой холестериновые соединения в общих растворителях. Зона их чувствительности занимает большой спектральный диапазон (от инфракрасной области до микроволновой). При тепловом воздействии совокупности молекул, имеющиеся в материале, приобретают определенную ориентацию, которая вызывает дифракцию лишь некоторых длин волн. Существуют соединения, которые работают стабильно и точно в большом диапазоне температур ( $\lambda=10,6$  мкм; 50 мВт/см<sup>2</sup>; 2 с). К числу других преимуществ пленок жидких кристаллов относится их обратимость (стирание производится полем звуковой частоты) при достаточно однородной чувствительности по поверхности. Недостатки — малое разрешение (примерно 20 мм<sup>-1</sup>) и малая скорость. Схема получения РВ-голограмм на жидких кристаллических пленках показана на рис. 6, а и б.

Здесь следует отметить, что существует много материалов, способных записывать РВ-голограммы в инфракрасной области: желатин, жидкие кристаллы спиропиранов [24, 25], пленки  $\text{Cu}_2\text{HgI}_2$  [26] и др. Методика эксперимента является обычной для получения РВ-голограмм: голограмма записывается в инфракрасном спектре ( $\lambda_1$ ) и после уменьшения в  $\lambda_2/\lambda_1$  раз считывается в видимом спектре.

Из фоточувствительных материалов пригодными для получения РВ-голограмм являются также фотополимеры [27, 28]. Процесс записи заключается в фотохимическом индуцировании реакции цепи радикалов. Длинные полимерные цепи, связанные тяжелыми ионами металлов, обуславливают дифракционные свойства записанных РВ-голограмм. С помощью такого процесса можно получить фазовую голограмму с эф-

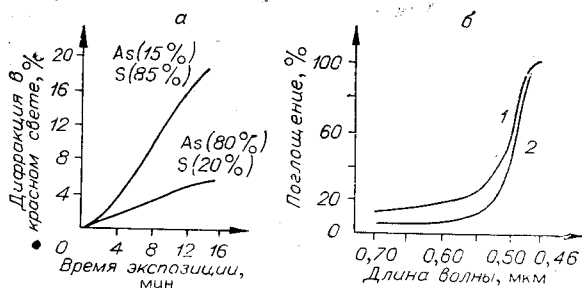


Рис. 5. Параметры пленок серного мышьяка: 1 — после экспозиции; 2 — до экспозиции.

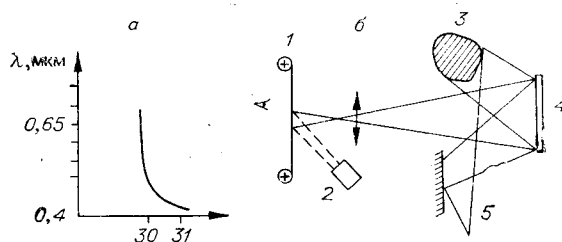


Рис. 6. Схема получения голограмм на жидких пленках:

1 — фотохроматическая пленка; 2 — лазер видимого излучения; 3 — объект; 4 — голограмма; 5 — инфракрасный лазер.

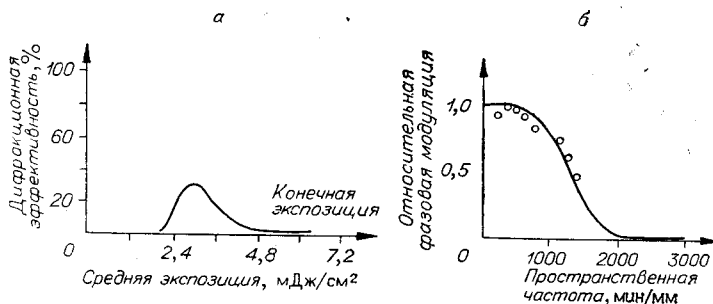


Рис. 7. Параметры фазовых голограмм.

Материал	Кодак 649 F	Агфа 10E75	Агфа 8E75	КЛАЛР	Криптона-инн	ШОТР 715
Чувствительность, эрг/см <sup>2</sup> ( $\lambda=0,69$ мкм)	10 <sup>4</sup>	2×10 <sup>2</sup>	2×10 <sup>3</sup>	2×10 <sup>3</sup> (1,5 мм)	10 <sup>5</sup> (1,5 мм)	4×10 <sup>4</sup> (1 мм)

эффективностью более 30% ( $\lambda=0,63$  мкм, 3 мДж/см<sup>2</sup>) (рис. 7, а). Разрешение может достигать 3000 мм<sup>-1</sup> (см. рис. 7, б).

Нелинейные поглотители [29—35] представляет собой неорганические и органические вещества, которые в определенном спектральном диапазоне имеют поглощение с насыщением. Такие нелинейные поглотители, как красители, стекла, пластмассы, газы и др., нашли широкое применение в качестве переключателей добротности и модовых фильтров практически на всех длинах волн, генерируемых лазерами. Чувствительность некоторых поглотителей сравнима с чувствительностью фотоэмульсий (см. таблицу).

Разрешающая способность нелинейных поглотителей очень велика (более 3000 мм<sup>-1</sup>) вследствие того, что запись производится на уровне атомных и молекулярных процессов. Дифракционная эффективность

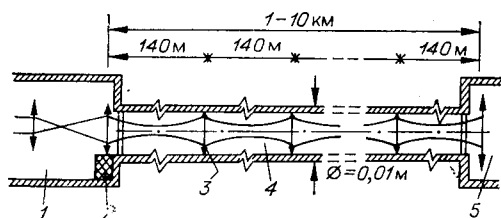


Рис. 8. Линзовый волновод:  
1 — система пуска; 2 — пьезоэлектрическая опора; 3 — линзы; 4 — откачанная область; 5 — приемник.

для тонких голограмм поглощения невелика (примерно 1,56%), но может быть улучшена при использовании диэлектрических эффектов в толстых пленках.

Для исключения фазового искажения и атмосферных помех при передаче РВ-голограмм со сжатой полосой частот может быть использован подземный линзовый волновод [32, 33] (рис. 8). В этом случае

искажение светового пучка может возникать лишь вследствие малых смещений центра пучка из-за тепловых градиентов в волноводе, которые могут быть скомпенсированы даже на расстоянии до 10 км. Ослабление, вносимое волноводом, не превышает величины 0,15 дБ/км. Упомянутое искажение вызывает вариацию пространственной несущей частоты. Такой оптический волновод обеспечивает большую скорость передачи голографических данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. N. Leith, et al. J. S. M. P. T. E., 1965, 74, № 10, 893.
2. L. H. Enloe, et al. B. S. T. J., 1968, 47, № 9, 1875.
3. C. B. Burckhardt si L. H. Enloe. B. S. T. J., 1969, 1529.
4. A. Larsen. B. S. T. J., 1969, 48, № 7, 2507.
5. Iu. N. Denisyuk & D. I. Statel'ko. Dokl. Nauk SSSR, 1967, 127, 176.
6. A. Macovski. A. P. L., 1969, 14, № 5, 166.
7. O. Bryngdhal & A. Lohmann. J. O. S. A., 1968, 58, № 5, 620.
8. V. I. Vlad. Proc. Conf. "Lasers and Their Appl." Dresden (1970). Rev. Roum. Phys., 1971, 16, 855.
9. R. Potter. Optical Proc. of Inf., eds. Pollak, Koester si Tippet, Spartan Books, Baltimore, Md., 1963.
10. V. I. Vlad. Lucr. Simp. "Domenii multidisciplinare si interdisciplinare" Acad. R. S. R., Apr. (1971), si in Lucr. Simp. Int. Telecomunicatii, Buc., Oct, 1971.
11. Kirk. A. O., 1966, 5, 1684.
12. A. L. Mikaeliane, et al. IEEE J., 1968, QE-4, 757.
13. S. Herman. Symp. on Modern Optics, 1967, P. I. B., 743.
14. Z. J. Kiss. IEEE J., 1969, QE-5, № 1, 12.

15. V. A. Tsekhomsky. Optika i Spektrosk., 1969, 67.
16. J. La Macchia. Laser Focus, 1970, Febr., 35.
17. M. Chomat, M. Miler. Tech. Rept. Inst. Radioeng. Electronics, C. A. S., Prague, 1971.
18. Laser Weekly, 1972, January 31, 1.
19. F. Fergasson, Acoustical Holography. L. Larmore et al, eds. Plenum Press, v. 2, N. Y., 1969.
20. R. G. Brandes et al. A. O., 1970, 9, 1712.
21. F. Keilmann. A. O., 1970, 9, № 6, 1319.
22. G. H. Heilmeyer. Proc. IEEE, 1969, 57, № 1, 34.
23. C. F. Augustine & W. E. Kock Proc. IEEE, 1969, № 5, 35.
24. T. Izawa et al A. P. L., 1969, 15, 201.
25. M. Lescinski & Miler Optics Commun., 1, 1970, № 9, 17.
26. J. Chivian et al APL, 1969, 15, 123.
27. J. D. Margerum Photo Sci. Eng., 1968, 12, 177.
28. J. A. Jenney J. O. S. A., 1970, 60, 1155.
29. F. Gires IEEE J. QE-2, 1966, № 9, 621.
30. M. Hercher IEEE J. QE-4, 1968, № 11, 954.
31. H. J. Gerritsen A. P. L., 10, 1967, № 9, 239.
32. V. I. Vlad Technical Note, C. R. C. G. E. Marcoussis, Nov. 1969.
33. B. Glode B. S. T. J., 46, 1967, № 4, 721.
34. V. I. Vlad. Proc. Conf. Holography and the Computer, IBM—Houston (1969) si Rev. Roum. Phys., 1971, 16, № 1, 73.
35. V. I. Vlad. Metode de prelucrare a informatiei în holografia conventionala si în timp real, Teza de doctorat, IPB, Buc., 1972.

*Поступила в редакцию 14 мая 1973 г.*