УДК 519.628:517.958

РЕГУЛЯРНЫЕ АЛГОРИТМЫ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. Л. Агеев[1], М. Е. Коршунов[1]

Рассматривается задача навигации по искаженным радиолокационным изображениям. Искажение изображения описывается интегральным уравнением Фредгольма первого рода типа свертки и статистическим шумом. Для решения задачи навигации необходимо определение с высокой точностью координат точки, из которой формируется изображение, путем его сопоставления с эталонным изображением, сформированным на основе карты местности. Для улучшения точности определения координат предложен новый регуляризирующий алгоритм. Проведены методические расчеты, демонстрирующие работу алгоритма на модельных примерах. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 06–01–00116).

Ключевые слова: ориентирование, радиолокация, интегральные уравнения Фредгольма первого рода, регуляризация.

1. Введение. Во многих областях науки и техники возникает задача анализа изображений с целью выделения на них положений фрагментов, связанных с “объектами” различного типа. В дальнейшем “объектом” будем называть соответствующий фрагмент изображения.

Обычной трудностью для такого рода задач является наличие шума и различного рода искажений. Требуется провести повышение контрастности, т.е. подавление шума и компенсацию искажений. Регуляризирующие алгоритмы решения задачи повышения контрастности изображений хорошо известны [1, 2]. Однако детальный анализ проблемы показывает, что, как правило, “естественная” постановка задачи анализа изображения не вписывается в существующую математическую теорию [3]. Во первых, пространство искомых функций часто содержит обобщенные функции (см. раздел 2 настоящей статьи). Во вторых, дальнейшее использование регуляризованного решения для анализа изображения порождает новые, неклассические требования качества к используемым методам. В настоящее время для многих задач, возникающих при анализе изображений, нет исчерпывающего формального описания естественного класса искомых функций, что создает существенные трудности при построении методов повышения контрастности.

В настоящей статье рассматривается частный случай задачи повышения контрастности изображений, связанный с задачей навигации по радиолокационным изображениям [4, 5]. В работе сформулированы некоторые формальные требования к виду рассматриваемых изображений (описанию класса искомых функций), предложены новые методы решения задачи повышения контрастности и анализа радиолокационных изображений, а также рассмотрены результаты методических расчетов с точки зрения новых требований к качеству алгоритмов.

В разделе 2 приведена постановка задачи навигации по радиолокационным изображениям. Алгоритмы обработки изображений и результаты методических расчетов обсуждаются в разделе 3.

2. Постановка задачи. В задаче навигации по радиолокационным изображениям (РЛИ) конечной целью является уточнение координат точки, из которой формируется РЛИ. Такое уточнение обычно производится путем сопоставления РЛИ с эталонным изображением, сформированным на основе карты местности для заранее заданного положения радиолокатора, при этом наиболее важную роль играют различного рода особенности рассматриваемой функции (изображения), соответствующие реальным объектам на местности. Будем называть такие объекты ориентирами.

Формирование РЛИ. Рассмотрим более подробно, что представляют из себя РЛИ и эталонное изображение, а также их связь между собой и со сканируемым участком местности. Предполагается, что в декартовой системе координат X, Z задан прямоугольник (рис. 1), для которого известна не только карта местности, но и отражающие характеристики всех объектов, лежащих в этом прямоугольнике.

[1] Институт математики и механики УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 16, 620219, Екатеринбург; e-mail: ageev@imm.uran.ru, korshunov@imm.uran.ru

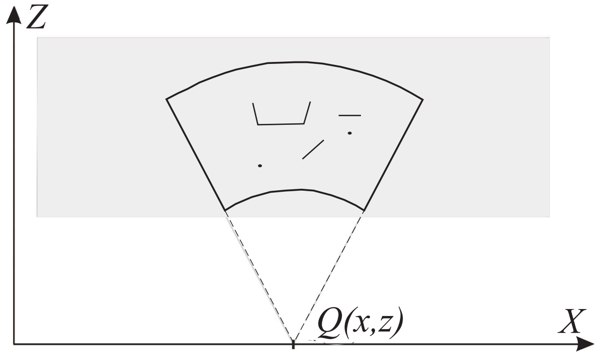


Рис. 1. Идеальное изображение в декартовой системе координат, темный цвет отвечает большей интенсивности сигнала

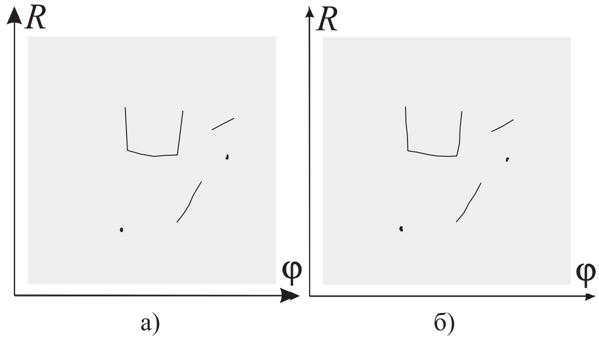


Рис. 2. Идеальные изображения: а) из точки $Q_0(0,0)$ под углом $\alpha_0 = 0$; б) из точки $Q'(\Delta x, \Delta z)$ под углом $\alpha' = \Delta\alpha$, где $\Delta x = -100$, $\Delta z = -100$, $\Delta\alpha = -3°$

Радиолокатор характеризуется положением (точкой наблюдения) $Q_0(x_0, z_0)$ и направлением оси сканирования, заданным углом α_0 (на рис. 1 $x_0 = z_0 = 0$, $\alpha_0 = 0$ и ось радиолокатора совпадает с осью Z). Идеальное изображение является функцией $g(R, \varphi)$, где (R, φ) — полярная система координат с центром в точке положения радиолокатора. Радиолокатор получает сигнал от части поверхности, заключенной в криволинейной трапеции.

На рис. 1 изображена модельная ситуация, когда на некоторой поверхности, дающей отражение малой интенсивности, расположено пять объектов (трехзвенная ломаная, два отрезка и две точки), дающих отражение большей интенсивности и выделяющихся на фоне сигнала, отраженного от подстилающей поверхности. Предполагается, что размеры заданного прямоугольника по осям X и Z соответственно равны -4000, 4000 и 2000, 4000. Тогда идеальным изображением будет функция $g(R, \varphi)$, переведенная в координаты R, φ из координат x, z (рис. 2). Если изображение формируется из точки $Q^{'}$ с координатами $(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z)$ под углом $\alpha' = \alpha_0 + \Delta\alpha$, то предполагается, что изображение преобразуется по известным формулам [4, 5], связанным с переходом к новой системе координат (аргументы функции $g(R, \varphi)$ переводятся в новую систему координат с новым направлением α'). На рис. 2 изображен пример формирования модельного изображения из двух разных точек с разными углами направленности радиолокатора α. В частности, отметим, что картинки а) и б) на рис. 2 несколько отличаются.

В настоящей работе нас не занимают детали достоверного моделирования функции $g(R, \varphi)$ (более реалистичное моделирование проводилось, например, в [4, 5]). Достаточно, чтобы по имеющейся карте можно было вычислять положения изображений всех объектов-ориентиров в зависимости от положения точки наблюдения Q' и угла α'.

Если бы мы знали идеальное изображение (рис. 2), то задача заключалась бы в том, чтобы определить Δx, Δz и $\Delta\alpha$. Ясно, что при наличии на изображении достаточного числа хорошо выделяемых объектов-ориентиров задача сводится к геометрическому сопоставлению примитивов на плоскости. К сожалению, вместо идеального изображения $g(R, \varphi)$ нам известно размытое и зашумленное изображение $f(R, \eta)$. Уравнение, связывающее измеряемую функцию $f(R, \eta)$, т.е. РЛИ, и идеальное изображение $g(R, \varphi)$, приведено ниже. Задача состоит в построении методов анализа РЛИ с целью дальнейшего определения смещений Δx, Δz и $\Delta\alpha$.

Уравнение РЛИ прямого видения. Идеальное изображение представляет собой неотрицательную функцию $g(R, \varphi)$ двух переменных $R \in [c, d]$ и $\varphi \in (-\infty, \infty)$. Нас будет интересовать случай, когда можно считать, что по переменной R функция известна практически точно, в то время как по переменной φ изображение сильно "смазано" (известна свертка истинного изображения с аппаратной функцией $K(R, \varphi)$ [4, 5]) и вместо истинного изображения измеряется функция $f(R, \eta)$. Для восстановления функции $g(R, \varphi)$ необходимо решить интегральное уравнение Фредгольма первого рода типа свертки, зависящее от параметра R:

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(\varphi - \eta) g(R, \varphi)\, d\varphi = f(R, \eta), \quad \eta \in (-\infty, \infty), \quad R \in [c, d]. \tag{2.1}$$

Аппаратная функция K моделировалась [5] с помощью формулы

$$K(\varphi) = \left[\frac{\sin(\rho\varphi)}{\rho\varphi}\right]^{\gamma}, \tag{2.2}$$

где $\rho = 20$ и $\gamma = 2$. Особенность уравнения (2.1) состоит в том, функция $K(\varphi)$ не зависит от R.

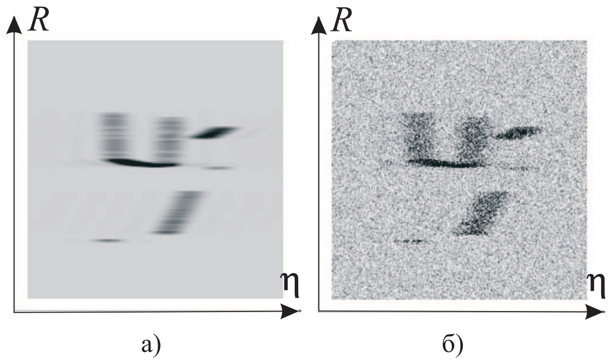


Рис. 3: а) функция $f(R,\eta)$; б) функция f^{σ}, шум 15 %

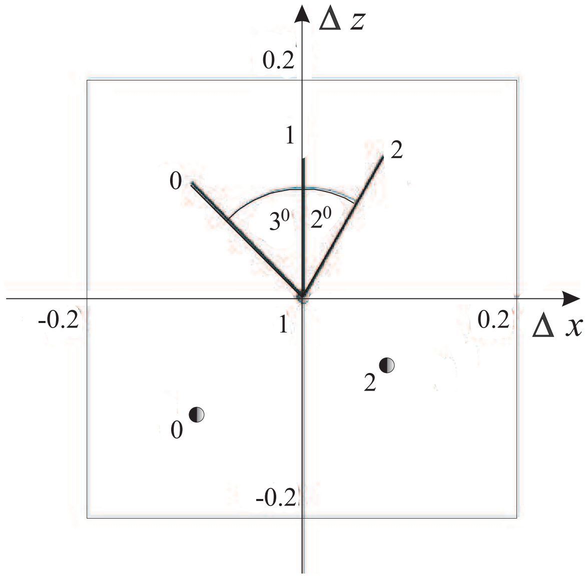


Рис. 4. Область возможных значений искомых смещений Δx, Δz. Угол $\Delta\alpha$ может принимать значения от -5° до 5°, выделено три точки и три угла (нумерация 0, 1, 2)

Измеряемая функция f^{σ} известна в точках равномерной двумерной сетки (R_j, η_k) и равна $f^{\sigma}_{jk} = f(R_j, \eta_k) + \xi_{jk}$, где $j = 1, 2, \ldots, J$, $k = 0, \pm 1, \ldots, \pm K$, $f(R_j, \eta_k)$ — точное значение функции $f(R, \eta)$ в узле сетки (R_j, η_k), ξ_{jk} — реализация случайной величины с нормальным распределением, нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ. Далее в качестве характеристики шума будем использовать величину относительной погрешности $\dfrac{\sigma}{\max\limits_{jk}\bigl|f(R_j, \eta_k)\bigr|}$, заданную в процентах.

На рис. 3 слева приведен пример функции f (без шума), связанной уравнением (2.1) с идеальным кадром, изображенным на рис. 2 а. На рис. 3 справа приведена зашумленная функция f^{σ}.

Выбор типов объектов-ориентиров. Как уже отмечалось выше, в рамках данной работы не рассматривается вопрос о достоверном моделировании функции $g(R, \varphi)$. Однако такое моделирование [4, 5] позволило сформулировать упрощенную модель идеальной функции g, которая и используется нами в дальнейшем. Мы будем предполагать, что в качестве ориентиров могут выступать либо точки, либо многозвенные ломаные. Более сложные типы ориентиров будут рассматриваться нами в дальнейших работах.

Для простоты рассмотрим сеточную функцию g_{jk}, $j = 1, 2, \ldots, J$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots, \pm K$, заданную на той же сетке, что и функция f_{jk}. Тогда функция g представима в виде

$$g(R_j, \varphi_k) = g_1(R_j, \varphi_k) + \sum_{1}^{N} \Delta_i \delta\bigl(R_j - R_i, \varphi_k - \varphi_i\bigr), \tag{2.3}$$

где g_1 — функция малой интенсивности, отвечающая подстилающему фону, точки $W_i(R_i, \varphi_i)$ расположены на объектах-ориентирах и $\delta(R, \varphi)$ — двумерная дельта-функция. Дело в том, что в случае, когда яркие точки принадлежат более протяженным объектам, часто трудно (или невозможно) точно указать их положение на объекте. Рассмотрим, например, мост. Отражения от ферм моста дают хорошо видимые яркие блики, близкие к точкам и расположенные вдоль моста. Однако для точного определения их положения необходимо иметь детальную информацию о положении и устройстве всех ферм моста, что требует существенных дополнительных усилий. В то же время, довольно просто указать отрезок, на котором должны располагаться эти яркие блики.

В настоящей статье рассматривается случай, когда объекты-ориентиры являются точками или многозвенными ломаными. Считается, что по топографической карте местности возможно рассчитать положение точек и ломаных, где сосредоточены яркие точки, интенсивность которых в несколько раз превышает интенсивность точек, лежащих вне этих объектов. В следующих наших работах будут рассматриваться площадные объекты-ориентиры.

Задача ориентирования. Пусть задана функция f^{σ}_{jk}, $j = 1, 2, \ldots, J$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots, \pm K$ (РЛИ) и аппаратная функция $K(\varphi)$ в виде (2.2). Точное положение точки $Q_0(x_0, z_0)$ и угла α_0, при которых производилось сканирование, неизвестно, а известно приближенное положение $Q'(x', z')$ и угол α', относительно которого неизвестную точку Q_0 и угол α_0 запишем в виде $x_0 = x' + \Delta x$, $z_0 = z' + \Delta z$, $\alpha_0 = \alpha' + \Delta\alpha$, где Δx, Δz, $\Delta\alpha$ — небольшие величины, причем заранее задана некоторая область, в пределах которой они могут изменяться (область неопределенности). На рис. 4 приведен пример области неопределенности, где тонкой линией отмечен прямоугольник, ограничивающий возможные значения Δx и Δz. Точками изображены три положения, для которых производились тестовые расчеты. Направление жирных отрезков условно соответствует углам $\Delta\alpha$, которые определяются направлением оси сканирования из соответствующих точек.

Известно также, что при изменении точки и направления сканирования изображение трансформируется по формулам, приведенным в [4, 5].

Требуется найти приближенное значение смещений Δx, Δz и угла $\Delta\alpha$. Классический подход к решению этой задачи подразумевает проведение предварительной процедуры повышения контрастности с последующим выделением ярких объектов и их геометрическим сопоставлением с объектами на идеальном изображении. Ниже предлагаются новые методы совместной обработки РЛИ, когда непосредственно с помощью методов регуляризации удается получить приближение к искомым смещениям.

Базовый регуляризирующий алгоритм. Опишем регуляризирующий алгоритм решения уравнения типа свертки, который будет использоваться в следующем разделе статьи. Запишем это уравнение в абстрактном виде (ядро уравнения то же, что и в уравнении (2.1), но решение и правая часть, вообще говоря, другие и не зависят от параметра R):

$$\int\limits_{-\infty}^{\infty} K(\widehat{\varphi} - \widehat{\eta})x(\widehat{\varphi})\, d\widehat{\varphi} = \widehat{f}(\widehat{\eta}), \quad \widehat{\eta} \in (-\infty, \infty).$$

Будем обозначать через $\Im(x)$ фурье-преобразование функции x. Тогда регуляризованное решение x_β этого уравнения, полученное методом Тихонова в фурье-образах, выражается формулой

$$\Im(x_\beta) = \frac{\Im(\widehat{f})\,\overline{\Im(K)}}{\left|\Im(K)\right|^2 + \beta},$$

где β — параметр регуляризации, а черта означает сопряжение.

3. Методы совместной обработки данных. Пусть нам удалось установить грубую привязку по имеющемуся изображению без применения процедур сглаживания и повышения контрастности. Допустим также, что произведено сопоставление между объектами-ориентирами на РЛИ и на эталонном изображении, т.е. на РЛИ выделены непересекающиеся области, каждая из которых содержит ровно один объект (ломаную или точку). Заметим, что в этой тематике важное значение имеет вопрос о разделении близких объектов. В настоящей статье эта важная проблема не обсуждается, т.е. далее привязка к каждому из объектов рассматривается в отдельности.

Напомним, что в нашем случае объекты являются либо точками, либо отрезками ломаных. Привязка к точечным объектам рассматривалась ранее в [4, 5] и здесь не обсуждается (приведенные в этих работах методы можно дополнить решением уравнения (2.1)). Предлагаемые ниже методы предназначены для привязки к многозвенным ломаным. Для простоты изложения подход излагается применительно к одному звену (отрезку). Различаются два случая: горизонтальный (или близкий к горизонтальному) отрезок и негоризонтальный отрезок (горизонтальный отрезок — отрезок параллельный оси OX). Ориентирование по каждому отрезку может выполняться отдельно, но подход легко обобщить на случай ломаной, состоящей из нескольких негоризонтальных отрезков.

При построении методов ориентирования по отрезку возникает следующая принципиальная трудность. Как правило, на практике на рассматриваемом отрезке интенсивность сигнала не одинакова (Δ_i в формуле (2.3) различны), при этом, как уже отмечалось выше, неизвестно, как она распределена по отрезку. Ранее рассматривался пример моста, для которого наличие сигнала разной интенсивности объясняется просто. Следовательно, необходимо рассматривать весь отрезок в целом. Предлагается решать сразу совокупность уравнений (2.1) при нескольких значениях параметра R, отвечающих отрезку. Кроме того, предлагается объединить алгоритмы привязки и алгоритмы регуляризации в единую схему.

Перечислим основные этапы предлагаемого метода. Пусть измерена сеточная функция f^σ, известная в точках равномерной двумерной сетки (R_j, η_k), $j = 1, 2, \ldots, J$, $k = 0, \pm 1, \ldots, \pm K$, и заданы приближенная точка $Q'(x', z')$ и приближенный угол α'. Требуется найти приближенное значение смещений Δx, Δz, $\Delta\alpha$. Основные этапы алгоритма состоят в следующем:

а) сведем совокупность уравнений (2.1), соответствующих отрезку, к одному уравнению типа свертки;

б) решим это уравнение базовым методом регуляризации, рассмотренным в предыдущем разделе;

в) определим на регуляризованном решении некоторый функционал, зависящий от Δx, Δz, $\Delta\alpha$;

г) среди Δx, Δz и угла $\Delta\alpha$ выберем те поправки, для которых функционал в точках $x' + \Delta x$, $z' + \Delta z$ и при угле $\alpha' + \Delta\alpha$ максимален (для негоризонтального отрезка) или минимален (для горизонтального отрезка).

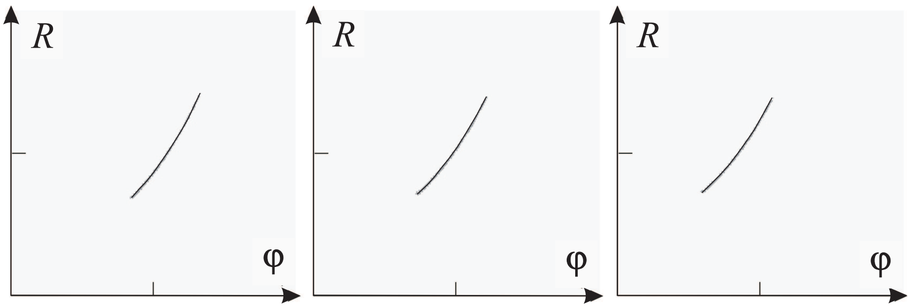
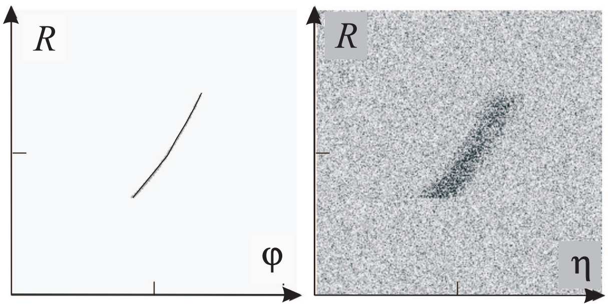


Рис. 5. Вид линии из точек 0, 1, 2 соответственно

Проиллюстрируем эту схему для негоризонтального и горизонтального отрезков. Выберем в области неопределенности несколько точек и несколько углов, которые занумеруем цифрами. Одну из этих точек возьмем в качестве истинной, т.е. сформируем из этой точки идеальное изображение $g(R, \varphi)$, вычислим $f(R, \eta)$ по уравнению (2.1), возьмем некоторую реализацию шума (уровень шума 15 %) и получим функцию с шумом f^σ в точках сетки (R_j, η_k), $j = 1, 2, \ldots, J$; $k = 0, \pm 1, \ldots, \pm K$. Среди поправок Δx, Δz и угла $\Delta\alpha$, соответствующих выбранным точкам, необходимо определить поправки, отвечающие истинной точке (значение функционала в истинной точке должно быть максимальным для негоризонтального отрезка или минимальным для горизонтального отрезка).

Случай 1. Рассмотрим в области ориентирования (неопределенности положения радиолокатора) три точки и три угла. На рис. 4 точки отмечены цифрами 0, 1, 2 (точка 1 совпадает с началом координат) и три соответствующих угла также отмечены цифрами 0, 1, 2. Будем считать истинной точку с номером 0.

Рассмотрим правую нижнюю линию на рис. 2 а. На рис. 5 изображен фрагмент этой линии, видимый из точек 0, 1, 2.



а) б)

Рис. 6. Идеальная линия (а); размытое с шумом изображение (б)

На рис. 6 приведены изображения идеальной и размытой линии с шумом. Опишем процедуру ориентирования по положению этой линии. Расстояние от точки наблюдения до начала кадра в данном случае составляет 1000; величина кадра также примерно равна 1000.

Свяжем с каждой тройкой чисел $(\Delta x, \Delta z, \Delta\alpha)$ из области неопределенности положения радиолокатора и с каждым ориентиром (в нашем случае с отрезком линии) некоторый оператор суммирования, ставящий в соответствие кадру функцию одного переменного $\widehat{\varphi}$. Пусть R_k, $k = 1, 2, \ldots, M$, — совокупность расстояний, отвечающих этой линии, а φ_k, $k = 1, 2, \ldots, M$, — соответствующие им значения углов. Рассмотрим M уравнений (2.1), отвечающих различным R_k, каждое со сдвигом φ_k, $k = 1, 2, \ldots, M$:

$$\int\limits_{-\infty}^{\infty} K(\varphi - \varphi_k - \eta) g(R_k, \varphi)\, d\varphi = f(R_k, \varphi_k + \eta), \quad \eta \in (-\infty, \infty).$$

Просуммировав эти уравнения по k и сделав замену $\widehat{\varphi} = \varphi - \varphi_k$, $\widehat{\eta} = \eta + \varphi_k$, мы получим уравнение

$$\int\limits_{-\infty}^{\infty} K(\widehat{\varphi} - \widehat{\eta}\,)x(\widehat{\varphi}\,)\,d\widehat{\varphi} = \widehat{f}(\widehat{\eta}\,), \tag{3.4}$$

где $x(\widehat{\varphi}\,)$ и $\widehat{f}(\widehat{\eta}\,)$ вычислены с помощью суммирования из $g(R_k, \varphi_k)$ и $f(R_k, \eta)$, $k = 1, 2, \ldots, M$, по формулам

$$x(\varphi) = \sum_{k=1}^{M} g(R_k, \varphi - \varphi_k), \quad \widehat{f}(\eta) = \sum_{k=1}^{M} f(R_k, \eta + \varphi_k). \tag{3.5}$$

Здесь мы пользуемся тем, что функция K, как упоминалось выше, не зависит от R. Вообще говоря, вместо оператора вида (3.5) можно использовать любой другой оператор, коммутирующий с интегральным оператором в уравнении (2.1).

Для каждого положения 0, 1, 2 радиолокатора мы имеем свой набор расстояний и углов R_k, φ_k, $k = 1, 2, \ldots, M$, отвечающих линии. Следовательно, операторы суммирования также будут различны. В силу представления (2.3), функция $x(\varphi)$, отвечающая истинному положению радиолокатора (в нашем примере это точка 0), будет дельта-функцией, сосредоточенной в нуле с коэффициентом $\sum\limits_{1}^{M} \Delta_i$, плюс маленький фон. Если же применить суммирование, отвечающее точкам 1 или 2, т.е. не совпадающее с истинным положением, то значение $x(0)$ будет меньше.

Определим функционал на f^{σ}. Функция $x(\widehat{\varphi}\,)$ нам неизвестна, и для ее определения нужно решить уравнение (3.4) с известной правой частью $\widehat{f}(\widehat{\eta}\,)$ для каждого положения 0, 1, 2 и после этого выбрать то положение, которому соответствует максимум $x(0)$.

Таким образом, вместо решения M уравнений типа свертки достаточно решать одно уравнение. Кроме того, снимается следующая трудность. Пусть на выбранной нами линии интенсивность сигнала не одинакова (Δ_i в формуле (2.3) различны) и при этом не известно, как интенсивность распределена по линии. Тогда точность определения соответствующего φ_k при различных k разная и не ясно, как учесть это обстоятельство.

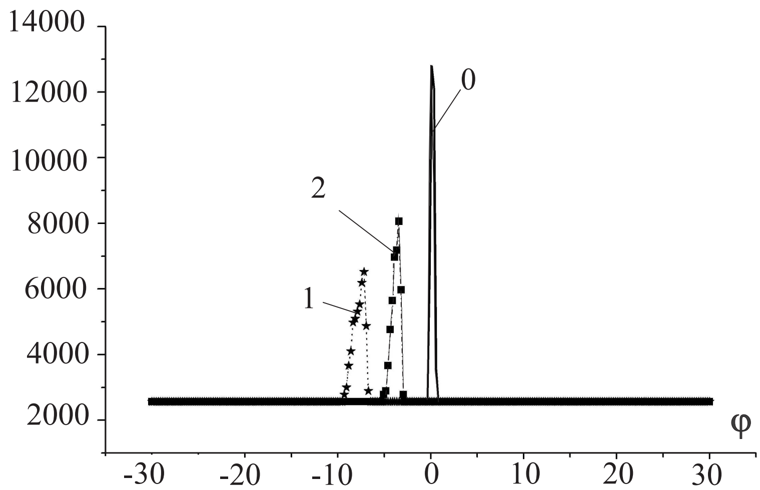


Рис. 7. Функция $x(\varphi)$ — действие суммирования на идеальную линию-ориентир из положений 0, 1, 2. Линия 0 отвечает точке 0 (истинной), линия 1 — точке 1, линия 2 — точке 2

Приведем несколько рисунков, иллюстрирующих действие суммирования. На рис. 7 представлен результат действия суммирования на идеальную линию — ориентир из точек наблюдения 0, 1, 2. Сдвиги выбраны соответственно каждой из точек наблюдения, в то время как кривая соответствует истинной точке наблюдения 0 (рис. 6 а). Как и следовало ожидать, для “ложных” точек наблюдения положение максимума функции $x(\varphi)$ сдвинуты относительно нуля на несколько градусов.

На рис. 8 приведен результат действия суммирования на наблюдаемый кадр (функцию $\widehat{f}(\widehat{\eta})$) из точек наблюдения 0, 1, 2. Сдвиги выбраны соответственно каждой из точек наблюдения, в то время как кривая соответствует истинной точке наблюдения 0. Для “ложных” точек наблюдения положение максимума функции сдвинуты относительно нуля на несколько градусов. Регуляризованное решение уравнения (3.4), соответствующее рис. 6, приведено на рис. 9. Значения $x(0)$ для точек 0, 1, 2 соответственно равны 5200, 2900, 3300 (здесь x — регуляризованное решение уравнения (3.4)).

Выше для привязки была использована негоризонтальная линия. Ясно, что для горизонтальной линии изложенная выше методика нуждается в модификации. Ниже рассматривается горизонтальная линия и исследуется устойчивость предложенной методики к различным реализациям помехи.

Случай 2. На рис. 10 приведен эталон, имеющий один ориентир — горизонтальную линию. Расстояние от точки наблюдения до начала кадра составляет 1000; величина кадра также примерно равна 1000.

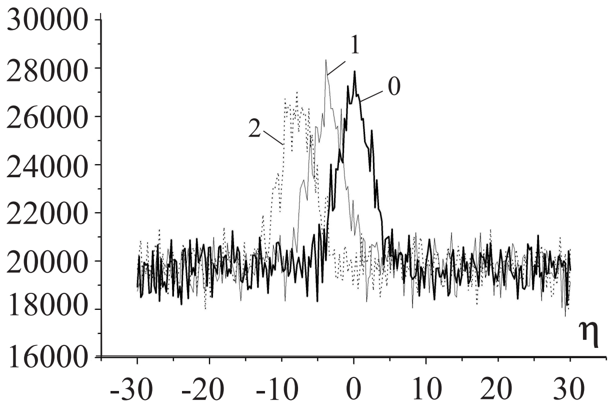


Рис. 8. Функция $\widehat{f}$ — действие суммирования на наблюдаемый кадр f^σ. Линия 0 отвечает точке 0 (истинной), линия 1 — точке 1, линия 2 — точке 2

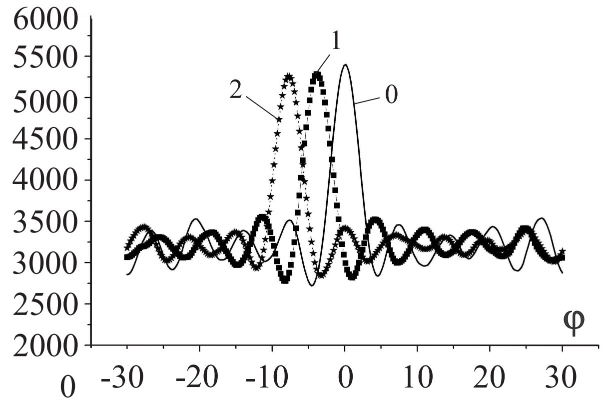


Рис. 9. Регуляризованное решение уравнения (3.4). Линия 0 отвечает точке 0 (истинной), линия 1 — точке 1, линия 2 — точке 2

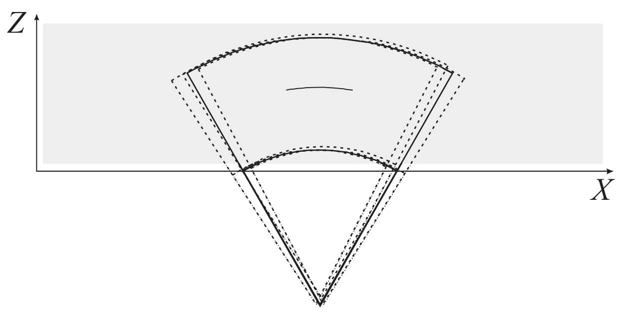


Рис. 10. Эталон, ориентир — горизонтальная линия

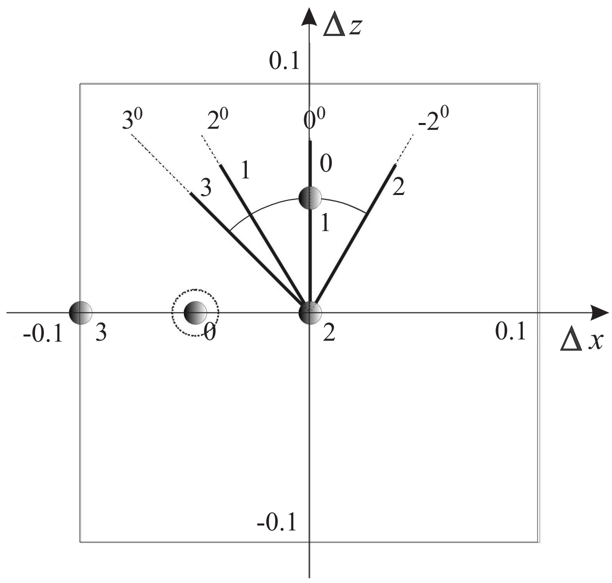


Рис. 11. Область ориентирования и четыре положения радиолокатора

На рис. 11 изображены четыре точки в области неопределенности и четыре угла. Точки отмечены цифрами 0, 1, 2, 3 (точка 2 совпадает с началом координат); четыре соответствующих угла также отмечены цифрами 0, 1, 2, 3. Истинной является точка 0.

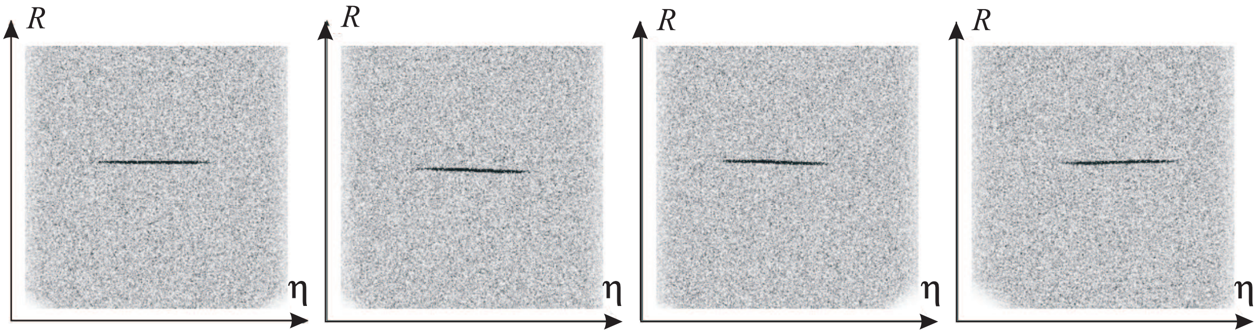
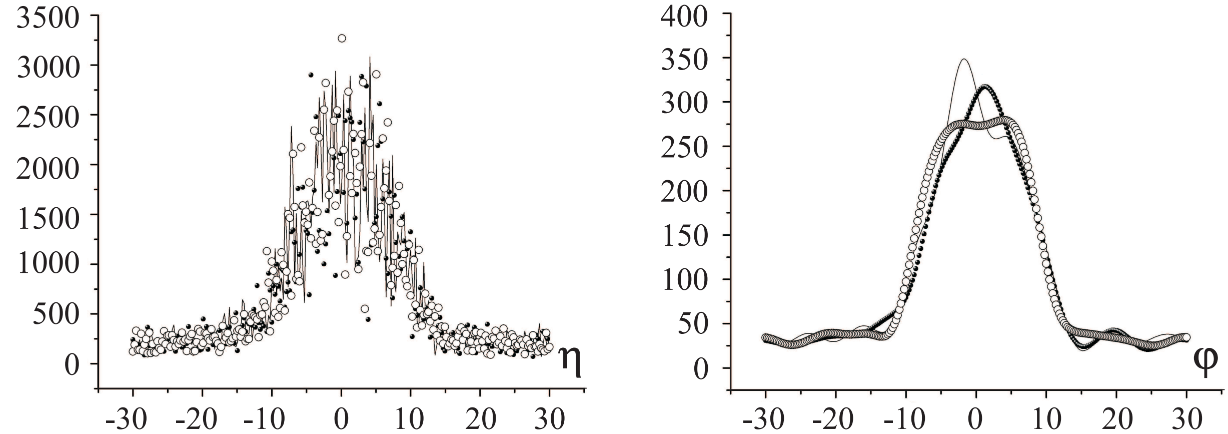


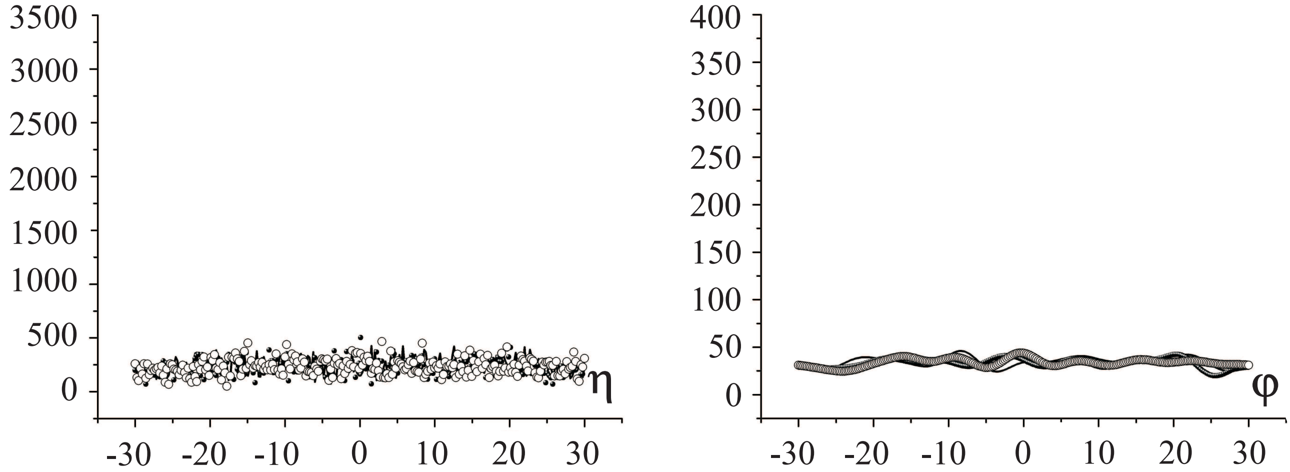
Рис. 12. Кадры изображения горизонтальной линии из точек наблюдения 0, 1, 2, 3 соответственно

На рис. 12 приведено четыре кадра изображения горизонтальной линии, сделанных из точек наблюдения 0, 1, 2, 3.



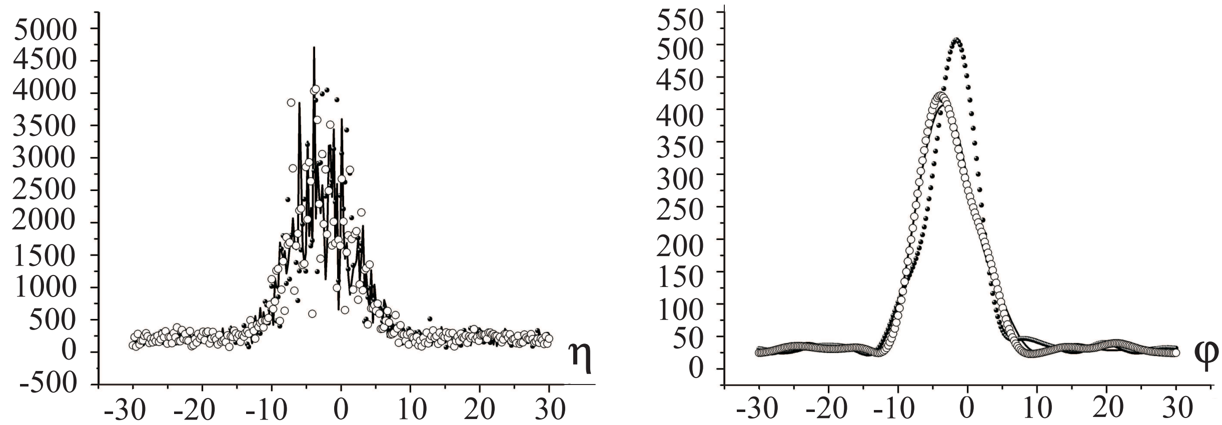
а) б)

Рис. 13. Точка 0 (истинная). Три реализации шума: а) действие суммирования на наблюдаемый кадр $\widehat{f}(\widehat{\eta})$, б) регуляризованные решения уравнения (3.4)



а) б)

Рис. 14. Точка 1. Три реализации шума: а) функция $\widehat{f}(\widehat{\varphi})$, б) регуляризованные решения уравнения (3.4)



а) б)

Рис. 15. Точка 2. Три реализации шума: а) действие суммирования на наблюдаемый кадр $\widehat{f}(\eta)$, б) регуляризованные решения уравнения (3.4)

Построение суммирования осуществляется, как и ранее, по формуле (3.5). Для каждого из кадров возьмем три варианта реализации шума (варианты 1 – 3). Результат применения этого оператора к функции f^{σ} представлен на рис. 13 а.

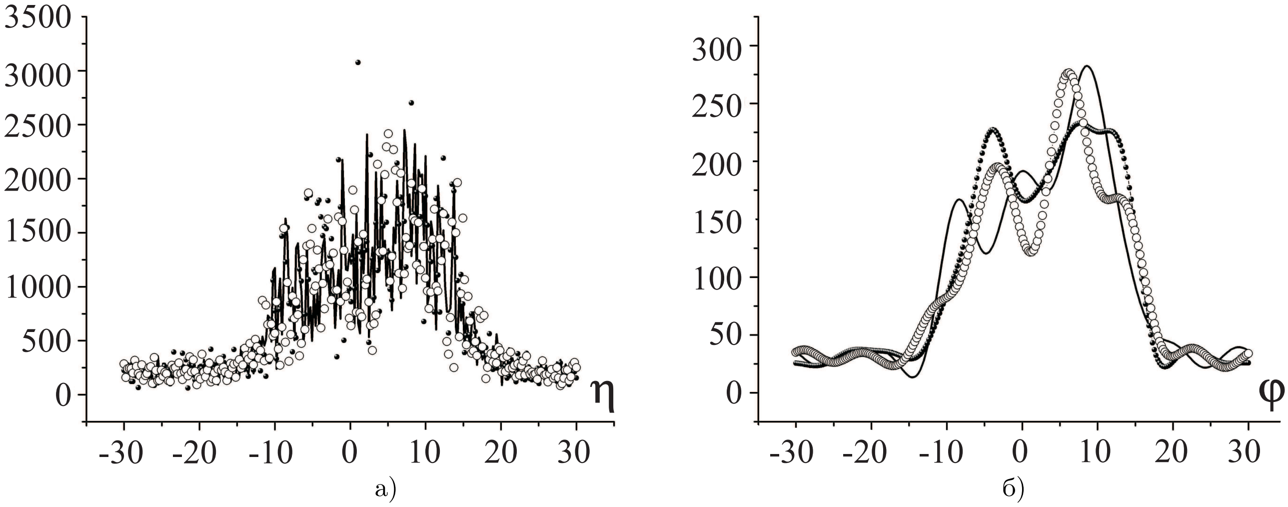


Рис. 16. Точка 3. Три реализации шума: а) действие суммирования на наблюдаемый кадр $\widehat{f}(\eta)$, б) регуляризованные решения уравнения (3.4)

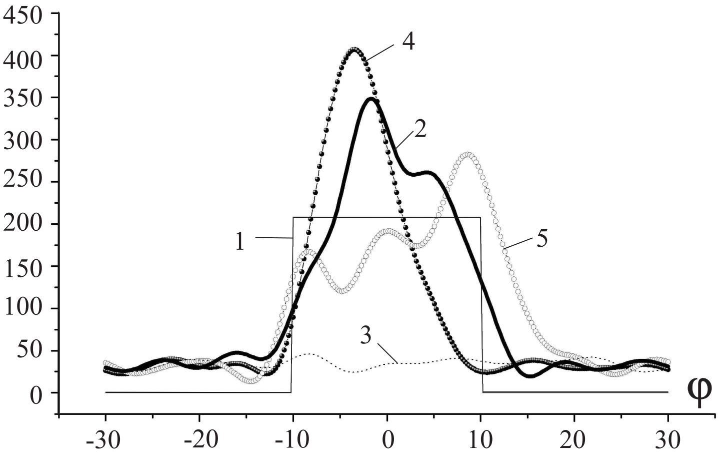


Рис. 17. Сравнение искомой функции для истинного положения с регуляризованными решениями для всех четырех положений. Линия 1 отвечает точке 0 (истинной, точному кадру), линия 2 — точке 0 (истинной), линия 3 — точке 1, линия 4 — точке 2, линия 5 — точке 3

Три регуляризованных решения (для трех реализаций шума) уравнения (3.4) изображены на рис. 13 б. В отличие от предыдущего примера функция $x(\varphi)$ для истинной линии при суммировании, отвечающем истинной точке наблюдения, представляет собой характеристическую функцию отрезка $[-10, 10]$ плюс небольшой фон. В этой связи в качестве функционала, отделяющего истинные положения точки наблюдения от ложных, естественно выбрать отклонение значений регуляризованного решения от ступеньки в метрике $L_2[-10, 10]$. В таком случае истинному положению будет отвечать наименьшее значение функционала.

Далее попарно приведены рисунки, аналогичные рис. 13, для случая, когда точка наблюдения не совпадает с истинной (точки 1, 2, 3). Горизонтальная линия позволяет хорошо определять расстояния. Поскольку точка 1 не лежит на оси OX в области неопределенности (рис. 11), то ясно, что значение функционала будет существенно меньше, чем в предыдущем случае (см. рис. 14). На рис. 15 представлены кривые, отвечающие точке 2 (рис. 11). Видно, что значения функций (регуляризованных и нерегуляризованных) сдвинуты влево. На рис. 16 представлены кривые, отвечающие точке 3 (рис. 11). На рис. 17 приведен пример сравнения характеристической функции отрезка $[-10, 10]$ (точное решение для истинного положения) с регуляризованными решениями уравнения (3.4). Видно, что решение, соответствующее истинной точке, наилучшим образом кореллирует со ступенькой.

В таблице сведены значения функционала, полученные для всех трех точек наблюдения. Нет строки, отвечающей точке 1, поскольку, как было отмечено выше, значение функционала для точки 1 заведомо достаточно большое.

Значения функционала для точек наблюдения
при различных реализациях шума

	Реализация 1	Реализация 2	Реализация 3
Точка 0	884	849	762
Точка 2	1262	1565	1318
Точка 3	1079	1153	1108

Привязка к нескольким объектам. Как упоминалось выше, изложенная методика может быть обобщена на случай нескольких ориентиров типа многозвенной ломаной. В частности, можно обобщить идею использования оператора суммирования на случай нескольких отдельных ориентиров, хотя в настоящее время не совсем ясно, нужно ли так делать или лучше проводить суммирование для каждого объекта отдельно. Приведем результат расчета с использованием оператора суммирования по всем объектам сразу для достаточно сложной модельной сцены, которая была предоставлена авторам А. В. Костоусовым и В. Б. Костоусовым [4, 5]. На рис. 18 изображена точная модельная сцена (эталон), полученная на основе карты. Белый цвет на этом изображении соответствует большой интенсивности отраженного сигнала (в частности, за объектами хорошо видны "тени"). Точное положение радиолокатора соответствует значениям $x_0 = z_0 = 0$, $\alpha_0 = 0$.

Рис. 18. Идеальный кадр (функция $g(R, \varphi)$)

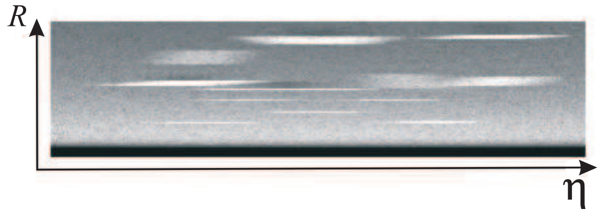


Рис. 19. Размытый кадр с шумом (функция f^σ)

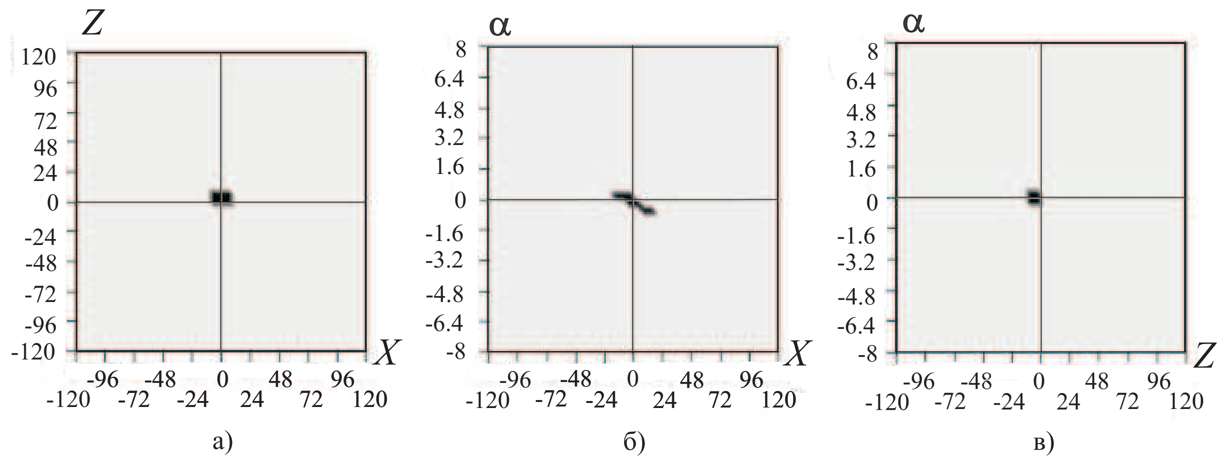


Рис. 20. Сечения области неопределенности X, Z; X, α; Z, α. Черный цвет — уточненное положение точки наблюдения

На основе уравнения (2.1) и моделирования шума (как и ранее, уровень шума 15 %) получен кадр РЛИ, изображенный на рис. 19. По этому кадру проводилось уточнение положения радиолокатора. В качестве ориентиров были выбраны шесть однозвенных и один двхузвенный отрезок, хорошо видимые на рис. 18. Усреднение проводилось по всем объектам сразу. В каждой точке области неопределенности вычислялось значение функционала так же, как в случае 1. Далее по всей области вычислялся максимум этого функционала Max и выбирались точки, значение функционала в которых больше чем 0.95 Max. На рис. 20 приведены сечения области неопределенности ($-120 \leqslant x \leqslant 120$; $-120 \leqslant z \leqslant 120$; $-8^\circ \leqslant \alpha \leqslant 8^\circ$) координатными плоскостями (X, Z; X, α и Z, α), на которых выбранные точки отмечены черным цветом, остальные точки отмечены белым цветом. Видно, что произошло существенное уточнение положения точки наблюдения (положения радиолокатора).

Выводы. На основе проведенных численных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1) для работоспособности предложенных в работе методов нет необходимости знать распределение интенсивности идеального сигнала по ориентирам;

2) ориентир типа “негоризонтальный отрезок” позволяет эффективно определять поправки к положению и углу сканирования;

3) ориентир типа “горизонтальный отрезок” позволяет эффективно определять расстояние от точки сканирования до ориентира.

Благодарности. Авторы благодарят В. Б. Костоусова, который привлек внимание авторов к данной тематике, за многочисленные плодотворные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бертс Р., Мак-Доннелл М.* Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989.
2. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974.
3. *Агеев А.Л., Коршунов М.Е.* Обработка изображений с выделением положения объектов // Теория управления и теория обобщенных решений уравнений Гамильтона–Якоби. Тр. международного семинара. Т. 2. Екатеринбург: Изд-во Уральск. ун-та, 2005. 61–65.
4. *Костоусов А.В., Костоусов В.Б.* Высокоточная навигация движущихся объектов по радиолокационным изображениям // Динамические системы и проблемы управления. Т. 11, № 1. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2005. 139–148.
5. *Костоусов А.В.* Задача навигации по радиолокационным изображениям точечных ориентиров: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2006.

Поступила в редакцию
18.09.2007