

УДК 681.786.42

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ТРЕХМЕРНОГО СКАНЕРА АКТИВНОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАРМОНИЧЕСКИХ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ**А.А. Бенуни, В.Я. Колочкин**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: benuni_anna@mail.ru

Рассмотрены вопросы оценки качества трехмерных триангуляционных сканеров со структурированной подсветкой, предназначенных для регистрации объемных образов объектов. Предложена методика контроля качества триангуляционных сканеров, основанная на оценке искажений, возникающих при восстановлении отдельных пространственных гармонических составляющих объекта в базе финитных гармонических функций. Проведена апробация этой методики при контроле погрешности восстановления объектов в виде прямоугольников, имеющих разные размеры. Выведены математические соотношения, которые позволяют оценить погрешность восстановления гармонических тест-объектов в триангуляционном сканере с гармонической структурированной подсветкой при реализации алгоритма восстановления на основе метода Фурье-анализа. Справедливость выведенной формулы подтверждена в ходе экспериментов, в процессе которых осуществлялась регистрация и восстановление гармонических тест-объектов при разных пространственных частотах структурированной подсветки. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструктивных параметров приборов и параметров алгоритма при условии минимизации погрешности восстановления формы объектов, имеющих заданную пространственную структуру.

Ключевые слова: трехмерный сканер, структурированная подсветка, контроль, точность, погрешность, тест-объект.

ESTIMATING THE ERROR OF ACTIVE 3D SCANNER BY USING HARMONIC TEST-OBJECTS**A.A. Benuni, V.Ya. Kolyuchkin**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: benuni_anna@mail.ru

The quality of 3D triangulation scanners with a structured light system, which are designed for recording of 3D images of objects estimated. A technique for check of triangulation scanner quality is offered which is based on estimation of distortions arising in reconstruction of individual 3D harmonic constituents of the object decomposition in the basis of finite harmonic functions. An approbation of this technique was conducted during the check of reconstruction of rectangular objects with different sizes. Mathematical relationships are deduced which make it possible to estimate the error of harmonic test-object reconstruction in the triangulation scanner with harmonic structured light system when the reconstruction algorithm based on the Fourier analysis method is implemented. The validity of the derived formula was verified during the experiments, in which the recording and reconstruction of harmonic test-objects were performed at different spatial frequencies of the structured light system. The obtained results can be used for optimizing constructive parameters of instruments and algorithm parameters on condition that the error of shape reconstruction for objects with a specified 3D structure is minimized.

Keywords: 3D scanner, structured light system, check, accuracy, error, test-object.

Основным показателем качества трехмерного сканера является погрешность формы восстановления объекта. Для оценки погрешности подобных сканеров следует использовать тест-объект известной пространственной формы, а погрешность характеризовать значением смещения и СКО характерных точек поверхности тест-объекта от истинных значений. Как показал анализ литературных источников [1, 2], в качестве тест-объектов обычно используют плоскую поверхность. При использовании такого тест-объекта можно оценить пороговую чувствительность аппаратуры, характеризующую отступление формы восстановленного образа от плоскости. Однако по такому тест-объекту нельзя оценить влияние формы поверхности объекта на погрешность сканера.

Поэтому актуальной является разработка методики оценки погрешности трехмерных сканеров, позволяющая учесть особенности рельефа регистрируемых трехмерных объектов. В настоящей статье ставится задача оценки качества трехмерных сканеров на основе триангуляционного метода со структурированной подсветкой в виде гармонического распределения путем оценки искажений формы восстановления образов объектов.

Используя теорему Котельникова для пространственно-частотной области, можно показать, что поверхность любого ограниченного в пространстве объекта можно представить разложением в базисе финитных гармонических функций, а именно

$$z(x, y) = \tilde{z}(0, 0) + 2 \sum_{\substack{n=\infty, m=0 \\ n \neq m=0}}^{\infty} \left| \tilde{z} \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right| \sin \left[2\pi \left(\frac{mx}{l_x} + \frac{ny}{l_y} \right) + \varphi \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right] \text{rect} \left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y} \right), \quad (1)$$

где l_x, l_y — габаритные размеры объекта.

Предположим, что качество восстановленного объемного рельефа объекта можно оценить по значениям искажений восстановления отдельных гармонических составляющих сигнала, представленного формулой (1). Тогда в качестве тест-объектов можно использовать финитные пространственные гармонические решетки, имеющие те же габаритные размеры $l_x \times l_y$ и пространственные частоты m/l_x и n/l_y .

Отметим, что при триангуляционном методе регистрации со структурированной подсветкой искажения восстановленного рельефа зависят от ориентации объекта относительно полос структурированной подсветки. Максимальные искажения будут в направлении, перпендикулярном полосам структурированной подсветки. Поэтому рассмотрим алгоритм обработки сигнала при регистрации тестового объекта

в виде финитной гармонической решетки, расположенной таким образом, что ее штрихи расположены параллельно полосам структурированной подсветки.

Пусть гармоническая решетка расположена перпендикулярно визирующей оси регистрирующей камеры сканера. Для упрощения математической записи рассмотрим одномерное описание тест-объекта в виде соотношения

$$z(y) = \left[z_0 + |\tilde{z}_n| \sin \left(2\pi \frac{n}{l_y} y \right) \right] \text{rect} \left(\frac{y}{l_y} \right), \quad (2)$$

где $z_0 = \tilde{z}_0$ — дальность, определяемая расстоянием от входного зрачка регистрирующей камеры, где принято начало системы координат, до среднего уровня рельефа, совпадающего с опорной плоскостью; $|\tilde{z}_n|$ — высота рельефа тест-объекта, соответствующая амплитуде n -й гармонической составляющей объекта, описываемого формулой (1).

Если на поверхность такого тест-объекта спроецировано гармоническое распределение с пространственной частотой ν_0 , то зарегистрированный приемной камерой сигнал с учетом линейного увеличения будет иметь вид

$$S(y') = A\rho(y') + B\rho(y') \cos \left(2\pi\nu'_0(y' + \Delta'_y(y')) \right), \quad (3)$$

где $\Delta'_y(y')$ — пространственное распределение смещения полос в регистрируемом изображении тест-объекта; $\rho(y')$ — распределение коэффициента отражения поверхности объекта; A, B — коэффициенты, определяющие уровни фонового излучения и сигнальной составляющей.

Согласно [3] распределение смещения полос при регистрации синусоидального тест-объекта, расположенного перпендикулярно оптической оси приемной системы, будет также иметь периодический характер:

$$\Delta'_y(y') \approx \frac{t_y a'_c}{z_0^2} |\tilde{z}_n| \sin \left(2\pi \frac{1}{T'_n} y' \right), \quad (4)$$

где t_y — расстояние между входными зрачками объективов проектора и регистрирующей камеры сканера — линейный параллакс; a'_c — задний отрезок объектива регистрирующей камеры; $T'_n = \frac{l'_y}{n}$ — период штрихов в изображении тест-объекта; l'_y — габаритный размер изображения объекта.

Формула (4) является приближенной, так как в ней не учитываются смещение входных зрачков объективов проектора и регистрирующей камеры по осям X, Z , а также наклон оптической оси проектора к плоскости тест-объекта. Это означает, что при регистрации опорной плоской поверхности, расположенной на расстоянии, равном z_0 , смещение $\Delta'_y(y') = 0$.

Зарегистрированный сигнал от тест-объекта можно записать как

$$S(y') \approx \left(A\rho(y') + B\rho(y') \cos \left(2\pi\nu'_0 y' + \Delta\Phi_n^{\max} \sin \left(2\pi \frac{1}{T'_n} y' \right) \right) \right) \text{rect} \left(\frac{y'}{l_y} \right), \quad (5)$$

где

$$\Delta\Phi_n^{\max} = 2\pi\nu'_0 \frac{t_y a'_c}{z_0^2} |\tilde{z}_n| \quad (6)$$

— максимальное смещение фазы зарегистрированного сигнала.

Распределение фазы в зарегистрированном сигнале имеет вид $\Phi_n(y) = 2\pi\nu'_0 y' + \Delta\Phi_n^{\max} \sin \left(2\pi \frac{1}{T'_n} y' \right)$. Отметим, что при нарушении условия монотонности возрастания фазы зарегистрированного сигнала, которое определим выражением

$$\frac{d\Phi_n(y')}{dy'} = 2\pi\nu'_0 + 2\pi \frac{\Delta\Phi_n^{\max}}{T'_n} \sin \left(2\pi \frac{1}{T'_n} y' \right) > 0,$$

будет наблюдаться раздвоение регистрируемых полос структурированной подсветки. Это может привести к ошибкам при восстановлении рельефа объекта при значениях периодов тестового сигнала

$$T_n > \frac{\Delta\Phi_n^{\max}}{\nu_0} = 2\pi \frac{t_y}{z_0} |\tilde{z}_n|. \quad (7)$$

Алгоритм обработки зарегистрированного изображения описан в работе [3]. В соответствии с этим алгоритмом на первом этапе проводится фильтрация зарегистрированного сигнала в окрестности пространственной частоты ν'_0 в целях устранения влияния фоновой составляющей $A\rho(y')$ и минимизации влияния аддитивного шума приемного тракта регистрации. Вид передаточной функции фильтра $\tilde{H}(\nu'_y)$ следует выбирать с учетом текстуры и информации о рельефе поверхностей регистрируемых объектов. Функцию $\tilde{H}(\nu'_y)$ можно оптимизировать под конкретный объект и параметры системы регистрации.

Вычислив преобразование Фурье от (3), получим спектр зарегистрированного сигнала

$$\begin{aligned} \tilde{S}(\nu'_y) = & A\tilde{\rho}(\nu'_y) \text{sinc}(\pi l'_y \nu'_y) + 0,5 B l'_y \tilde{\rho}(\nu'_y) \times \\ & \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_k(\Delta\Phi_n^{\max}) \text{sinc} \left(\pi l'_y \left(\nu'_y \mp \nu'_0 - \frac{k}{T'_n} \right) \right), \quad (8) \end{aligned}$$

где $I_k(\Delta\Phi_n)$ — функция Бесселя n -го порядка.

После фильтрации сигнал можно представить в виде

$$S_1(y') = 0,5B\rho(y')\text{rect}\left(\frac{y'}{l'_y}\right) \exp(i2\pi\nu'_0 y') \times \\ \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_k(\Delta\Phi_n^{\max})\tilde{H}\left(\nu'_0 + \frac{k}{T'_n}\right) \exp\left(i2\pi\frac{k}{T'_n}y'\right). \quad (9)$$

В соответствии с алгоритмом обработки смещение по фазе зарегистрированного сигнала определяется формулой

$$\Delta\hat{\Phi}_n(y') = \text{Im}(\ln(S_1(y')S_{ref}^*(y'))), \quad (10)$$

по которой с учетом данных предварительной калибровки сканера вычисляются координаты точек объемного рельефа объекта. В формуле (10) использовано обозначение

$$S_{ref}^*(y') = \exp(-i2\pi\nu'_0 y'). \quad (11)$$

Рассмотрим оценку смещения фазы $\Delta\hat{\Phi}_n(y')$ при малых значениях $\Delta\Phi_n^{\max}$, а именно

$$0 \leq \Delta\Phi_n^{\max} < 1 \text{ рад}. \quad (12)$$

В этом случае для $k = \pm 2, \pm 3, \dots, \infty$ значения функций Бесселя $I_k(\Delta\Phi_n^{\max}) \ll I_0(\Delta\Phi_n^{\max})$. Если функция пропускания фильтра удовлетворяет условию $\tilde{H}\left(\nu'_0 - \frac{1}{T'_n}\right) = \tilde{H}\left(\nu'_0 + \frac{1}{T'_n}\right)$, то формулу (10) приближенно можно представить в виде

$$\Delta\hat{\Phi}_n(y') \approx \Delta\Phi_n^{\max} \frac{\tilde{H}\left(\nu'_0 - \frac{1}{T'_n}\right)}{\tilde{H}(\nu'_0)} \sin\left(2\pi\frac{1}{T'_n}y'\right). \quad (13)$$

Выражение (13) получено из выражения (10) с использованием разложения функции логарифма $\ln(1+x)$ и функций Бесселя $I_0(x)$, $I_1(x)$ в ряд Маклорена и ограничением первым членом в разложении.

Тогда координаты точек поверхности объекта могут быть выражены выражением

$$\hat{z}_n(y) \approx \tilde{z}_n \frac{\tilde{H}\left(\nu'_0 - \frac{1}{T'_n}\right)}{\tilde{H}(\nu'_0)} \sin\left(2\pi\frac{1}{T'_n}y'\right). \quad (14)$$

Как следует из (14), амплитуда восстановленного синусоидального сигнала определяется только функцией пропускания фильтра, используемого при предварительной обработке зарегистрированного сигнала. Следовательно, в случае использования полосового фильтра минимальный период синусоиды, которая будет разрешаться с помощью сканера, обратно пропорционален ширине полосы пропускания $\Delta\nu'$ и равен $T_n \approx \frac{z_0}{a'_c} \frac{2}{\Delta\nu'}$.

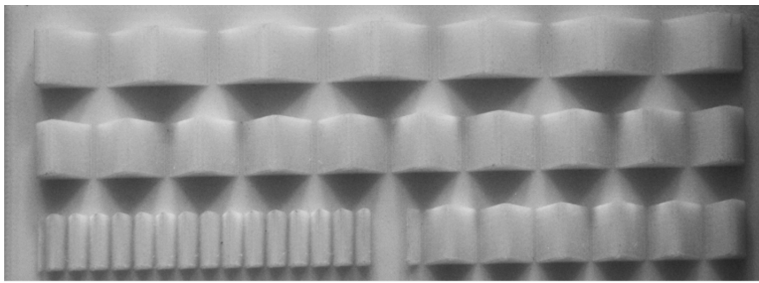


Рис. 1. Набор финитных гармонических тест-объектов

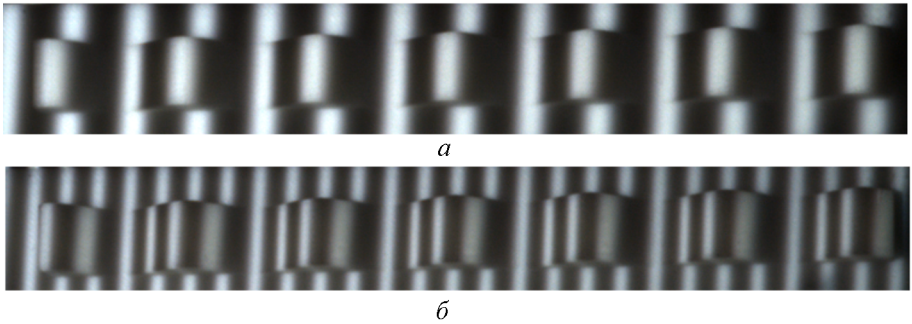


Рис. 2. Фрагменты зарегистрированного сигнала с периодом $T'_n = 220$ пикселей при разных частотах структурированной подсветки: $\nu'_0 = 1/110$ (а) и $1/55$ 1/пиксель (б)

Анализ выражений (9) и (10) показал, что погрешность оценки рельефа по формуле (14) возрастает при увеличении значения $\Delta\Phi_n^{\max}$, определяемого формулой (6).

Для подтверждения справедливости формул (13), (14) были проведены и экспериментальные исследования, в процессе которых выполнялись регистрация и восстановление гармонических тест-объектов. Тест-объекты (рис. 1) были изготовлены с использованием трехмерного принтера и имели диффузно отражающую поверхность.

В ходе эксперимента изменялась частота структурированной подсветки ν_0 для получения сигналов с разным значением $\Delta\Phi_n^{\max}$. На рис. 2 приведены фрагменты зарегистрированного сигнала для гармонической решетки с периодом $T'_n = 220$ пикселей в изображении решетки при частотах подсветки $\nu'_0 = 1/110$ и $\nu'_0 = 1/55$ 1/пиксель.

Таким образом, на один период тест-объекта приходилось в первом случае два, во втором — четыре периода изображения проецируемых синусоидальных полос структурированной подсветки. Значение максимального фазового сдвига $\Delta\Phi_n^{\max}$ оказалось равным 0,9 и 1,8 рад соответственно.

При обработке зарегистрированных изображений использованы полосовые фильтры с передаточной функцией $\tilde{H}'_{1,2}(\nu'_y) = \text{rect}\left(\frac{\nu'_y - \nu'_0}{\Delta\nu'_{1,2}}\right)$

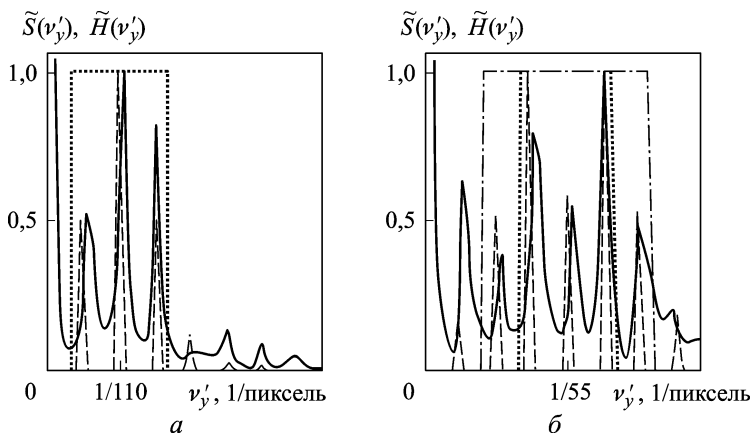


Рис. 3. Спектры сигналов и передаточные функции фильтров при $\nu'_0 = 1/110$ (а) и $1/55$ 1/пиксель (б):

— спектры зарегистрированных сигналов; --- — расчетные зависимости спектров $\tilde{S}(\nu'_y)$; ····· и —·— — передаточные функции фильтров $\tilde{H}_1(\nu'_y)$ и $\tilde{H}_2(\nu'_y)$

с шириной полосы пропускания $\Delta\nu'_1 \approx \frac{2}{T'_n}$ и $\Delta\nu'_2 \approx \frac{4}{T'_n}$. На рис. 3 приведены спектры зарегистрированных сигналов, расчетные зависимости спектров $\tilde{S}(\nu_y)$, полученные по формуле (8), и передаточные функции фильтров.

Различия расчетных и экспериментальных спектров могут быть объяснены погрешностью в определении частоты подсветки ν'_0 .

Как следует из рис. 3 и выражения (8), полосовой фильтр $\tilde{H}_1(\nu'_y)$ пропускает составляющие в спектре зарегистрированного сигнала с номерами $k = 0, \pm 1$. Фильтр с передаточной характеристикой $\tilde{H}_2(\nu'_y)$ пропускает составляющие в спектре зарегистрированного сигнала с номерами $k = 0, \pm 1, \pm 2$.

На рис. 4 представлены теоретические зависимости смещения фазы зарегистрированного сигнала от координаты и расчетные зависимости, полученные при обработке зарегистрированных сигналов в соответствии с алгоритмом (10). Тот факт, что для первой решетки при $\Delta\Phi_n^{\max} = 0,9$ рад эти зависимости близки, подтверждает справедливость формулы (13) для малых значениях $\Delta\Phi_n^{\max}$ в соответствии с (12). Как следует из рис. 3, б и 4, б при увеличении значения $\Delta\Phi_n^{\max}$ увеличивается ширина спектра сигнала и для выбранного фильтра $\tilde{H}_1(\nu'_y)$ возрастает погрешность в оценке фазы сигнала. В восстановленном смещении фазы присутствуют как линейные, так и нелинейные искажения. Линейные искажения восстановленного сигнала можно оценить коэффициентом, определяемым по формуле

$$K_n = \frac{\tilde{z}(1/T_n)}{|\tilde{z}_n|} = \frac{\tilde{\Phi}(1/T_n)}{\Delta\Phi_n^{\max}}. \quad (15)$$

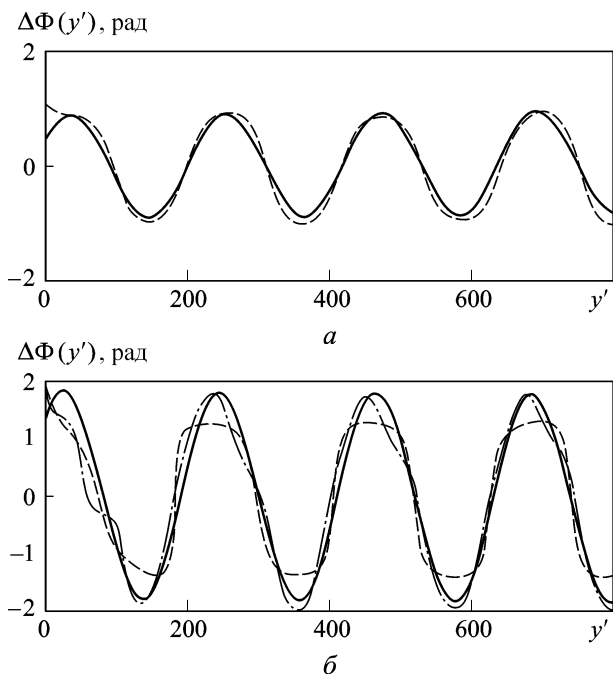


Рис. 4. Зависимость смещения фазы зарегистрированного сигнала от координаты:

$\Delta\Phi_n^{\max} = 0,9$ (а) и $1,8$ радиан (б); — — теоретическая зависимость; --- и - · - - оценка зависимости фазы при применении фильтров с полосами $\Delta\nu'_1$ и $\Delta\nu'_2$

Из формул (13), (14) следует, что коэффициент K_n при выполнении условия (12) можно принять равным

$$K_n = \frac{\tilde{H}\left(\nu'_0 - \frac{n}{l'_y}\right)}{\tilde{H}(\nu'_0)}. \quad (16)$$

Для рассмотренных случаев при использовании фильтра $\tilde{H}_1(\nu'_y)$ коэффициент $K_n = 0,92$ при $\Delta\Phi_n^{\max} = 0,9$ рад и $K_n = 0,82$ при $\Delta\Phi_n^{\max} = 1,8$ рад. Отметим, что при увеличении значения $\Delta\Phi_n^{\max}$ коэффициент K_n становится значительно меньше расчетного значения по формуле (16), которое для фильтра $\tilde{H}_1(\nu'_y)$ равно $K_n = 1$. Точное значение коэффициентов K_n можно определить по результатам тестирования трехмерного сканера с использованием тестовых сигналов в виде гармонической решетки с частотой n/l'_y .

Для уменьшения погрешности восстановления формы объекта для второго случая с $\Delta\Phi_n^{\max} = 1,8$ рад необходимо использовать фильтр с более широкой полосой пропускания. При использовании фильтра с передаточной функцией $\tilde{H}_2(\nu'_y)$ при $\Delta\Phi_n^{\max} = 1,8$ рад коэффициент $K_n = 0,95$.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают справедливость выведенных математических выражений.

Ранее предполагалось, что качество восстановленного объемного рельефа объекта можно оценить по значениям искажений при восстановлении отдельных гармонических составляющих сигнала. Учитывая только линейные искажения, можно записать, что рельеф поверхности объекта определяется в соответствие с выражением

$$\hat{z}(y) = \tilde{z}_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left| \tilde{z}\left(\frac{n}{l_y}\right) \right| K_n \sin\left(2\pi \frac{n}{l_y} + \varphi\left(\frac{n}{l_y}\right)\right) \text{rect}\left(\frac{y}{l_y}\right). \quad (17)$$

Однако оценка пространственной структуры восстановленного объекта по линейным искажениям отдельным гармоническим составляющим будет приближенной. На основе анализа выражений (1), (3) и (4) можно показать, что спектр зарегистрированного сигнала от объекта сложной структуры, имеет вид

$$\tilde{S}(\nu'_y) = 0,5B\tilde{\rho}(\nu'_y) \otimes \delta(\nu'_y - \nu'_0) \otimes \tilde{S}_1(\nu'_y) \otimes \tilde{S}_2(\nu'_y) \otimes \dots \otimes \tilde{S}_n(\nu'_y), \quad (18)$$

где $\tilde{S}_1(\nu'_y), \tilde{S}_2(\nu'_y), \dots, \tilde{S}_n(\nu'_y)$ – спектры сигналов от отдельных гармонических составляющих с периодом $T'_n = l'_y, \frac{l'_y}{2}, \dots, \frac{l'_y}{n}$ соответственно.

Из формулы (18) следует, что спектр сигнала в этом случае представляется сверткой спектров сигналов от отдельных составляющих и будет более широким.

Для иллюстрации возможности использования формулы (17) для объектов со сложным рельефом поверхности проведено моделирование процесса обработки сигнала для объектов в виде прямоугольников со смещением фазы зарегистрированного сигнала $\Delta\Phi(y') = \Phi \text{rect}\left(\frac{y'}{L'_y}\right)$, имеющих разные размеры, а именно $L'_y = \nu'_0, 3\nu'_0, 7\nu'_0$, при значениях амплитуды $A_\Phi = 1$ рад и $A_\Phi = 2$ рад. При предварительной обработке зарегистрированного сигнала использован полосовой фильтр с передаточной функцией $\tilde{H}(\nu'_y) = \text{rect}\left(\frac{\nu'_y - \nu'_0}{\nu'_0}\right)$.

Согласно формуле (17) восстановленное распределение смещения фазы имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{\text{теор}}(y') &= \left(A_\Phi \frac{L'_y}{l'_y} + \right. \\ &+ 2A_\Phi \frac{L'_y}{l'_y} \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\pi L'_y \frac{n}{l'_y}\right) \tilde{H}\left(\nu'_y - \frac{n}{l'_y}\right) \sin\left(2\pi \frac{n}{l'_y} y' + \varphi_n\right) \left. \right) \text{rect}\left(\frac{y'}{l'_y}\right). \end{aligned} \quad (19)$$

Сравним распределения, полученные по формуле (19), и распределения $\Delta\hat{\Phi}(y')$, полученные при математическом моделировании сигнала, отраженного от объектов.

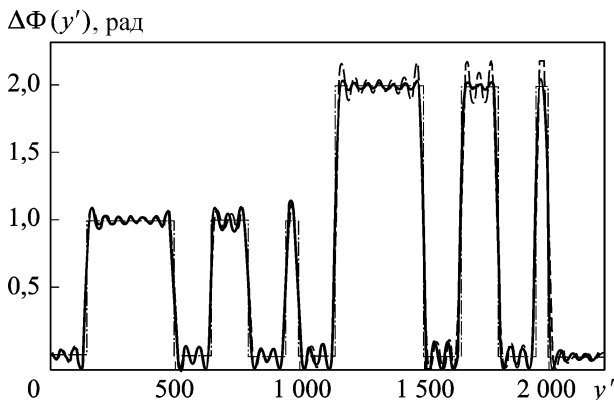


Рис. 5. Зависимость смещения по фазе от координаты:

— · — · — исходное распределение $\Delta\Phi(y')$; — · — · — расчетное распределение $\Delta\hat{\Phi}_{\text{теор}}(y')$;
 — — — — — восстановленное распределение $\Delta\hat{\Phi}(y')$

Как следует из рис. 5 при небольших амплитудах $A_{\Phi} = 1$ рад максимальное отклонение восстановленного рельефа $\hat{\Phi}(y)$ поверхности от расчетного $\hat{\Phi}_{\text{теор}}(y')$ не превышает 5 %, т.е. при выполнении условия (12) формулы (16) и (17) достаточно точно описывают восстановленный рельеф поверхности объекта. При увеличении амплитуды до $A_{\Phi} = 2$ рад отличие возрастает до 15 %.

Если предположить, что калибровка системы выполнена с достаточной степенью точности, то погрешность восстановления формы объекта может быть обусловлена следующими факторами:

- линейными и нелинейными искажениями, возникающими в процессе обработки зарегистрированного сигнала;
- текстурой объекта, зависящей от пространственного распределения коэффициента отражения $\rho(y)$;
- аддитивным шумом регистрирующей камеры [5].

На основе теоретических и экспериментальных исследований обоснована возможность использования гармонических тест-объектов для контроля погрешности трехмерного сканера. Представленные в статье результаты могут быть использованы для оптимизации конструктивных параметров прибора и параметров алгоритма при минимизации погрешности восстановления формы объекта с учетом его пространственной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаниро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
2. Trobina M. Error model of a coded-light range sensor: Technical report BIWI-TR-164, ETH-Zentrum, 1995.

3. *Wenjing Chen, Xianyu Su, Yiping Cao, Liqun Xiang*. Improving Fourier transform profilometry based on bicolor fringe pattern // *Optical Engineering*. – January 2004. V. 43, no. 1. P. 192–198.
4. *Папулис А.* Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971.
5. *Бенуни А.А., Колочкин В.Я.* Оптимизация параметров алгоритма восстановления трехмерных образов объектов на основе параллаксного метода регистрации // Труды конференции. Прикладная оптика. СПб., 2007.

REFERENCES

1. *Shapiro L.G., Stockman G.C.* Computer Vision. Upper Saddle River, Prentice Hall, 2001. (Russ. ed.: Shapiro L., Stokman Dzh. Komp'yuternoe zrenie. Moscow, BINOM Publ., 2006. 762 p.).
2. *Trobina M.* Error Model of a Coded-Light Range Sensor: Technical Report BIWI-TR-164, ETH-Zentrum, 1995.
3. *Wenjing Chen, Xianyu Su, Yiping Cao, Liqun Xiang*. Improving Fourier transform profilometry based on bicolor fringe pattern. *Opt. Eng.*, 2004, vol. 43, no. 1, pp. 192–198.
4. *Papoulis A.* Systems and Transforms with Applications in Optics. New York, McGraw-Hill, 1968. 316 p. (Russ. ed.: Papulis A. Teoriya sistem i preobrazovaniy v optike. Moscow, Mir Publ., 1971. 496 p.).
5. *Benuni A.A., Kolyuchkin V.Ya.* Optimization of the parameters of an algorithm for reconstructing three-dimensional images by the parallax registration method. *Trudy Konf. Prikl. Opt.* [Proc. Conf. Appl. Opt.]. St. Petersburg, 2007 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.05.2012

Анна Альбертовна Бенуни — инженер НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области системного проектирования оптико-электронных приборов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.A. Benuni — engineer of the Research Institute of Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of system designing of optical-electronic instruments.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.

Василий Яковлевич Колочкин — д-р техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области системного проектирования оптико-электронных приборов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.Ya. Kolyuchkin — Dr. Sci. (Eng.), head of department researcher of the Research Institute of Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of system designing of optical-electronic instruments.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.