

## СПЕКТРАЛЬНОЕ И СПЕКТРАЛЬНО-МОДОВОЕ КОДИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

© 2007 Г.И. Леонович<sup>1</sup>, С.А. Матюнин<sup>2</sup>, П. Л. Токмак<sup>2</sup>, Э.С.Луганский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский научный центр РАН

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены основные параметры спектроуправляемых элементов, применяемых в оптоэлектронных преобразователях перемещения (ОПП) со сбором информации от сенсоров по волоконно-оптическим линиям связи. Предложены варианты структурных схем ОПП со спектральным и спектрально-модовым кодированием перемещения.

### Введение

Современные достижения в области микроэлектроники и информационных технологий позволяют значительно улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики оптоэлектронных преобразователей угловых и линейных перемещений (ОПП) за счет усовершенствования вторичных преобразователей – электронных блоков (ЭБ), выносимых, как правило, в комфортные условия эксплуатации [1-3]. При этом сбор оптических сигналов от удаленных высоконадежных оптомеханических сенсоров может осуществляться по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) с последующим фотоэлектрическим преобразованием, формированием и обработкой цифровой информации в ЭБ. В современных системах передачи информации по ВОЛС возможны различные методы модуляции и кодирования сигналов: пространственное, волновое (спектральное), временное, поляризационное, модовое и их комбинации [1-5]. Практический интерес с точки зрения простоты реализации и низкой стоимости комплектованных представляет спектральная и спектрально-модовая модуляция и кодирование параметра перемещения.

### Общая характеристика элементов спектральной модуляции и кодирования

Для формирования и управления спектральным составом оптических сигналов в ОПП широко применяются оптические фильтры различной структуры [2].

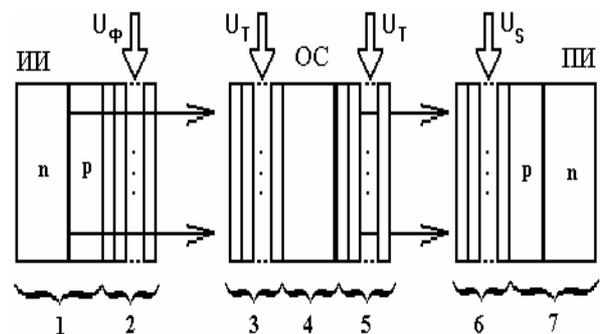


Рис. 1. Структурная схема МОС

На рис. 1 в качестве примера представлена структурная схема многокомпонентной оптической структуры (МОС) спектрального взаимодействия элементов ОПП, в котором на поверхность источника излучения (ИИ), элементов оптической системы (ОС) и приемника излучения (ПИ), наносится ряд компонент (оптических фильтров) 2, 3, 5, 6 в виде многослойных тонкопленочных покрытий (МТП). Эти компоненты выполняют функции спектральной, временной и пространственной фильтрации, модуляции и коммутации, реализуя заданные алгоритмы спектрального взаимодействия.

Суть алгоритмов заключается в управлении взаимным смещением спектральных характеристик МОС, направленном, в первую очередь, на достижение заданных параметров точности и стабильности преобразования. Такое управление может быть осуществлено различными путями: воздействием тепловых, электрических, магнитных и акустических полей, изменением угла падения излучения и др. [2].

### Математическая модель МОС

Для построения математической модели МОС введем следующие обозначения:  $\Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi)$ ,  $S^*(\lambda, t, \tau, U_S)$  – абсолютные спектральные характеристики излучения ИИ, пропускания ОС и чувствительности ПИ,  $U_\phi, U_T, U_S$  – управляющие сигналы ИИ, ОС и ПИ,  $\Phi_n^{*i}(\lambda, t, \tau)$ ,  $T_n^{*j}(\lambda, t, \tau)$ ,  $S_n^{*k}(\lambda, t, \tau)$  – абсолютные спектральные характеристики пропускания  $i, j, k$ -го МТП, нанесенных на поверхности ИИ, ОС и ПИ соответственно. Тогда для последовательно соединенных элементов с МТП спектральный состав излучения  $I^*(\lambda, t, \tau)$ , падающего на фоточувствительную площадку ПИ, определяется из выражения

$$I^*(\lambda, t, \tau) = \{\Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi) \cdot \prod_{i \in I} \Phi_n^{*i}(\lambda, t, \tau)\} \times \{T^*(\lambda, t, \tau, U_T) \cdot \prod_{j \in J} T_n^{*j}(\lambda, t, \tau)\} \times \{S^*(\lambda, t, \tau, U_S) \cdot \prod_{k \in K} S_n^{*k}(\lambda, t, \tau)\} \quad (1)$$

где  $I, J, K$  – множество индексов компонент МТП, нанесенных на ИИ, элементы ОС и ПИ соответственно.

В большинстве случаев с достаточной степенью точности и независимо от физической природы процессов, происходящих в МОС, их абсолютные спектральные характеристики можно аппроксимировать различными функциями вида

$$\begin{aligned} \hat{O}^*(\lambda, t, \tau, U_\phi) &= \hat{O}_i(t, \tau, U_\phi) \cdot \hat{O}[\lambda - \lambda_\phi(t, \tau)], \\ T^*(\lambda, t, \tau, U_T) &= T_i(t, \tau, U_T) \cdot T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)], \\ S^*(\lambda, t, \tau, U_S) &= S_i(t, \tau, U_S) \cdot S[\lambda - \lambda_S(t)], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Phi[\lambda - \lambda_\phi(t, \tau)]$ ,  $T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)]$ ,  $S[\lambda - \lambda_S(t, \tau)]$  – относительные спектральные характеристики ИИ, ОС и ПИ соответственно;  $\Phi_m(t, \tau, U_\phi)$ ,  $T_m(t, \tau, U_T)$ ,  $S_m(t, \tau, U_S)$  – температурно-временные зависимости изменения максимумов их абсолютных спектральных характеристик;  $\lambda_\phi(t, \tau)$ ,  $\lambda_T(t, \tau)$ ,  $\lambda_S(t, \tau)$  – температурно-временные зависимости длин волн максимумов соответствующих спектральных характеристик. С учетом (2) спектральные характеристики элементов МОС имеют вид  $T^*(\lambda, t, \tau, U_T)$ ,

$$\begin{aligned} \hat{O}^*(\lambda, t, \tau, U_\phi, U_{n\phi}^i, U_{n\phi}^j) &= \hat{O}_i(t, \tau, U_\phi) \cdot \hat{O}[\lambda - \lambda_\phi(t, \tau)] \times \\ &\times \prod_{i \in I} \hat{O}_{i_i}^i(t, \tau, U_{n\phi}^i) \cdot \hat{O}_i[\lambda - \lambda_{\phi_i}^i(t, \tau, U_{n\phi}^i)]; \\ T^*(\lambda, t, \tau, U_T, U_{nT}^j, U_{nT}^k) &= T_i(t, \tau, U_T) \cdot T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)] \times \\ &\times \prod_{i \in J} \hat{O}_{i_i}^j(t, \tau, U_{nT}^j) \cdot \hat{O}_i[\lambda - \lambda_{T_i}^j(t, \tau, U_{nT}^j)]; \\ S^*(\lambda, t, \tau, U_S, U_{nS}^k, U_{nS}^l) &= S_i(t, \tau, U_S) \cdot S[\lambda - \lambda_S(t)] \times \\ &\times \prod_{k \in K} S_{i_i}^k(t, \tau, U_{nS}^k) \cdot S_i[\lambda - \lambda_{S_i}^k(t, \tau, U_{nS}^k)]. \end{aligned}$$

где  $U_{n\phi}^i, U_{nT}^j, U_{nS}^k$  – управляющие воздействия на максимумы пропускания соответствующих МТП,  $U_{n\phi}^i, U_{nT}^j, U_{nS}^k$  – управляющие воздействия на сдвиг спектральных характеристик МТП.

Так как в общем случае для МОС наблюдается координатная зависимость спектральных характеристик по поверхности элементов, то их абсолютные спектральные характеристики запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \Phi^{**}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_\phi^{**}) &= \Phi^*(\lambda, t, \tau, U_\phi, U_{n\phi}^i, U_{n\phi}^j) \cdot \\ &\cdot G_\phi(x, y, z); \\ T^{**}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_T^{**}) &= T^*(\lambda, t, \tau, U_T, U_{nT}^j, U_{nT}^k) \cdot \\ &\cdot G_T(x, y, z); \\ S^{**}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_S^{**}) &= S^*(\lambda, t, \tau, U_S, U_{nS}^k, U_{nS}^l) \cdot \\ &\cdot G_S(x, y, z), \end{aligned}$$

где  $G_\phi(x, y, z)$ ,  $G_T(x, y, z)$ ,  $G_S(x, y, z)$  – весовые функции, учитывающие координатную зависимость соответствующих спектральных характеристик ИИ, ОС, ПИ соответственно, а  $U_\phi^{**}, U_T^{**}, U_S^{**}$  – множество управляющих воздействий элементы МОС. Тогда с учетом выражения для освещенности [2] чувствительной площадки  $P_{II}$  ПИ от смещенного относительно него на величину  $x_0, y_0$  ИИ с излучающей площадкой  $P_{II}$ , получим обобщенное выражение для величины выходного сигнала ПИ в виде:

$$J(t, \tau, U_\phi, U_T, U_S, U_{n\phi}^i, U_{nT}^j, U_{nS}^k, U_{n\phi}^i, U_{nT}^j, U_{nS}^k) = \int_{\lambda_{II}}^{\lambda_B} \int_{P_{II}} \int_{P_{II}} \frac{\Phi^{**}(x_0, y_0, z_0, \lambda, t, \tau, U_\phi^{**}) \cdot T^{**}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_T^{**}) \cdot S^{**}(x, y, z, \lambda, t, \tau, U_S^{**})}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]} \cdot dx dy dz \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет учесть как вли-

яние информационных и управляющих воздействий на элементы МОС, так и влияние внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ).

В табл. 1 с позиций теории чувствительности приведены выражения для определения чувствительность МОС  $\alpha_j = \Delta J / J$  к изменению управляющих сигналов и ВДФ.

В таблице приняты следующие условные обозначения:

$$\alpha_{\Phi M}^{\tau} = \frac{1}{\Phi_M(t, \tau, U_{\Phi})} \frac{\partial \Phi_M(t, \tau, U_{\Phi})}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{S M}^{\tau} = \frac{1}{S_M(t, \tau, U_S)} \frac{\partial S_M(t, \tau, U_S)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{T M}^{\tau} = \frac{1}{T_M(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_M(t, \tau, U_T)}{\partial \tau} \text{ – инерционность ИИ, ОС, ПИ;}$$

$$\alpha_{\Phi M n}^{i\tau} = \frac{1}{\Phi_{Mn}^i(t, \tau, U_{\Phi})} \frac{\partial \Phi_{Mn}^i(t, \tau, U_{\Phi})}{\partial \tau}, \quad \alpha_{S M n}^{k\tau} = \frac{1}{S_{Mn}^k(t, \tau, U_T)} \frac{\partial S_{Mn}^k(t, \tau, U_T)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{T M n}^{j\tau} = \frac{1}{T_{Mn}^j(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_{Mn}^j(t, \tau, U_T)}{\partial \tau} \text{ – инерционность ИИ, ОС, ПИ по цепи управления МТП;}$$

$$\alpha_{\Phi M}^i = \frac{1}{\Phi_M(t, \tau, U_{\Phi})} \frac{\partial \Phi_M(t, \tau, U_{\Phi})}{\partial t}, \quad \alpha_{T M}^j = \frac{1}{T_M(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_M(t, \tau, U_T)}{\partial t},$$

$$\frac{1}{S_M(t, \tau, U_S)} \frac{\partial S_M(t, \tau, U_S)}{\partial t} \text{ – температурная чувствительность ИИ, ОС, ПИ;}$$

$$\alpha_{\Phi M n}^{ij} = \frac{1}{\Phi_{Mn}^j(t, \tau, U_{\Phi})} \frac{\partial \Phi_{Mn}^j(t, \tau, U_{\Phi})}{\partial t}, \quad \alpha_{T M}^{ij} = \frac{1}{T_{Mn}^j(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_{Mn}^j(t, \tau, U_T)}{\partial t},$$

$$\alpha_{S M}^{k\tau} = \frac{1}{S_{Mn}^k(t, \tau, U_T)} \frac{\partial S_{Mn}^k(t, \tau, U_T)}{\partial t} \text{ – температурная чувствительность ИИ, ОС, ПИ по цепи МТП;}$$

$$\alpha_{\lambda \Phi}^{\tau} = \frac{1}{\lambda_{\Phi}(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_{\Phi}(t, \tau)}{\partial \tau}, \quad \alpha_{\lambda T}^{\tau} = \frac{1}{\lambda_T(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_T(t, \tau)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{\lambda S}^{\tau} = \frac{1}{\lambda_S(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_S(t, \tau)}{\partial \tau} \text{ – инерционность изменения длин волн максимумов спектральных характеристик ИИ, ОС, ПИ;}$$

$$A^* = \Phi[\lambda - \lambda_{\Phi}(t, \tau)] \cdot \prod_{i \in I} \Phi_n^i[\lambda - \lambda_{\Phi n}^i(t, \tau, U_{n\lambda\Phi}^i)] \cdot T[\lambda - \lambda_T(t, \tau)].$$

$$\prod_{i \in J} T_n^j[\lambda - \lambda_{Tn}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)] \cdot S[\lambda - \lambda_S(t)] \cdot \prod_{k \in K} S_n^k[\lambda - \lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)] d\lambda$$

$$A = \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A_1 d\lambda \quad ; \quad \alpha_{\lambda \Phi n}^{i\tau} = \frac{1}{\lambda_{\Phi n}^i(t, \tau, U_{n\lambda\Phi}^i)} \frac{\partial \lambda_{\Phi n}^i(t, \tau, U_{n\lambda\Phi}^i)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{\lambda T n}^{i\tau} = \frac{1}{\lambda_{Tn}^i(t, \tau, U_{n\lambda T}^i)} \frac{\partial \lambda_{Tn}^i(t, \tau, U_{n\lambda T}^i)}{\partial \tau},$$

$$\alpha_{\lambda S n}^{k\tau} = \frac{1}{\lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)} \frac{\partial \lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)}{\partial \tau} \text{ – инерционность изменения длин волн максимумов спектральных характеристик МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ;}$$

$$\alpha_{\lambda \Phi}^i = \frac{1}{\lambda_{\Phi}(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_{\Phi}(t, \tau)}{\partial t}, \quad \alpha_{\lambda T}^j = \frac{1}{\lambda_T(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_T(t, \tau)}{\partial t},$$

$$\alpha_{\lambda S}^i = \frac{1}{\lambda_S(t, \tau)} \frac{\partial \lambda_S(t, \tau)}{\partial t} \text{ – температурные коэффициенты изменения длин волн максимумов спектральных характеристик ИИ, ОС, ПИ;}$$

$$\alpha_{\lambda \Phi n}^{ij} = \frac{1}{\lambda_{\Phi n}^j(t, \tau, U_{n\lambda\Phi}^j)} \frac{\partial \lambda_{\Phi n}^j(t, \tau, U_{n\lambda\Phi}^j)}{\partial t},$$

$$\alpha_{\lambda T n}^{ij} = \frac{1}{\lambda_{Tn}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)} \frac{\partial \lambda_{Tn}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)}{\partial t},$$

$$\alpha_{\lambda S n}^{k\tau} = \frac{1}{\lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)} \frac{\partial \lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)}{\partial t} \text{ – темпера-}$$

турные коэффициенты изменения длин волн максимумов спектральных характеристик МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ;

$$\beta_{\lambda \Phi} = \frac{\partial \Phi[\lambda - \lambda_{\Phi}]}{\partial \lambda_{\Phi}}, \quad \beta_{\lambda T} = \frac{\partial T[\lambda - \lambda_T]}{\partial \lambda_T},$$

$$\beta_{\lambda S} = \frac{\partial S[\lambda - \lambda_S]}{\partial \lambda_S} \text{ – крутизна спектральной}$$

характеристики ИИ, ОС, ПИ;

$$\beta_{\lambda \Phi n}^i = \frac{\partial \Phi_n^i[\lambda - \lambda_{\Phi n}^i]}{\partial \lambda_{\Phi n}^i}, \quad \beta_{\lambda T n}^j = \frac{\partial T_n^j[\lambda - \lambda_{Tn}^j]}{\partial \lambda_{Tn}^j}, \quad \beta_{\lambda S n}^k = \frac{\partial S_n^k[\lambda - \lambda_{Sn}^k]}{\partial \lambda_{Sn}^k} \text{ – крутизна спектральной характеристики МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ;}$$

$$\alpha_{\Phi M}^{U\Phi} = \frac{1}{\Phi_M(t, \tau, U_{\Phi})} \frac{\partial \Phi_M(t, \tau, U_{\Phi})}{\partial U_{\Phi}},$$

$$\alpha_{T M}^{UT} = \frac{1}{T_M(t, \tau, U_T)} \frac{\partial T_M(t, \tau, U_T)}{\partial U_T},$$

$$\alpha_{S M}^{US} = \frac{1}{S_M(t, \tau, U_S)} \frac{\partial S_M(t, \tau, U_S)}{\partial U_S} \text{ – чувствительность максимумов спектральных характеристик ИИ, ОС, ПИ к соответствующим управляющим воздействиям;}$$

$$\alpha_{\Phi M n}^{iU\Phi} = \frac{1}{\Phi_{Mn}^i(t, \tau, U_{\Phi n}^i)} \frac{\partial \Phi_{Mn}^i(t, \tau, U_{\Phi n}^i)}{\partial U_{\Phi n}^i},$$

$$\alpha_{T M n}^{jUT} = \frac{1}{T_{Mn}^j(t, \tau, U_{Tn}^j)} \frac{\partial T_{Mn}^j(t, \tau, U_{Tn}^j)}{\partial U_{Tn}^j},$$

Таблица 1. Чувствительность МОС к управляющим воздействиям и ВДФ

| Воздействие   | Коэффициент чувствительности   |
|---|--|
| Время<br>$\Delta\tau$   | $\alpha_{\Phi M}^{\tau} + \alpha_{SM}^{\tau} + \alpha_{TM}^{\tau} + \sum_i \alpha_{\Phi M n}^{i\tau} + \sum_j \alpha_{TM n}^{j\tau} + \sum_k \alpha_{SM n}^{k\tau} + \frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A^* [\lambda_{\Phi} \beta_{\lambda\Phi} \alpha_{\lambda\Phi}^{\tau} + \lambda_S \beta_{\lambda S} \alpha_{\lambda S}^{\tau} + \lambda_T \beta_{\lambda T} \alpha_{\lambda T}^{\tau} +$<br>$+ \sum_{i \in I} \lambda_{\Phi n}^i \beta_{\lambda\Phi n}^i \alpha_{\lambda\Phi n}^{i\tau} + \sum_{j \in J} \lambda_{Tn}^j \beta_{\lambda T n}^j \alpha_{\lambda T n}^{j\tau} + \sum_{k \in K} \lambda_{Sn}^k \beta_{\lambda S n}^k \alpha_{\lambda S n}^{k\tau}] d\lambda$ |
| Температура<br>$\Delta t$   | $\alpha_{\Phi M}^t + \alpha_{SM}^t + \alpha_{TM}^t + \sum_i \alpha_{\Phi M n}^{it} + \sum_j \alpha_{TM n}^{jt} + \sum_k \alpha_{SM n}^{kt} + \frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A^* [\lambda_{\Phi} \beta_{\lambda\Phi} \alpha_{\lambda\Phi}^t + \lambda_S \beta_{\lambda S} \alpha_{\lambda S}^t + \lambda_T \beta_{\lambda T} \alpha_{\lambda T}^t +$<br>$+ \sum_{i \in I} \lambda_{\Phi n}^i \beta_{\lambda\Phi n}^i \alpha_{\lambda\Phi n}^{it} + \sum_{j \in J} \lambda_{Tn}^j \beta_{\lambda T n}^j \alpha_{\lambda T n}^{jt} + \sum_{k \in K} \lambda_{Sn}^k \beta_{\lambda S n}^k \alpha_{\lambda S n}^{kt}] d\lambda$   |
| Интенсивность излучения ИИ<br>$\Delta U_{\Phi}, \Delta U_{n\Phi}^i$     | $\alpha_{\Phi M}^{U\Phi} \Delta U_{\Phi} + \sum_i \alpha_{\Phi M n}^{iU\Phi} \Delta U_{n\Phi}^i$   |
| Пропускание ОС $\Delta U_T, \Delta U_{nT}^j$                            | $\alpha_{TM}^{UT} \Delta U_T + \sum_j \alpha_{TM n}^{jUT} \Delta U_{nT}^j$   |
| Чувствительность ПИ<br>$\Delta U_S, \Delta U_S^k$                       | $\alpha_{SM}^{US} \Delta U_S + \sum_k \alpha_{SM n}^{kUS} \Delta U_{nS}^k$   |
| Сдвиг спектральной характеристики МТП ИИ<br>$\Delta U_{n\lambda\Phi}^i$ | $\frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A_1 [\sum_{i \in I} \lambda_{\Phi n}^i \beta_{\lambda\Phi n}^i \alpha_{\lambda\Phi n}^{iU\lambda} \Delta U_{n\lambda\Phi}^i] d\lambda$   |
| Сдвиг спектральной характеристики МТП ОС $\Delta U_{n\lambda T}^j$      | $\frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A_1 [\sum_{j \in J} \lambda_{Tn}^j \beta_{\lambda T n}^j \alpha_{\lambda T n}^{jU\lambda} \Delta U_{n\lambda T}^j] d\lambda$   |
| Сдвиг спектральной характеристики МТП ПИ<br>$\Delta U_{n\lambda S}^k$   | $\frac{1}{A} \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} A_1 [\sum_{k \in K} \lambda_{Sn}^k \beta_{\lambda S n}^k \alpha_{\lambda S n}^{kU\lambda} \Delta U_{n\lambda S}^k] d\lambda$   |

$$\alpha_{SMM}^{kUS} = \frac{1}{S_{Mn}(t, \tau, U_{Sn}^k)} \frac{\partial S_{Mn}^k(t, \tau, U_{Sn}^k)}{\partial U_{Sn}^k} - \text{чувстви-}$$

тельность максимумов спектральных характеристик МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ к соответствующим управляющим воздействиям;

$$\alpha_{\lambda\Phi n}^{jU\lambda} = \frac{1}{\lambda_{\Phi n}^j(t, \tau, U_{n\lambda\Phi}^j)} \frac{\partial \lambda_{\Phi n}^j(t, \tau, U_{n\lambda\Phi}^j)}{\partial U_{n\lambda\Phi}^j},$$

$$\alpha_{\lambda T n}^{jU\lambda} = \frac{1}{\lambda_{Tn}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)} \frac{\partial \lambda_{Tn}^j(t, \tau, U_{n\lambda T}^j)}{\partial U_{n\lambda T}^j},$$

$$\alpha_{\lambda S n}^{kU\lambda} = \frac{1}{\lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)} \frac{\partial \lambda_{Sn}^k(t, \tau, U_{n\lambda S}^k)}{\partial U_{n\lambda S}^k} - \text{чувстви-}$$

тельность изменения длин волн максимумов спектральных характеристик МТП соответственно ИИ, ОС, ПИ к соответствующим управляющим воздействиям.

Как видно из (3) и табл. 1 выходной сигнал ПИ определяется величиной излучаемого ИИ светового потока, спектральными характеристиками МОЭ и взаимодействием этих спектральных характеристик. Причем, этим взаимодействием можно управлять как

путем изменения соответствующих управляющих воздействий, так и изменением крутизны и взаимного расположения спектральных характеристик элементов. Указанные свойства оптических фильтров позволяют создавать различные типы сенсоров с высокими метрологическими и эксплуатационными показателями.

### ОПП с интерполяцией периода шкалы

На рис. 2 показана упрощенная структурная схема оптомеханического сенсора двухотсчетного цифрового ОПП, в котором модулирующая шкала выполнена из окон прозрачности шириной  $a_0/2$ , где  $a_0$  – период следования окон. Каждое окно представляет собой конструкцию из двух светофильтров (СФ1 и СФ2) с длиной волны  $l_1$  и  $l_2$  и полосами пропускания  $Dl_1$  и  $Dl_2$  соответственно.

Пространственно-спектральное разделение окна предназначено для определения направления перемещения шкалы и устранения неоднозначности кода перемещения в пределах периода  $a_0$ . Световой поток  $\Phi_0$  в диапа-

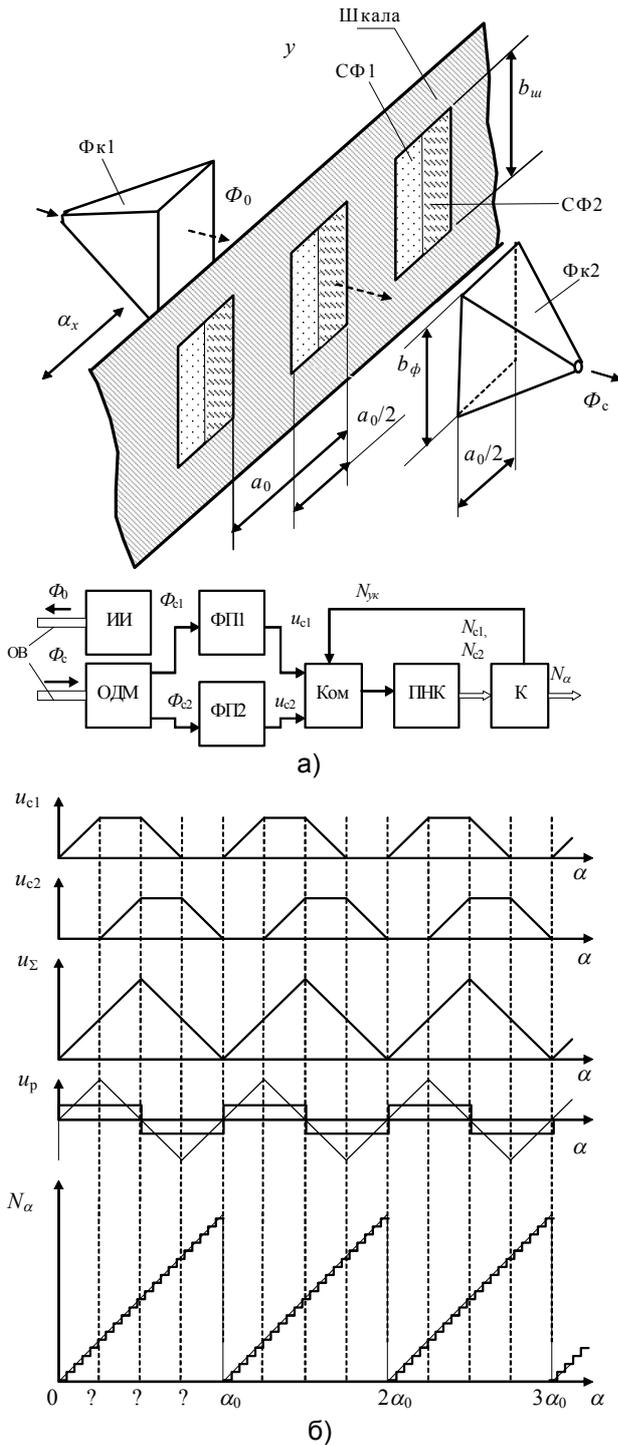


Рис. 2. Структурная схема (а) и эпюры сигналов (б) цифрового ОПП с модулирующими светофильтрами

зоне  $\Delta\lambda \in \Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$  от источника излучения (ИИ) через оптическое волокно (ОВ) направляется на фоклин Фк1, выполняющий функцию диафрагмы, в котором формируется облучающее световое пятно площадью  $S_0 = a_0 b_0 / 2 \geq a_0 b_\phi / 2$ , где  $b_\phi$  – высота широкого торца фоклина,  $b_{ш}$  – высота окон шкалы ( $b_\phi \leq b_{ш}$ ).

В процессе перемещения шкалы в пределах  $[i\alpha_0, (i+1)\alpha_0]$ , где  $i=1, 2, \dots$  – номер

окна на выходе фоклина Фк2, выполняющего функции считывающего элемента (СчЭ), формируется оптический сигнал

$$\hat{O}_i = \hat{O}_0 [\hat{E}_{1\alpha} \tau(\lambda_1) + \hat{E}_{2\alpha} \tau(\lambda_2)],$$

где  $t_1(l), t_2(l)$  – спектральные характеристики пропускания СФ1 и СФ2 соответственно;  $\hat{E}_{1\alpha}, \hat{E}_{2\alpha}$  – функции модуляции светового потока, определяемые текущим значением перемещения  $a$  и чертежами СФ.

Если граница раздела СФ проводится через центр окна параллельно боковым границам (см. рис. 2,а), а геометрические размеры широких торцов Фк1 и Фк2 идентичны ( $\alpha_i = \alpha_{\bar{i}} = \alpha_0 / 2$ ), то

$$K_{1\alpha} = \begin{cases} \frac{\alpha}{\alpha_0}, & 0 \leq \alpha < \frac{\alpha_0}{4} \\ \frac{1}{2}, & \frac{\alpha_0}{4} \leq \alpha < \frac{\alpha_0}{2} \\ 2 \frac{\left(\frac{3\alpha_0}{4} - \alpha\right)}{\alpha_0}, & \frac{\alpha_0}{2} \leq \alpha < \frac{3\alpha_0}{4} \\ 0, & \frac{3\alpha_0}{4} \leq \alpha < \alpha_0 \end{cases}$$

$$K_{2\alpha} = \begin{cases} 0, & 0 \leq \alpha < \frac{\alpha_0}{4} \\ \frac{\alpha - \frac{\alpha_0}{4}}{\alpha_0}, & \frac{\alpha_0}{4} \leq \alpha < \frac{\alpha_0}{2} \\ \frac{1}{2}, & \frac{\alpha_0}{2} \leq \alpha < \frac{3\alpha_0}{4} \\ 2 \frac{(\alpha_0 - \alpha)}{\alpha_0}, & \frac{3\alpha_0}{4} \leq \alpha < \alpha_0 \end{cases}$$

С выхода оптического демультиплексора (ОДМ) на фотоприемники ФП1 и ФП2 подаются два оптических сигнала  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Выходы ФП через коммутатор (Ком) подключены к преобразователю напряжения в код (ПНК), соединенного с информационным входом контроллера (К). Алгоритм работы контроллера иллюстрируется эпюрами сигналов (рис. 1,б), из которых видно, что из суммарного сигнала  $u_c$  формируется неоднозначный код перемещения, а из разностного  $u_p$  – код определения направления перемещения.

Недостатком таких преобразователей

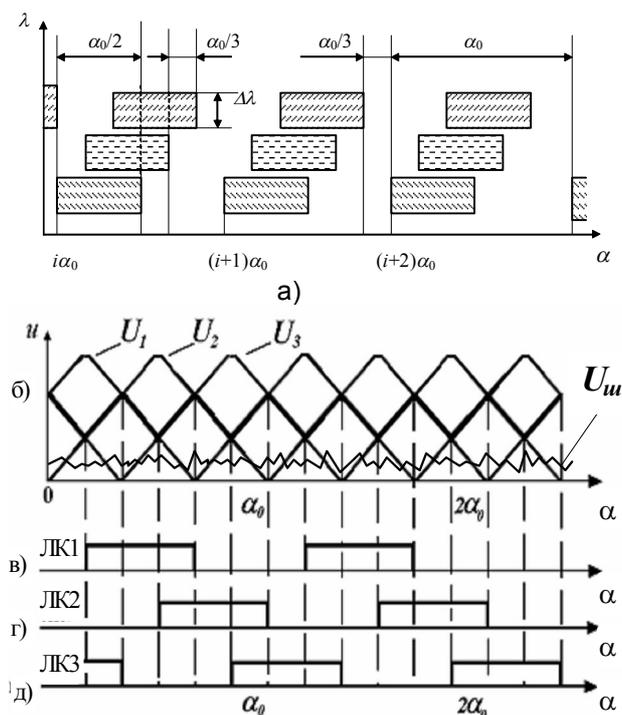


Рис. 3. ОПП с высоким отношением  $U_c/U_u$ : а) - структурная схема; (б-д) - эпюры сигналов

является низкая точность преобразования вследствие уменьшения отношения сигнал/шум в точках, кратных  $\alpha_0 + \alpha_0 / N_{TO\max}$ , где  $N_{TO\max} = 2^{n_{то}}$  – максимальное значение интерполирующего кода точного отсчета.

Вариант шкалы с высоким отношением  $U_c/U_u$  в интерполируемых квантах показан на рис. 3. Каждый квант периодом  $a_0$  состоит из трех СФ, шириной  $\alpha_0 / 2$  и смещенных на величину  $\alpha_0 / 3$ .

Выходы ОДМ через соответствующие фотоприемники ФП1 – ФП3 подключены к трем подключенным к контроллеру логическим компараторам (ЛК1-ЛК3) и управляемый коммутатор. На вход ЛК1 поступают сигналы с ФП1 и ФП2 ( $u_1$  и  $u_2$ ), на вход ЛК2 – с ФП2 и ФП3 ( $u_2$  и  $u_3$ ), на вход ЛК3 – с ФП3и ФП1 ( $u_1$  и  $u_3$ ). Код управления, формируемый из выходных сигналов ЛК, определяет

Таблица 2. Алгоритм работы схемы выбора линейных участков

| № комб. | Соотношения вых. сигналов ЛК | Сост. вых. ЛК |   |   | Сигн. на вх. ПНК |
|---------|------------------------------|---------------|---|---|------------------|
|         |                              | 1             | 2 | 3 |                  |
| 1       | $u_2 > u_1, u_3 > u_1$       | 0             | 0 | 1 | $u_2$            |
| 2       | $u_2 > u_3, u_1 > u_3$       | 0             | 1 | 0 | $u_1$            |
| 3       | $u_2 > u_3, u_3 > u_1$       | 0             | 1 | 1 | $u_3$            |
| 4       | $u_2 < u_3, u_1 > u_2$       | 1             | 0 | 0 | $u_3$            |
| 5       | $u_2 < u_1, u_3 > u_1$       | 1             | 0 | 1 | $u_1$            |
| 6       | $u_2 > u_3, u_1 > u_2$       | 1             | 1 | 0 | $u_2$            |

порядок прохождения сигналов с ФП1-ФП3 на вход ПНК.

В табл. 2 показан алгоритм работы логической схемы ОПП, позволяющий получить на входе ПНК сигнал треугольной формы с периодом  $a_0 / 3$ , свободный от плоских и зашумленных участков (рис. 3,б). Сущность логического управления заключается в инвертировании знака приращения при переходе с линейно возрастающего на линейно спадающий участок сигнала  $u(x)$  (рис.3,в-д). В результате на выходе контроллера формируется код, пропорциональный перемещению во всем диапазоне преобразования.

Информационная емкость и быстродействие преобразователя определяются параметрами реверсивного счетчика. Современные счетчики позволяют находиться в рамках заданной динамической погрешности при информационной емкости  $n=16$  бит, диапазоне перемещения  $L=100$  мм и скорости перемещения  $da/dt=15...50$  м/с. Полная автокоррекция погрешности разметки шкалы при этом будет обеспечена до величины

$$|\Delta a_{1,2\max}| \leq \frac{a_0}{6}.$$

Если чувствительность ПНК ,

$$n_{\text{ПНК}} = \log_2 \left( \frac{U_o}{\Delta U_{MP}} \right) = 8, \text{ то количество}$$

квантов равно  $N = 2^n - 2^{n_{\text{пнк}}} = 256$ . Допустимая погрешность разметки  $|\Delta a_{1,2\max}| = 65$  мкм.

С целью повышения энергетических параметров интерполяционных сигналов, определяемых шириной спектра, применяется нониусная шкала из широкополосных СФ (ШСФ) с высокой точностью нанесения границ. На рис. 4 показан чертеж фрагмента шкалы, которая выполнена из периодически нанесенных групп из  $N=8$  ШСФ с взаимно смещенными на величину  $(j-1)Dl_n$  полосами пропускания ( $j = 1, N$ ). Ширина каждого фильтра равна ширине СчЭ  $\alpha_\delta = \alpha_n = \alpha_0 / 2$ . Фильтры смещены вдоль шкалы на величину  $Da = a_0 / N$ . Перемещение шкалы на величину  $jDa$  приводит к изменению спектра суммарного сигнала на входе ОДМ, соответствующему одной из  $M=11$  комбинаций, представленных в табл. 3.

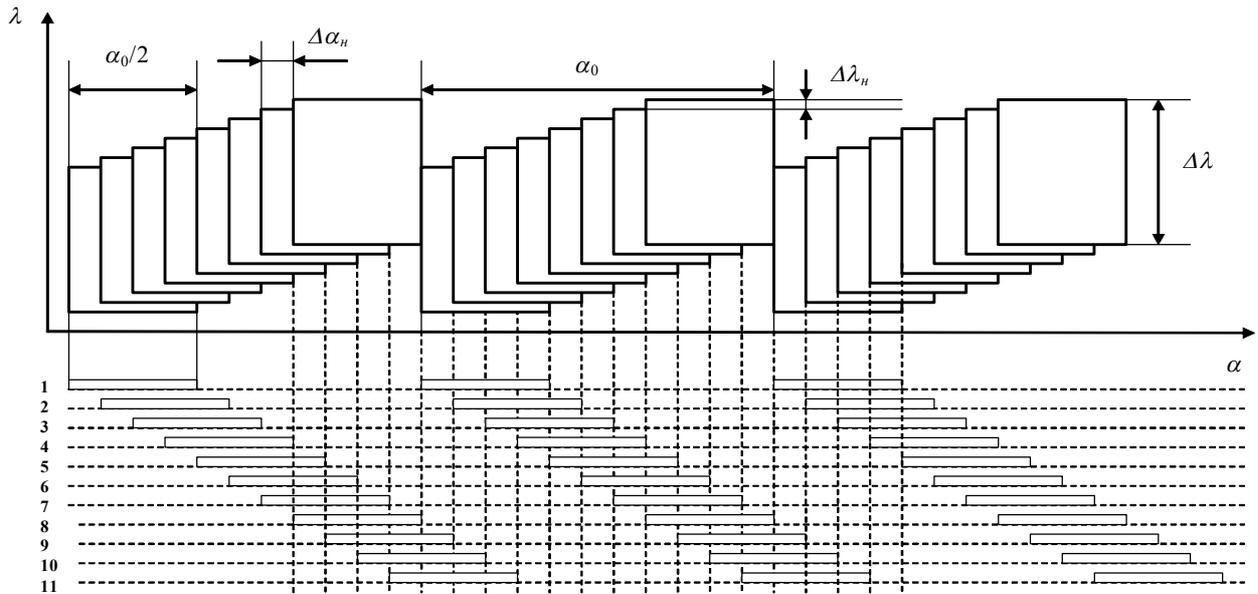


Рис. 4. Формирование рисунка кодовой шкалы из  $N=8$  светофильтров на периоде  $a_0$

Достоинством такого алгоритма является однозначность интерполяционного единичного позиционного кода (ЕПК).

Для преобразования выходных ЕПК в двоичный код более удобно формировать число градаций  $M = 2^{n\alpha}$  путем изменения числа  $N$  и уплотнения межгруппового расстояния на величину  $kDa_n$ . При этом необходимо выполнение условия сохранения минимума энергии сигнала

В ряде работ предложены различные эффективные чертежи шкал с применением светофильтров и схем расстановки СчЭ со спектроформирующими покрытиями, в которых корректируются погрешности, связанные с переходом между 0 и  $N_{max}$ , перекосом линии считывания, дифракцией и рассеянием светового потока [1-3, 6-9].

Структурная схема ОПП со спектрально-модовым кодированием перемещения

представлена на рис. 5 [6]. При установке СФ 4 за шкалой 3 параллельно ее поверхности лучи от осветителя 1, проходящие через диафрагму 2, попадают на поверхность СФ 4 расходящимся пучком, который воспринимается фоклином 5. Часть лучей угловой апертуры пучка заключается в диапазоне углов  $D\beta = \beta_{max} - \beta_{min}$ , границы которых, для согласования с ОДМ определяются в соответствии с выражениями

$$\begin{cases} \beta_{max} = \arccos \frac{\lambda_{max}}{\lambda_0} = \arctg \frac{2d}{a_0 + b} \\ \beta_{min} = \arccos \frac{\lambda_{min}}{\lambda_0} = \arctg \frac{2d}{b} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{max}$ ,  $\lambda_{min}$  – максимальная и минимальная длины волн рабочего диапазона ОДМ;  $d$  – расстояние между плоскостью отверстия диафрагмы 2 и поверхностью КШ 3 со стороны

Таблица 3. Формирование ЕПК

| № поз. (ЕПК) | Номера центральных длин волн засвеченных СФ |   |   |   |
|--------------|---|---|---|---|
|              | 1   | 2 | 3 | 4 |
| 1            | 1   | 2 | 3 | 4 |
| 2            | 2   | 3 | 4 | 5 |
| 3            | 3   | 4 | 5 | 6 |
| 4            | 4   | 5 | 6 | 7 |
| 5            | 5   | 6 | 7 | 8 |
| 6            | 6   | 7 | 8 | - |
| 7            | 7   | 8 | - | - |
| 8            | 8   | - | - | - |
| 9            | 8   | 1 | - | - |
| 10           | 8   | 1 | 2 | - |
| 11           | 8   | 1 | 2 | 3 |

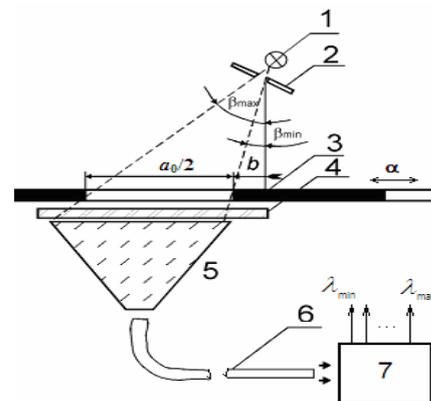


Рис. 5. Структурная схема сенсора ОПП со спектральным кодированием перемещения

УИС 4;  $a_0$  – период КШ 3;  $b$  – расстояние от нормали, восстановленной из отверстия диафрагмы к поверхности УИС 4 до участка УИС 4, пропускающего излучение с длиной волны  $l_{\min}$ .

Согласование производится варьированием  $l_{\max}, l_{\min}, d, b$  с учетом фазового поперечного сдвига  $Dx$  падающего светового луча (рис. 5, 6), ограниченного диапазоном  $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}$ .

Световой луч точечного источника описывается уравнением падающей волны

$$A(r) = A_0 \exp\left[-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right], \quad (3)$$

где  $r^2 = u^2 + v^2$ ;  $u, v, w$  – приведенные декартовы координаты.

На основании анализа Фурье такой луч можно представить в виде суммы плоских волн

$$A(r) = \int \int A(k_u, k_v) e^{-ikr} dk_u dk_v, \quad (4)$$

где  $|k|^2 = k_u^2 + k_v^2 + k_w^2$ ;  $k_u, k_v, k_w$  – компоненты волнового вектора в декартовой системе координат.

Компоненты  $k_u$  и  $k_w$  плоской волны, движущейся под углом  $Db$  к направлению падения луча, связаны между собой соотношением  $\Delta\beta = k_u / k_w$ .

Фаза отраженной компоненты плоской волны, для которой  $k_u \ll k_w$ , сдвигается на величину

$$\Psi_{\Delta\beta} = \Psi_0 + \frac{\partial\Psi}{\partial\beta}(\Delta\beta_{\max}).$$

Отсюда с учетом (4) следует, что отраженный луч сдвинут в поперечном направ-

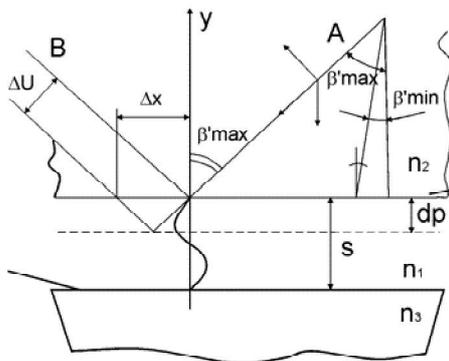


Рис. 6. Формирование поперечного фазового сдвига светового луча

лении на величину  $\Delta u = \frac{1}{k_w} \frac{\partial\Psi}{\partial\beta_{\max}}$ .

Глубина проникновения световой волны из среды с показателем преломления  $n_1^o$  в среду с показателем преломления  $n_2^o$  равна

$$dp = \frac{\cos\beta_{\max}}{2\text{tg}\beta_{\max}} \frac{1}{n_1 k_0} \frac{\partial\Psi}{\partial\beta_{\max}}, \quad (5)$$

а фазовый сдвиг

$$\Delta\Psi = 2dptg\beta_{\max}. \quad (6)$$

Производная фазы светового луча по параметру максимального значения угла падения светового луча равна

$$\frac{\partial\Psi}{\partial\beta_{\max}} = \left(\frac{k_{u_1}^2}{k_{u_1}^2 + k_{u_2}^2}\right) \frac{\partial}{\partial\beta_{\max}} \left(\frac{k_{u_2}}{k_{u_1}}\right), \quad (7)$$

где  $k_{u_1}^2 = (n_1^o)^2 k_0^2 (1 - \sin^2\beta_{\max})$ , (8)

$$k_{u_2}^2 = k_0^2 \left( (n_1^o)^2 \sin^2\beta_{\max} - (n_2^o)^2 \right). \quad (9)$$

Подставляя выражения (8) и (9) в (7) и (6), получим

$$\Delta\Psi = \frac{2}{k_{u_2}} \text{tg}\beta_{\max}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что для согласования фазовых фронтов волн во всех точках вдоль границы раздела сред необходимо варьировать значениями  $b_{\min}$  и  $b_{\max}$ . Световой пучок испытывает полное отражение от поверхности раздела  $n_2^o - n_1^o$ , что приводит к установлению моды стоячей волны в интерференционном светофильтре. Эта мода является стационарной в направлении оси  $u$ , но движется в направлении оси  $x$  с фазовой постоянной  $k_m$ . В фоклине может существовать несколько мод с фазовыми постоянными ( $k_m = 1, 2, 3, \dots$ ). Эти моды имеют экспоненциально убывающие “хвосты”, частично заходящие на поверхность раздела  $n_1^o - n_3^o$ . Зазор  $S$  между фоклином и СФ выбирается в районе 100 нм из расчета перекрытия “хвостов” мод фоклина, с учетом согласования фазовых фронтов волн  $DY$  таким образом, чтобы  $k = k_m$ , что удовлетворяет условию когерентной перекачки сдвинут в поперечном направлении на энергии моды СФ в моду  $m$ -го порядка фоклина. Позиционный спектр мод передается фоклином через волоконно-оптическую линию связи в ОДМ.

Если приравнять число мод, возбуждаемых в фоклине в пределах  $a/2$ , к числу  $N$ , то шаг  $Da$  интерполяции определяется выражением

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_0 d_1 \lambda_0 \cos \beta}{4d_2 \sqrt{(n_1'')^2 - (n_3'')^2}}, \quad (11)$$

где  $d_1, d_2$  - ширина входного и выходного торцов фоклина соответственно;  $\frac{d_2}{d_1} \sqrt{(n_1'')^2 - (n_3'')^2}$  - числовая апертура фоклина.

### ОПП абсолютного считывания с однородной цифровой шкалой

Применение структурированной по цифровому закону комбинации из светофильтров

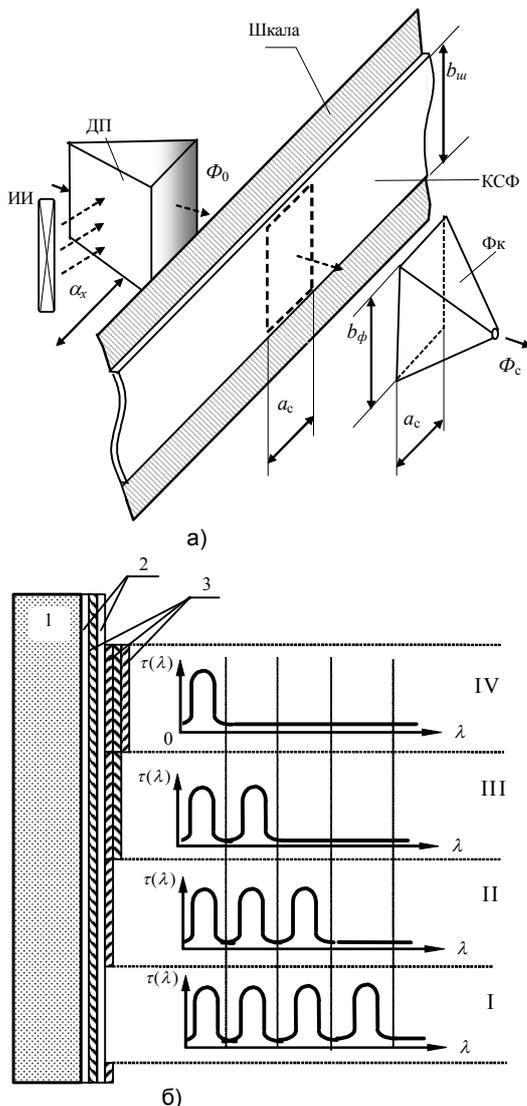


Рис. 7. ОПП с ЦШ на комбинированном узкополосном светофильтре: а - структурная схема; б - принцип нанесения комбинированного светофильтра

позволяет значительно сократить величину рабочей зоны  $b_w$  цифровой шкалы ЦШ (рис. 7, а).

Световой поток от источника излучения ИИ проходит через дисперсионную призму ДП, шкалу с нанесенным на нее комбинированным светофильтром КСФ и фо克林 Фк, сопряженный со световодом - к ОДМ в составе электронного блока. КСФ (рис. 6,б) представляет собой многорезонансную узкополосную интерференционную систему, состоящую из нанесенных на прозрачное основание 1 зеркальных четвертьволновых 2 и резонансной полуволновой 3 пленок, формирующих опорный слой кодовой дорожки. Порядок интерференции  $m$  выбирается так, чтобы в полосе чувствительности СчЭ укладывалось число  $n$  полос прозрачности интерференционной системы, соответствующее числу разрядов выбранного кода преобразования. На участки  $1, 2, 3, \dots, 2^n$  кодовой дорожки с периодом  $a_i = Q/2^i$  наносятся дополнительные четвертьволновые зеркальные составляющие 2 шириной  $a_i/2$ .

Эти составляющие вырезают из основных полос пропускания  $l_{m1}, l_{m2}, \dots, l_{mn}$  соответствующие каждой разрядной дорожке полосы  $Dl_{m1}, Dl_{m2}, \dots, Dl_{mn}$ . Такое расположение зеркальных составляющих позволяет осуществить спектральное кодирование светового потока, связанное с перемещением  $a_x$  ЦШ. Например, для трехразрядного цифрового ОПП в полосе чувствительности ОДМ должны находиться три полосы пропускания интерференционной системы: основная  $Dl_{m1}$  и две дополнительные  $Dl_{m2}$  и  $Dl_{m3}$  (на рис. 6,б участки I-IV). На опорный слой кодовой дорожки с указанными полосами пропускания наносятся три дополнительных заграждающих четвертьволновых слоя. Первый слой, не пропускающий излучение с длиной волны  $l_{m1}$ , наносится с периодом  $a_1$ . На него с периодом  $a_2 = 2a_1$  наносится слой, не пропускающий излучение с длиной волны  $l_{m2}$ , и далее сверху с периодом  $a_3 = 4a_1$  наносится слой, не пропускающий излучение с длиной волны  $l_{m3}$ .

Соответствие между выходным кодом датчика и параметрами интерференционной системы приведено в табл. 4.

Последовательное нанесение УИС друг на друга в геометрических пределах одной дорожки ЦШ позволяет достичь  $n$ -кратного

Таблица 4. Формирование кодовых комбинаций

| Номера разрядов выходного кода перемещения |   |   | Наличие заграждающих четвертьволновых систем |                |                | Спектральный состав излучения на выходе КШ |                |                |
|--|---|---|--|----------------|----------------|--|----------------|----------------|
| 1  | 2 | 3 | $\lambda_{m1}$                               | $\lambda_{m2}$ | $\lambda_{m3}$ | $\lambda_{m1}$                             | $\lambda_{m2}$ | $\lambda_{m3}$ |
| 0  | 0 | 0 | -  | -              | -              | +  | +              | +              |
| 0  | 0 | 1 | +  | -              | -              | -  | +              | +              |
| 0  | 1 | 0 | -  | +              | -              | +  | -              | +              |
| 0  | 1 | 1 | +  | +              | -              | -  | -              | +              |
| 1  | 0 | 0 | -  | -              | +              | +  | +              | -              |
| 1  | 0 | 1 | +  | -              | +              | -  | +              | -              |
| 1  | 1 | 0 | -  | +              | +              | +  | -              | -              |
| 1  | 1 | 1 | +  | +              | +              | -  | -              | -              |

сокращения рабочей зоны  $b_y$ . Допустимая величина радиального перекося ЦШ при  $b_y=20$  мм,  $a_1=0,184$  мм равна  $Dj_{lmax}=1,05^\circ$ , а при  $b_y=1$  мм  $Dj_{lmax}=15,05^\circ$ . Вся информация из сенсора передается в ЭБ по единственному световоду без перекрестных помех между разрядными каналами.

**Заключение**

Спектральное кодирование перемещения с помощью спектроформирующих элементов (СФЭ) значительно снижает требования к точности расположения СчЭ относительно шкалы. В результате снижаются трудозатраты на изготовление сенсоров и упрощается конструкция кодирующих узлов. Погрешность преобразования определяется подбором СФЭ, рабочая длина волны которых может выдерживаться с точностью до нанометра. Создается возможность для применения различных методов мультиплексирования информационных каналов, существенно сокращающих количество волоконно-оптических линий связи.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Леонович Г.И.* Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений для жестких условий эксплуатации. Самара: СГАУ, 1998.
2. *Матюнин С.А.* Многокомпонентные оптонные структуры. Самара: Самарский научный центр РАН, 2001.
3. *Гречишников В.М., Конюхов Н.Е.* Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений со встроенными волоконно-оптическими линиями связи. М.: Энергоатомиздат, 1992.
4. *Демьяненко П.А, Зиньковский Ю.Ф., Прокофьев М.И.* Измерительные преобразователи на основе волоконно-оптических датчиков. - [www.fotonexpress.ru](http://www.fotonexpress.ru)
5. *Леонович Г.И., Матюнин С.А.* Использование метода спектрального кодирования в датчиках линейных и угловых перемещений // Микросистемная техника. 2001. №12.
6. А.с. 1259486 СССР Н 03М1/24 Преобразователь перемещения в код / *Леонович Г.И., Данилов А.В, Матюнин С.А.*, №3709301 // Открытия. Изобретения. 1986, БИ 32.

**SPECTRUM AND SPECTRUM-MODE SIGNAL CODING IN OPTOELECRONIC DISPLACEMENT TRANSDUCERS WITH OPTTICAL FIBER COMMUNICATION LINES**

© 2007 G.I. Leonovich<sup>1</sup>, S.A. Matunin<sup>2</sup>, P. L. Tokmak<sup>2</sup>, E.S. Luganskij<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara Science Centre of Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup> Samara State Aerospace University

Described basic parameters of elements controlled by spectrum, which are part of the optoelectronic displacement transducers (OETD) with data acquisition from sensors using optical fiber communication lines. Offered different variants of structure charts of OETD with spectrum and spectrum-mode displacement coding.