

Слынько Ю.В.

Селекция движущихся целей при авиационном наблюдении с построением трехмерной карты облачного слоя

Аннотация. Был создан алгоритм селекции движущихся целей для случая авиационного наблюдения пригоризонтной области. Для этого случая характерны сильная нелинейность задачи и большая степень априорной неопределенности. Для решения данной задачи создан нелинейный алгоритм фильтрации с определением таких параметров наблюдаемой сцены, как высота облачного слоя и контуры облаков.

1. Введение

В обработке видео изображений очень распространена задача выделения полезных объектов в видеопоследовательности.

Если мы имеем дело с движущимся точечным или квазиточечным объектом, то такая задача называется задачей селекции движущихся целей [1], [2]. К сегодняшнему дню в этом направлении проделана большая работа. Хорошо исследована и решена задача для случая нормального белого шума.

В данной работе предлагается решение такой задачи для случаев авиационного наблюдения (Рис. 1). При этом необходимо выделять движущиеся объекты на фоне постилающей поверхности, т.е. на фоне коррелированных шумов. В данном случае задача существенно нелинейна, и широко распространенная линейная обработка не дает удовлетворительных результатов.

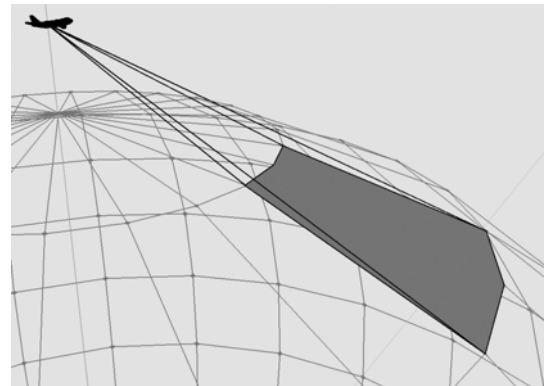


Рис. 1 Схема наблюдения.

Ещё более осложняет проблему наличие разного рода разрывов функций, неограниченного возрастания их или их производных и т.д.

Для решения данной задачи необходимо учитывать, а значит, и оценить, не только неизвестную функцию яркости подстилающей поверхности, но и высоту, структуру и яркость облаков. Фактически это означает создание трехмерной картины облаков. Такая задача известна в литературе под названием трехмерная структура по движению (3D structure from motion) [3]. Однако до сих пор не существует удовлетворительно работающего алгоритма, а те, что существуют, как правило, работают только при больших изменениях ракурса наблюдения.

2. Постановка задачи

В данной работе рассмотрена задача обнаружения точечных движущихся объектов при наблюдении с летящего самолёта подстилающей поверхности (Рис. 1).

Наблюдение ведётся с нескольких камер, направленных в разные области вблизи горизонта так, что при движении самолёта одна и та же область может появиться в поле зрения нескольких камер. Все камеры работают в одном и том же диапазоне длин волн.

При этом мешающий фон не только не является нормальным белым, но является ещё и нестационарным, т.е. движется относительно самолёта. Чтобы формализовать отличие такого фона от полезных объектов, будем считать эти объекты:

1. Достаточно малыми. Действительно, размер пикселя изображения на поверхности Земли больше сотни метров, а размер движущихся объектов едва ли превышает эту величину.
2. Движущихся по законам, отличным от законов движения подстилающей поверхности (имеется в виду движения относительно видео сенсора). Причём, здесь важно только проекция этого движения на плоскость матрицы фотоприёмника, а движение вдоль луча зрения не учитывается.

Только объекты, удовлетворяющие этим требованиям, называются полезными.

При реализации алгоритма все параметры сенсора, как и параметры движения носителя, считались известными.

Задачей данной работы было создание алгоритма удаления (фильтрации) мешающего фона, при этом полезные сигналы не должны искажаться. Также существенно, что в процессе фильтрации определяется трехмерная структура облаков, что может представлять самостоятельный интерес.

3. Принципы построения алгоритма

Решение задачи обеления чаще всего можно свести к следующей схеме. Для каждого пикселя текущего кадра ищется оценка его яркости при условии, что соседние пиксели (пространственная корреляция) и/или пиксели из кадров, полученных в другое время (временная корреляция) имеют заданную яркость. Кадр из этих оценок будем называть картой фона. Обелённый кадр при этом получается вычитанием из текущего кадра карты фона.

Однако априорной плотности распределения яркости пикселей не существует, поэтому вместо неё используются различные параметрические модели распределений, что можно описать принципиальной формулой:

$$W_{ij}(t) = F_{ij}(t) - M_{ij}(t | F(t_n)..F(t_m), \bar{r}(t, F(t_n)..F(t_m))), \text{ где} \quad (1)$$

- t_n и t_m – начальный и конечный моменты времени.
- $W_{ij}(t) - (i,j)$ пиксель обелённого кадра в момент времени t . При этом момент времени t необязательно является конечным моментом времени.
- $F_{ij}(t) - (i,j)$ пиксель исходного кадра в момент времени t .
- $M_{ij}(t | F(t_m)..F(t_n), \vec{\gamma}(F(t_k)..F(t_l))) - (i,j)$ пиксель карты фона в момент времени t . Он вычисляется на основе всех исходных кадров и вектора неизвестных параметров.
- $\vec{\gamma}(t, F(t_k)..F(t_l))$ - вектор неизвестных параметров в момент времени t , вычисленных на основе всех имеющихся исходных данных.

При этом необходимо внимательно следить, чтобы в модель не входил сам полезный сигнал и он не «принимался» за мешающий фон. Считается, что полезным сигналом является точечный объект, смещающийся относительно других объектов (объекты размером в несколько пикселей считаются принадлежащими подстилающей поверхности). Такими объектами с достаточной точностью являются все объекты, чьи угловые размеры меньше разрешающей способности сенсора, а яркость недостаточна для того, чтобы было существенно «размывание» объекта за счёт дифракции и абберации.

Главное используемое приближение состоит в том, что при вычислении оценки яркости пикселя используются только яркости соседних по пространству и по времени пикселей. При этом полагается, что эти яркости физически неизменны, а не стационарность процесса связана только с движением летательного аппарата (т.е. не учитываются ни изменения освещённости, ни ветер и т.д.).

Если положить для текущего кадра время $t_0=0$, то учитываются только кадры из «временного окна» со временами $t=-t_{pr}..t_{nx}$, где t_{pr} и t_{nx} – параметры от 0 до 10.

Таким образом, основой алгоритма является создание карты фона на основе кадров из «временного окна». Эту задачу можно условно разделить на две подзадачи: определение рельефа подстилающей поверхности и облаков, и создание собственно карты фона на основе этого рельефа. Здесь существенны две проблемы. Во-первых, количество параметров, описывающих рельеф земной поверхности и облака чрезвычайно велико, поэтому необходимо использовать приближённые модели, позволяющие уменьшить число этих параметров. Этими параметрами в данном алгоритме выбраны высота облачного слоя и карта облаков в приближении, что эти облака тонкие и плоские. Во-вторых, задача распадается на подзадачи лишь приближенно, и для получения удовлетворительного результата необходимо использовать сложную итерационную схему:

1. Вычисляется карта фона, считая Землю идеальной сферой.
2. По карте фона определяется высота облачного слоя.
3. Определяется карта облачного слоя, т.е. определяется, какие пиксели кадра соответствуют облачному слою, а какие – поверхности Земли. При этом считается, что облака плоские и тонкие.
4. По полученной карте облачного слоя вновь вычисляется карта фона с учетом рельефа, которая и используется для обеления кадра.
5. Обелённый кадр подвергается пространственной фильтрации.

Таким образом, основная формула создания обелённого кадра следующая:

$$W_{ij}(t) = F_{ij}(t) - M_{ij}(t | F(-t_{pr})..F(t_{nx}), h(t, F(-t_{pr})..F(t_{nx})), C(t, h, F(-t_{pr})..F(t_{nx}))) \quad (2)$$

- $h(t, F(-t_{pr})..F(t_{nx}))$ - высота облачного слоя.
- $C(t, h, F(-t_{pr})..F(t_{nx}))$ - карта облаков на момент времени t .

4. Создание карты фона

Точное вычисление карты фона является крайне трудоёмкой задачей, поэтому используется следующая схема приближённого вычисления.

При этом особое внимание следует уделять тому, что в данной задаче ведётся наблюдение пригоризонтной части поверхности Земли, и задача создание карты фона сильно не линейна, вплоть до неограниченного возрастания производных некоторых функций (например, площади поверхности Земли, соответствующей одному пикселю изображения).

Т.к. параметры движения самолёта известны, то для каждого кадра «временного окна» для каждой точки нетрудно из геометрических соображений вычислить координаты этой же точки земной поверхности в текущем кадре. При этом необходимо знать высоты этих точек. В первом приближении они считаются одинаковыми (приближение идеальной сферы).

При пересчёте координат получаются не целочисленные значения, а для создания карты фона необходимо вычислить яркость точек, соответствующих целым значениям координат пикселей в кадре. При этом не учитывается изменение области, с которой излучение попадает в данный пиксель, и не учитывается изменение яркости в соответствии с диаграммой рассеяния. Это приближенно соответствует Ламбертовскому рассеиванию. Тогда яркость в пикселях с целочисленными координатами вычисляется как интерполяция или аппроксимация яркостей с нецелочисленными координатами.

При проведении интерполяции или аппроксимации для каждой точки данного кадра выбирается небольшая окрестность (размером от 1 до 3 пикселей). В эту окрестность попадают точки из других кадров, по которым и проводится интерполяция или аппроксимация. При этом координаты точек в такой окрестности квазислучайны и в силу нелинейности задачи различны для различных точек, поэтому все вычисления надо проводить для каждой точки отдельно.

Были реализованы следующие алгоритмы интерполяции/аппроксимации:

- *Кусочно-постоянная интерполяция.* Яркость пикселя приравняется к яркости ближайшей к ней точки, что как раз соответствует приближению функции яркости кусочно-постоянной функцией.
- *Линейная интерполяция.* В этом алгоритме выбирается треугольник минимального размера, включающий нужную точку, и яркость этой точки вычисляется как линейная интерполяция по треугольнику.
- *Вычисление среднего.* Яркость точки вычисляется как среднее значение яркостей ближайших точек.
- *Линейная аппроксимация.* В данном алгоритме используется модель фона, согласно которой яркость в окрестности данной точки есть линейная функция координат $b = a_x x + a_y y + a$. При этом коэффициенты вычисляются методом наименьших квадратов.
- *Полиномиальная интерполяция.* Яркость данной точки вычисляется путём полиномиальной интерполяции яркостей ближайших точек. При этом степень полинома выбирается так, чтобы количество точек было не меньше количества степеней свободы полинома (в двумерном случае количество степеней свободы равно $p = (n+1)(n+2)/2$, где n – степень полинома). Тогда коэффициенты полинома находятся решением системы, аналогичной системе, возникающей при линейной интерполяции, но с количеством уравнений, равным p .
- *Полиномиальная аппроксимация.* Функция яркости аппроксимируется полиномом заданной степени, по которому вычисляется яркость данной точки. Коэффициенты полинома ищутся методом наименьших квадратов аналогично случаю линейной аппроксимации.
- *Билинейная аппроксимация.* Функция яркости аппроксимируется билинейной функцией, т.е. $b = Axu + Bx + Cy + I$, линейной по каждой из координат. Коэффициенты в этой функции вычисляются фильтром Калмана.

При этом необходимо учитывать то, что для некоторых точек, находящихся недалеко от горизонта, все точки из других кадров располагаются точно вдоль линии, и задача вырождается в одномерную, т.е. необходимо иметь одномерные аналоги всех представленных алгоритмов.

Также, если точка является изображением космического пространства, то используется только алгоритм вычисления среднего значения, т.к. тогда никаких смещений подстилающей поверхности (которой являются звёзды и атмосфера Земли на просвет) нет и задача строго стационарна.

Первый алгоритм показывает хорошие результаты только когда ближайшая точка достаточно (<0.1 пикселя) близко к нужной точке. Остальные же показывают примерно одинаковые результаты. Существование предела качества связано, видимо, с тем, что функция яркости подстилающей поверхности кусочно-непрерывна и имеет многочисленные разрывы, которые с трудом поддаются аппроксимации. И СКО остаточного фона связано, прежде всего, с плохой фильтрацией разрывов, т.е. качество алгоритмов ограничено не точностью заложенных в них моделей, а принципиальным ограничением точности оценки, обусловленным разрывностью функции яркости фона.

Для повышения качества можно использовать комбинацию нескольких алгоритмов, при этом в каждой точке выбирается тот алгоритм, который даёт наименьшую разность яркостей с данным кадром. Особенно эффективно использовать комбинацию кусочно-постоянной интерполяции с каким-нибудь другим алгоритмом.

Используя карту фона, построенную на основе модели сферической поверхности можно построить карту рельефа подстилающей поверхности. Особо важно выделить облака, т.к. их высоты достаточно велики для того, чтобы алгоритмы создания карты фона работали неадекватно. При этом область считается однослойной, а рельеф облаков и поверхности Земли не принимается во внимание. При этом не происходит существенной потери качества, т.к. высоты влияют только на пересчёт координат, а ошибка в высоте ~ 600 м даёт несущественную ошибку в определении координат. Однако же при больших высотах, особенно при большой толщине облачного слоя эта модель может быть неудовлетворительной.

5. Определение высоты облачного слоя

Первым этапом определения рельефа является определение высоты облачного слоя. Это делается путём сравнения реального кадра с картами фона, созданными для различных

высот подстилающей поверхности над уровнем моря. При этом карта фона создаётся в приближении идеальной сферы.

Т.к. создание карт фона для большого количества высот требует больших вычислительных затрат, то используется итерационный алгоритм:

1. Вычисляется высота с точностью 1км, что требует создание карт фона от высоты поверхности Земли на данной территории, (она считается известной из географических источников) до высоты полёта самолёта с интервалом в 1км.
2. В окрестности этой высоты вычисляются карты фона с интервалов высот в 100м.

Когда карты фона вычислены для каждой из высот, вычисляется кадр корреляции между каждой из них и текущим кадром по формуле

$$C_{kl} = \sum_{\substack{i=k-dx \\ j=l-dy}}^{\substack{i=k+dx \\ j=l+dy}} (M_{ij} - m_{kl})(F_{ij} - f_{kl}), \text{ где} \quad (3)$$

- C_{kl} – точка кадра корреляции.
- M_{ij} – точка кадра карты фона.
- F_{ij} – точка текущего кадра.
- dx и dy – размеры области, для которой вычисляется корреляция (могут быть от 5 до 25 пикселей, оптимальные ~15).

- $m_{kl} = \sum_{\substack{i=k-dx \\ j=l-dy}}^{\substack{i=k+dx \\ j=l+dy}} M_{ij}$ и $f_{kl} = \sum_{\substack{i=k-dx \\ j=l-dy}}^{\substack{i=k+dx \\ j=l+dy}} F_{ij}$ - средние значения яркостей карты фона и текущего кадра в данной области.

Такие кадры корреляции создаются для каждой высоты. Далее создаётся карта высот – для каждой точки текущего кадра из всех кадров корреляции выбирается кадр, в котором значение коэффициента корреляции для данного пикселя максимально, и полагается, что высота данного пикселя соответствует максимуму коэффициента корреляции. По карте высот строится гистограмма количества пикселей с данной высотой, максимум которой соответствует искомой высоте облачного слоя.

Несмотря на то, что при работе данного алгоритма создавалась карта высот, использовать её в качестве карты облаков нельзя, поскольку, несмотря на кажущуюся работоспособность данного алгоритма, карта облаков получается с недопустимым количеством ошибок, однако, высота облачного слоя при этом определяется вполне надёжно.

6. Создание карты облаков

После вычисления высоты облачного слоя создаётся карта облаков, т.е. кадр, определяющий для каждого пикселя текущего кадра, принадлежит тот облачному слою или Земной поверхности. Было разработано несколько алгоритмов для создания такой карты. Во всех в них используется сравнение карта фона, полученной для двух высот – для высоты облачного слоя и поверхности Земли, с текущим кадром.

Однако создание этих карт фона необходимо проводить с учётом более сложной ситуации, чем при сферической поверхности. Необходимо принимать особые меры, чтобы случаи затенения не сказывались существенно на качестве получаемых карт фона. При этом особую проблему составляет то, что облака перемещаются на фоне Земли при изменении угла зрения, т.е. точки поверхности Земли, видимые на одном кадре могут быть не видны на другом.

Для решения этой проблемы алгоритмы создания карты фона используются с некоторыми модификациями. Все они заключаются в ограничении размеров временного окна. Т.к. облака и просветы между ними, зачастую, достаточно протяжённые, то можно ожидать, что точка затеняется или, наоборот, находится вне затенения, достаточно долго. Т.е. если данная точка принадлежит поверхности Земли, то она не затеняется либо во все последующие моменты времени внутри «временного окна», либо во все предыдущие. Тогда при создании карты она можно использовать один и тот же алгоритм, но работающий сначала только со всеми предыдущими кадрами, а потом со всеми последующими. А дальше можно для каждой точки выбрать лучших из алгоритмов. Однако, иногда размеры облаков или просветов малы, и за «временное окно» точка может несколько раз выходить из тени и попадать туда снова. Тогда необходимо вычислять карте фона лишь по ближайшим по времени кадрам. При этом не следует забывать, что чем больше кадров используется при создании карты фона, тем больше её точность.

Для наилучшего результата необходимо использовать различные алгоритмы, модифицированные всеми перечисленными способами, а также и вовсе не модифицированные, а потом для каждой точки выбрать лучший из них путём сравнения с текущим кадром. Далее полученные таким образом карты фона для двух высот используются собственно в алгоритмах создания карты фона.

Таких алгоритмов несколько:

- *Проверка на лучшее совпадение.* Создаётся кадр с разностями между яркостями текущего кадра и карты фона и производится свёртка этого кадра с прямоугольником заданного размера, т.е. производятся следующие вычисления:

$$D_{kl} = \left| \sum_{\substack{i=k+w \\ j=l-w}}^{\substack{i=k+w \\ j=l+w}} (F_{ij} - M_{ij}) \right|, \text{ где} \quad (4)$$

- D_{kl} – пиксель кадра яркости.
- w – величина окна (от 1 до 5).

При этом точка определяется как принадлежащая облакам, если для неё свёртка разности для высоты облаков меньше, чем для высоты поверхности Земли.

- *Проверка на лучшую корреляцию.* Считаются кадры корреляции между двумя картами фона и текущим кадром по формуле, аналогичной (3) (при этом размер области, по которой считается корреляция, значительно меньше, чем при определении высоты облаков). Далее создаётся промежуточная карта облаков, в которую попадают точки, для которых лучший из коэффициентов корреляции достаточно мал по сравнению с квадратом яркости этой точки в текущем кадре, т.е., фактически, все точки, находящиеся достаточно далеко от границы между облаками и поверхностью Земли. Потом на этой промежуточной карте облаков выбираются связанные области, и для каждой из них определяется их принадлежность к облачному слою методом, аналогичным первому алгоритму.
- *Проверка на принадлежность поверхности Земли.* Текущий кадр обеляется на основе карты фона для высоты поверхности Земли. И точка считается принадлежащей облакам, если яркость пикселя обелённого кадра недостаточно мала по сравнению с яркостью пикселя исходного кадра, т.е. если она плохо отфильтрована.
- *Проверка на принадлежность облакам.* Текущий кадр обеляется на основе карты фона для высоты облаков. И точка считается принадлежащей облакам, если яркость пикселя обелённого кадра мала по сравнению с СКО этого кадра.

7. Обеление кадра и пространственная фильтрация

На основе данной облаков фона создаёт карта фона с учётом высоты каждой точки со всеми возможными затенениями. Т.е. для точек с поверхности Земли при создании карты фона используются только те точки с других кадров, в которых данная точка не была закрыта облаками. Затем из текущего кадра вычитается карта фона и получается «обеленный» кадр.

Для борьбы с остаточными помехами целесообразно использовать пространственную фильтрацию. При пространственной фильтрации яркость пикселя обелённого кадра получается вычитанием из пикселя исходного кадра линейной комбинации яркостей соседних пикселей по формуле

$$b_{i,j} = \sum_{n=-p}^p \sum_{m=-p}^p b_{i+n,j+m} H_{n,m} \quad (5)$$

Использовались фильтры различной структуры [4], но наилучшие результаты показал крестовой фильтр нулевого порядка:

$$H_{nm} = \frac{1}{4} \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

8. Анализ и результаты работы алгоритма

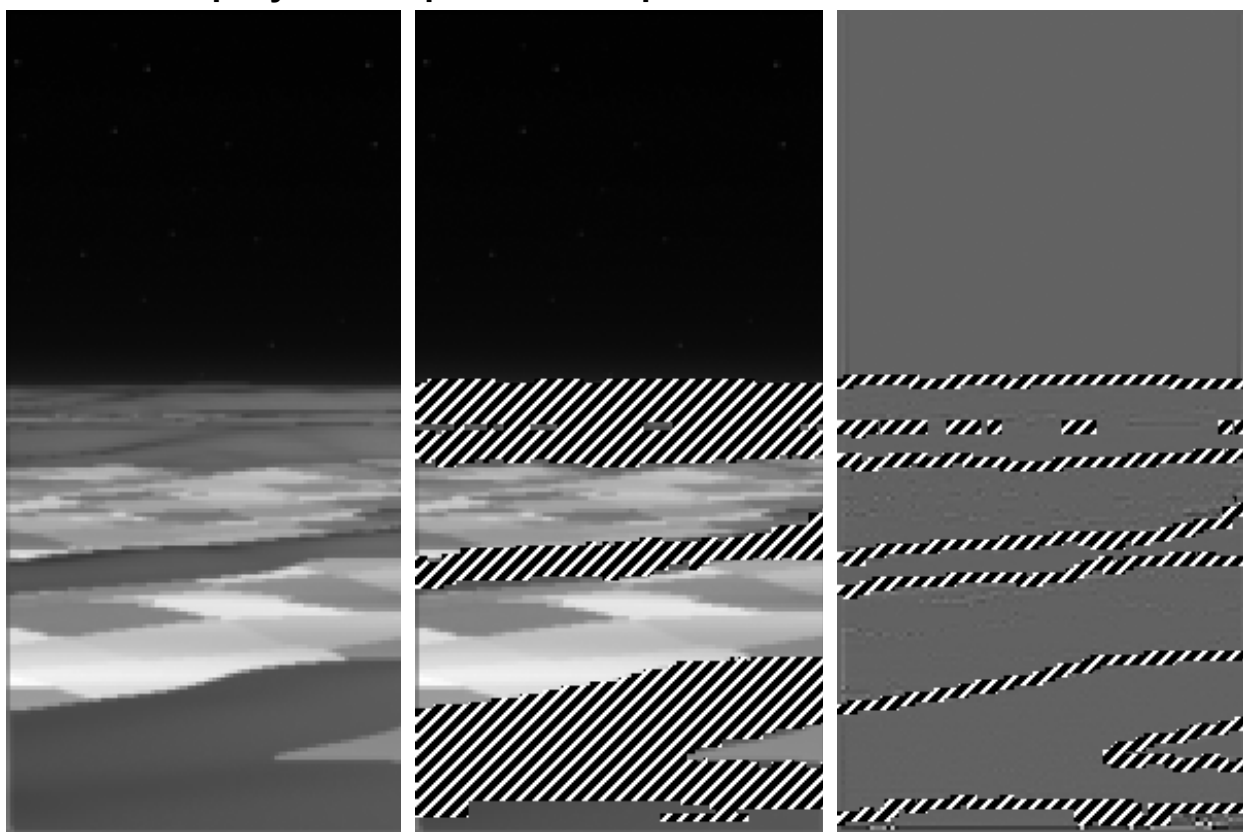


Рис. 2. Слева – кадр исходной последовательности, в центре – кадр с обнаруженными облаками, справа – обеленный кадр (штриховкой обозначены границы облаков – области, исключенный из обработки)

Исследование проводилось на синтетических последовательностях следующего характера:

1. Отсутствие облаков и рельефа.
2. Отсутствие облаков при перепадах высот на поверхности Земли до 600м.
3. Однослойная облачность с различным характером освещения.

Суммарные результаты работы представлены в Табл. 2 и на Рис. 2.

Результаты работы алгоритмов построения трехмерной карты облаков. Исследования представленного алгоритма на синтетических последовательностях показали, что высота облачного слоя определяется с точностью до 100м. Контуры облаков определяются с точностью до 2 пикселей (Рис. 2 – центр), что соответствует различным размерам в метрах в зависимости от близости облаков к горизонту (а значит – удаленности от наблюдателя). Зная высоту облаков и их контуры, мы фактически имеем полную трехмерную

Последовательность	Отношение СКО исходного кадра к СКО обелённого	Минимальный уровень полезного сигнала (в уровнях СКО фона)
Без облаков и без рельефа	30÷35	0.17
Без облаков и с рельефом ~600м	28÷32	0.18
С однослойной облачностью	26÷32	0.20
Табл. 1 Результаты обеления.		

картину облачного слоя.

Результаты работы алгоритмов обеления.

Результаты исследования алгоритмов обеления кадра представлены в Табл. 1. Прежде всего, исследовалась степень подавления мешающего сигнала (отношение СКО исходного кадра к СКО обелённого).

Точность определения высоты облачного слоя	100 метров
Точность определения границ облаков	1÷2 пикселя
Отношение СКО исходного кадра к СКО обелённого	26÷35
Минимальный уровень полезного сигнала (в уровнях СКО фона)	0.17÷0.20
Табл. 2 Общие результаты.	

Она достигала 35 при отсутствии облаков и 32 с однослойной облачностью. Как показали исследования, наличие рельефа земной поверхности не сказывается существенно на качестве работы алгоритмов.

Также проводились исследования минимального уровня полезного сигнала (в уровнях СКО фона) Для обнаружения сигнала в кадре выбирались 100 отметок наибольшей яркости. Полезный сигнал считался обнаруженным, если его отметка обнаружена в 5 кадрах из 7 последовательных [5]. Представленный алгоритм способен обнаруживать объекты, чья яркость составляет не больше 20% от СКО яркости фона.

9. Выводы

Задачей являлась разработка алгоритма фильтрации фона для следующей системы. С самолёта, летящего на высоте 7-10 км, производится наблюдение на фоне подстилающей поверхности и облаков. На самолёте установлены несколько камер, наблюдающих поверхность Земли и облака в направлении горизонта. Задачей такого наблюдения является обнаружение точечных движущихся объектов.

Особенностями данной задачи являются:

1. Нестационарность мешающего фона.
2. Нелинейность задачи, связанная со сферичностью Земли.
3. Сложная физическая картина фона. Учитывалось, что фон может составлять поверхность Земли с неизвестным рельефом, облачный слой неизвестной структуры и т.д.
4. Наличие разрывов функции яркости.
5. Наличие неограниченных производных некоторых функций, т.к. наблюдается области горизонта.

Был создан целый спектр похожих алгоритмов, дающих различные результаты для разных внешних условий, что позволяет выбирать лучший из них, и обеспечивает устойчивость качества результата в разных ситуациях.

При этом были созданы различные алгоритмы, близкие к оптимальным, а существование одинакового предела качества их работы позволяет утверждать, что он ограничен постановкой задачи, а не оптимальностью самих алгоритмов.

Результаты работы алгоритма характеризуются следующими основными параметрами:

- для случая безоблачной атмосферы коэффициент подавления фона достигает $28 \div 35$,
- при наличии облаков – $26 \div 32$,
- минимальный уровень обнаружимого полезного сигнала менее 20% от СКО фона.

Помимо базового комплексного алгоритма фильтрации были созданы следующие вспомогательные алгоритмы:

1. Алгоритм определения высоты облачного слоя исключительно по данным его наблюдения с летящего самолёта при полном отсутствии априорных данных о её величине.
2. Алгоритм построения карты облачного слоя по тем же данным.

Т.е. фактически реализованы алгоритмы построения трёхмерной картины по данным двухмерных наблюдений. Особо следует подчеркнуть, что большинство существующих алгоритмов подобного типа работают при больших изменениях ракурса наблюдения и на основе изучения поведения реперных точек. Разработанные здесь алгоритмы работают при малых углах изменения ракурса и не могут основываться на поведении реперных строчек, т.к. основной задачей данного алгоритма является селекция движущихся точечных целей.

10. Литература

1. Г. Ван Трис. Теория обнаружения, оценок и модуляции. М: Советское радио, 1977.
2. А.К. Ким, А.Е. Колесса, В.Н. Лагуткин, А.В. Лотоцкий, В.Г. Репин. Алгоритмы идентификации и подавления нестационарного мешающего фона и повышение разрешающей способности в оптическом сенсоре с хаотически колеблющейся оптической осью и динамическими аберрациями. Радиотехника, 1998, №12
3. Jebara T., Azarbayejani A., Pentland A. 3D structure from 2D motion, - IEEE Signal processing magazine, May 1999.
4. Методы компьютерной обработки изображений. Под ред. В.А. Сойфера. М: Физматлит, 2003.
5. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределённости и адаптация информационных систем. - «Советское радио», 1977.