

УДК 621.3.08

А.А. ШМАТКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ПРИЕМНИКАМИ

*Впервые решена задача синтеза алгоритмов оптимального оценивания параметров шероховатых поверхностей в системах с многоэлементными оптическими приемниками. Синтезирован алгоритм оптимальной обработки оптических сигналов (спекл-изображений), разработана структурная схема оптимального измерителя среднеквадратической высоты и радиуса корреляции неровностей шероховатой поверхности, исследованы предельные погрешности оценок параметров шероховатых поверхностей по информационным матрицам Фишера, а также диапазоны углов визирования на основе анализа матриц обратных к информационным матрицам Фишера.*

**Ключевые слова:** *параметры шероховатой поверхности, лазерное излучение, спекл-изображение, оптимальная обработка, многоэлементный оптический приемник.*

### Введение

При решении задач контроля параметров шероховатых поверхностей (ШП), в машиностроении, в процессе производства деталей, готовых изделий на разных этапах технологического процесса обработки и т.д. в значительной мере применяются контактные или громоздкие (непортативные) оптические измерители, разработанные на основе эвристических подходов [1]. При этом вопросы оптимальной обработки сигналов в бесконтактных измерителях параметров ШП и соответственно их потенциальных возможностях в литературе не исследованы. Разработка и исследование алгоритмов, которые могут быть реализованы в компактных бесконтактных измерителях за счет использования свойств лазерного излучения, является актуальной задачей, решаемой в работе. В отличие от работы [2], в которой синтезированы и исследованы оптимальные алгоритмы оценки параметров ШП одноэлементными оптическими приемниками, получены оптимальные решения для многоэлементных оптических приемников. Исследуются предельные погрешности оценок параметров ШП, а также диапазоны углов визирования на основе матриц обратных к информационным матрицам Фишера [3].

### 1. Постановка оптимизационной задачи. Уравнение наблюдения

По результатам регистрации многоэлементными оптическими приемниками (МОП) отраженного шероховатой поверхностью когерентного излучения (спекл-изображения) при условии, что угловые раз-

меры МОП очень малы и его поверхность регистрирует большое число спеклов, необходимо синтезировать алгоритмы оценок неизвестных параметров ШП: радиуса корреляции  $L_h$  и среднеквадратических высот отклонения неровностей ШП  $\sigma_h$ . На основе полученных алгоритмов необходимо составить структурную схему устройства оптимального оценивания и определить его потенциальные точностные характеристики.

Уравнение наблюдения запишем в виде

$$u_{ik}(t) = s_{ik}(t) + n_{ik}(t), \quad (1)$$

помеха  $n_{ik}(t)$  типа белого шума. Индексы  $i = \overline{1, N}$ , соответствующие независимым сигналам, регистрируемым элементами матричного оптического приемника в его  $k$ -ом угловом положении относительно исследуемой шероховатой поверхности,  $k = \overline{1, 2}$  – индексы, соответствуют угловым положениям МОП.

Схема соответствующая математическим моделям уравнений наблюдения приведена на рис. 1.

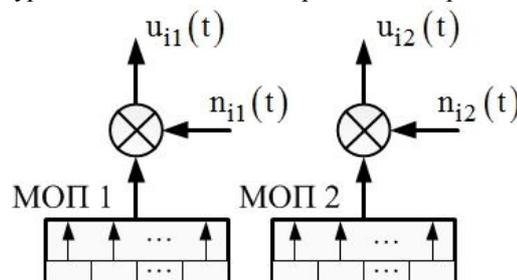


Рис. 1. Схема соответствующая уравнениям наблюдения

Полезный сигнал в зоне Фраунгофера в заданном угловом положении на каждом элементе МОП имеет вид

$$\dot{s}_{ik}(t, \bar{\vartheta}) = \exp\{j\omega t\} \times \int_D \dot{F}_{ik}(\bar{r}) \Lambda[t - t_{\zeta}(\bar{r})] \exp\{jk\bar{r}\bar{\vartheta}_{ik}\} d\bar{r}. \quad (2)$$

Процессы  $u_{i1}(t)$  и  $u_{i2}(t)$  считаем гауссовыми и статистически независимыми. Полагаем также, что выполняется следующее условие:

$$\sigma^0(\bar{\vartheta}_{ik}, \bar{\lambda}) \approx \sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}), \quad (3)$$

где  $\sigma^0$  – эффективное сечение рассеяния и в очень малых угловых размерах МОП от индекса  $i$  практически не зависит.

## 2. Решение оптимизационной задачи

Совместный условный функционал плотности вероятности запишем так [2]:

$$P[\bar{u}(t)/\bar{\lambda}] = \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^N P[u_{ik}(t)/\bar{\lambda}]. \quad (4)$$

Составим уравнение правдоподобия для наблюдений (1)

$$\frac{\partial \ln(P[\bar{u}(t)/\bar{\lambda}])}{\partial \lambda_{\mu}} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \left\{ \int_{T_{ik}} \int_{T_{ik}} \frac{\partial R_{uik}(t_1, t_2, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_{\mu}} \times W_{uik}(t_1, t_2, \bar{\lambda}) dt_1 dt_2 + \int_{T_{ik}} \int_{T_{ik}} \frac{\partial W_{uik}(t_1, t_2, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_{\mu}} \times u_{ik}(t_1) u_{ik}(t_2) dt_1 dt_2 \right\} = 0, \quad (5)$$

где  $W_{ik}(t_1, t_2, \bar{\lambda})$  – функция, обратная корреляционной, которая определяется из уравнения обращения такого вида

$$\int_{T_{ik}} R_{uik}(t_1, t_2, \bar{\lambda}) W_{uik}(t_2, t_3, \bar{\lambda}) dt_2 = \delta(t_1 - t_3). \quad (6)$$

Корреляционная функция (КФ) процесса (1) имеет вид

$$R_{uik}(t_1, t_2, \bar{\lambda}) = R_{sik}(t_1, t_2, \bar{\lambda}) + R_{nik}(t_1, t_2),$$

где

$$R_{uik}(t_1, t_2, \bar{\vartheta}, 0) = \sigma^0(\bar{\vartheta}_{ik}) R_S(t_1 - t_2), \\ R_{nik}(t_1, t_2) = N_{nik} 0,5 \delta(t_1 - t_2),$$

$$R_S(t_1 - t_2) \approx 0,5 \cos(t_1 - t_2) \times \int_D \Lambda[t_1 - t_3(\bar{r})] \Lambda[t_2 - t_3(\bar{r})] d\bar{r}. \quad (7)$$

Длительность во времени функции  $\Lambda(t)$  соответствует длительностям излучаемых лазером цугов волн и примерно равна длительности функции временной когерентности лазерного излучения

$$\int_D \Lambda[t_1 - t_{\zeta}(\bar{r})] \Lambda[t_2 - t_{\zeta}(\bar{r})] d\bar{r}. \quad (8)$$

В соответствии с теоремой Хинчина-Винера находим энергетический спектр в виде

$$G_{uik}(f, \bar{\lambda}) = F\{R_{uik}(t_1, t_2, \bar{\lambda})\} = \sigma^0(\bar{\vartheta}_{ik}, \bar{\lambda}) G_{\Lambda}(f) + N_{nik} 0,5, \quad (9)$$

где

$$G_{\Lambda}(f) = F\{R_S(t_1 - t_2)\}, \quad (10)$$

$F\{\cdot\}$  – оператор прямого преобразования Фурье.

Уравнение правдоподобия (5) в спектральной области получим в виде

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \left\{ T_{ik} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial \lambda_{\mu}} [\ln G_{uik}(f, \bar{\lambda})] df - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial \lambda_{\mu}} [\ln G_{uik}(f, \bar{\lambda})] \times G_{uik}^{-1}(f, \bar{\lambda}) |\dot{S}_{T_{ik}}(j2\pi f)|^2 df \right\} = 0, \quad (11)$$

где

$$\dot{S}_{T_{ik}}(j2\pi f) = \int_{T_{ik}} u_{ik}(t) \exp\{-j2\pi f t\} dt.$$

Для оценки неизвестных параметров  $\bar{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2)$ , необходимо решить систему уравнений (11). При обработке принимаемых колебаний основной операцией является формирование периодограммы  $|\dot{S}_{T_{ik\Sigma}}(j2\pi f)|^2$  с последующим весовым усреднением. Практически это реализуется посредством спектрального анализа усечённого колебания  $u_{ik\Sigma}(t)$  с последующим квадратичным детектированием и весовым суммированием. Однако в оптическом диапазоне непосредственно эту операцию выполнить невозможно. Проведя более тщательное исследование структуры этого выражения, рассмотрим другие варианты практической реализации этого алгоритма. Проведём подстановку в полученное уравнение выражения для энергетического спектра (10).

Учитывая, что

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_{\mu}} [\ln G_{uik}(f, \bar{\lambda})] =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\partial}{\partial \lambda_\mu} G_{\text{uik}}(f_1, \bar{\lambda}) G_{\text{uik}}^{-1}(f_2, \bar{\lambda}) = \\
 &= \frac{\partial \sigma^0(\bar{\vartheta}_{\text{ik}}, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_\mu} \cdot \frac{G_\Lambda(f)}{\sigma^0(\bar{\vartheta}_{\text{ik}}, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}}, \quad (12) \\
 &\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \frac{\partial \sigma^0(\bar{\vartheta}_{\text{ik}}, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_\mu} \times \\
 &\times \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\Lambda(f)}{\sigma^0(\bar{\vartheta}_{\text{ik}}, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}} df - \right. \\
 &- \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\Lambda(f)}{[\sigma^0(\bar{\vartheta}_{\text{ik}}, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}]^2} \times \\
 &\left. \times \frac{|\dot{S}_{\text{Tik}}(j2\pi f)|^2}{T} df \right\} = 0. \quad (13)
 \end{aligned}$$

или в матричной форме

$$\underline{\sigma}' \bar{X} = 0, \quad (14)$$

где

$$\underline{\sigma}' = \|\sigma'_{\text{ik}\mu}\| = \left\| \frac{\partial \sigma^0(\bar{\vartheta}_{\text{ik}}, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_\mu} \right\|, \quad \bar{X} = \{ \cdot \}.$$

Матрица  $\underline{\sigma}'$  – характеристика поверхности, для различных поверхностей различна и в общем случае не равна нулевой матрице. Тогда считаем, что  $\bar{X} = 0$ , т.е.

$$\begin{aligned}
 &\int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\Lambda(f)}{\sigma^0(\bar{\vartheta}_{\text{ik}}, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}} df = \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\Lambda(f)}{[\sigma^0(\bar{\vartheta}_{\text{ik}}, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}]^2} \times \\
 &\times \frac{|\dot{S}_{\text{Tik}}(j2\pi f)|^2}{T} df. \quad (15)
 \end{aligned}$$

С учётом (1) выражение (18) примет вид

$$\begin{aligned}
 &\sum_{k=1}^K \frac{\partial \sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_\mu} \times \\
 &\times \sum_{i=1}^N \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\Lambda(f)}{\sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}} df - \right. \\
 &- \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\Lambda(f)}{[\sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}]^2} \times
 \end{aligned}$$

$$\left. \times \frac{|\dot{S}_{\text{Tik}}(j2\pi f)|^2}{T} df \right\} = 0.$$

Учитывая (14) и (20) получим

$$\begin{aligned}
 &\sum_{i=1}^N \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\Lambda(f)}{\sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}} df - \right. \\
 &- \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\Lambda(f)}{[\sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}]^2} \times \\
 &\left. \times \frac{|\dot{S}_{\text{Tik}}(j2\pi f)|^2}{T} df \right\} = 0.
 \end{aligned}$$

Отметим, что в случае статистического усреднения правой части выражения (15) при  $T \rightarrow \pm\infty$ , уравнение превращается в тождество.

Рассмотрим

$$\begin{aligned}
 &\lim_{T \rightarrow \pm\infty} \left\langle |\dot{S}_{\text{Tik}}(j2\pi f)|^2 \right\rangle = \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \int_{-\frac{T}{2}}^{\infty} \langle u_{\text{ik}}(t_1) u_{\text{ik}}(t_2) \rangle \times \\
 &\times \exp\{j2\pi f(t_1 - t_2)\} dt_1 dt_2 = \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} T \int_{-\infty}^{\infty} R_{\text{uik}}(\tau) \exp\{j2\pi f\tau\} d\tau = \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} T G_{\text{uik}}(f, \bar{\lambda}). \quad (16)
 \end{aligned}$$

В результате для решения уравнения (14) необходимо сформировать в каждом канале приема  $u_{\text{ik}}(t, \bar{t}'_{\text{ik}})$  периодограмму  $|\dot{S}_{\text{Tik}}(j2\pi f)|^2$ , осуществить её весовое интегрирование по частотам и приравнять к левой части уравнения, в которую должны входить известные зависимости от искомым параметров  $\bar{\lambda}$ . Данные зависимости определяются с помощью электродинамических моделей теплового излучения различными поверхностями или из обучающих экспериментов.

Представим правую часть уравнения (15) в таком виде

$$\begin{aligned}
 &\int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_\Lambda(f)}{[\sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}) G_\Lambda(f) + 0,5N_{0\text{ik}}]^2} \times \\
 &\times \frac{|\dot{S}_{\text{Tik}}(j2\pi f)|^2}{T} df =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \left| \dot{K}_{\hat{a}}(j2\pi f) \right|^2 \frac{\left| \dot{S}_{T_{ik}}(j2\pi f) \right|^2}{T} df = \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\left| \dot{S}_{\hat{a}T_{ik}}(j2\pi f) \right|^2}{T} df, \quad (17)
 \end{aligned}$$

а уравнение (15) так

$$\begin{aligned}
 &\int_{-\infty}^{\infty} \left| \dot{K}_{\hat{a}}(j2\pi f) \right|^2 \times \\
 &\times \left[ \sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}) G_{\Lambda}(f) + 0,5N_{0ik} \right] df = \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \left| \dot{K}_{\hat{a}}(j2\pi f) \right|^2 \frac{\left| \dot{S}_{T_{ik}}(j2\pi f) \right|^2}{T} df, \quad (18)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 &\frac{G_{\Lambda}(f)}{\left[ \sigma^0(\vartheta_k, \bar{\lambda}) G_{\Lambda}(f) + 0,5N_{0ik} \right]^2} = \\
 &= \left| \dot{K}_{\hat{a}}(j2\pi f) \right|^2 = \left| \dot{K}_{\hat{a}}(j2\pi f) \dot{K}_{\hat{a}}^*(j2\pi f) \right|. \quad (19)
 \end{aligned}$$

Выражение (19) – квадрат модуля передаточной характеристики фильтра, осуществляющего во времени декорреляцию принятых колебаний и согласованную фильтрацию, требующих в итоге некоторого расширения спектра принятого сигнала. Данный набор операций в оптическом диапазоне на сегодняшний день реализовать практически невозможно. Если отказаться от применения такого фильтра, полагая, что

$$\sigma^0(\vartheta_k, \bar{\lambda}) G_{\Lambda}(f) \gg 0,5N_{0ik},$$

энергетическое отношение сигнал/шум

$$\mu = \frac{2\sigma^0(\vartheta_k, \bar{\lambda}) G_{\Lambda}(f)}{N_{0ik}} \gg 1,$$

получим следующее уравнение для оценок параметров  $\bar{\lambda}$  в виде

$$\begin{aligned}
 &\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}) G_{\Lambda}(f) df = \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\left| \dot{S}_{T_{ik}}(j2\pi f) \right|^2}{T} df. \quad (20)
 \end{aligned}$$

Воспользовавшись теоремой Парсеваля-Лапласа, перепишем правую часть (20) в виде

$$\begin{aligned}
 &\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\left| \dot{S}_{T_{ik}}(j2\pi f) \right|^2}{T_k} df \approx \\
 &\approx \frac{1}{T_k} \int_0^T u_{ik}^2(t) dt = P_{cpi}(\bar{\vartheta}_k), \quad (21)
 \end{aligned}$$

где  $P_{cpi}(\bar{\vartheta}_k)$  – оценка средней мощности оптических колебаний, принятых из направления  $\bar{\vartheta}_k$  одним элементом МОП.

Окончательно выражение (20) сведем к виду

$$\sigma^0(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda}) = \frac{P_{cpi}(\bar{\vartheta}_k)}{P_{\Lambda}}, \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned}
 P_{cpi}(\bar{\vartheta}_k) &= \sum_{i=1}^N P_{cpi}(\bar{\vartheta}_k), \\
 P_{cpi}(\bar{\vartheta}_k) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\left| \dot{S}_{T_{ik}}(j2\pi f) \right|^2}{T_k} df \approx \\
 &\approx \frac{1}{T_k} \int_0^T u_{ik}^2(t) dt, \\
 P_{\Lambda} &= N \int_{-\infty}^{\infty} G_{\Lambda}(f) df.
 \end{aligned}$$

Мощность  $P_{cpi}(\bar{\vartheta}_k)$ , в отличие от полученной в [2], равна сумме выходных мощностей  $P_{cpi}(\bar{\vartheta}_k)$  МОП по всем выходам. Схема оптимального измерителя эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) ШП многоэлементными приемниками показана на рис. 2.

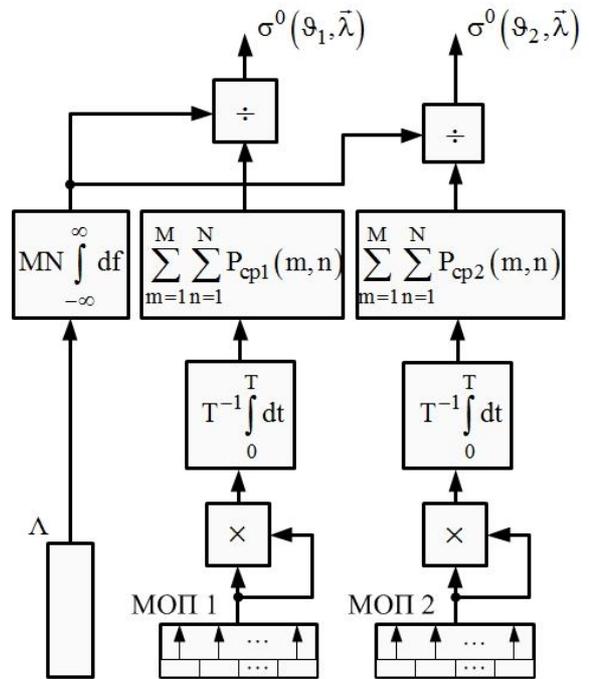


Рис. 2. Структурная схема оптимального измерителя ЭПР ШП многоэлементными оптическими приемниками

### 3. Расчёт предельных погрешностей измеряемых параметров

Предельные погрешности измерений параметров  $\bar{\lambda}$  определим из обращения информационной матрицы Фишера [2], элементы которой имеют вид

$$\Phi_{\mu\nu} = \frac{1}{2} T \Delta f \times \sum_{k=1}^K \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_\mu} \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_\nu} \quad (23)$$

Для оценки двух неизвестных параметров матрица Фишера имеет вид

$$\Phi = \frac{1}{2} T \Delta f \times \left\| \begin{array}{cc} \sum_{k=1}^2 \left( \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_1} \right)^2 & \sum_{k=1}^2 \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_1} \times \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_2} \\ \sum_{k=1}^2 \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_1} \times \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_2} & \sum_{k=1}^2 \left( \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_k, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_2} \right)^2 \end{array} \right\| \quad (24)$$

Предельные дисперсии ошибок измерения параметров  $\lambda_1, \lambda_2$  получим из матрицы обращением матрицы (24)

$$\sigma_{\lambda_1(2)}^2 = \frac{2}{T \Delta f} \times \frac{\left( \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_{2(1)}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_{2(1)}} \right)^2}{\left( \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_1} \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_2} - \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_1} \frac{\partial \ln \sigma^o(\bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_2} \right)^2} \quad (25)$$

### 4. Оптимальное оценивание параметров мелкомасштабной шероховатой поверхности

Запишем ЭПР мелкомасштабной поверхности [3,4]

$$\sigma_n^0 = 4k^4 \pi^{-1} |\dot{M}_n|^2 \cos^2 \theta_i \cos^2 \theta_S W(\bar{q}_\perp), \quad (26)$$

где  $W(\bar{q}_\perp)$  – энергетический спектр,  $\dot{M}_n$  – коэффициенты, зависящие от углов  $\theta_i, \theta_S$  и ди-

электрической проницаемости  $\varepsilon$ .

Энергетический спектр неровностей

$$W(\bar{q}_\perp) = \pi \sigma_h^2 L_h^2 \exp \left\{ -\beta^2 \times \left( \sin^2 \theta_i + \sin^2 \theta_S - 2 \sin \theta_i \sin \theta_S \cos \phi_S \right) \right\}, \quad (27)$$

где

$$\beta = 0,5kL_h.$$

С учётом (27), уравнение (26) примет вид

$$\sigma_n^0 = 4k^4 \pi^{-1} |\dot{M}_n|^2 \zeta \pi \sigma_h^2 L_h^2 \exp \left\{ -\beta^2 \xi \right\}, \quad (28)$$

где

$$\xi = \sin^2 \theta_i + \sin^2 \theta_S - 2 \sin \theta_i \sin \theta_S \cos \phi_S,$$

$$\zeta = \cos^2 \theta_i \cos^2 \theta_S.$$

Запишем уравнение (28) для двух углов регистрации отраженных колебаний

$$\sigma_{n1}^0 = 4k^4 \pi^{-1} |\dot{M}_n|^2 \zeta_1 \pi \sigma_h^2 L_h^2 \exp \left\{ -\beta^2 \xi_1 \right\}, \quad (29)$$

$$\sigma_{n2}^0 = 4k^4 \pi^{-1} |\dot{M}_n|^2 \zeta_2 \pi \sigma_h^2 L_h^2 \exp \left\{ -\beta^2 \xi_2 \right\}. \quad (30)$$

Разделим (29) на (30) и, учитывая (26), получим

$$\frac{\sigma_{n1}^0}{\sigma_{n2}^0} = \frac{P_{cp1}}{P_{cp2}} = \exp \left\{ -\exp \left\{ \ln(0,5kL_h) 2 \right\} (\xi_1 - \xi_2) \right\}, \quad (31)$$

тогда

$$\exp \left\{ \ln(0,5kL_h) 2 \right\} (\xi_1 - \xi_2) = -\ln \frac{P_{cp1}}{P_{cp2}}. \quad (32)$$

Рассчитаем радиус корреляции  $L_h$  и средне-квадратическую высоту неровностей  $\sigma_h$

$$\lambda_1 = L_h = \exp \left\{ \ln \left( -\ln \left( \frac{P_{cp1}}{P_{cp2}} \right) (\xi_1 - \xi_2)^{-1} \right) 0,5 \right\} \times \quad (33)$$

$$\times (0,5k)^{-1},$$

$$\lambda_2 = \sigma_h =$$

$$= \exp \left\{ 0,51n \left( \left( \frac{P_{cp1}}{P_{cp2}} \right)^{-1} \right) \times \quad (34)$$

$$\times \left( 4k^4 \pi^{-1} |\dot{M}_n|^2 \zeta_1 \pi L_h^2 \exp \left\{ -\beta^2 \xi_1 \right\} \right)^{-1} \right\}.$$

Структурная схема оптимального оценивания параметров ШП показана на рис. 3. Схема содержит каналы оценок  $\sigma_h$  и  $L_h$ .

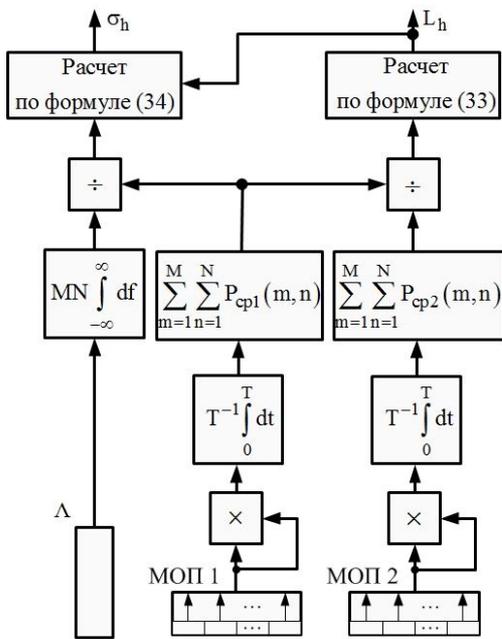


Рис. 3. Структурная схема оптимального измерителя  $\sigma_h$  и  $L_h$  ШП МОП

### 5. Исследование диапазонов углов визирования

На основе анализа матриц обратных к информационным матрицам Фишера исследованы зависимости предельных погрешностей оценок параметров от углов положения излучателя (лазера) и углов расположения МОП. На рис. 4 представлена блок-схема исследуемой установки.

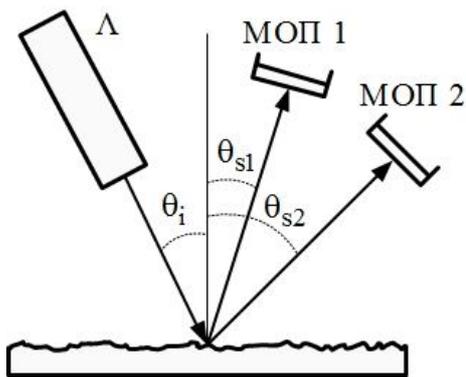


Рис. 4. Блок-схема исследуемой установки

Вначале исследуем зависимость предельных погрешностей оценок параметров от углов визирования (см. (25)). Отмеченная зависимость углового положения излучателя от величин погрешностей показана на рис. 5.

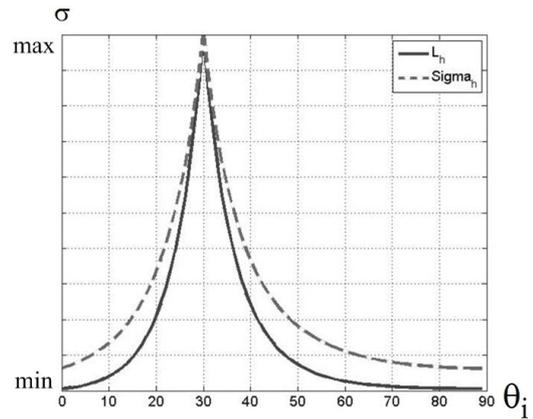


Рис. 5. Величина погрешностей при заданном угловом положении излучателя

С точки зрения простоты технической реализации экспериментальной установки угол положения излучателя целесообразно выбрать равным  $60^\circ$ , для данного угла на рис. 6 (а, б) представлены графики зависимости погрешности измерения неизвестных параметров от углового положения оптических приемников.

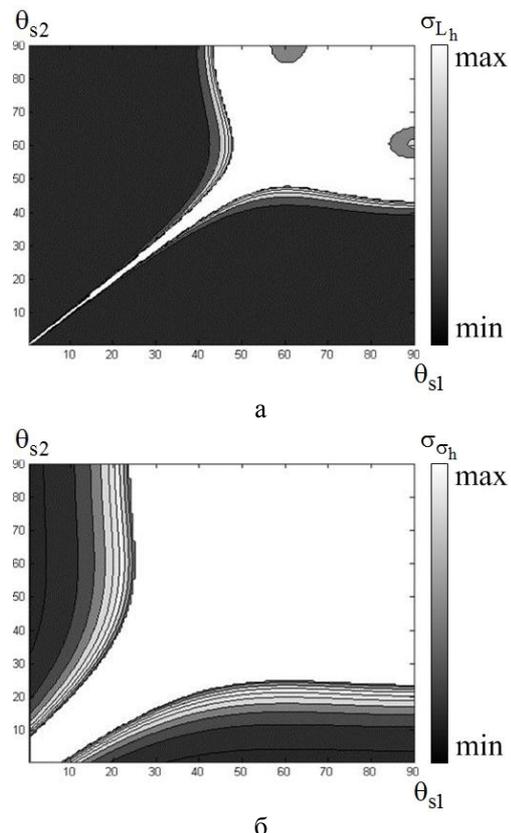


Рис. 6. Зависимости погрешностей от угловых положений МОП:  
а – погрешности определения радиуса корреляции  $L_h$  ;  
б – погрешности определения СКО неровностей ШП  $\sigma_h$

Оптимальные углы расположения МОП необходимо выбрать с учётом минимальных погрешностей совместного определения исследуемых параметров, наложив графики зависимости погрешностей определения первого и второго параметров рис. 6, штриховкой выделены совместные области наименьших погрешностей определения обеих параметров (рис. 7).

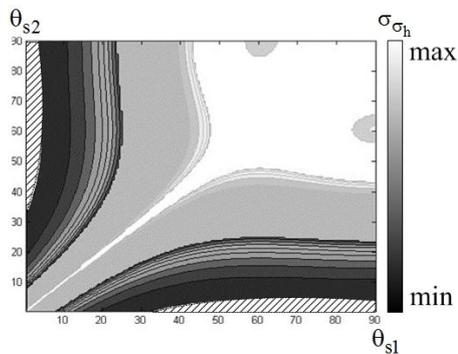


Рис. 7. Оптимальные углы расположения МОП

### Заключение

Впервые решена задача оптимального оценивания параметров ШП многоэлементными оптическими приемниками. Синтезирован алгоритм оптимальной обработки оптических сигналов, разрабо-

тана соответствующая структурная схема, выполнено исследование предельных погрешностей оценок параметров ШП по информационным матрицам Фишера, а также определены оптимальные диапазоны углов визирования.

### Литература

1. Табенкин, А.Н. Шероховатость, волнистость, профиль [Текст] / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2007. – С. 115-133.

2. Шматко, А.А. Оптимизация оценок параметров и статистических характеристик шероховатых поверхностей одноэлементными оптическими приемниками [Текст] / А.А. Шматко, В.К. Волосюк, В.И. Зворский // Физические основы приборостроения. – 2013. – Т. 2, №3. (в печати).

3. Волосюк, В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации [Текст] / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2008. – 704 с.

4. Волосюк, В.К. Статистические методы оценивания параметров электродинамических моделей земной поверхности при дистанционном зондировании [Текст] / В.К. Волосюк. – Харьков: ХАИ, 1991. – С. 10-14.

Поступила в редакцию 02.06.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ ОПТИМАЛЬНИХ ОЦІНОК ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКИХ ПОВЕРХОНЬ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИМИ ОПТИЧНИМИ ПРИЙМАЧАМИ

*О.О. Шматко*

Вперше вирішено задачу синтезу алгоритмів оптимального оцінювання параметрів шорстких поверхонь у системах з багатоелементними оптичними приймачами. Синтезовано алгоритм оптимальної обробки оптичних сигналів (спекл-зображень), розроблено структурну схему оптимального вимірювача середньоквадратичної висоти і радіусу кореляції нерівностей шорсткої поверхні, досліджено граничні похибки оцінок параметрів шорстких поверхонь з інформаційних матриць Фішера, а також діапазони кутів візування на основі аналізу матриць зворотних до інформаційних матриць Фішера.

**Ключові слова:** параметри шорсткої поверхні, лазерне випромінювання, спекл-зображення, оптимальна обробка, багатоелементний оптичний приймач.

### SYNTHESIS ALGORITHM FOR OPTIMAL PARAMETER ESTIMATES OF SURFACE ROUGHNESS OF MULTI-ELEMENT OPTICAL RECEIVERS

*О.О. Shmatko*

First we solve the problem of synthesis of optimal algorithms for estimating the parameters of rough surfaces in systems with multi-element optical receivers. Synthesized optimal algorithm for the processing of optical signals (speckle pattern), developed a block diagram of the optimal measurement standard deviation and correlation length of a rough surface irregularities are investigated limits of error estimates of the parameters of rough surfaces on the Fisher information matrix, as well as ranges of viewing angles on the basis analysis matrix inverse to the information Fisher matrix.

**Key words:** surface roughness, laser, speckle pattern, optimal processing, multi-element optical receiver.

**Шматко Александр Александрович** – аспирант каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: sasha\_10@pochta.ru.