

УДК 621. 372: 534

Е.А. Арсирій, інженер,
В.А. Власенко, д-р техн. наук, проф.

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРИМИТИВОВ ПОТОКОВ МАССОПЕРЕНОСА В РАМКАХ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТВ³С

О.О. Арсирій, В.О. Власенко. Аналіз та моделювання структурних примітивів потоків масопереносу в межах інформаційної технології ТВ³С. Представлені методика та результати спектрального узагальненого аналізу, моделювання та ідентифікації структурних примітивів, які визначаються в ході візуалізації вихрових хвильових структур гідродинамічних потоків. Показана ефективність застосування узагальненого амплітудно-фазового аналізу (за Фуко-Гільбертом) при ідентифікації просторових спектральних та імовірнісних моделей.

E. A. Arsiriy, V.A. Vlasenko. Analysis and modelling of structure primitives of mass transfer flows within the scope informative TVS technique. Presented are methods and results of spectral generalized analysis, modelling and identification of structural primitives determined in the visualization process of vortex structures of hydrodynamic flows. Disclosed is efficiency of use of generalized amplitude-and-phase analysis (after Foucault-Hilbert) in identification of three-dimensional spectral and probabilistic models.

Использование метода визуализации потоков оптически активной жидкостью (ОАЖ) в сочетании с мультимедиа-системой позволяет визуализировать и интерпретировать структуры потоков массопереноса в различных аэро- и гидродинамических системах.

В таблице [1] приведены исходные изображения структурных примитивов слоистого, ячеистого, ориентированного и вихревого потоков. На рисунке (а) приведены изображения двумерных распределений спектральных плотностей (по Фурье) (в логарифмических координатах по интенсивности) этих структурных примитивов. Как видно из приведенных изображений, спектральные характеристики всех структурных примитивов существенно отличаются и, следовательно, могут быть использованы для их идентификации. Вариации размеров фрагментов, в пределах которых вычисляются двумерные спектры Фурье, приводят к вариациям оценок спектральных плотностей. Однако, выбор размеров фрагментов (64×64) — (128×128) оказывается удовлетворительным. Построение спектральных моделей структурных примитивов проводим в пространстве преобразования Фурье-Хартли и, затем, в пространстве преобразования Фуко-Гильберта.

Если амплитудный спектр по Фурье исходного изображения преобразован с помощью изотропного преобразования Фуко - Гильберта, то, используя следующие формулы, возможно получить изображения, содержащие пространственные распределения обобщенных параметров — огибающей, фазы и частоты от Фурье-спектров исходных структурных примитивов (т. н. пространственно-динамические описания).

Обобщенная огибающая $A(\omega_x, \omega_y)$ определяется как:

$$A(\omega_x, \omega_y) = \sqrt{S^2(\omega_x, \omega_y) + \hat{S}^2(\omega_x, \omega_y)}, \quad (1)$$

где $\hat{S}(\omega_x, \omega_y) = \sqrt{\hat{S}_{\omega_x}^2(\omega_x, \omega_y) + \hat{S}_{\omega_y}^2(\omega_x, \omega_y)}$; $\hat{S}_{\omega_x}(\omega_x, \omega_y), \hat{S}_{\omega_y}(\omega_x, \omega_y)$ — составляющие одномерной трансформанты Гильберта от спектра.

Обобщенная фаза $\psi(\omega_x, \omega_y)$ определяется как:

$$\psi(\omega_x, \omega_y) = \arctg \frac{\hat{S}(\omega_x, \omega_y)}{S(\omega_x, \omega_y)}. \quad (2)$$

Обобщенная частота $\Omega(\omega_x, \omega_y)$ определяется как:

$$\Omega(\omega_x, \omega_y) = \sqrt{\Omega_{\omega_x}^2(\omega_x, \omega_y) + \Omega_{\omega_y}^2(\omega_x, \omega_y)}, \quad (3)$$

$$\text{где } \Omega_{\omega}(\omega_x, \omega_y) = \frac{S_{\omega}(\omega_x, \omega_y) \hat{S}'_{\omega}(\omega_x, \omega_y) - \hat{S}_{\omega}(\omega_x, \omega_y) S'_{\omega}(\omega_x, \omega_y)}{S_{\omega}^2(\omega_x, \omega_y) + \hat{S}_{\omega}^2(\omega_x, \omega_y)}, \quad (4)$$

$$S'_{\omega}(\omega_x, \omega_y) = \frac{\partial S_{\omega}(\omega_x, \omega_y)}{\partial \omega}, \quad \hat{S}'_{\omega}(\omega_x, \omega_y) = \frac{\partial \hat{S}_{\omega}(\omega_x, \omega_y)}{\partial \omega}.$$

Рассмотрим пространственные спектральные характеристики структурных примитивов слоистого, ячеистого, ориентированного и вихревого потоков в пространствах, обобщенных — по Фуко-Гильберту — огибающей, фазы и частоты.

На рисунке (б) приведено изображение фазового спектра по Фурье структурных примитивов, там же приведены изображения обобщенных огибающей (в), фазы (г) и частоты (д) амплитудных спектров по Фурье структурных примитивов.

Пространственно-спектральное моделирование позволило построить набор моделей структурных примитивов в различных пространствах обработки. Рассмотрим методику идентификации этих моделей на основе методов корреляционно-экстремальной фильтрации (КЭФ). Для идентификации изображений вихревых волновых структур используются взаимная корреляционная функция и нормированная взаимная корреляционная функция, а также метод парных функций [2, 3].

Взаимная корреляционная функция:

$$K_{L1}(a_x) = M\{[s_e(x) - M[s_e(x)]] [s_t(x + a_x) - M[s_t(x + a_x)]]\}, \quad (5)$$

где $s_e(x)$, $s_t(x)$ — эталонное и текущее изображения;

M — символ математического ожидания.

Функция $K_{L1}(a_x)$ представляет собой смешанную центральную моментную функцию 2-го порядка.

Нормированная взаимная корреляционная функция:

$$K_{L2}(a_x) = \frac{K_{L1}(a_x)}{\sigma[s_e(x)]\sigma[s_t(x)]}, \quad (6)$$

где σ — оператор среднеквадратичного отклонения.

Для оценки эффективности разработанных алгоритмов моделирования и идентификации используем оценки показателя качества корреляционно-экстремальной классификации Q и оценки вероятности правильной классификации $P_{пр}$ — т. н. рабочие характеристики. Для оценки показателя качества Q используем отношение

$$Q = \text{Ctr} \mathbf{B} / 2 \|\mathbf{B}'\|, \quad (7)$$

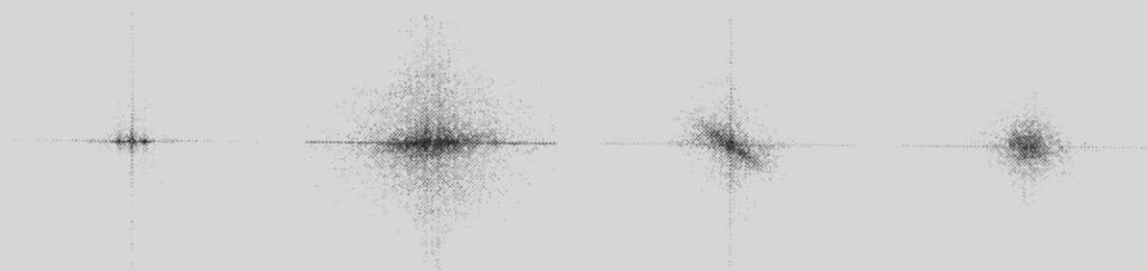
где $\text{tr} \mathbf{B}$ — след ковариационной матрицы $\mathbf{B}$ классифицируемых изображений;

$\|\mathbf{B}'\|$ — норма матрицы $\mathbf{B}'$, образуемой от матрицы $\mathbf{B}$ удалением диагональных элементов (коэффициентов автокорреляции);

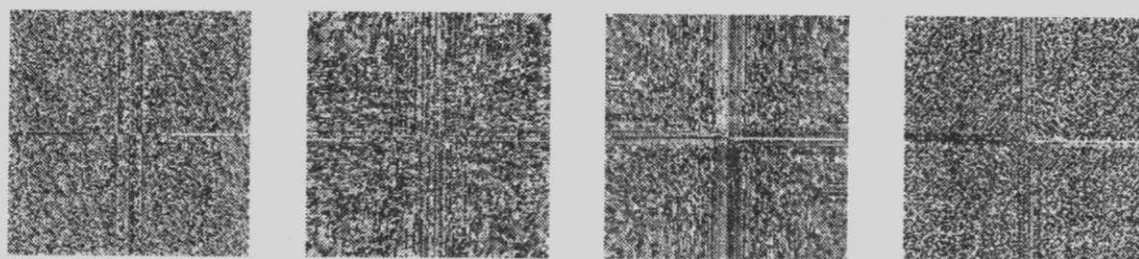
C — постоянная величина.

Для оценки вероятности $P_{пр}$ используем метод непосредственного моделирования процедуры классификации путем предъявления алгоритму помеченных изображений, вычисления значений первого максимума и второго максимума функций взаимной корреляции и интервала взаимной корреляции, и последующего сравнения вычисленных трех значений с пороговыми уровнями. Положительное решение принимается в случае хотя бы двух превышений, а для интервала корреляции — непревышений пороговых уровней. По отношению числа правильных решений к числу предъявлений реализаций изображений заданного класса оцениваем частоту (вероятность) $P_{пр}$.

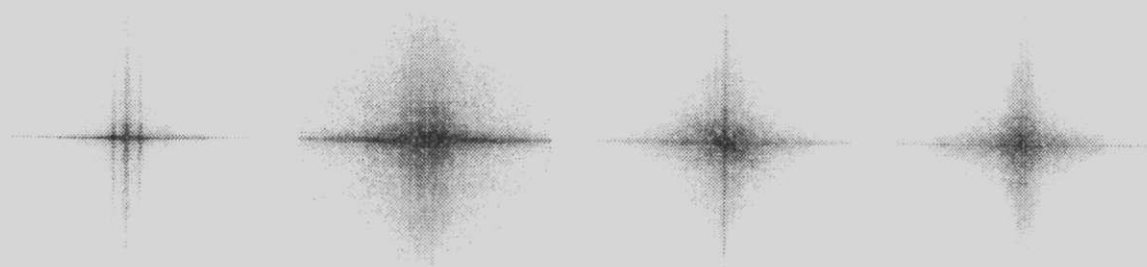
Для оценки устойчивости алгоритмов классификации структурных примитивов гидродинамических потоков использовался показатель качества классификации Q (7) и вероятность пра-



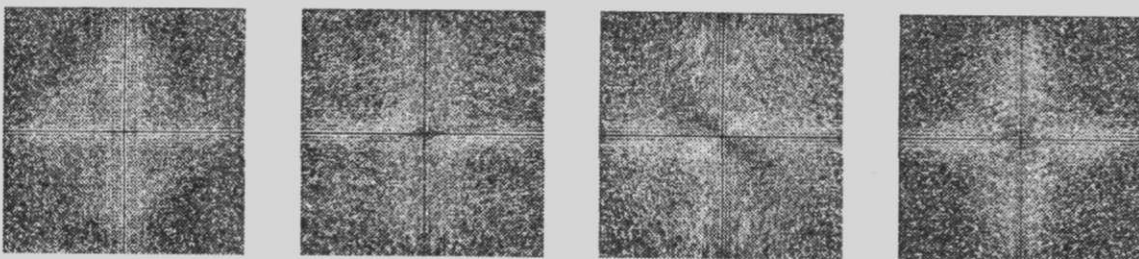
а)



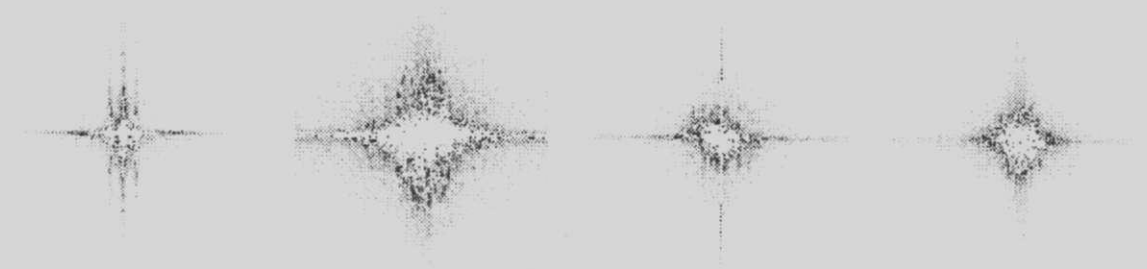
б)



в)



г)



д)

Модели структурных примитивов гидродинамических потоков в различных пространствах обработки

вильной классификации $P_{пр}$. В табл. 1 представлены результаты эксперимента по идентификации изображений структурных примитивов — слоистого, ячеистого, ориентированного ячеистого и вихревого потоков в исходном пространстве, в пространстве амплитудного спектра Фурье, а также в пространствах обработки амплитудного спектра: в пространстве обобщенной огибающей (по Фуко-Гильберту), в пространстве модуля трансформанты Гильберта, в пространстве градиента, в пространстве градиента от модуля трансформанты Гильберта, в пространствах обобщенной частоты и фазы (по Фуко-Гильберту).

Далее в табл. 1 приведены оценки вероятности правильной идентификации типа примитива, полученные в тех же пространствах и условиях. Как видим, показатель Q адекватно оценивает качество работы алгоритма классификации. Наилучшие результаты показали алгоритмы обработки и классификации в пространстве обобщенной фазы (по Фуко-Гильберту).

В табл. 2 приведены оценки качества классификации и вероятности правильной идентификации (классификации), полученные в исходном спектральном пространстве и в пространстве обобщенной фазы по Фуко-Гильберту при различных отношениях сигнал/шум. В качестве шума

Таблица 1

Оценки показателя качества и вероятности правильной идентификации

Тип пространства	исходн. физич. пр-во	спектр. пр-во по Фу-рье	обобщ. ампл. по ФГ	трансф. Гильберта	градиент	градиент тр. Гильберта	обобщ. част. по ФГ	обобщ. фаза по ФГ
Показатель качества $c / ш = \infty$								
ориентированный	1,234	1,277	1,155	1,142	1,217	1,169	1,200	1,918
слоистый	1,249	1,302	1,254	1,252	1,126	1,144	1,306	2,263
ячеистый	1,159	1,227	1,116	1,118	1,128	1,113	1,268	2,033
вихревой	1,153	1,226	1,125	1,117	1,172	1,131	1,179	1,881
Вероятность правильной идентификации, $c / ш = \infty$								
ориентированный	0,75	0,95	0,90	0,90	0,95	0,95	0,95	0,98
слоистый	0,80	0,97	0,95	0,95	0,80	0,85	0,96	0,99
ячеистый	0,70	0,94	0,70	0,80	0,80	0,70	0,95	0,99
вихревой	0,70	0,93	0,75	0,80	0,90	0,75	0,92	0,97

использовались псевдослучайные положительные поля с равномерным распределением интенсивности.

Представленные результаты моделирования и идентификации спектрально-корреляционными методами структурных примитивов гидродинамических потоков позволяют сделать следующие выводы:

— моделирование и идентификация примитивов в спектральной области Фурье-преобразования позволяют повысить качество идентификации по сравнению с идентификацией в исходном (физическом) пространстве.

Таблица 2

Оценки показателя качества и вероятности правильной идентификации при различных отношениях сигнал/шум

Тип обработки	Показатель качества		Вероятность правильной классификации	
	спектральное пр-во	обобщенная фаза по ФГ	спектральное пр-во	обобщенная фаза по ФГ
$c / ш = 10$				
ориентированный	1,20	1,82	0,95	0,98
слоистый	1,22	2,10	0,96	0,98
ячеистый	1,16	1,93	0,91	0,97
вихревой	1,16	1,76	0,91	0,97
$c / ш = 8$				

Продолжение табл. 2

Тип обработ- ки	Показатель качества		Вероятность правильной клас- сификации	
	спектральное признак	обобщенная фаза, π ФГ	спектральное признак	обобщенная фаза, π ФГ
$c // \pi = 10$				
ориентирован- ный	1,16	1,60	0,90	0,97
слоистый	1,17	1,96	0,93	0,96
ячеистый	1,10	1,70	0,85	0,96
вихревой	1,09	1,59	0,84	0,96
$c / \pi = 5$				
ориентирован- ный	1,10	1,49	0,86	0,96
слоистый	1,11	1,73	0,87	0,95
ячеистый	1,07	1,51	0,82	0,94
вихревой	1,06	1,42	0,78	0,94
$c / \pi = 3$				
ориентирован- ный	1,07	1,32	0,82	0,95
слоистый	1,08	1,50	0,83	0,95
ячеистый	1,04	1,33	0,77	0,94
вихревой	1,03	1,25	0,74	0,92
$c / \pi = 2$				
ориентирован- ный	1,04	1,20	0,76	0,90
слоистый	1,05	1,25	0,77	0,91
ячеистый	1,01	1,13	0,68	0,86
вихревой	1,00	1,12	0,65	0,86

ком) пространстве;

— предварительная обработка, в ходе которой вычисляются пространственно-динамические характеристики — распределения обобщенных параметров огибающей, фазы и частоты амплитудного Фурье-спектра примитивов, позволяет добиться высокой помехоустойчивости алгоритмов идентификации за счет существенного сжатия информации и увеличения межклассового расстояния в пространстве классификационных признаков;

— наибольшую эффективность показали алгоритмы идентификации в пространстве распределений обобщенной фазы (по Фуко-Гильберту) амплитудного Фурье-спектра примитивов.

Предложенные методики и информационная технология могут применяться не только для автоматизации исследовательских и проектно-конструкторских работ в энергетическом, транспортном машиностроении, но и в других областях — в частности, в системах метеорологического, экологического, спасательного мониторинга, в системах дистанционного зондирования природных ресурсов, космического наблюдения и других системах анализа фоно-целевой обстановки.

Литература

- ✓ 1. Арсирий В.А., Арсирий Е.А., Власенко В.А. Метод и информационная технология визуализации структур гидродинамических потоков // Труды Одес. политехн. ун-та. — 1997. — Вып. 2.
2. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации / В.Н. Баклицкий, А.М. Бочкарев, М.П. Мусьяков; Под ред. В.Н. Баклицкого. — М.: Радио и связь, 1986.
- ✓ 3. Арсирий Е.А., Власенко В.А. Алгоритмы идентификации характерных признаков потоков папиллярных линий: подход на основе метода корреляционно-экстремальной Гильберт-фильтрации. — 31 с. — Деп. в ГНТБ Украины 23.10.96, №1983-Ук96.