

С. В. МИХЛЯЕВ
(Новосибирск)

ОПЕРАТИВНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СРЕДСТВАМИ ФУРЬЕ-ОПТИКИ

Пространственно-частотная фильтрация изображений, осуществляемая средствами фурье-оптики, используется в настоящее время при решении различных научно-технических задач [1—3]. Широкое применение при этом находят такие оптические преобразования, как высокочастотная фильтрация и мультиплицирование изображений [4—6]. Совместное действие этих преобразований эффективно использовано, например, в оптико-цифровой системе промышленного контроля при реализации дифференциального метода измерений размеров изделий сложной формы с четкой теневой проекцией [7]. Посредством мультиплицирования в системе обеспечивается совмещение информативных фрагментов изображения контролируемого объекта с приемным полем видеосистемы, а высокочастотная фильтрация используется для устранения взаимного влияния мультиплицированных изображений, существенно затрудняющего фотоэлектрическую обработку результирующего изображения.

Мультиплицирование изображений в системах фильтрации осуществляется обычно с помощью дифракционных решеток различных периодов и ориентации, являющихся в общем случае компонентами более сложных пространственно-частотных фильтров [8]. Существенно, что с увеличением расстояний между мультиплицированными изображениями требования к точности изготовления используемых дифракционных решеток резко возрастают. В связи с этим обычный способ изменения параметров мультиплицирования, заключающийся в замене пространственно-частотного фильтра или его отдельных мультиплицирующих компонентов, оказывается не всегда приемлемым.

В настоящем сообщении предлагается более простой метод, позволяющий осуществлять совместно фильтрацию и мультиплицирование изображений и допускающий оперативное изменение параметров мультиплицирования путем изменения положения (и ориентации) мультиплицирующих компонентов пространственно-частотных фильтров на оси системы. Дается обоснование метода и обсуждаются особенности его применения в оптоэлектронных системах контроля геометрических параметров промышленных изделий.

Для обоснования предлагаемого метода рассмотрим модифицированную оптическую систему фильтрации (рис. 1), на входе которой в плоскости P_1 расположен исходный «одномерный» объект с функцией пропускания $f(x_1)$, а в частотной плоскости P_3 — оптический фильтр $H_1(x_3)$. Отличие этой системы от традиционной заключается в применении дополнительного мультиплицирующего пространственно-частотного фильтра $H_2(x_4)$, отстоящего от основного на расстоянии Δ вдоль оси системы. Найдём амплитуду светового распределения $g(x_5)$ на выходе такой системы (в плоскости P_5 , сопряженной с P_1) при освещении объекта монохроматической плоской световой волной и покажем, что изменение величины Δ вызывает соответствующее изменение параметров мультиплицирования изображений.

Анализ оптической системы проведем в параксиальном приближении, рассматривая свободное пространство глубиной z как линейный фильтр с откликом [3]

$$\psi(x, y; z) = (i/\lambda z) \exp\{-(ik/2z)(x^2 + y^2)\}, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны света.

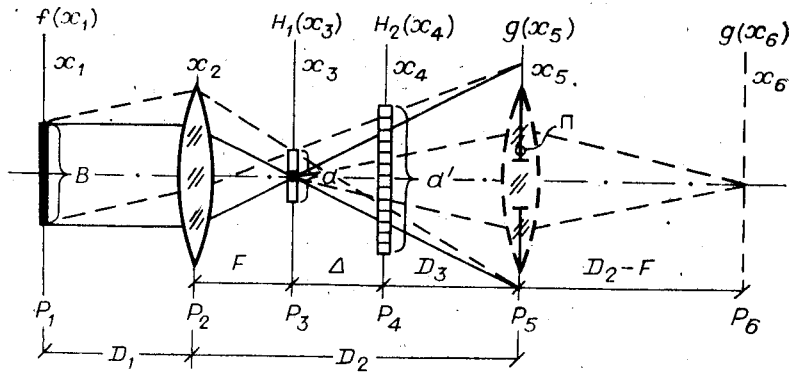


Рис. 1. Схема оптической системы.

Результат фильтрации в общем случае записывается следующим образом:

$$g(x_5, y_5) = \lambda F \{ \{ f(x_1) \otimes \psi(x_2, y_2; D_1) \} \psi^*(x_2, y_2; F) \otimes \psi(x_3, y_3; F) \} H_1(x_3) \otimes \psi(x_4, y_4; \Delta) \} H_2(x_4) \otimes \psi(x_5, y_5; D_3). \quad (2)$$

Здесь F — фокусное расстояние объектива; \otimes и $*$ означают операции свертки и комплексного сопряжения соответственно. Осуществляя интегрирование в (2) по координате y и выполнив ряд преобразований с учетом определения (1), получим с точностью до несущественных постоянных множителей

$$g(x_5, y_5) = \psi(x_5, y_5; D_2 - F) \int F(kx_3/F) H_1(x_3) h(x_3, x_5) dx_3, \quad (3)$$

где $F(\cdot)$ представляет пространственно-частотный спектр объекта

$$F(u) = \int f(x_1) \exp\{iux_1\} dx_1, \quad (4)$$

а функция $h(\cdot)$ определяется выражением

$$h(x_3, x_5) = \sqrt{\Delta D_3 \lambda^5 (D_2 - F)^3} \psi\left(x_5; (D_2 - F) \frac{D_3}{\Delta}\right) \times \\ \times \psi\left(x_3; (D_2 - F) \frac{\Delta}{D_3}\right) \int H_2(x_4) \psi\left(x_4; \frac{\Delta D_3}{D_2 - F}\right) \exp\left\{ikx_4 \left(\frac{x_3}{\Delta} + \frac{x_5}{D_3}\right)\right\} dx_4. \quad (5)$$

Проанализируем соотношения (3)–(5), описывающие световое поле на выходе рассматриваемой системы. Заметим, что при $H_2 \equiv \text{const}$ функция (5) приобретает вид

$$h(x_3, x_5) = \exp\{ikx_3 x_5 / (D_2 - F)\}. \quad (6)$$

Из (3) с учетом (4), (6) получаем

$$g(x_5, y_5) = \psi(x_5, y_5; D_2 - F) g_0(x_5), \quad (7)$$

где

$$g_0(x_5) = \int f(x_1) h_1(x_1 + x_5/M) dx_1. \quad (8)$$

Параметр M в выражении (8) определяет увеличение оптической системы $M = D_2/D_1$, а функция $h_1(\cdot)$ описывает отклик первого пространственно-частотного фильтра $H_1(x_3)$:

$$h_1(x) = \int H_1(x_3) \exp\left\{\frac{ikx_3 x}{F}\right\} dx_3. \quad (9)$$

Таким образом, при отсутствии второго фильтра на выходе системы в плоскости P_5 формируется изображение с амплитудным распределе-

нием (7), являющееся результатом обычной фильтрации, осуществляемой фильтром H_1 , расположенным в частотной плоскости оптической системы. Наличие второго фильтра H_2 , как видно из (3), (5), может привести к существенному изменению выходного изображения.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением случая, когда амплитудное пропускание второго фильтра описывается одномерной функцией вида

$$H_2(x_4) = \sum_n \alpha_n \exp\{-ikx_4\beta_n\}. \quad (10)$$

Проведя интегрирование в (3), (5) с учетом (10), окончательно получим

$$g(x_5, y_5) = \frac{1}{\Delta} \lambda D_3 (D_2 - F) \psi(x_5, y_5; D_2 - F) \sum_n \alpha_n \times \\ \times \psi^*\left(\beta_n D_3; \frac{D_3(D_2 - F)}{\Delta}\right) \exp\left\{-\frac{ik\Delta\beta_n x_5}{D_2 - F}\right\} g_0(x_5 - \beta_n D_3). \quad (11)$$

Из соотношения (11) следует, что световое распределение на выходе системы является суперпозицией изображений (8) с пространственными сдвигами и фазами, зависящими не только от частотного состава фильтра H_2 , но и от его расположения на оптической оси системы. Если отдельные изображения в (11) не перекрываются, то их относительные интенсивности определяются коэффициентами $|\alpha_n|^2$. В общем же случае результат фильтрации и мультиплицирования существенно искажается интерференцией различных составляющих (11). В частности, если $H_1 = \text{const}$, а H_2 — периодическая функция с периодом T_0 , то, как следует из (11), в области пересечения мультиплицированных изображений в результате интерференции может возникнуть саморепродуцирование транспаранта-фильтра $H_2(x_4)$:

$$g(x_5, y_5) \approx \psi(x_5, y_5; D_2 - F) H_2(x_5/M_1), \quad (12)$$

где $M_1 = (D_2 - F)/\Delta$. Саморепродуцирование будет иметь место при выполнении известного соотношения

$$\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{D_3} = \frac{\lambda}{NT_0^2} \quad (13)$$

для целых значений N , определяемых частотным составом функции (10) [9].

Интерференция различных составляющих в (11) проявляется тем слабее, чем меньше область их пересечения. В связи с этим рассматриваемую методику изменения параметров мультиплицирования наиболее целесообразно использовать совместно с дополнительной высокочастотной фильтрацией, осуществляемой, как обычно, фильтром, расположенным в плоскости P_3 . На выходе системы в этом случае формируется совокупность контурных изображений (11), взаимное расположение которых зависит от положения фильтра H_2 на оси системы. Фазовые множители, входящие в суперпозицию (11), при этом практически не оказывают влияния на интенсивность светового распределения в плоскости P_5 .

Рассмотрим в качестве примера случай, когда входное изображение является бинарным, а фильтр H_2 представляет собой дифракционную решетку с периодом T_0 , обладающую двумя порядками дифракции: $\beta_1 = -\beta_2 = \theta = \lambda/T_0$. При этих условиях на выходе системы формируются два контурных изображения, расстояние между центрами которых (параметр мультиплицирования) определяется соотношением

$$A = 2\theta D_3 = 2\theta (D_2 - F) (1 - \Delta/(D_2 - F)). \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что перемещение фильтра H_2 вдоль оси системы вызывает непрерывное изменение параметра мультиплицирования от 0 до $2\theta(D_2 - F)$, что эквивалентно действию дифракционной решетки, расположенной в плоскости P_3 , у которой непрерывно изменяется пе-

риод: $T = T(D_3) = T_0(D_2 - F)/D_3$. Существенным моментом является то, что размер d' перемещаемого компонента $H_2(x_4)$, как следует из рис. 1, должен удовлетворять при этом соотношению

$$d' > d(1 - \Delta/(D_2 - F)) + B\Delta/F, \quad (15)$$

где B и d — размеры соответственно исходного объекта $f(x_1)$ и фильтра $H_1(x_3)$. При получении оценки (15) предполагалось выполнение условия $\delta \ll B$, где δ — характерный размер отклика (9).

Полученные выше результаты справедливы также для случая двумерного фильтра $H_1(x_3, y_3)$ и суперпозиции мультиплицирующих одномерных фильтров H_2 , расположенных в различных плоскостях оптической системы и имеющих различные ориентации.

Рассмотренный метод может быть использован при создании систем обработки информации, где необходимо сочетание фильтрации и мультиплицирования изображений. В частности, представляется перспективной возможность применения его при реализации бесконтактных методов контроля геометрических параметров промышленных изделий: для формирования дифференциальных изображений изделий в оптико-цифровом [7] и преобразования диапазона измерений в дифракционном [10] или более общем, спектральном [11], методе контроля. В двух последних случаях следует учитывать особенности использования перемещаемых мультиплицирующих фильтров, обусловленные тем, что анализ световых распределений осуществляется не в пространственной, а в частотной плоскости оптической системы. Рассмотрим, например, дифракционный измеритель, содержащий в частотной плоскости оконтуривающий пространственно-частотный фильтр и дифракционную решетку с двумя порядками дифракции $\pm\theta$. Этому случаю соответствует оптическая схема, приведенная на рис. 1, с параметром сдвига решетки $\Delta = 0$. Анализ дифракционной картины осуществляется в плоскости P_6 , сопряженной с P_3 . При контроле размера «одномерного» объекта (протяженный цилиндр, зазор и т. п.), как показано в [11], с помощью решетки осуществляется изменение диапазона измерений на величину $\pm A_0$, где $A_0 = 2\theta F$ — параметр мультиплицирования. В случае если $\Delta \neq 0$, параметр A_0 , как следует из (14), становится зависящим от Δ (или D_3): $A_0 = 2\theta D_3/M$, что открывает возможность преобразования диапазона измерений путем простого изменения положения дифракционной решетки на оси системы. При практической реализации такого приема необходимо учитывать вызываемый им эффект снижения пространственной инвариантности системы контроля. Действительно, можно показать, что наличие фазовых множителей в соотношениях (10), (11) приводит к появлению периодической зависимости интенсивности светового распределения в выходной частотной плоскости P_6 системы в области пересечения дифракционных картин, соответствующих различным дифракционным порядкам решетки, от поперечных смещений контролируемого объекта (x_1) и решетки (x_4) в плоскостях P_1 и P_4 системы (см. рис. 1)*:

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{kx_6}{2F} |B - A_0| + \frac{kx_1 \theta \Delta}{F} + kx_4 \theta \right).$$

Соответствующие периоды изменения интенсивности светового распределения (L_1 и L_4) определяются выражениями

$$L_1 = \lambda F / 2\theta \Delta; \quad L_4 = \lambda / 2\theta. \quad (16)$$

Существенно, что L_4 не зависит от положения решетки на оси системы, в то время как L_1 изменяется от ∞ до значения L_4/M при изменении Δ от 0 до $(D_2 - F)$. Таким образом, пространственная инвариантность системы достигается лишь при $\Delta = 0$, что соответствует случаю размеще-

* При выводе этого соотношения предполагалось, что в плоскости P_5 системы установлена полевая диафрагма (П), пропускающая световой поток, соответствующий лишь двум контурам, расположенным в центральной части изображения (11).

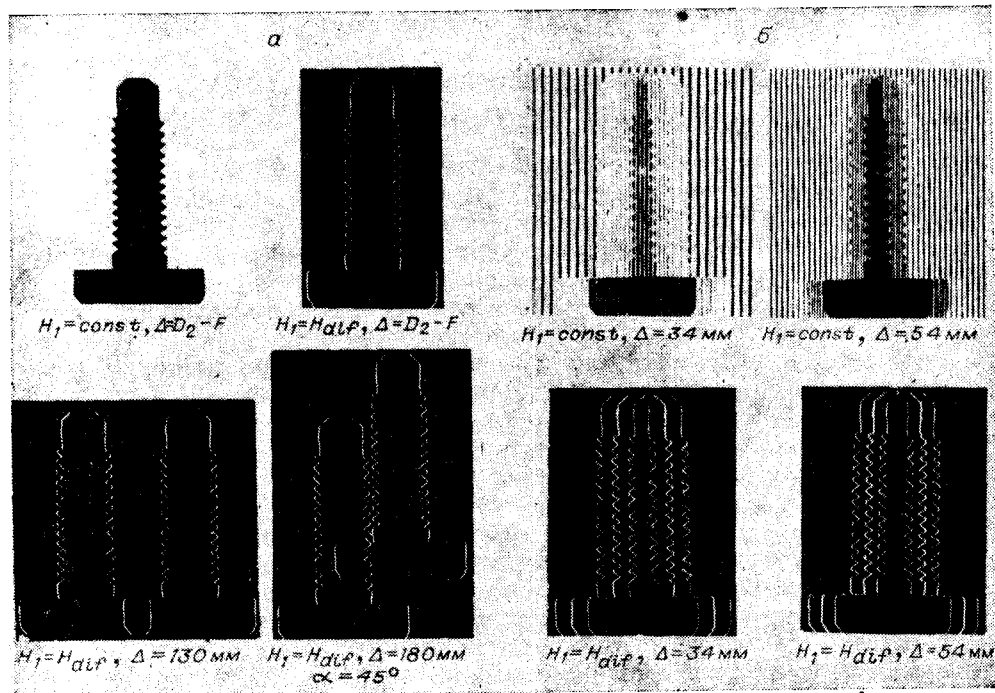


Рис. 2. Результаты фильтрации и мультиплицирования изображений, соответствующие различным фильтрам H_1 , H_2 при различных значениях параметра Δ :
 а — H_2 — фазовая дифракционная решетка, $T_0=0,02$ мм; б — H_2 — амплитудная дифракционная решетка, $T_0=0,1$ мм.

ния дифракционной решетки в частотной плоскости системы P_3 . Отмеченные особенности необходимо учитывать при создании систем контроля, основанных на дифракционных измерениях, и выработке требований к точности позиционирования контролируемых изделий.

Экспериментальная проверка полученных результатов осуществлялась в оптической системе (см. рис. 1), обеспечивающей двукратное увеличение изображений при фокусном расстоянии объектива $F = 180$ мм. Для высокочастотной фильтрации использовался дифференцирующий бинарный фильтр

$$H_1(x_3, y_3) = H_{\text{diff}} = [\text{rect}(x_3/d) - \text{rect}(x_3/d_0)] \text{rect}(y_3/l)$$

с параметрами $d = 5$, $d_0 = 1$, $l = 10$ мм, а для мультиплицирования — дифракционные решетки $H_2(x_i)$ с прямоугольным профилем штрихов скважностью 1 и периодами $T_0 = 0,1$ мм (амплитудная решетка) и $T_0 = 0,02$ мм (фазовая решетка). Исходным объектом, помещаемым во входной плоскости системы, служил микровинт.

На рис. 2 показаны примеры световых распределений в плоскости P_3 , полученные при различных положениях фазовой (а) или амплитудной (б) решеток H_2 на оптической оси системы и соответствующие различным фильтрам H_1 . При использовании фазовой решетки и $\Delta = D_2 - F$ в плоскости P_3 формируется теневое изображение объекта (при $H_1 = \text{const}$) или результат его оконтурирования (при $H_1 = H_{\text{diff}}$). В общем случае, как следует из рис. 2, а, взаимное расположение мультиплицированных изображений зависит как от значения параметра Δ , так и от угловой ориентации решетки α . Взаимное влияние мультиплицированных изображений при когерентном освещении иллюстрируется рис. 2, б, на котором приведены случаи саморепродуцирования изображения амплитудной решетки ($H_1 = \text{const}$). Нарушение режима саморепродуцирования и практически полное устранение интерференционных эффектов достигаются при использовании высокочастотной фильтрации ($H_1 = H_{\text{diff}}$).

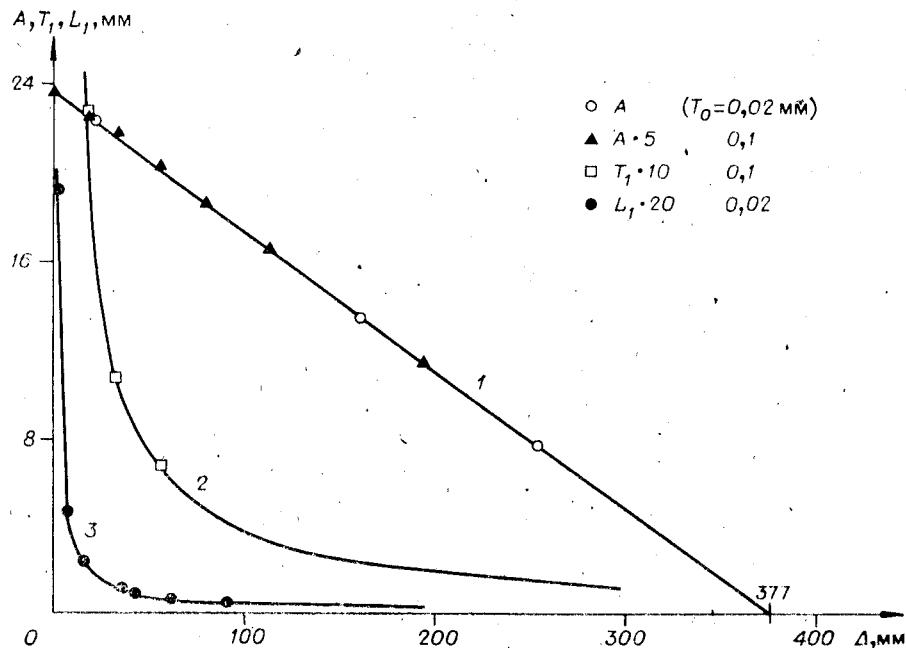


Рис. 3. Зависимости параметра мультиплицирования A (1), периода полос T_1 в саморепродуцированных изображениях амплитудной решетки (2), периода изменения L_1 интенсивности дифракционной картины в плоскости P_6 при смещениях исходного объекта в плоскости P_1 системы (3) от величины параметра Δ .

Следует отметить, что взаимное влияние мультиплицированных изображений может быть ослаблено также при использовании некогерентного освещения. В последнем случае необходимо учитывать возможное снижение контраста результирующего изображения.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные и расчетные зависимости 1–3, соответствующие выражениям (14), (12), (16). Кривая 1 характеризует линейный закон изменения параметра мультиплицирования A от величины смещения решеток Δ . Кривая 2 определяет период полос $T_1 = M_1 T_0$ (в зависимости от Δ) в саморепродуцированных изображениях амплитудной решетки, показанных на рис. 2, б. Характер снижения пространственной инвариантности оптической системы при возрастании Δ в случае анализа дифракционной картины в плоскости P_6 системы иллюстрируется кривой 3. Этой кривой определяется период L_1 изменения интенсивности дифракционной картины при поперечном смещении исходного объекта в плоскости P_1 в зависимости от величины Δ . Следует отметить хорошее согласие экспериментальных данных с расчетными зависимостями.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают возможность оперативного изменения параметров мультиплицирования изображений в оптической системе фильтрации путем изменения положения (и ориентации) пространственно-частотных фильтров на оптической оси системы. При практическом использовании такого приема необходимо учитывать ограничения (15), накладываемые на размеры перемещаемых фильтров. Кроме того, в случае анализа световых распределений в пространственной области оптической системы следует принимать во внимание эффекты взаимного влияния мультиплицированных изображений (существенное ослабление этих эффектов может быть обеспечено путем дополнительной высокочастотной фильтрации изображений), а при анализе дифракционных картин, соответствующих мультиплицированным изображениям, учитывать изменение пространственной инвариантности системы, обусловленное изменением положения мультиплицирующих компонентов фильтров на оси системы.

Предложенный метод может быть эффективно использован в оптико-электронных системах при решении задач промышленного контроля, распознавания изображений, а также в других случаях, требующих выполнения фильтрации изображений и их мультиплицирования с изменяемыми параметрами.

Автор выражает признательность И. С. Солдатенкову за изготовление фазовых дифракционных решеток, применявшихся при экспериментальных исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики.— М.: Наука, 1971.
2. Оптическая обработка информации/Под ред. Д. Кейсента.— М.: Мир, 1980.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мир, 1973.
4. Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В. Качественное оконтуривание двумерных теневых изображений.— Автометрия, 1979, № 1, с. 33—44.
5. Козлов О. А., Нежевенко Е. С., Потатуркин О. И. Распознавание изображений в когерентно-оптических системах с применением контурных эталонов.— Автометрия, 1976, № 6, с. 34—44.
6. Здор С. Е., Широков В. Б. Оптический поиск и распознавание.— М.: Наука, 1973.
7. Вертопрахов В. В., Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оптическое преобразование изображений в оптико-цифровой системе промышленного контроля.— Автометрия, 1983, № 4, с. 59—64.
8. Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Корреляционный метод допускового контроля размеров изделий с использованием расщепляющих фильтров.— Автометрия, 1981, № 1, с. 70—74.
9. Bryngdahl O. Image formation using self-imaging techniques.— JOSA, 1973, v. 63, № 4, p. 416—419.
10. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении.— Л.: Машиностроение, 1978.
11. Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Спектральный метод контроля размеров изделий на основе биполярных фильтров по интенсивности.— Автометрия, 1980, № 2, с. 43—59.

Поступила в редакцию 12 октября 1984 г.

УДК 621.396.677.8.001.5

А. Ю. ГРИНЕВ, В. Д. СВЕТ, В. С. ТЕМЧЕНКО

(Москва)

КОГЕРЕНТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР КОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Введение. Кольцевые антенные решетки (АР) позволяют осуществлять широкоугольный обзор пространства по азимуту практически без ухудшения свойств диаграммы направленности. Формирование остро-направленного излучения (приема) и сканирования в таких АР — сложная техническая задача, которая еще более усложняется, когда конечной целью становится реализация параллельного обзора пространства, аналогичного тому, который имеет место в плоских АР, принимающих широкополосный в пространственно-временном (ПВ) смысле сигнал [4].

Кольцевые АР с когерентными оптическими (КО) процессорами, использующими пространственные модуляторы света (ПМС) с пространственной разверткой принятого элементами АР ПВ-сигнала, позволяют осуществлять панорамный обзор по азимуту и частоте одновременно при фиксированном угле места [2—5].

КО-процессор кольцевой антенной решетки. В работах [4, 5] изложен алгоритм обработки ПВ-сигнала $\mathcal{E}(R, t)$, принятого элементами кольцевой АР, реализующий для фиксированного угла места направленные свойства и разрешение по частоте, тождественные эквивалентной