

МОДЕЛЬ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ В ЛИТОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© 2012 г. Е.Н. ИВАШОВ, П.С. КОСТОМАРОВ

Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ
e-mail: Pavel.Kostomarov@gmail.com

Рассмотрим решение задачи морфологической фильтрации одномерной функции $f(x)$ как задачу поиска экстремума функционала штрафа [1]

$$\Phi(f(x), L(x)) = J(f(x), L(x)) + \alpha \times Q(L(x)),$$
$$L(x): \Phi(f(x), L(x)) \rightarrow \min(L(x)),$$

где

$$J(f(x), L(x)) = \sum_{i=0, \dots, N-1} |f(x_i) - L(x_i)|,$$
$$Q(L(x)) = \sum_{i=0, \dots, N-1} (L(x_i) - L(x_{i-1}))^2,$$

$\{x_0, \dots, x_{N-1}\}$ – множество дискретных значений аргумента рассматриваемой функции в ее области определения; критерий Q описывает требование «гладкости» получаемой функции-решения. Заметим, что критерий J в данном случае является критерием минимума нормы разности для нормы L (сумма модулей разности, *манхэттенское расстояние*) вследствие чего критерий Φ является хорошо определенным и соответствующая процедура минимизации дает морфологический проектор в соответствии с доказанным утверждением [2].

Представим функционалы качества в следующей *аддитивно-рекурсивной форме*:

$$J(f(x), L(x)) = J(x_{N-1}):$$
$$J(x_i) = J(x_{i-1}) + \Delta J(x_i, L(x_i)); J(0) = \Delta J(0, L(0)),$$
$$Q(L(x)) = Q(x_{N-1}):$$
$$Q(x_i) = Q(x_{i-1}) + \Delta Q(L(x_{i-1}), L(x_i)); Q(0) = 0,$$
$$\Delta J(x_i, L(x_i)) = |f(x_i) - L(x_i)|,$$
$$\Delta Q(L(x_{i-1}), L(x_i)) = (L(x_{i-1}) - L(x_i))^2.$$

Простейшая реализация решения данной задачи методом динамического программирования (ДП) основана на использовании двумерного *аккумулятора* $A(x, l)$ размера $(N - 1) \times M$, где M – количество элементов дискретизации области значений рассматриваемой функции. Алгоритм отыскания решения выполняется в два прохода и имеет следующий вид.

Прямой проход динамического программирования

Шаг 0. Инициализировать значения крайнего левого столбца аккумулятора:

$$A(0, l) = \Delta J(0, l), l = 0 \dots M - 1.$$

Шаги $i = 1 \dots N - 1$. Определить значение каждого следующего столбца аккумулятора по формуле:

$$A(x_i, l) = \Delta J(x_i, l) + \min_1 \{A(x_{i-1}, t) + \alpha \times Q(t, l)\}, t, l = 0 \dots M - 1.$$

Обратный проход динамического программирования

Шаг 0. Инициализировать значения крайнего правого элемента решения:

$$L(x_{N-1}) = \operatorname{argmin}_1 \{A(x_{N-1}, l)\}, l = 0 \dots M - 1.$$

Шаги $i = N - 2 \dots 0$. Справа налево определить значение всех следующих элементов решения по формуле:

$$L(x_i) = \operatorname{argmin}_l \{A(x_i, l) + \alpha \times \Delta Q(l, L(x_{i+1}))\}, \\ l = 0 \dots M - 1.$$

Конец алгоритма

Описанный алгоритм позволяет также решить задачу *кусочно-постоянной сегментации*, если изменить критерий качества решения на следующий:

$$\Delta Q(L(x_{i-1}), L(x_i)) = \{0, \text{если } L(x_{i-1}) = L(x_i), 1, \text{если } L(x_{i-1}) \neq L(x_i)\}.$$

Иными словами, штрафной функционал качества решения Q в этом случае будет иметь значение, равное числу переходов от одной области постоянного значения к другой. Если при этом выбрать весовой коэффициент α достаточно большим, то любое изменение значения $L(x)$ будет оплачиваться столь дорогим «штрафом», что оно окажется оправданным лишь при достаточно сильном соответствующем уменьшении критерия соответствия $J(f(x), L(x))$.

Выбор критерия соответствия J также может отличаться от приведенного выше [1].

Монотонный проектор *ДП-открытие* определяется функционалом

$$J_{open}(f(x), L(x)) = \{+\infty, \text{если } \exists x: f(x) < L(x), -\|L(x)\|^2, \text{если } f(x) \geq L(x)\}.$$

Монотонный проектор *ДП-закрытие* определяется функционалом

$$J_{close}(f(x), L(x)) = \{+\infty, \text{если } \exists x: f(x) > L(x), \|L(x)\|^2, \text{если } f(x) \leq L(x)\}.$$

Данные критерии являются критериями экстримальной обобщенной нормы.

На Рис. 1 представлены примеры применения одномерных монотонных операторов проективной морфологической фильтрации с различными параметрами сглаживания [1].

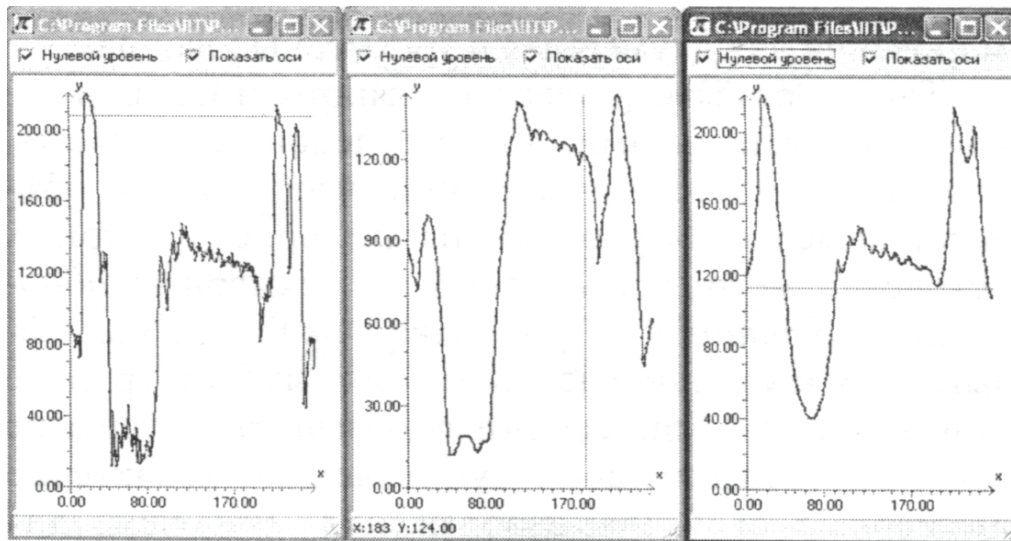


Рис. 1. Слева – исходная функция, далее результаты применения операторов ДП-фильтров.

На Рис. 2 представлены примеры применения одномерных операторов проективной морфологической сегментации с различными параметрами сглаживания.

Проведенные численные эксперименты также подтвердили, что если к любой одномерной функции $f(x)$ применить среднеквадратичную ДП-фильтрацию или ДП-фильтрацию по критерию минимума расстояния с некоторым α , то любая дальнейшая ДП-фильтрация с тем же α более не изменяет полученное решение. То есть существует такое множество «стабильных» функций, для которых обе монотонные α -проекции равны среднеквадратичной α -проекции и равны самой исходной функции:

$$f(x) = \operatorname{Pr}(f(x), J_{LSE}, Q, \alpha) = \operatorname{Pr}_0(f(x), J_{open}, Q, \alpha) = \operatorname{Pr}_c(f(x), J_{close}, Q, \alpha).$$

Вычислительная реализация данной процедуры также осуществлялась методом динамического программирования.

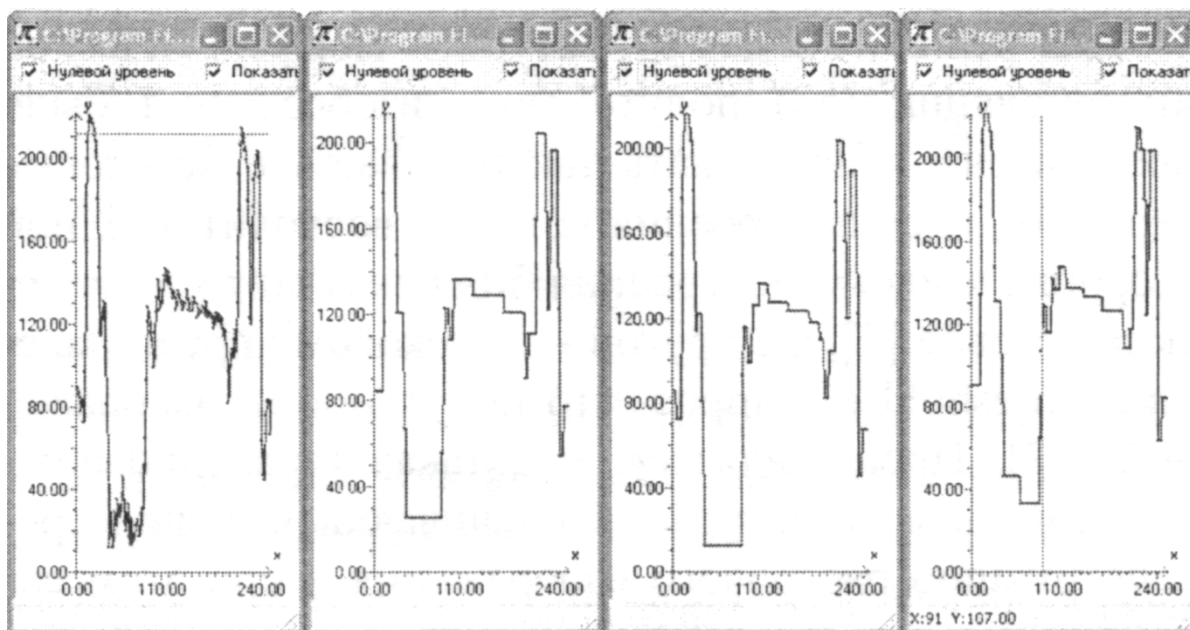


Рис. 2. Слева – исходная функция, далее результаты применения операторов ДП-сегментации.

Рассмотрим практическое применение фильтрации и сегментации в иммерсионной ультрафиолетовой литографии (ИУФЛ).

OPC (Optical Proximity Correction – оптический эффект близости) – это комплекс методов RET (Resolution Enhancement Techniques – метод улучшения разрешающей способности), заключающийся в корректировке фильтрации и сегментации топологии СБИС на стадии проектирования [3, 4]. Топология разбивается на примитивы (фрагментируется), которые корректируются либо по заранее определенным правилам «rule based OPC» (ROPC), либо по результатам литографического моделирования «model based OPC» (MOPC).

MOPC – более сложный метод, который включает литографическое моделирование, полученных после фрагментации геометрических примитивов (Рис. 3). Результат такого моделирования (воздушное изображение или даже профиль резиста) сравнивается с первоначальной топологией, и, в случае появления несоответствия, примитив корректируется фильтруется в этих местах. Этот процесс итерационно повторяется до момента выполнения условий оптимальности при заданных допусках.

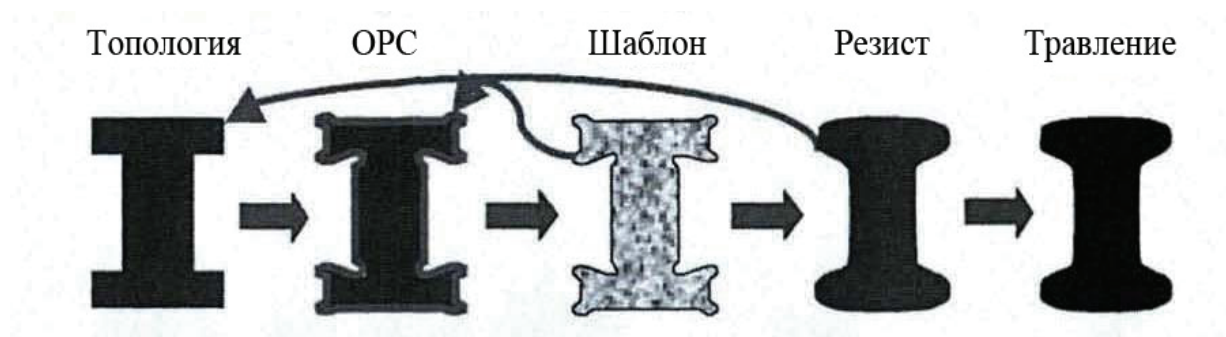


Рис. 3. Пример применения литографического моделирования MOPC

Применение MOPC позволяет существенно расширить возможности литографического процесса [3, 4], однако является сложным в использовании, требующим наличия специальных дорогостоящих САПР и вычислительных кластерных комплексов.

В случае ROPC топология анализируется при помощи САПР на предмет соответствия заранее определенным правилам расстановки корректирующих элементов (Рис. 4). Количество правил зависит от типа топологии (память, логика), топографии (рельефа нижележащих слоев), количества типов фигур OPC, их типоразмеров и применяемого технологического оборудования.



Рис. 4. Пример применения правил корректировки оптических эффектов близости ROPC.

Измерение размеров в «узких» местах примитивов, выбранного базиса, позволяет получить достаточный объем информации для описания литографического процесса. Модель литографического процесса, однажды полученная на основании этих данных, позволяет проводить точную коррекцию любых дополнительных более сложных геометрий.

Выводы

1. Дано формальное описание обобщенной проективной морфологии. Приводится краткая сводка ее свойств и способов ее применения в задачах анализа изображений. Исследованы различные конструктивные схемы построения проективных операторов анализа цифровых данных.

2. Задачу коррекции топологии при помощи ROPC можно разделить на три крупные подзадачи:

- анализ топологии СБИС на предмет определения базиса геометрических примитивов, которые требуют коррекции;
- модельное или экспериментальное определение состава, типов и параметров фигур OPC, необходимых для выбранного базиса примитивов;
- внедрение ROPC в процесс проектирования СБИС, т.е. разработка программных средств коррекции ее топологии по определенным в первых пунктах правилам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Визильтер Ю.В.* Обобщенная проективная морфология / Компьютерная оптика. – 2008, т. 32, № 4, с. 384-399.
2. *Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю.* Сравнение и локализация фрагментов изображений с использованием проективных морфологий. // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2008, № 2, с. 14-22.
3. *Родионов И.А.* Методы коррекции оптических эффектов близости // Научные технологии и интеллектуальные системы 2007: Сборник трудов 9-ой Всероссийской научно-технической конференции. – М., 2007, с. 174-178.
4. *Родионов И.А.* Исследование влияния параметров технологического процесса литографии на минимальные критические размеры элементов, получаемых на кремниевой пластине // Научные технологии и интеллектуальные системы 2007: Сборник трудов 9-ой Всероссийской научно-технической конференции. – М., 2007, с. 219-224.