

РАДІОФІЗИКА

РАДИОФИЗИКА

RADIOPHYSICS

УДК 621.391:621.396

О. С. Антропов, О. О. Дробахин

ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ НЕКВАДРАТИЧНОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

Рассмотрена задача обработки радиофизических изображений финитных объектов на основе алгоритмов неквадратичной регуляризации с целью подавления аддитивного гауссовского шума и восстановления размытых изображений финитных объектов. Сформулированы основные критерии решения задачи для случая кусочно-постоянных изображений с использованием метода минимума длительности. Эффективность подхода проверяется путем численного моделирования и обработки экспериментальных данных, представленных спутниковыми изображениями земной поверхности и радиофизическими изображениями финитных объектов.

ВСТУПЛЕНИЕ

Задача восстановления сигналов и изображений является достаточно общей и часто возникает в различных практических приложениях. При этом может рассматриваться постановка этой задачи, подразумевающая глобальное восстановление изображения или локальную обработку изображения, ориентированную на повышение визуального качества изображения, например, путем его фильтрации с помощью соответствующих масок. Подробное описание методов локальной фильтрации может быть найдено в [1]. В этой работе мы ставим задачу обработки изображения с целью повышения качества оценки параметров интересующих объектов, например, точности оценки их размеров, и будем решать глобальную задачу деконволюции в присутствии аддитивного гауссовского шума. Такая задача традиционно решается с помощью многочисленных алгоритмов инверсной фильтрации, подробный анализ которых приведен в [2]. К сожалению, неустойчивость подобных алгорит-

мов к влиянию шумов, и, в первую очередь, часто присутствующая неопределенность математического описания оператора искажения регистрируемого изображения серьезно препятствует их практическому применению. И, если первое указанное затруднение можно устранить путем построения соответствующего регуляризирующего алгоритма по схеме Тихонова [3], то для решения второй задачи необходима дополнительная априорная информация о характеристиках искажающей системы, помех и шумов, либо о характеристиках интересующего объекта с целью восстановления такой информации. Поскольку исследуемые объекты финитны, т. е. их изображения имеют точечный или кусочно-постоянный характер, и отсутствуют какие-либо сведения о системе искажения изображения, следует использовать этот факт для синтеза оптимального алгоритма восстановления зашумленных и/или искаженных изображений. Заметим, что метод квадратичной регуляризации также может быть использован, но при обработке изображения с целью удаления аддитивного шума будет внесено искажение в виде дополнительного размытия изображения. В последнее время [4] разработан целый ряд подходов, использующих специальные весовые функции при решении задачи восстановления сигналов и изображений, имеющих кусочно-постоянную структуру, и носящих название методов полуквадратичной регуляризации. Главным недостатком этих методов является их эмпиричность и отсутствие на данный момент практических рекомендаций по эффективному их применению. В этой работе мы предлагаем использовать информационные возможности ме-

тогда минимума длительности [5, 6] для построения соответствующего неквадратичного регуляризующего алгоритма. Используя основные идеи классического алгоритма Тихонова, мы модифицируем регуляризующий член в суммарном функционале с учетом специфики решаемой задачи и учитывая конечность либо пространственной протяженности восстанавливаемого объекта, либо его первой производной.

1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для простоты изложения вначале рассмотрим постановку задачи восстановления одномерного сигнала. Пусть для измеренных данных некоторой неизвестной функции $\tilde{u}(t)$ задана следующая аппроксимация $u_\delta(t) = \|\tilde{u}(t) - u_\delta(t)\|_{L_2} \leq \delta$. Следует найти такую функцию $\tilde{u}(t)$, для которой выполняется условие $\|\tilde{u}(t) - u_\delta(t)\|_{L_2} \leq \delta$ (это позволяет учесть наличие шума), и при этом искомая функция имеет конечную длительность. По аналогии с работами [7, 8], вместо квадратичной регуляризации, использующей энергию невязки, предлагается применение неэнергетического регуляризующего члена, учитывающего временную длительность или, в контексте рассматриваемой задачи, пространственную протяженность искомого решения. В качестве такой регуляризующей функции предлагается использовать функцию «квазидлительности» сигнала $u(t)$:

$$D_{\alpha, \beta}[u(t)] = \int_{-T/2}^{T/2} \{[|u(t)/\lambda|^2 + \alpha^2]^\beta - \alpha^{2\beta}\} dt, \quad (1)$$

где α, β – параметры функционала $D_{\alpha, \beta}$, которые можно выбрать так [5, 7]: $\alpha \approx \sigma/\lambda$, где σ^2 – дисперсия шума; $\beta = 1/16$; $\lambda = \max\{|u(t)|\}$. Тогда можно сформулировать следующую постановку задачи восстановления одномерного сигнала в виде задачи безусловной оптимизации, представленной функционалом вида:

$$J_{\alpha, \beta}(\tilde{u}) = \|\tilde{u}(t) - u_\delta(t)\|_{L_2}^2 + \gamma D_{\alpha, \beta}\left(\frac{d}{dt}\tilde{u}(t)\right), \quad (2)$$

который нужно минимизировать, где γ – параметр регуляризации. Первый член функционала (2) – невязка между искомой и измеренной функциями, второй член является регуляризующим. Функционал $J_{\alpha, \beta}$ использует квазидлительность производной решения в качестве неквадратичного регуляризующего члена.

Для случая обработки изображения $u(x, y)$ можно задать функцию «пространственной квазипротяженности» вида

$$D_{\alpha, \beta}[u(x, y)] = \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} \left\{ [|u(x, y)/\lambda|^2 + \alpha^2]^\beta - \alpha^{2\beta} \right\} dx dy. \quad (3)$$

Так как при реконструкции кусочно-постоянного изображения $u(x, y)$ необходимо учитывать требование конечной протяженности перепадов яркости между отдельными сегментами изображения, в частности между интересующим объектом и фоном (т. е. перепады яркости должны быть как можно более резкими), в качестве аргумента функции (3) можно использовать изображение, содержащее границы обрабатываемого изображения. В практике цифровой обработки изображений [1] с целью выделения границ на изображении применяются градиентные методы, использующие для аппроксимации первой производной конечно-разностные схемы, которые реализуются с помощью соответствующих масок свертки. Следует заметить, что для работы с границами могут быть использованы и вторые производные (оператор Лапласа), но использование градиента в большинстве практических случаев достаточно. Обозначим вектор градиента яркости изображения $u(x, y)$ как $\vec{G}(x, y)$. Тогда функционал (3) для случая обработки изображения переписывается в виде

$$J_{\alpha, \beta}(\tilde{u}) = \|\tilde{u}(x, y) - u_\delta(x, y)\|_{L_2}^2 + \gamma D_{\alpha, \beta}\left(|\vec{G}(x, y)|\right). \quad (4)$$

Решение, получаемое минимизацией функционала (4), следуя [8] будем называть решением по минимуму протяженности первой производной изображения (РМППИ). Предыдущее численное моделирование [7, 8] показало, что можно учесть интенсивность присутствующего на изображении аддитивного шума путем варьирования вспомогательных параметров α и β функционала $J_{\alpha, \beta}$. Однако, при выборе очень больших значений α можно получить решение, аналогичное получаемому с помощью стандартной регуляризации. Поиск решения трудной задачи нелинейной оптимизации проводится с помощью численных методов. В работе [7] было отмечено, что для класса обратных задач, подобных рассматриваемой, существует некоторое оптимальное значение параметра γ , такое что не будет получено ни вырожденное нулевое решение (для очень больших γ), ни решение без регуляризации (для случая малых γ).

2 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для детального исследования возможностей применения предложенной техники восстановления изображений проведем численное моделирование фильтрации зашумленных и восстановления кусочно-постоянных как изображений, так и одномерных сиг-

налов, что соответствует случаю построчной обработки изображения. Будем проводить сравнение результатов обработки с результатами, получаемыми стандартным квадратичным методом регуляризации.

Суперпозиция прямоугольных импульсов, искаженная аддитивным гауссовым шумом с SNR, равным +15 дБ, показана на рис. 1, а. Результаты восстановления сигнала при использовании стандартной регуляризации и полученные минимизацией функционала (2) для оптимальных значений параметров регуляризации, показаны на рис. 1, б и 1, в, соответственно. При этом были использованы следующие значения вспомогательных параметров функционала (2): $\alpha = 0,1$, $\beta = 1/16$, $\lambda = 1,16$. Легко видеть, что стандартный подход внес большое искажение, особенно в местах резкого изменения амплитуды сигнала, тогда как предложенный подход дает хорошую оценку сигнала, при этом среднеквадратическое отклонение (СКО) восстановленного сигнала от истинного не превышает 0,8 %.

Рассмотрим качество восстановления предложенным способом кусочно-постоянного сигнала (рис. 1) после его прохождения через инвариантную к сдвигу искажающую систему с ограниченной полосой пропускания и добавления аддитивного шума с SNR, равным +15 дБ. В этом случае помимо шумового ис-

кажение наблюдается искажение краев сигнала и появление искажающих осцилляций из-за потери высоких частот в спектральной области сигнала (рис. 2, а). Полученные результаты восстановления имеют СКО от истинного сигнала менее 4 %, что говорит о высокой эффективности подхода, при этом форма сигнала и временное расположение скачков амплитуды практически идеально соответствуют исходному неискаженному сигналу. Значения вспомогательных параметров функционала (2) выбраны так: $\alpha = 0,1$, $\beta = 1/16$, $\lambda = 1,03$. Также проведем моделирование задачи минимизации функционала (2), выбрав в качестве исходного сигнала априорно гладкий сигнал типа гауссовского импульса в отсутствие шума. Результаты минимизации с использованием таких значений вспомогательных параметров: $\alpha = 0,001$, $\beta = 1/16$, и двух значений гиперпараметра γ : 0,3 и 0,8 показаны на рис. 2, в. Можно видеть, что варьирование значений параметра регуляризации может приводить к эффекту различного квантования исходно гладкого сигнала, и, в предельном случае, к бинаризации или полному подавлению сигнала.

Перейдем от случая построчной обработки к решению задачи (4). Модельное изображение нескольких финитных объектов, расположенных на сером фоне, искажено интенсивным гауссовым шумом с SNR

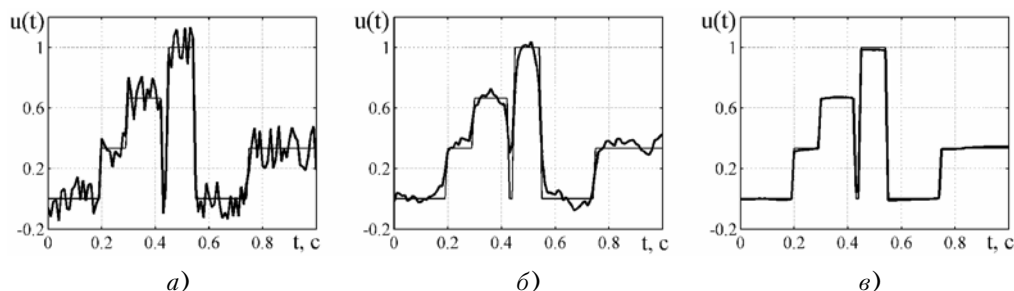


Рисунок 1 – Обработка кусочно-постоянного сигнала:

а – исходный сигнал, искаженный аддитивным гауссовским шумом (— — исходный сигнал, — — зашумленный), б – результат восстановления стандартным методом регуляризации (— — истинный сигнал, — — восстановленный), в – результат восстановления предложенным методом регуляризации (— — истинный сигнал, — — восстановленный)

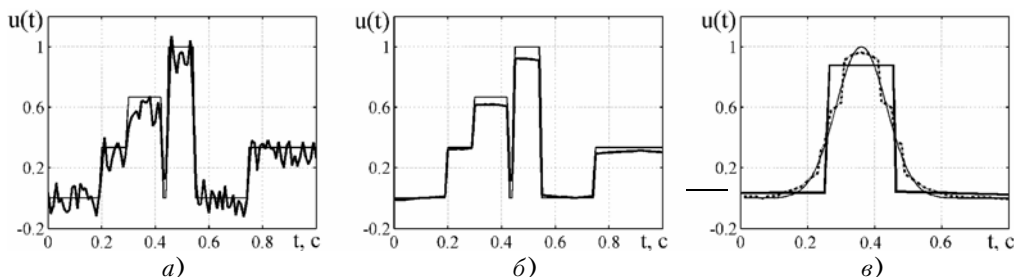


Рисунок 2 – Обработка сигнала искаженного системой с ограниченной полосой пропускания в присутствии шума:

а – формирование изображения (— — исходный сигнал, — — искаженный сигнал), б – результат восстановления (— — истинный сигнал, — — восстановленный), в – обработка гауссовского сигнала (— — исходный сигнал, - - - - восстановленный сигнал при $\gamma = 0,3$, — — восстановленный сигнал при $\gamma = 0,8$)

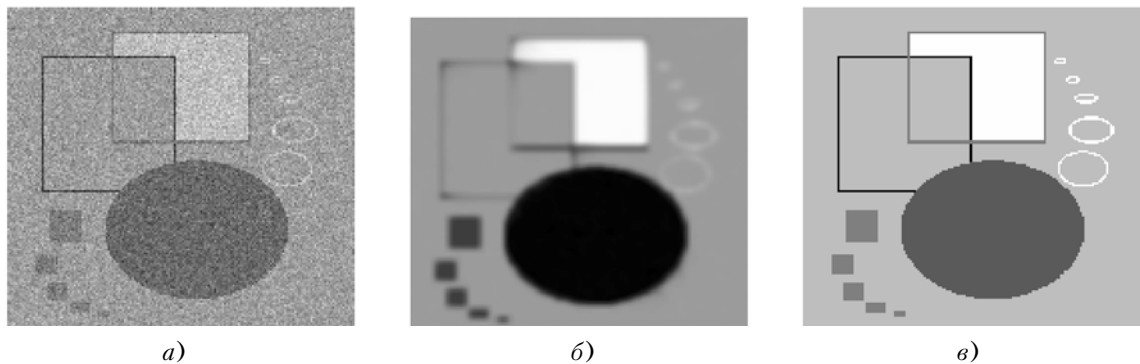


Рисунок 3 – Обработка модельного кусочно-постоянного изображения:
 а – зашумленное изображение, б – восстановленное стандартным методом изображения,
 в – восстановленное предложенным методом изображения

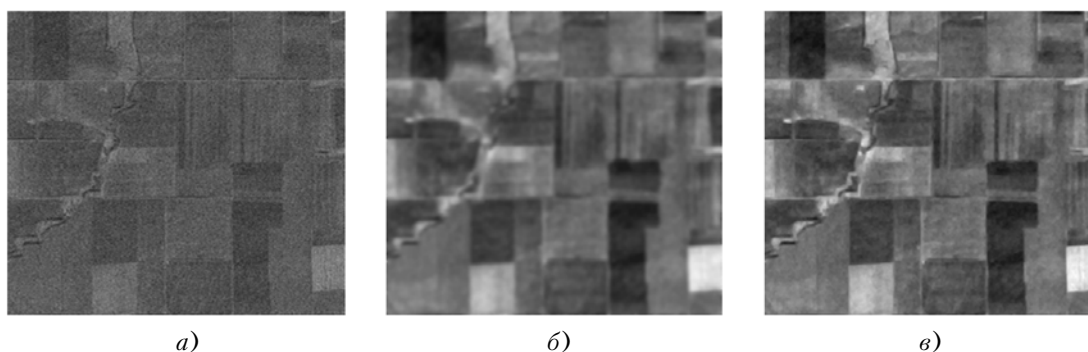


Рисунок 4 – Обработка реального спутникового снимка:
 а – зашумленное изображение, б – восстановленное стандартным методом изображения,
 в – восстановленное предложенным методом изображения

+15 дБ (рис. 3, а). Результаты восстановления сигнала при использовании стандартной квадратичной регуляризации и минимизацией функционала (4) для оптимальных значений параметров регуляризации, показаны на рис. 2, б и 2, в, соответственно. При этом были использованы следующие значения вспомогательных параметров функционала (1): $\alpha = 0,1$, $\beta = 1/16$, $\lambda = 1$. Результаты использования квадратичной регуляризации имеют низкое визуальное качество, и, помимо этого, некоторые тонкие границы вообще отсутствуют, тогда как предложенный метод проводит восстановление без существенных искажений.

4 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В качестве примера кусочно-постоянного изображения использован спутниковый снимок местности в окрестности р. Кубань (рис. 4, а), искаженный аддитивным шумом. Метод стандартной регуляризации внес существенное размытие в восстановленное изображение (рис. 4, б), тогда как РМППИ (рис. 4, в)

позволило сохранить мелкие детали, различимые лишь на исходном изображении.

Рассмотрим задачу оценивания параметров объектов по их радиофизическим изображениям. В качестве исследуемых объектов были использованы 3 медные полоски, расстояние между центрами полос составило 50 мм, их ширина была 1, 2 и 4 мм соответственно. Изображение было получено путем линейного сканирования объектов с последующим синтезированием в каждой точке временного сигнала по данным многочастотного измерения в полосе 38–52 ГГц согласно процедуре, описанной в [9]. В синтезированных таким образом изображениях ось ординат соответствует изменению позиции при сканировании, а ось абсцисс – изменению времени в синтезированной временной характеристике отражения. Целью проведения измерений было установить возможность оценивания пропорций между измеряемыми объектами, что при наличии априорной информации о размерах опорного объекта даст возможность провести оценку ширины полосок. Обработка исходного изображения (рис. 5, а, б) после проведения весовой обработки в окрестности соответствующих информативных пиков

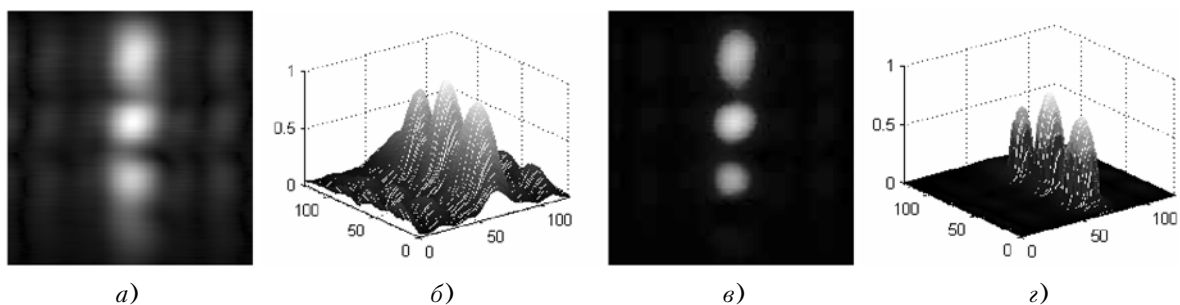


Рисунок 5 – Обработка СВЧ-изображения металлических полосок:

a – исходное изображение в градациях серого, *б* – отвечающая исходному изображению поверхность значений яркостей пикселей, *в* – обработанное изображение в градациях серого, *г* – отвечающая обработанному изображению поверхность значений яркостей пикселей

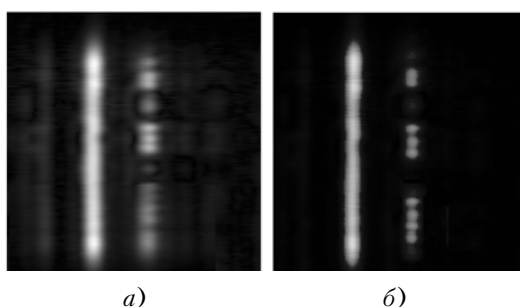


Рисунок 6 – Обработка изображения за преградой:

a – исходное изображение, *б* – результат обработки предложенным методом

дала оценку расстояния между центрами полос: 47 и 54 мм, при этом оценка ширины полос затруднена и пропорции очевидно не соблюдаются. После восстановления изображения предложенным методом (рис. 5, *в*, *г*) была улучшена оценка межцентровых расстояний до 49 и 52 мм, соответственно, и стала возможной оценка пропорции между шириной полосок. Если провести оценку последней по числу пикселей ненулевой амплитуды в окрестности центров соответствующих пиков, можно получить оценку отношений ширины полосок 1,0 : 1,76 : 3,51. Таким образом были получены оценки по данным реального эксперимента, дальнейшее улучшение оценки может быть получено после проведения оценивания функции рассеяния точки по результатам нескольких измерений и решения соответствующей обратной задачи. Наличие максимальной амплитуды отражения у среднего объекта объясняется явлением дифракции.

Поскольку с практической точки зрения при использовании СВЧ интроскопии важен случай расположения интересующего объекта за преградой, проведем обработку изображений полосок за листом диэлектрика (рис. 6, *a*). Полоски расположены на расстоянии 60 мм одна от другой, их ширина равна 2, 5 и 12 мм, соответственно. Видно, что в случае измерения более широких полосок наблюдается формирова-

ние нескольких центров отражения в пределах одной полосы, но и для этого случая предложенный метод привел к повышению качества изображения (рис. 6, *б*), устранив «мешающие» переотражения и артефакты.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод неквадратичной регуляризации с использованием метода минимума длительности позволяет повысить качество восстановления кусочно-постоянных изображений по сравнению с классическим методом регуляризации по схеме Тихонова за счет эффективной обработки границ объектов на изображении. Функционал минимума «квазипротяженности» градиента исходного изображения используется в качестве регуляризирующего члена в предложенном методе восстановления изображений. Работоспособность и эффективность подхода проверена путем численного моделирования кусочно-постоянных сигналов и изображений и проверки на реальных изображениях радиофизической природы.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Pratt W. K. Digital image processing / W. K. Pratt. – New York : John Wiley & Sons, 2001. – 723 p.
2. Василенко Г. И. Восстановление изображений / Г. И. Василенко, А. М. Тараторин. – М.: Радио и связь, 1986. – 301 с.
3. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1974. – 224 с.
4. Nikolova M. Efficient reconstruction of piecewise constant images using nonsmooth nonconvex minimization / M. Nikolova, M. Ng, S. Zhang, W.-K. Ching // SIAM Journal on Imaging Sciences. – 2008. – № 1. – P. 2–25.
5. Вовк С. М. Метод минимума длительности для восстановления финитных сигналов / С. М. Вовк, В. Ф. Борулько // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1991. – № 8. – С. 66–69.
6. Вовк С. М. Определение параметров синусоидального сигнала, искаженного неизвестными импульсами / С. М. Вовк, О. С. Антропов, В. Ф. Борулько // Известия вузов. Радиоэлектроника. – № 9. – 2008. – С. 40–51.
7. Антропов О. С. Метод минимума пространственной протяженности для определения диаграммы направленности антенны по измерениям ближнего поля /

- О. С. Антропов, В. Ф. Борулько, С. М. Вовк // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2008. – № 1. – С. 9–12.
8. Antropov O. S. Edge-Preserving Piecewise-Constant Image Restoration via Method of Minimum of Extension / O. S. Antropov // Proceedings of IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium. – Kiev, 2008. – P. 151–154.
9. Alekseev V. V. Microwave introscopy using multifrequency measurements and transversal scan / V. V. Alekseev, O. O. Drobakhin, Ye. V. Kondrat'ev, D. Yu. Saltykov // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2006. – № 2. – P. 24–26.

Надійшла 14.10.2008

Розглянута задача обробки радіофізичних зображень фінітних об'єктів на основі алгоритмів неквадратичної регуляризації з метою зменшення адитивного гауссовського шуму та відновлення розмитих зображень фінітних об'єктів. Сформульовані основні критерії розв'язку цих задач для випадку кусково-постійних зображень з

використанням методу мінімуму тривалості. Ефективність підходу перевіряється за допомогою чисельного моделювання та обробки експериментальних даних, що представлені супутниковими знімками земної поверхні та радіофізичними зображеннями фінітних об'єктів.

Problem of radiophysical images processing on the basis of nonquadratic regularization algorithms with the purpose of additive noise suppression and restoration of blurred images of finite objects is considered. Basic criteria for problem solution are formulated for the case of piecewise-constant images using method of minimum of duration. Effectiveness of proposed approach is verified by means of through numerical simulations and experimental processing of data represented by satellite images of Earth surface and radiophysical images of finite objects.

УДК 681.3.+681.5.007

В. М. Гусятин, Я. В. Чаговец, Д. Г. Кожушко

МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ ТЕКСТУР ДЛЯ СИНТЕЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБРАТНЫМ ТРАССИРОВАНИЕМ ЛУЧЕЙ. ОДНОМЕРНЫЙ СЛУЧАЙ

Предложен метод фильтрации текстур для синтеза изображений методом обратного трассирования. Суть метода заключается в выполнении фильтрации в плоскости текстуры. Предложены функции аппроксимации реальной проекции фильтра на плоскость текстуры.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим одномерный случай фильтрации текстур. На рис. 1 представлены геометрические элементы задачи. Аналогом плоскости текстуры в одномерном случае является прямая текстуры, а аналогом экрана – прямая экрана. Прямая текстуры задана в базовой системе координат XU (g -с/к) на оси X . Текстура представлена функцией $T(X_T)$, заданной на прямой текстуры. Здесь X_T – текстурная координата. Задан наблюдатель (центр проекции точка h), с которым связана система координат UV (v -с/к), точка h совпадает с началом этой с/к. $\vec{h} = \{x_h, y_h\}$ – радиус-вектор центра проекций h в g -с/к, задает положение центра проекций относительно g -с/к.

Экран задан в v -с/к вдоль оси координат Y_s , параллельной оси V на расстоянии от нее координатами $\frac{1}{\rho}$, где ρ – шаг пикселей на экране. Угол α отсчитывается от положительного направления оси OX g -с/к против часовой стрелки до положительного на-

правления оси OX v -с/к. Из центра проекции h проведем луч через точку на прямой экрана с координатами $\left\{\frac{1}{\rho}, Y_v\right\}$ в v -с/к, где Y_v – экранная координата, до пересечения с прямой текстуры в точке p_T с координатами $\{X_T, 0\}$. Определим две функции, ус-

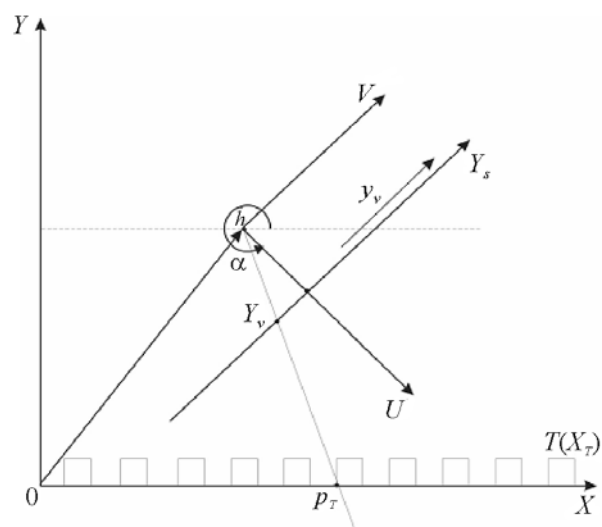


Рисунок 1 – Геометрические элементы задачи