

А.Т.Трофимов, А.Е.Николаев

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА НАБЛЮДЕНИЯ ПО ЕГО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЮ ПРИ НАЛИЧИИ БЫСТРОЙ ДИНАМИКИ И ФЛУКТУАЦИИ КООРДИНАТ

Problems of analysis of the precise coordinate estimation of the observation object, by videopicture, for some real situations of observing objects from aircraft, are considered. Different picture, processes are considered in paper; the estimate error analysis, by the way of modeling, is adduced. Recommendations on quasioptimal algorithm choice are given.

Постановка задачи

При наблюдении объекта на поверхности земли с борта низколетящего с большой скоростью летательного аппарата, с помощью телевизионной камеры нижнего обзора возникает проблема управления положением оптической оси видеокамеры и углом поля зрения, т.е. масштабом изображения объекта наблюдения в видеокадре. Видеокадры представляют собой сигнал, сформированный телекамерой с применением ПЗС-матрицы (прибор с зарядовой связью [1]), что накладывает известные ограничения на квазиоптимальные алгоритмы.

Для обеспечения эффективного видеонаблюдения необходимо обеспечить точность определения угломестных координат не менее 20 угловых секунд. При этом диапазон скорости изменения этих координат — от 0 до 400 градусов в секунду и выше. Особенностью обрабатываемых изображений объектов наблюдения является наряду с быстрым изменением координат их трансформация — искажение [2].

Вследствие флуктуаций положения видеокамеры, установленной на борту летательного аппарата, из-за известных причин, связанных с динамическими особенностями полета в атмосфере, координаты изображения объекта подвержены случайным флуктуациям.

Ниже рассматривается задача оценки (измерения) координат объекта по изменяющемуся изображению.

Аналитическая оценка ошибок определения координат

В зависимости от типа критериальной функции, которая является мерой, определяющей выбор степени сходства сравниваемых изображений, можно найти дисперсию оценки координат. Так, для дифференцируемой критериальной функции $K(\vec{r})$ дисперсия D оценки координат $\vec{r}$ определяется следующим образом.

1. Для одномерного случая $\vec{r} \equiv x$ в области действительного положения объекта в точке с координатами $x = x_0$

$$D(x) = \frac{D\left(\frac{\partial K}{\partial x}\right)}{\left(\frac{\partial^2 K}{\partial x^2}\bigg|_{x=x_0}\right)^2}. \quad (1)$$

2. Для двумерного случая $\vec{r} \equiv \{x, y\}$ в области действительного положения объекта в точке с координатами $x = x_0, y = y_0$

$$D(x) = \frac{D\left(\frac{\partial K}{\partial y}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 K}{\partial x \partial y}\right)_{x=x_0, y=y_0}^2 - D\left(\frac{\partial K}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 K}{\partial y^2}\right)_{x=x_0, y=y_0}^2}{\left(\frac{\partial^2 K}{\partial x \partial y}\right)_{x=x_0, y=y_0}^4 - \left(\frac{\partial^2 K}{\partial x^2}\right)_{x=x_0, y=y_0}^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 K}{\partial y^2}\right)_{x=x_0, y=y_0}^2};$$

$$D(y) = \frac{D\left(\frac{\partial K}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 K}{\partial x \partial y}\right)_{x=x_0, y=y_0}^2 - D\left(\frac{\partial K}{\partial y}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 K}{\partial x^2}\right)_{x=x_0, y=y_0}^2}{\left(\frac{\partial^2 K}{\partial x \partial y}\right)_{x=x_0, y=y_0}^4 - \left(\frac{\partial^2 K}{\partial x^2}\right)_{x=x_0, y=y_0}^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 K}{\partial y^2}\right)_{x=x_0, y=y_0}^2},$$

где введено обозначение $D(r)$ — дисперсия, $\sigma_r = \sqrt{D(r)}$ — среднеквадратическое отклонение параметра r .

Аналитическое определение искомой дисперсии оценки координат по приведенным выше формулам затруднительно, поэтому целесообразно определить дисперсию методом моделирования.

Анализ погрешности путем имитационного моделирования

Определение дисперсии оценки координат выполнено моделированием кавзиоптимального алгоритма с использованием трех различных критериальных функций для полутонного изображения. Это

функция квадрата разности

$$K_1(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (A_{y+i, x+j} - S_{ij})^2; \quad (2)$$

функция модуля разности

$$K_2(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |A_{y+i, x+j} - S_{ij}|;$$

функция Минковского

$$K_3(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sqrt{|A_{y+i, x+j} - S_{ij}|}, \quad (4)$$

где $A_{y,x}$ — элемент матрицы размерностью $P \times H$, соответствующий яркости элемента текущего изображения с координатами (x, y) ; S_{ij} — элемент матрицы размерностью $N \times M$ — изображение объекта наблюдения; $K_m(x, y)$ — значение критериальной функции в точке с координатами (x, y) , $m = 1, 2, 3$. Размерность A предполагается большей размерности S , и так как $K_m(x, y)$ являются элементами матрицы, то максимальная размерность этой последней равна $(H - M) \times (P - N)$.

Моделирование осуществлялось в системе математических вычислений Mathematica 4.1. Последовательность из более чем 50 видеок кадров генерировалась наложением гауссовского шума с дисперсией σ_s^2 на сформированное определенным образом изображение с дисперсией σ_A^2 (см., напр., рис.1). Таким образом, отношение сигнал/шум для одного элемента изображения равно

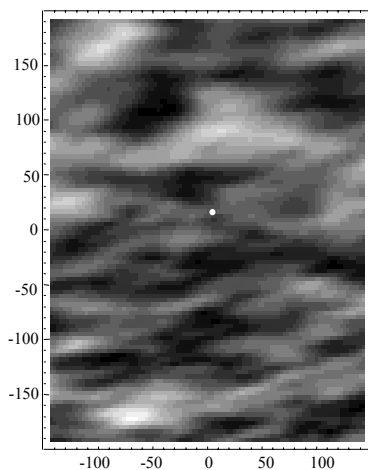


Рис.1. Один из кадров. Белой точкой в области центра кадра отмечено местоположение объекта наблюдения

$$s = \sigma_A / \sigma_S.$$

Ввиду того, что об объекте наблюдения нет полной априорной информации, в качестве объекта наблюдения используется выделенный сегмент изображения предыдущего кадра с центром координат, измеренных также в предыдущем кадре. Такой алгоритм достаточен для определения дисперсии оценки координат.

При моделировании определение оценки координат положения объекта наблюдения $(\tilde{x}, \tilde{y})$ осуществлялось по минимуму критериальной функции:

$$(\tilde{x}, \tilde{y})_m = \left\{ K_m(\tilde{x}, \tilde{y}) = \min_{x, y} K_m(x, y) : x, y \in [-10, 10] \right\}, \quad (5)$$

где заданные границы изменения координат x и y определяют «зону поиска» объекта в кадре.

Поскольку размерность и, вообще говоря, форма изображения объекта наблюдения может быть выбрана произвольным образом, то для моделирования были выбраны прямоугольник 8×16 и горизонтальная строка 1×128 , так что в обоих случаях размер изображения объекта составляет 128 элементов. При этом, согласно (5), зона поиска будет выглядеть так, как показано на рис.2.

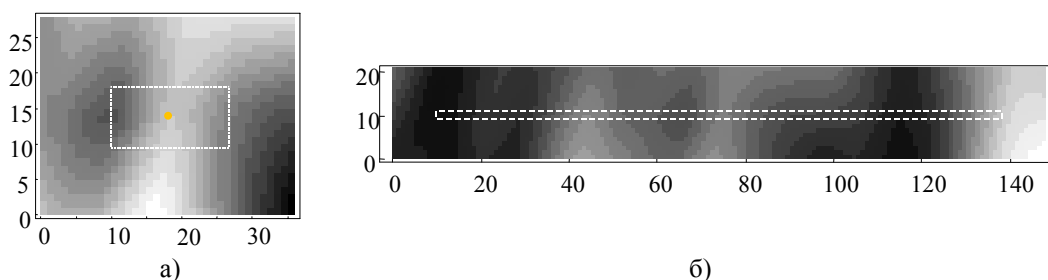


Рис.2. Участок зоны поиска: а) для изображения объекта 8×16 ; б) для изображения объекта 1×128 . Светлой рамкой отмечено изображение, соответствующее положению объекта наблюдения

Результаты моделирования были получены следующие.

На рис.3 и 4 изображены графики зависимости оценки дисперсии от отношения сигнал/шум. Символами звезда, квадрат и ромб отмечены значения среднеквадратического отклонения оценки координат объекта, найденные в результате моделирования с использованием критериальных функций, и соответственно. Закрашенные символы соответствуют среднеквадратическому отклонению оценки координаты x объекта, а не закрашенные —

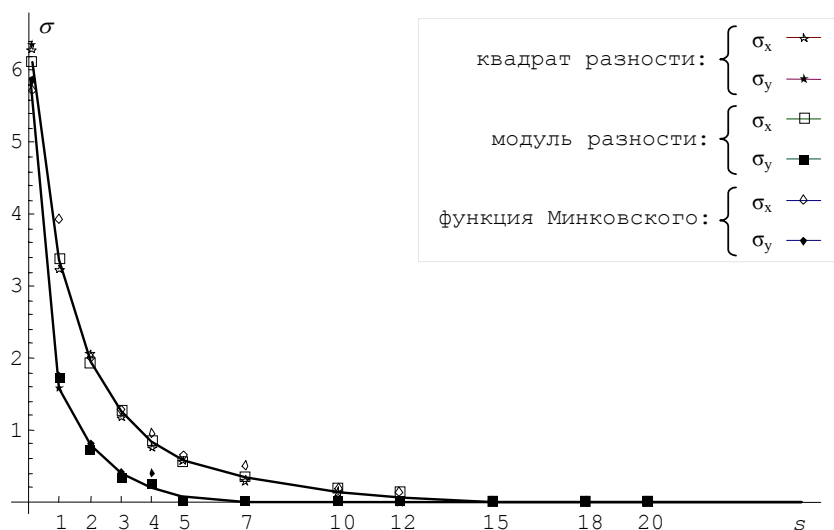


Рис.3. Среднеквадратическое отклонение оценки координат объекта в виде прямоугольника 8×16

координаты y объекта.

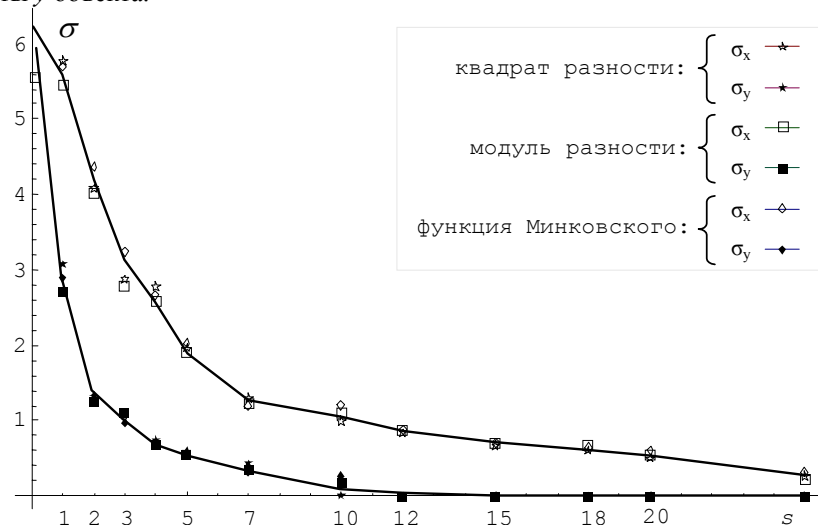


Рис.4. Среднеквадратическое отклонение оценки координат объекта в виде горизонтальной строки 1×128

Приближенное решение позволило выявить обратно пропорциональную зависимость $\sigma(\vec{r})$ от s , которая справедлива для выбранных критериальных функций при больших значениях отношения сигнал/шум.

Более наглядно различия алгоритмов можно проследить по поверхности распределения величины соответствующей критериальной функции в зависимости от величины смещения (по координатам x и y). Подобные поверхности, полученные при одной и той же реализации шума, изображены на рис.5.

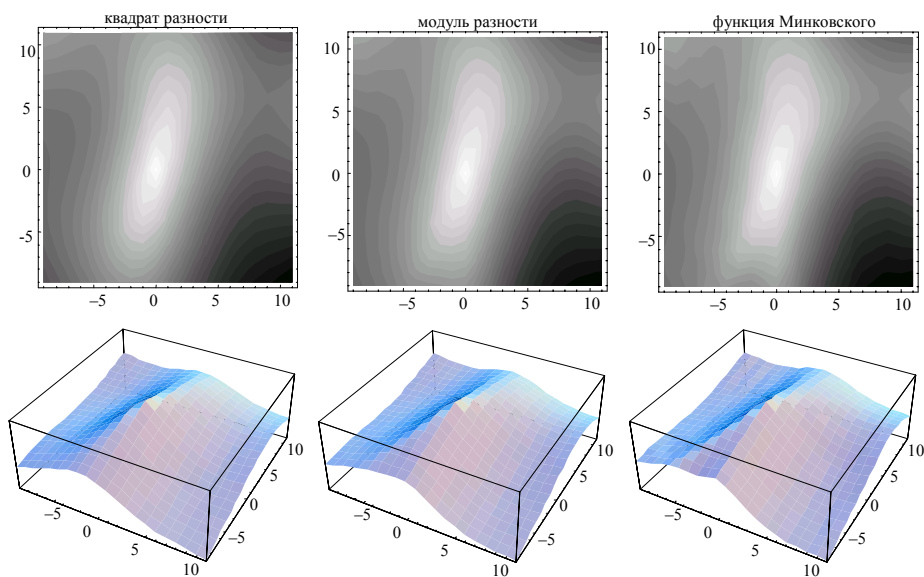


Рис.5. Поверхности распределения уровня соответствующей критериальной функции в зависимости от величины смещения (по координатам x и y). В качестве фонового изображения взята зона поиска для изображения объекта в виде прямоугольника 8×16 . Для каждой критериальной функции представлены поверхности в виде контурных линий и двумерной поверхности.

Выводы

С практической точки зрения наиболее просто реализуется на ЭВМ алгоритм с применением функции модуля разности (3). А с точки зрения устойчивости обнаружения алгоритмы с применением функций (2)-(4) дают примерно одинаковый результат, что подтверждает зависимость среднеквадратического отклонения оценки координат объекта от отношения сигнал/шум.

Если проследить изменение поверхностей критериальных функций от смены реализации шума, то можно сделать следующие выводы:

- наиболее чувствительна к изменению изображения критериальная функция (4);
- наименее острый экстремум у критериальной функции (2);
- поведение поверхностей в нашем случае практически не зависит от формы объекта.

Дальнейшие исследования показывают отсутствие принципиальных различий с точки зрения устойчивости поиска объекта при использовании критериальных функций (2)-(4). Поэтому для реализации на ЭВМ был выбран квазиоптимальный алгоритм с использованием критериальной функции модуля разности (3).

-
1. Полупроводниковые формирователи сигналов изображений / Под ред. П.Йесперса, Ф.Ван де Виле, М.Уайта. М.: Мир, 1979. 573 с.
 2. Баклицкий В.К. и др. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М.: Радио и связь, 1986. 216 с., ил.