УДК 519.977.54:004.94

С. Г. Черный, А. А. Жиленков

Моделирование процессов в системе датчик – объект при сканировании подводных коммуникаций

Смоделированы процессы, описывающие взаимодействие сканирующего датчика с элементом линии подводной коммуникации. Данная задача актуальна при построении систем автоматизированного инспектирования подводных объектов с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов. Получена простая модель, позволяющая описать структурные свойства материала объекта или повреждений на его поверхности. Математическая модель взаимодействия объекта и сканирующего датчика представлена в виде суммы двух рядов. Показано, что в задачах контроля локальной структуры поверхности объекта возможно представление математической модели в форме ряда Котельникова. Полученные результаты имеют высокую практическую значимость при решении задач прокладки специализированных линий и магистралей на территории Крымской акватории Азово-Черноморского бассейна и регулярного мониторинга их состояния.

Ключевые слова: подводный аппарат, инспектирование, датчик – объект, вектор.

Введение

Каждый день по всему миру в эксплуатацию вводятся новые линии подводных коммуникаций, протяженность их увеличивается. Как следствие, растут риски, способствующие разного рода повреждениям подводных кабелей и трубопроводов, в числе которых коррозия, сейсмическая обстановка, механические повреждения (например, от использования тяжелых тралов рыболовецкими судами, в результате повреждений якорями судов, сброшенными в море объектами и т. д.). По статистике растет количество повреждений нагревательных кабелей, что вызывает разрушения обогреваемых ими подводных трубопроводов. В связи с этим естественно возрастает и число необходимых инспекционных мероприятий, направленных на поиск повреждений подводных коммуникаций, утечек, посторонних объектов на линиях, которые в том числе могут быть связаны с террористической угрозой.

Для выполнения нормативных требований для визуального исследования линий подводных коммуникаций сегодня привлекаются водолазы или гораздо реже подводные аппараты с телеуправлением. В то же время в ведущих странах мира наблюдается тенденция к разработке эффективных методов и средств подобного контроля с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов [1–3]. Теоретически использование подобных аппара-

тов позволяет существенно расширить радиус действия инспектирующего объекта, снизить затраты на техническое обеспечение надводными судами, несущими специальное оборудование. В связи с этим возникает проблема автоматизации процесса инспектирования с помощью разных методов сканирования. Автономные подводные аппараты могут нести на борту акустические, оптические и электромагнитные сенсоры, с помощью которых проводится поиск подводных коммуникаций на морском дне и их исследование.

В научной литературе достаточно полно освещено решение задач автоматизированного поиска и распознавания подводных коммуникаций необитаемыми аппаратами [4–6], но информация о разработках в области автоматизированной инспекции целостности протяженных подводных объектов практически отсутствует. Известны буквально единицы аппаратов, обладающих подобной функцией [7–9]. На основании анализа доступных публикаций можно сделать вывод, что наибольших успехов разработчикам удалось достичь в области поиска и инспекции по электромагнитному излучению посредством соответствующих бортовых датчиков [9, 10]. Однако применение данного метода весьма ограничено узким кругом задач и имеет ряд существенных недостатков. Основными недостатками являются обеспечение обнаружения в ходе инспекции только мест разрыва запитанных электролиний и необходимость наличия последних в составе инспектируемой линии [7, 8].

© Черный С. Г., Жиленков А. А., 2017

В рамках решения задачи автоматизации инспектирования линий подводных коммуникаций, связывающих Республику Крым с материковой частью России, в данной статье исследуются проблемы распознавания дефектов на поверхностях элементов инспектируемых линий. В частности, проводится анализ изображений, получаемых с помощью телевизионных датчиков, подводных акустических сканеров (типа *BlueView BV 5xxx*, *Echoscope* и т. п.) и их комплексирования.

Цели настоящей работы – построение модели взаимодействия датчика и объекта инспектирования, поиск на ее базе эффективных методов выделения основных особенностей структуры в изображении объекта, идентификации скрытых периодичностей, неравномерностей, т. е. решение задачи выделения существенных особенностей структуры изображения, характерных для элементов подводных коммуникаций.

Математическое описание взаимодействия датчика и объекта контроля

Опишем систему объект – датчик в случае контроля поверхности объекта по его изображению в оптическом диапазоне (рис. 1).

Рис. 1. Координатная система для подвижного окна: x, y – координаты переноса; $f(x, y)$ – импульсная переходная функция объекта; H – чувствительность датчика, по физическому смыслу совпадающая с локальной импульсной переходной характеристикой

В этом случае реакция $U(x, y)$ определяется сверткой весовой функции материала объекта и функции распределения чувствительности датчика $H(x, y)$ по формуле:

$$U(x, y) = \iint_{\Omega_H} f(x_1, y_1) H(x_1 - x, y_1 - y) dx_1 dy_1.$$

Из-за расхождения области определения модели и окна теряется возможность применения свертки в виде

$$U(x, y) = \iint_{\Omega_H} f(x_1, y_1) H(x_1 - x, y_1 - y) dx_1 dy_1.$$

Действительно, отсчет координат модели и окна датчика не совпадают, что приводит к нарушению симметричности свертки. Данная особенность учтена в работе [11] и практически игнорируется в более поздних исследованиях. Это свойство присуще описаниям для телевизионных систем [12]. В этом случае для замены переменных является целесообразным переход к координатной системе X, Y и переносной системе η, ξ . В результате сигнал от подвижного окна описывается уравнением

$$U(x, y) = \iint_{\Omega_H} f(\eta + x, \xi + y) H(\eta, \xi) d\eta d\xi. \quad (1)$$

Включив модель инспектируемого материала в виде ряда Фурье в выражение отклика получаем:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \tilde{f}(x, y) \otimes H(x, y) = \\ &= \iint_{\Omega_H} \tilde{f}(\eta + x, \xi + y) H(\eta, \xi) d\eta d\xi = \\ &= \iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \left[\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} (a_{m,n} \cos n(\eta + x) \times \right. \\ &\quad \times \cos m(\xi + y) + \dots + b_{m,n} \sin n(\eta + x) \times \\ &\quad \times \cos m(\xi + y) + c_{m,n} \cos n(\eta + x) \times \\ &\quad \times \sin m(\xi + y) + \dots \\ &\quad \left. \dots + d_{m,n} \sin n(\eta + x) \sin m(\xi + y)) \right] d\eta d\xi. \end{aligned} \quad (2)$$

Выполнив преобразования, определим спектральную характеристику датчика

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x, y) &= \iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \times \\ &\times \left[\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} (a_{m,n} \cos n(\eta + x) \cos m(\xi + y) + \right. \\ &\quad + b_{m,n} \sin n(\eta + x) \cos m(\xi + y) + \\ &\quad + c_{m,n} \cos n(\eta + x) \sin m(\xi + y) + \\ &\quad \left. + d_{m,n} \sin n(\eta + x) \sin m(\xi + y)) \right] d\eta d\xi, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} a_{m,n} \cos n(\eta + x) \cos m(\xi + y) &= a_{m,n}[(\cos m\eta \cos nx - \sin m\eta \sin nx) \times (\cos m\xi \cos my - \sin m\xi \sin my)] = \\ &= a_{m,n}[\cos m\eta \cos nx \cos m\xi \cos my - \sin m\eta \sin nx \cos m\xi \cos my - \\ &\quad - \cos m\eta \cos nx \sin m\xi \sin my + \sin m\eta \sin nx \sin m\xi \sin my]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{m,n} \sin n(\eta + x) \cos m(\xi + y) &= b_{m,n}[(\sin m\eta \cos nx + \cos m\eta \sin nx) \times (\cos m\xi \cos my - \sin m\xi \sin my)] = \\ &= b_{m,n}[\sin m\eta \cos nx \cos m\xi \cos my + \cos m\eta \sin nx \cos m\xi \cos my - \\ &\quad - \sin m\eta \cos nx \sin m\xi \sin my - \cos m\eta \sin nx \sin m\xi \sin my]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{m,n} \cos n(\eta + x) \sin m(\xi + y) &= c_{m,n}[(\cos m\eta \cos nx - \sin m\eta \sin nx) \times (\sin m\xi \cos my + \cos m\xi \sin my)] = \\ &= c_{m,n}[\cos m\eta \cos nx \sin m\xi \cos my - \sin m\eta \sin nx \sin m\xi \cos my + \\ &\quad + \cos m\eta \cos nx \cos m\xi \sin my - \sin m\eta \sin nx \cos m\xi \sin my]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{m,n} \sin n(\eta + x) \sin m(\xi + y) &= d_{m,n}[(\sin m\eta \cos nx + \cos m\eta \sin nx) \times (\sin m\xi \cos my + \\ &\quad + \cos m\xi \sin my)] = d_{m,n}[(\sin m\eta \cos nx \sin m\xi \cos my + \cos m\eta \sin nx \sin m\xi \cos my + \\ &\quad + \sin m\eta \cos nx \cos m\xi \sin my + \cos m\eta \sin nx \cos m\xi \sin my)]. \end{aligned}$$

Из уравнений элементов спектральной матрицы можно выделить составляющие, связанные с переносной системой координат. Это, в свою очередь, дает возможность получить

компоненты спектральной характеристики датчика в явном виде.

Преобразуем модель (3) к виду (4).

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \left(a_{m,n} \left\{ \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \times \cos m\xi d\eta d\xi \right] \cos nx \cos my - \right. \right. \\ &\quad - \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \cos m\xi d\eta d\xi \right] \sin nx \cos my - \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \sin m\xi d\eta d\xi \right] \cos nx \sin my + \\ &\quad + \left. \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \sin m\xi d\eta d\xi \right] \sin nx \sin my \right\} + b_{m,n} \left\{ \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \cos m\xi d\eta d\xi \right] \cos nx \cos my + \right. \\ &\quad + \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \cos m\xi d\eta d\xi \right] \sin nx \cos my - \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \sin m\xi d\eta d\xi \right] \cos nx \sin my - \\ &\quad - \left. \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \sin m\xi d\eta d\xi \right] \sin nx \sin my \right\} + c_{m,n} \left\{ \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \sin m\xi d\eta d\xi \right] \cos nx \cos my - \right. \\ &\quad - \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \sin m\xi d\eta d\xi \right] \sin nx \cos my + \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \cos m\xi d\eta d\xi \right] \cos nx \sin my - \\ &\quad - \left. \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \cos m\xi d\eta d\xi \right] \sin nx \sin my \right\} + d_{m,n} \left\{ \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \sin m\xi d\eta d\xi \right] \cos nx \cos my + \right. \\ &\quad + \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \sin m\xi d\eta d\xi \right] \sin nx \cos my + \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \cos m\xi d\eta d\xi \right] \cos nx \sin my + \\ &\quad + \left. \left[\iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \cos m\xi d\eta d\xi \right] \sin nx \sin my \right\} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Обозначив элементы, связанные с характеристиками датчика как компоненты, касающиеся соответствующих элементов спектральной матрицы модели материала, получаем:

$$\begin{aligned} h_{m,n}^a &= \iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \cos m\xi d\eta d\xi, \\ h_{m,n}^b &= \iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \cos m\xi d\eta d\xi, \\ h_{m,n}^c &= \iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \cos m\eta \sin m\xi d\eta d\xi, \\ h_{m,n}^d &= \iint_{\Omega_H} H(\eta, \xi) \sin m\eta \sin m\xi d\eta d\xi. \end{aligned} \quad (5)$$

Подстановка (5) в уравнение (2) значительно упрощает модель реакции системы:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} (h_{m,n}^a a_{m,n} + h_{m,n}^b b_{m,n} + \\ &+ h_{m,n}^c c_{m,n} + h_{m,n}^d d_{m,n}) \cos nx \cos my + \\ &+ (-h_{m,n}^b a_{m,n} + h_{m,n}^a b_{m,n} - h_{m,n}^d c_{m,n} + h_{m,n}^c d_{m,n}) \times \\ &\times \sin nx \cos my + \\ &+ (-h_{m,n}^c a_{m,n} - h_{m,n}^d b_{m,n} + h_{m,n}^a c_{m,n} + h_{m,n}^b d_{m,n}) \times \\ &\times \cos nx \sin my + \\ &+ (h_{m,n}^d a_{m,n} - h_{m,n}^c b_{m,n} - h_{m,n}^b c_{m,n} + h_{m,n}^a d_{m,n}) \times \\ &\times \sin nx \sin my. \end{aligned} \quad (6)$$

В уравнении (6) компоненты структуры на изображении инспектируемой поверхности взаимодействуют с компонентами модели датчика, что обуславливает использование более высокой размерности. Введем векторы с компонентами спектральных характеристик датчика $\mathbf{h}$ и материала объекта $\mathbf{a}$:

$$\mathbf{h}_{m,n} = \begin{bmatrix} h_{m,n}^a \\ h_{m,n}^b \\ h_{m,n}^c \\ h_{m,n}^d \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}_{m,n} = \begin{bmatrix} a_{m,n} \\ b_{m,n} \\ c_{m,n} \\ d_{m,n} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Сформируем матрицы, описывающие последовательность взаимодействия элементов модели датчика и изображения объекта [13]:

$$\begin{aligned} M_a &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ M_b &= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ M_c &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ M_d &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

Данные матрицы в качестве элементов фактически содержат матрицы растяжения (сжатия) и матрицы поворота

$$\begin{aligned} M_a &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ M_b &= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ M_c &= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ M_d &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

Матрица модели взаимодействия датчика и объекта в этом случае имеет вид:

$$S_{m,n}^u = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{m,n} M_a \mathbf{h}_{m,n} & \mathbf{a}_{m,n} M_b \mathbf{h}_{m,n} \\ \mathbf{a}_{m,n} M_c \mathbf{h}_{m,n} & \mathbf{a}_{m,n} M_d \mathbf{h}_{m,n} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Полученная модель позволяет сохранить форму изображения отклика как результат взаимодействия двух основных элементов – объекта и модели датчика в виде

$$U(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \langle \Phi_{mx}, S_{m,n}^u \Phi_{ny} \rangle. \quad (11)$$

К тому же значительно упрощается описание контроля поврежденных участков объекта. Благодаря тому, что выражение (8) имеет простое ядро, введение модели поврежденного материала объекта сводится к простым операциям над матрицами.

При использовании матриц модели деформированного материала и векторов возбужденной модели (9) можно определить реакцию системы объект – датчик (10) с помощью спектральных матриц

$$\mathbf{a}_{m,n}^+ = \begin{bmatrix} a_{m,n}^+ \\ b_{m,n}^+ \\ c_{m,n}^+ \\ d_{m,n}^+ \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}_{m,n}^- = \begin{bmatrix} a_{m,n}^- \\ b_{m,n}^- \\ c_{m,n}^- \\ d_{m,n}^- \end{bmatrix}. \quad (12)$$

$$S_{m,n}^{u+} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{m,n}^+ M_a \mathbf{h}_{m,n} & \mathbf{a}_{m,n}^+ M_b \mathbf{h}_{m,n} \\ \mathbf{a}_{m,n}^+ M_c \mathbf{h}_{m,n} & \mathbf{a}_{m,n}^+ M_d \mathbf{h}_{m,n} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$S_{m,n}^{u-} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{m,n}^- M_a \mathbf{h}_{m,n} & \mathbf{a}_{m,n}^- M_b \mathbf{h}_{m,n} \\ \mathbf{a}_{m,n}^- M_c \mathbf{h}_{m,n} & \mathbf{a}_{m,n}^- M_d \mathbf{h}_{m,n} \end{pmatrix}.$$

Далее сигнал датчика в общем случае описывается уравнением

$$U(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{m,n} \langle \Phi_{nx}^+, S_{m,n}^{u+} \Phi_{ny}^+ \rangle + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \langle \lambda_{m,n}, \Phi_{mx}^- S_{m,n}^{u-} \Phi_{ny}^- \rangle. \quad (14)$$

Таким образом, получена простая модель, позволяющая описать структурные свойства материала объекта или (при отсутствии ярко выраженной структуры) повреждений на его поверхности. Запишем спектральные

векторы как сумму собственного и совмещенного векторов

$$\mathbf{a}_{m,n}^+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a_{m,n}^+ + d_{m,n}^+ \\ b_{m,n}^+ + c_{m,n}^+ \\ c_{m,n}^+ + b_{m,n}^+ \\ d_{m,n}^+ + a_{m,n}^+ \end{bmatrix} = \mathbf{a}_{m,n}^+ + \tilde{\mathbf{a}}_{m,n}^+, \quad (15)$$

$$\mathbf{a}_{m,n}^- = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a_{m,n}^- - d_{m,n}^- \\ b_{m,n}^- - c_{m,n}^- \\ c_{m,n}^- - b_{m,n}^- \\ d_{m,n}^- - a_{m,n}^- \end{bmatrix} = \mathbf{a}_{m,n}^- - \tilde{\mathbf{a}}_{m,n}^-.$$

Видно, что оценка компонентов спектральных векторов может быть произведена с помощью одного датчика.

Сканирование зондирующим лучом

С учетом заявленных технических характеристик сканирующих систем, использование которых возможно для рассматриваемых задач инспектирования, рассмотрим один из основных случаев – сканирование зондирующим лучом. В данном случае сканирование производится с помощью лучевого акустического сканера *BlueView BV 5000*, использующего элемент с Гауссовским распределением энергии и эффективным радиусом $\rho(x, y) = \exp(-\sigma^2(x^2 + y^2))$.

Компоненты спектральной матрицы элемента разбиения имеют вид: $h_a = 1/2 \exp \times (- (m^2 + n^2) / 4\sigma^2)$. Эта спектральная матрица включает следующие элементы:

$$A_{mn} = 1/2\pi a_{mn} \exp(- (m^2 + n^2) / 4\sigma^2),$$

$$B_{mn} = 1/2\pi b_{mn} \exp(- (m^2 + n^2) / 4\sigma^2), \quad (16)$$

$$X_4 = XS = \text{SIGN } Y(XY),$$

$$D_{mn} = 1/2\pi d_{mn} \exp(- (m^2 + n^2) / 4\sigma^2).$$

В данном случае спектральная характеристика датчика обеспечивает фильтрацию верхних пространственных частот, не внося существенного искажения в сигнал контроля.

При построении модели необходимо учесть, что сохранение явного вида топологической зависимости обеспечивает единство подхода к выявлению отклонений свойств

изображения поверхности объекта от заранее заданных.

Для получения математического описания в данном случае используем комплексную формулу члена ряда, где частичная сумма ряда может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{mn}(x, y) = & a_{m,n} \cos nx \cos my + \\ & + b_{m,n} \sin nx \cos my + c_{m,n} \cos nx \sin my + \\ & + d_{m,n} \sin nx \sin my = r_{m,n} e^{j(nx+my)} + \\ & + r_{-m,n} e^{j(nx-my)} + r_{m,-n} e^{j(-nx+my)} + \\ & + r_{-m,-n} e^{-j(nx+my)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Учитывая, что в данном выражении (17) имеем отсчеты по узлам решетки со смещением по координатам на $\frac{3}{2}\pi$, запишем:

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x, y) = & \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} r_{m,n} e^{j(nx+my)} + \\ & + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} r_{-m,n} e^{j(nx-my)} + \\ & + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} r_{m,-n} e^{j(-nx+my)} + \\ & + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} r_{-m,-n} e^{-j(nx+my)} = \\ & f^*(x, y) + f^*(x, y + \Delta_y) + \\ & f^*(x + \Delta_x, y) + f^*(x + \Delta_x, y + \Delta_y). \end{aligned} \quad (18)$$

Исходя из этого, можно получить описание изображения поверхности с сохранением топологических свойств для смещений, согласованных с геометрическими размерами сканируемой области.

Возвращаясь к задаче контроля с малым прямоугольным окном, получаем свертку

$$\begin{aligned} U(x, y) = & H \otimes \{ f^*(x, y) + \\ & f^*(x, y + \Delta_y) + f^*(x + \Delta_x, y) + \\ & + f^*(x + \Delta_x, y + \Delta_y) \}. \end{aligned} \quad (19)$$

Приняв, что сканируемая область является прямоугольником для равномерной чувствительности преобразователя в окне, можно записать:

$$\begin{aligned} U(x, y) = & \sum \sum f_{m,n} \frac{\sin(\pi(x/h - n))}{\pi(x/h - n)} \times \\ & \times \frac{\sin(\pi(y/l - m))}{\pi(y/l - m)} + \\ & + \sum \sum f_{m+\Delta,n} \frac{\sin(\pi(x/h - n))}{\pi(x/h - n)} \times \\ & \times \frac{\sin(\pi(y/l - m))}{\pi(y/l - m)} + \\ & + \sum \sum f_{m,n+\Delta} \frac{\sin(\pi(x/h - n))}{\pi(x/h - n)} \times \\ & \times \frac{\sin(\pi(y/l - m))}{\pi(y/l - m)} + \\ & + \sum \sum f_{m+\Delta,n+\Delta} \frac{\sin(\pi(x/h - n))}{\pi(x/h - n)} \times \\ & \times \frac{\sin(\pi(y/l - m))}{\pi(y/l - m)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Следовательно, сигнал сканирования формируется из четырех компонентов, представляющих собой ряд Котельникова. Отсчеты берутся в точках (x, y) , $(x + \Delta, y)$, $(x, y + \Delta)$, $(x + \Delta, y + \Delta)$ (рис. 2).

Рис. 2. Координаты отсчетов функции

Таким образом, сохранение чувствительности модели к топологическим свойствам поверхности объекта достигается контролем сигнала в четырех точках области сканирования. Учитывая, что спектр сигнала ограничен, можно утверждать, что использование в качестве модели формулы (20) обеспечивает воспроизведение сигнала. Также можно сделать важный вывод: для контроля без потери информации о структурных особенностях поверхности объекта достаточно иметь окно 2×2 пикселя, сравнимое с областью сканирования (табл. 1).

Таблица 1

Минимальный размер окна сканирования

$f(x, y + \Delta)$	$f(x + \Delta, y + \Delta)$
$f(x, y)$	$f(x + \Delta, y)$

Из анализа (14) следует, что линейно независимыми являются только четыре компоненты спектральных векторов. Для контроля в общем случае необходимо иметь достаточно простое окно, дополненное компонентами задержки (табл. 2).

Таблица 2

Структура окна сканирования

$f(x, y + \Delta)$	$f(x + \Delta, y + \Delta)$
$f(x, y)$	$f(x + \Delta, y)$
$f(x, y - \Delta)$	$f(x + \Delta, y - \Delta)$

Существенным является необходимость определения исходного шага в окне. Данный вопрос решается просто, если принять, что при контроле поверхности объекта достаточно проанализировать только первую гармонику. Отсчеты берутся в точках максимумов и нулей функции. Таким образом, достаточно просто построить модель, сохраняющую основные топологические свойства поверхности объекта контроля за максимумами функции и ее производных.

Проверка адекватности математической модели

Проверим сходимость модели при описании поверхности объекта. Использование при построении модели ряда Фурье позволяет заключить, что поскольку элементы сканируемого изображения физически не реализуют разрывов и структура изображения поверхности периодическая, то общая сходимость гарантирована. Важным остается вопрос сложности модели, поэтому необходимо оценить количество элементов ряда для получения модели с требуемой точностью.

Модель нулевого приближения рассчитана как среднее значение поля изображения с учетом коэффициента λ_0 :

$$u_{0,0} = \frac{1}{4L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x, y) dx dy. \quad (21)$$

Модель первого приближения обеспечивает только описание основных компонентов, при этом средняя квадратическая погрешность достигает 30 %. При приближении двумя членами ряда погрешность снижается до 18 %. Как известно, увеличение числа членов ряда приводит к снижению ошибки. Однако, как показал анализ, переход к приближению с учетом пяти гармоник обеспечивает снижение ошибки до 4,8 %, при дальнейшем увеличении количества гармоник снижение ошибки замедляется так, что при использовании всего спектра удастся получить ошибку не менее 2,7 %. Таким образом, использование при построении модели частот выше пятой гармоники можно признать нецелесообразным.

На рис. 3 приведен пример изображения, полученный сканером подводного кабеля, для которого была построена модель.

Рис. 3. Изображение поверхности подводного кабеля

Достаточность учета малого числа гармоник объясняется довольно простым спектральным составом, свойственным исследованным поверхностям. Так, на рис. 4 показан одномерный спектр изображения образца по координате сканирующего луча.

В спектре, кроме нулевой гармоники, доминируют только две составляющие, связанные с чередованием областей сканирования 1 и существованием возмущений структуры 2. Собственно, полный пространственный спектр изображения исследуемого образца достаточно сложный (рис. 5).

Рис. 4. Одномерный спектр образца:
1 – область сканирования; 2 – возмущения структуры

Рис. 5. Пространственный спектр изображения образца

Рис. 6. Строка (а) и столбец (б) матрицы автокорреляции

Реализация модели была выполнена в среде *MATLAB*. Исходный кадр изображения образца обрабатывался с выделением контуров. Выделение контуров изображения позволило подчеркнуть особенности периодичности структуры поверхности объекта контроля. Наличие корреляционного максимума позволяет установить основные частоты структуры материала. На рис. 6 приведены строка и столбец матрицы автокорреляции. Строка и столбец корреляционной матрицы являются автокорреляционными функциями для фиксированных координат.

Определить основные частоты структуры, являющиеся периодами структуры изображения, можно и с корреляционными функциями. Однако для корреляции характерно обострение не только основных частот, но и выделение скрытых периодичностей, что усложняет задачу определения основных параметров структуры модели [14–17]. Для получения значения основных частот модели найдем энергетический спектр изображения и его корреляционное поле (рис. 7).

Рис. 7. Энергетический спектр изображения образца (а) и корреляционное поле образца (б)

Рис. 8. Свертка модели поверхности inspected объекта и эталонного образца

Определенные по энергетическим спектрам частоты позволяют построить эталонную полигармоническую модель поверхности инспектируемого объекта (рис. 8).

Заключение

Анализируя полученную модель, можно сделать следующие выводы:

- математическая модель взаимодействия объекта (линии подводных коммуникаций) и сканирующего датчика (рассмотрен пример обработки изображения, полученного акустическим сканирующим датчиком) представляется в виде суммы двух рядов;
- компоненты спектральных векторов являются определенными только при отсутствии деформации структуры материала объекта;
- в задачах контроля локальной структуры поверхности объекта можно представлять математическую модель в форме ряда Котельникова;
- для сохранения в модели топологических свойств объекта отсчеты необходимо выполнять в максимумах функции и ее производных.

Настоящие исследования имеют высокую практическую значимость ввиду прокладки специализированных линий и магистралей на территории Крымской акватории Азово-Черноморского бассейна и необходимости регулярного мониторинга их состояния.

Список литературы

1. *Matsumoto S., Ito Y.* Real-time vision-based tracking of submarine-cables for AUV/ROV // *OCEANS'95 MTS/IEEE*. October, 1995. Vol. 3. Pp. 1997–2002.
2. *Ortiz A., Simó M., Oliver G.* A vision system for an underwater cable tracker // *Machine Vision and Applications*. July, 2002. Vol. 13, Iss. 3. Pp. 129–140.
3. *Rives P., Borrelly J.J.* Underwater pipe inspection task using visual servoing techniques // *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robotic Systems*. September, 1997. Vol. 7–11. Pp. 63–68.
4. *Fukasawa T., Hozumi S., Morita M., Oketani T.* Dissolved methane sensor for methane leakage monitoring in methane hydrate production // *OCEANS'06 MTS/IEEE*. September, 2006. Vol. 18–21. CD-ROM.

5. Tracking // OCEANS'03 MTS/IEEE, Biloxi. September, 2003. Vol. 5. Pp. 2651–2658.
6. Evans J., Patryn P., Privat B., Johnson N., Capus C. AUTOTRACKER. Autonomous inspection – Capabilities and lessons learned in offshore operations // OCEANS'09 MTS/IEEE, Biloxi. October, 2009. Vol. 26–29.
7. Dubberley J.R., Gendron M.L. Synthetic aperture sonar low frequency vs. high frequency automatic contact generation // OCEANS'09 MTS/IEEE, Biloxi. October, 2009. Vol. 26–29. Pp. 1–4.
8. Copros T., Scourzic D. Pipeline inspection latest results from the Alistar // International Conference on Subsea Technologies, Saint Petersburg, Russia, June 2007.
9. Conte G., Zanolli S., Perdon A., Tascini G., Zingaretti P. Automatic analysis of visual data in submarine pipeline inspection // OCEANS'96 MTS/IEEE. 1996. Vol. 3. Pp. 1213–1219.
10. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2 кн. Кн. 1. М.: Мир, 1982. 312 с.
11. Радионов В. А. Математическая модель текстильного материала и оптикоэлектронного преобразователя в потоке лучистой энергии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1982. № 3. С. 82–87.
12. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / А. Н. Писаревский, А. Ф. Чернявский, Г. К. Афанасьев и др.; под ред. А. Н. Писаревского, А. Ф. Чернявского. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 424 с.
13. Рыфтин К. В. Телевизионные системы. М.: Радио, Ленинград, 1968. 210 с.
14. Chernyi S., Zhilenkov A. Modeling of complex structures for the ship's power complex using XILINX system // Transport and Telecommunication. 2015. Vol. 16, no. 1. Pp. 73–82.
15. Chernyi S. Use of information intelligent components for the analysis of complex processes of marine energy systems // Transport and Telecommunication. 2016. Vol. 17, no. 3. Pp. 202–211.
16. Nyrkov A., Sokolov S., Zhilenkov A., Chernyi S., Mamunts D. Identification and tracking problems in qualimetry inspections in distributed control systems of drilling platforms // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, Saint Petersburg, Russia, 2016. Pp. 641–645. DOI 10.1109/EIConRusNW.2016.7448265
17. Жиленков А. А., Черный С. Г. Модель взаимодействия телевизионного датчика и объекта в задачах автоматизации инспектирования состояния подводных коммуникаций // Инженерная физика. 2016. № 4. С. 43–49.

Поступила 28.01.17

Черный Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электрооборудование судов и автоматизации производства» Керченского государственного морского технологического университета, г. Керчь, доцент кафедры «Комплексное обеспечение информационной безопасности» Государственного университета морского и речного флота имени С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: экспертные системы, морские буровые платформы.

Жиленков Антон Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления и информатики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: энергетические системы.

Process modeling in sensor – object system when scanning underwater communications

The study focuses on the modeled processes describing the interaction of the scanning sensor with the element of underwater communication. This task is relevant in constructing the systems for automated monitoring of underwater objects by means of unmanned underwater vehicles. A simple model has been obtained that makes it possible to describe the structural properties of the object's material or damage on its surface. The mathematical model of interaction between the object and the scanning sensor is presented as a sum of two series. The study shows that in problems of controlling the local structure of the object's surface, it is possible to present the mathematical model in Kotelnikov expanded form. The obtained results are of high practical importance in solving the problems of laying specialized lines and highways in the territory of the Crimean water area of the Azov-Black Sea basin and regular monitoring their condition

Keywords: underwater vehicle, monitoring, sensor – object, vector.

Cherny Sergey Grigorevich – Candidate of Engineering Sciences, Head of the Department of Electrical Equipment of Vessels and Manufacturing Automation, Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Associate Professor, Department of Integrated Information Security, State University of Marine and River Fleet named after S. O. Makarov, Saint Petersburg.

Science research interests: expert systems and offshore drilling platforms.

Zhilentov Anton Aleksandrovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Control Systems and Informatics, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg.

Science research interests: energy systems.