

УДК 681.786.2

А.А. Тисленко

Повышение точности построения карт глубин пространства в активно-импульсной телевизионной измерительной системе с использованием цифровой фильтрации изображений

В качестве устройств определения дальности до объектов интереса (ОИ) может быть использована активно-импульсная телевизионная система (АИ ТИС). Применение АИ ТИС распространяется в сфере навигации транспортных средств, а также в области задач по обнаружению объектов при недостаточности естественного освещения и в условиях малопрозрачных сред. Работа посвящена исследованию повышения точности построения карт глубин пространства в АИ ТИС, построенной на базе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), при обработке выходных изображений системы фильтром Гаусса, медианным фильтром и 3D-фильтром. Выполнены: сравнительная оценка качества получаемых изображений и оценка измерения дальности. Показано, что применение фильтрации Гаусса обеспечивает одну из самых высоких эффективностей подавления шума на изображениях, получаемых данной системой, и тем самым позволяет строить карты глубин пространства с наивысшей точностью при использовании результата нахождения измерительной функции по методу аппроксимации. К достигнутым параметрам рассматриваемой системы можно отнести точность построения карт глубин по дальности до 4,5 см.

Ключевые слова: фильтрация, электронно-оптический преобразователь, шумовая составляющая, отношение сигнал/шум, измерение дальности.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-41-48

Решение задач определения дальности до объектов интереса (ОИ) требует высокого качества выходных изображений, получаемых с использованием АИ ТИС. Снижение качества выходных изображений обусловлено следующими факторами:

- 1) стационарная компонента шума ЭОП;
- 2) шум КМОП-матрицы (матрицы, построенной на базе CMOS-технологии);
- 3) шум квантования АЦП;
- 4) нестационарная компонента шума ЭОП;
- 5) неравномерная чувствительность КМОП-матрицы;
- 6) спекл-шум;
- 7) наличие повреждённых элементов КМОП-матрицы или групп элементов, имеющих аномальную чувствительность;
- 8) сцинтилляция (кратковременные вспышки на экране ЭОП).

Таким образом, величина яркости выходных изображений содержит полезную составляющую сигнала, аддитивную, мультипликативную и аппликативную составляющие [1, 2]. В связи с этим в данной работе исследуется эффективность применения методов пространственной и гомоморфной фильтрации к изображениям, полученным с использованием АИ ТИС, построенной на базе ЭОП, для обеспечения эффективного шумоподавления аддитивной и мультипликативной составляющих. Целью данной работы является оценка качества получаемых изображений и оценка точности построения карт глубин пространства по выходным кадрам АИ ТИС, обработанным фильтрами Гаусса, медианным и 3D-фильтром.

Решение проблемы подавления сложной шумовой составляющей рассматривается в отечественных работах. В работе [3] для решения данной проблемы предложен алгоритм расширения динамического

диапазона уровней яркости. В [4] описывается простейший метод обработки изображений – усреднение нескольких десятков кадров одной и той же сцены, и в [5] оценивается точность построения карт глубин. Работы [6, 7] посвящены применению сверточной искусственной нейронной сети шумоподавления и алгоритмов инверсной фильтрации соответственно. В работах зарубежных авторов, в частности [8], выполнено сравнение различных видов билатеральных фильтров при обработке изображения, полученного твердотельным лидаром.

Описание АИ ТИС

Принцип работы АИ ТИС основывается на импульсном подсвете пространства и стробировании по времени фотоприёмного устройства, оснащенного быстродействующим затвором.

Используемые в данной работе данные были получены с использованием АИ ТИС, структурная схема которой приведена на рис. 1 [9].

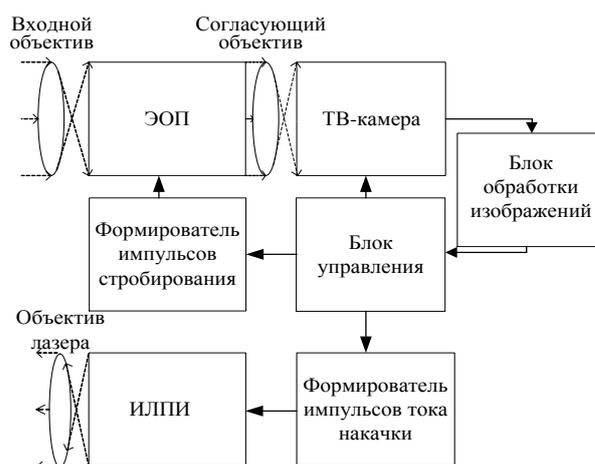


Рис. 1. Структурная схема АИ ТИС

Структурную схему АИ ТИС можно условно разделить на три модуля: лазерный излучающий модуль, приёмный модуль фотоприёмника, модуль управления и обработки изображений.

Формирование светового импульса обеспечивается в лазерном излучающем модуле путём подачи управляющего сигнала на формирователь импульсов тока накачки, где формируются импульсы подсвета пространства (ИПП) с заданными параметрами. Сформированный сигнал с выхода формирователя импульсов тока накачки поступает на импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ), импульсная мощность которого равна 320 Вт, где непосредственно формируется световой поток ИК-диапазона длин волн. Сформированный световой поток после прохождения через объектив излучателя распространяется в пространстве и, попадая на ОИ, отражается от него, образуя отражённый световой поток.

Регистрация отражённого светового потока осуществляется при открытом затворе ЭОПа, открытие которого производится поступившим управляющим сигналом с блока управления. Продолжительность времени открытого состояния затвора называется длительностью импульса стробирования фотоприёмника (ИСФ). Время от начала излучения и до момента открытия затвора называется задержкой стробирования. ЭОП преобразует поступающий световой поток ИК-диапазона в видимое излучение и усиливает его интенсивность. После прохождения ЭОПа поток фотоэлектронов через согласующий объектив фокусируется на КМОП-матрицу, которая обеспечивает формирование конечного изображения.

Описанный принцип работы ТИС, работающей в АИ-режиме, представляет реализацию метода стробирования по дальности. Это означает, что импульсы света, излучаемые системой, отражаются от ОИ и регистрируются АИ ТИС в заданные промежутки времени. Длительность распространения излучаемых импульсов света ограничена длительностью ИПП, а время, за которое отражённый световой поток будет регистрироваться системой, ограничивается длительностью ИСФ. Длительности ИПП и ИСФ, а также величина задержки стробирования определяют просматриваемую (подсвечиваемую) часть пространства – активную зону видения (АЗВ). На рис. 2 представлены диаграммы сигналов ИПП и ИСФ при равных длительностях; на рис. 3 – длительность ИПП меньше, чем длительность ИСФ, и диаграммы АЗВ соответственно.

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют, что форма и протяжённость АЗВ (l_z) пространства определяется длительностями ИПП и ИСФ, а также их соотношением.

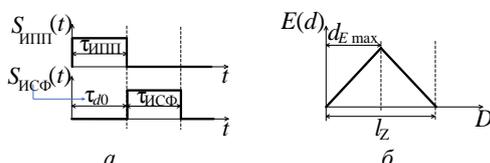


Рис. 2. Диаграммы сигналов при равных длительностях ИПП и ИСФ: а – ИПП и ИСФ; б – АЗВ

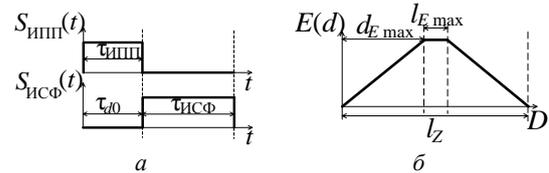


Рис. 3. Диаграммы сигналов при разных длительностях ИПП и ИСФ: а – ИПП и ИСФ, б – АЗВ

Величиной $d_{E \max}$ обозначается дальность до точки пространства, содержащей потенциальный ОИ, с максимальной интенсивностью отражаемого света. Вычисляется как

$$d_{E \max} = \frac{\tau_{d0} \cdot c}{2},$$

где τ_{d0} – начальная задержка стробирования; c – скорость света.

При разных длительностях ИПП и ИСФ величина $l_{E \max}$ характеризует протяжённость части пространства с максимальной интенсивностью отражаемого света от потенциально находящегося в этой части пространства ОИ. В случае когда длительность ИСФ больше, чем длительность ИПП, величина $l_{E \max}$ вычисляется как

$$l_{E \max} = \frac{(\tau_{ИСФ} - \tau_{ИПП}) \cdot c}{2},$$

где $\tau_{ИПП}$ – длительность ИПП; $\tau_{ИСФ}$ – длительность ИСФ.

Методы измерения дальности АИ ТИС условно разделяются по количеству используемых АЗВ. В данной работе используется многозонный метод измерения дальности (ММИД) [10], заключающийся в формировании двух групп кадров: с первой АЗВ и с суммарной АЗВ.

Яркость пикселя кадра с первой АЗВ аналитически описывается следующим образом:

$$I_1(x, y) = I(x, y, \tau_{d0}) \cdot N,$$

где $I(x, y, \tau_{d0})$ – яркость пикселя с координатами (x, y) с АЗВ, сформированной при задержке стробирования τ_{d0} ; N – количество локальных АЗВ в группе кадров.

Из выражения яркости пикселя кадра с первой АЗВ видно, что каждый кадр состоит из суммы N локальных АЗВ, т.е. его формирование обеспечивается накоплением в КМОП-матрице совокупностей множеств фотонов, относящихся к каждой АЗВ, за время экспозиции одного кадра. Таким образом, обеспечивается искусственное увеличение интенсивности регистрируемого светового потока в кадре.

Яркость пикселя кадра с суммарной АЗВ аналитически описывается следующим образом:

$$I_2(x, y) = \frac{N}{M} \cdot \sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d0} + (m-1) \cdot \Delta\tau_d)],$$

где $\Delta\tau_d$ – шаг задержки стробирования; M – количество различных задержек стробирования.

Отличие двух групп кадров состоит в том, что кадры с суммарной АЗВ формируются из нескольких совокупностей локальных АЗВ, которые смещены в пространстве относительно друг друга на некоторый дискретный шаг по дальности, пропорциональный $\Delta\tau_d$.

При нормировании кадра с суммарной АЗВ относительно кадра с первой АЗВ вычисляется кадр отношения. Он представляет собой массив значений, каждый элемент которого содержит число от нуля до единицы, т.е. данный массив содержит значения относительной яркости (ОЯ). Значения ОЯ являются аргументами измерительной функции, которая используется для пересчета измеренной ОЯ в оценку дальности.

Описание фильтрации и принципа построения карт глубин

В этой работе к выходным кадрам обоих типов, полученным по ММИД, применяются фильтр Гаусса со среднеквадратичным отклонением равным 7, медианный фильтр, размерность апертуры которого равна 1×7 , и 3D-фильтр, параметр сигма (величина дисперсии билатерального фильтра) которого равен 25. Применение фильтра размытия Гаусса и медианного фильтра общеизвестно [11]. 3D-фильтр основан на гомоморфной фильтрации в совокупности со стохастическим подходом, его описание дано в [12].

Карта глубины пространства, в сущности, является всё тем же изображением сцены, где каждому пикселю вместо значения яркости присваивается значение дальности до соответствующей области отображаемого пространства. Для удобства восприятия карты глубины по дальности часто используют цветовую палитру.

Таким образом, текущие оценки дальности до некоторой области на поверхности ОИ формируются в АИ ТИС на основе предварительно известной измерительной функции.

Аналитический вид функции измерения неизвестен. Реально в качестве неё выступает калибровочная функция. Она может быть получена применением аппроксимации к вычисленной, при нормировании кадров, совокупности значений ОЯ ОИ, расположенных на различных известных дальностях от системы. Здесь необходимо отметить, что совокупность значений ОЯ для отдельных областей ОИ, расположенных на различных дальностях от системы, вычисляется путём усреднения значений ОЯ в некоторой области ОИ. Усреднение значений ОЯ позволяет уменьшить влияние флуктуаций сигнала яркости (от пикселя к пикселю) и получить более точную оценку калибровочной функции.

Таким образом, входными данными для выполнения калибровки являются усреднённые значения ОЯ ОИ. При этом каждому элементу множества значений ОЯ соответствует величина эталонной дальности до известной области на его поверхности. В качестве критерия аппроксимации используется среднеквадратичный критерий. Для сглаживания используется полином 5-й степени [13–15].

При подстановке в калибровочную (измерительную) функцию текущих значений ОЯ вычисляются оценки дальности до соответствующих областей на поверхности ОИ. При подстановке значений ОЯ каждого пикселя кадра отношения формируется изображение. При этом яркость каждого пикселя содержит

информацию о дальности до отображаемой области на поверхности ОИ.

Описание методики оценок ОСШ, абсолютной ошибки (АО) и времени обработки

Для оценивания качества обработанных изображений используется эталонная оценка ОСШ [16], для которой в качестве эталонных изображений используются усреднённые (по 300 отдельным кадрам) изображения, причём ОСШ оценивается не по всему изображению, а лишь по области ОИ. Выражение, по которому производится вычисление ОСШ,

$$\text{ОСШ} = 20 * \log(M / \sigma), \quad (1)$$

где M – математическое ожидание выборки значений яркости пикселей по области ОИ; σ – среднеквадратичное отклонение (СКО) по яркости.

Выражение для определения σ имеет следующий вид:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (I(i, j) - K(i, j))^2} / mn, \quad (2)$$

где $I(i, j)$ – яркость текущего пикселя изображения; $K(i, j)$ – яркость соответствующего пикселя эталонного изображения; m, n – линейные размеры фрагмента изображения.

Для оценки ошибки между полученными значениями дальности по аппроксимирующей функции D_h и эталонными (известными) значениями дальности h измеряемого диапазона вычисляются АО для каждого отсчёта измеряемого диапазона:

$$\text{АО}_h = h - D_h. \quad (3)$$

В качестве интегральной оценки точности построения карт глубин используется критерий среднеквадратичной ошибки (СКО). Выражение, по которому вычисляется СКО,

$$\text{СКО} = \sqrt{\sum_{h=1}^H (\text{АО}_h)^2} / H, \quad (4)$$

где H – количество значений диапазона измеряемой дальности.

При обработке различными фильтрами кадров каждой группы вычислялось время обработки каждого кадра. Среднее время обработки вычислялось как среднее арифметическое всех полученных значений времени обработки для каждого кадра каждого типа.

Результаты обработки

Исходные изображения для обработки были получены путём проведения эксперимента с использованием АИ ТИС, по ММИД, при выбранных в результате теоретического моделирования значениях параметров: длительность импульса подсвета – 30 нс, длительность импульса стробирования фотоприёмника – 130 нс, начальная величина задержки стробирования – 60 нс, шаг задержки стробирования – 6 нс, количество используемых АЗВ равно 20. Описание проведения эксперимента: в узком длинном пространстве (коридоре) расположен ОИ (транспарант с белым листом бумаги на деревянном штативе), изображение которого фиксировалось в режиме видео-

записи АИ ТИС. Штатив с транспарантом по мере увеличения измеряемой дальности смещается вглубь сцены, всё дальше отдаляясь от АИ ТИС. Измеряемым диапазоном дальности является участок пространства от 8 до 20 м, транспарант смещается с шагом 1 м.

Необработанные, обработанные и усреднённые изображения визуально мало отличаются друг от друга. Поэтому для демонстрации изменений была взята выборка яркости по строке, расположенной на середине ОИ (показана пунктирной линией на рис. 4).

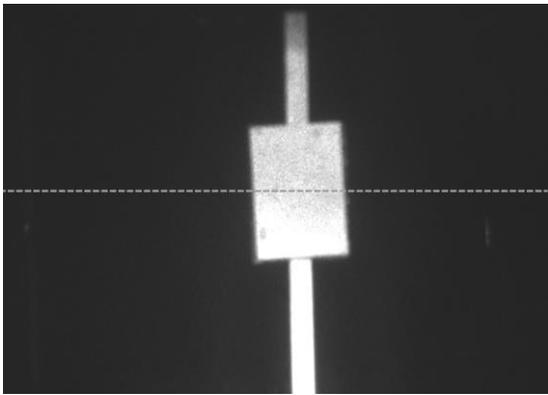


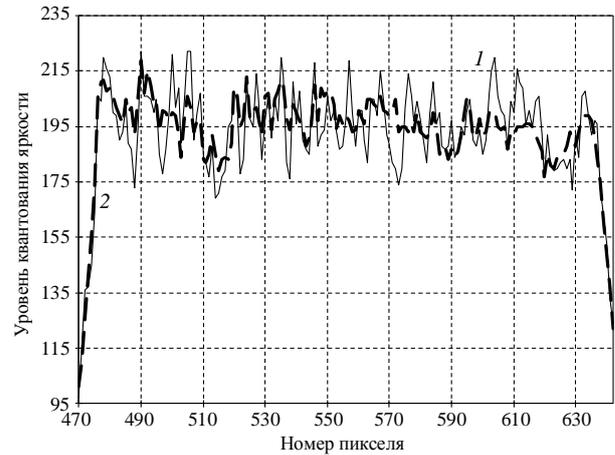
Рис. 4. Пример получаемого изображения (пунктиром показана строка, по данным из которой производится построение графиков зависимости значений яркости от номера пикселя в строке)

На рис. 5, *а* представлены графики зависимостей значений яркости пикселей от номера столбца (распределение яркости по строкам) для необработанных и усреднённых изображений, на рис. 5, *б* – для обработанных различными фильтрами. При этом взята не вся строка, а лишь её часть, отражающая яркость ОИ.

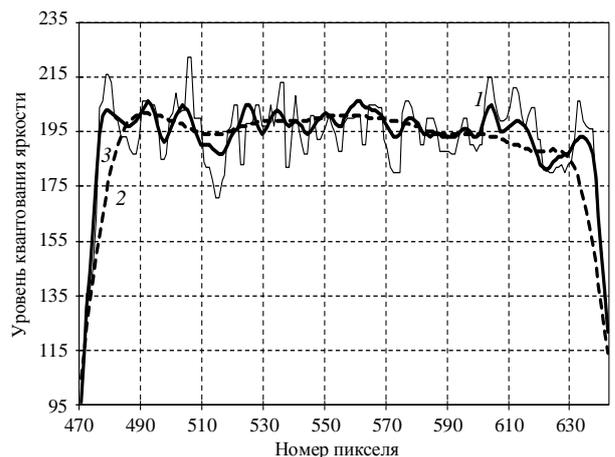
Из графиков зависимостей, приведённых на рис. 5, *а*, видно, что характер поведения графиков зависимости для усреднённых кадров и необработанных схожи в целом. На рис. 5, *а* для необработанных кадров наблюдаются значительные флуктуации сигнала яркости по сравнению с сигналом яркости усреднённых и обработанных кадров, что отражает значительную зашумлённость необработанных изображений. Помимо флуктуаций, наблюдаются глобальные изменения уровня яркости, обусловленные особенностями работы ЭОП [4].

Исходя из рис. 5, *б*, кадры, обработанные фильтром Гаусса и 3D-фильтром, обладают выраженной «степенью» шумоподавления в связи со «сглаженностью» флуктуаций сигнала яркости. Однако такое сглаживание может быть выражено в потерях яркостной составляющей в некоторых областях изображения, что влияет на детализацию изображения и предположительно увеличивает ошибку определения дальности.

Среднее время обработки изображений, разрешение которого составляет 1032×772 пикселей, различными фильтрами, вычисление которого произведено в программной среде MATLAB при аппаратной поддержке intel core i5-6200U (2,3 ГГц), 4 Гб оперативной памяти, представлено в табл. 1.



Видеокадры: 1 – необработанный, 2 – усреднённый
а



1 – медианный фильтр (1×7);
2 – 3D-фильтр (сигма равна 25);
3 – фильтр Гаусса (СКО равно 7)

б

Рис. 5. Графики зависимостей значений яркости пикселей от номера пикселя в строке: *а* – необработанные и усреднённые кадры; *б* – обработанные кадры

Таблица 1

Среднее время обработки исходных изображений различными фильтрами

Название фильтра	Среднее время, мс
Фильтр Гаусса	2,3
Медианный фильтр	1,8
3D-фильтр	20000

Также была проведена оценка σ по выражению (2) (рис. 6, *а*) и ОСШ по выражению (1) (рис. 6, *б*) для кадров с первой АЗВ.

Из рис. 6, *а* видно, что графики зависимости СКО для обработанных и необработанных видеокадров схожи по характеру поведения. Наибольшие уровни СКО можно отнести к реальным кадрам в связи с отсутствием подавления на них шумовой составляющей. Общее снижение СКО с увеличением дальности предположительно связано с тем, что на ближних дистанциях значительный вклад шумовой составляющей вносит мультипликативный шум, а именно нестационарная компонента шума ЭОПа, величина которой пропорциональна интенсивности

регистрируемого светового потока. На дальних дистанциях интенсивность отражённого излучения от объектов гораздо меньше, чем на ближних дистанциях, соответственно, величина мультипликативной составляющей предположительно очень мала. Однако, исходя из графиков СКО, приведённые зависимости не принимают нулевые значения, а в целом сохраняют некоторый уровень (с 18 до 20 м), что предположительно связано с сохраняющимся вкладом аддитивной составляющей шума.

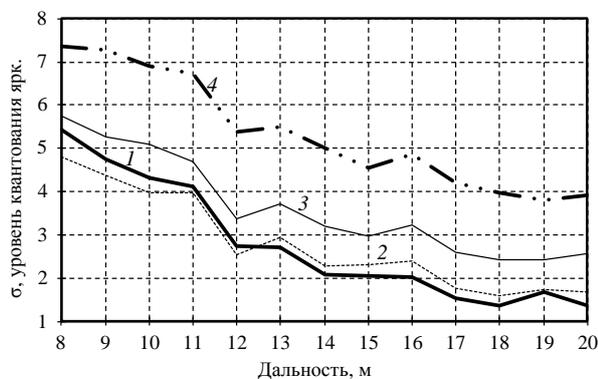


Рис. 6. Графики зависимости СКО и ОСШ от дальности:
 1 – фильтр Гаусса (СКО равно 7);
 2 – 3D-фильтр (сигма равна 25);
 3 – медианный фильтр (1×7); 4 – без обработки

Из рис. 6, б видно, что графики зависимости ОСШ для обработанных и необработанных кадров в целом схожи по поведению. На ближних дистанциях по значениям ОСШ наибольшая эффективность в задаче подавления шумовой составляющей достигается при применении фильтра Гаусса и 3D-фильтра. При увеличении дальности наблюдается значительное снижение ОСШ для кадров, поскольку к концу измеряемого диапазона существенно проявляется шумовая составляющая и значительно уменьшается интенсивность регистрируемого света (в связи с влиянием закона обратных квадратов). Исходя из рис. 6, б, лучшее шумоподавление достигается при применении фильтра Гаусса.

На рис. 7 приведена оценка измерительной функции, найденной посредством аппроксимации совокупности ОЯ, вычисленной по усреднённым кад-

рам полиномиальной функцией 5-й степени. Выбор полиномиальной функции 5-й степени обусловлен тем, что для данного вида функции наблюдается величина ошибок оценки дальности меньше, чем в случае использования линейной аппроксимирующей функции.

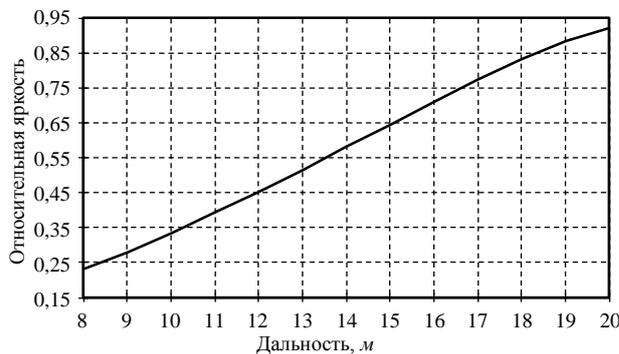


Рис. 7. Оценка измерительной функции

На рис. 8 приведён пример построенной карты глубин пространства по усреднённому изображению.

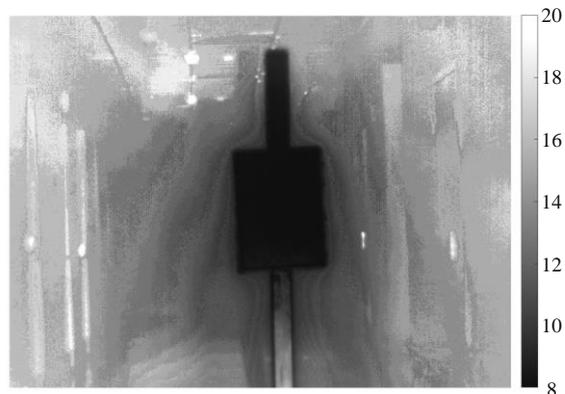


Рис. 8. Пример построенной карты глубин пространства по усреднённому изображению

На рис. 8 виден транспарант, чёрный цвет отображения которого в соответствии со шкалой справа сигнализирует о ближней дальности до него (около 8 м). Однако области около транспаранта выглядят неправдоподобно: за транспарантом не расположено других объектов, и поэтому области около транспаранта должны иметь светлые оттенки цвета близкие к максимальной дальности по шкале справа. Такое явление связано с особенностями работы ЭОПа, которое называется ореольностью.

После построения карт глубин пространства были вычислены АО по выражению (3) и в графическом виде отражены на рис. 9 как зависимость АО от значений дальности. Данный график содержит ограничение представляемых значений дистанции, поскольку для необработанных кадров и кадров, обработанных медианным фильтром, наблюдается значительная АО (до -1,5 м для необработанных).

По выражению (4) и данным, приведённым на рис. 9, были вычислены значения СКО (табл. 2) измерения дальности как интегральные оценки точности построения карт глубин.

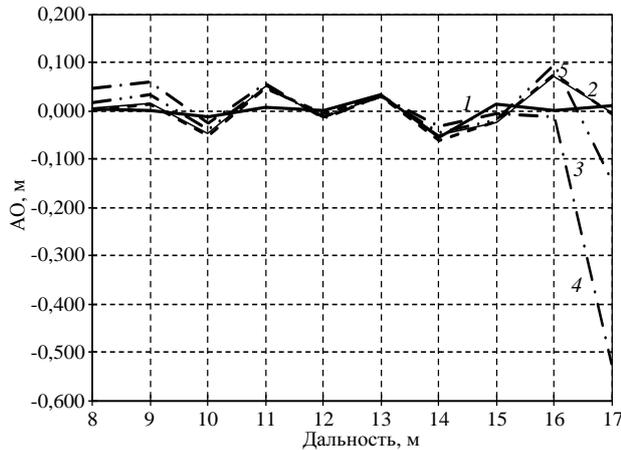


Рис. 9. Зависимости АО от дальности: 1 – усреднение; 2 – фильтр Гаусса (СКО равно 7); 3 – медианный фильтр (1×7); 4 – без обработки; 5 – 3D-фильтр (сигма равна 25)

Таблица 2

Результаты вычисления СКО	
Вид обработки кадров	СКО, м
Без обработки (реальные)	1,390
Фильтр Гаусса	0,045
Медианный фильтр	0,367
3D-фильтр	0,062
Усреднение	0,026

Необходимо отметить, что наблюдаемое на рис. 5, б значительное сглаживание флуктуаций сигнала яркости при использовании фильтра Гаусса влечёт за собой снижение детализации изображения, но на определяемые значения дальности до ОИ данный фактор имеет слабое влияние. Это связано с тем, что при определении дальности до ОИ используются средние значения яркости по полю ОИ, что некоторым образом уменьшает отклонение среднего значения яркости обработанного кадра от среднего значения яркости усреднённого (теоретически с отсутствующим шумом) кадра.

Заключение

Согласно данным, приведённым на рис. 6, видно, что наибольшая эффективность в решении задачи шумоподавления достигается при использовании фильтра Гаусса с размером апертуры, равной 7, и 3D-фильтра с параметром сигма, равным 25. По данным рис. 9 видно, что АО для усреднённых кадров минимальны на всей дистанции измерения, а также АО для случаев фильтра Гаусса и 3D-фильтра на дистанции до 17 м практически полностью совпадают, однако после 17 м для 3D-фильтра возрастают до $-13,6$ см, что вносит вклад в СКО для 3D-фильтра. По данным табл. 2 наименьшее значение СКО соответствует построению карт глубин по усреднённым кадрам (2,6 см). Обработка фильтром Гаусса обеспечивает СКО, равное 4,5 см. Несмотря на высокую эффективность шумоподавления в случае применения 3D-фильтра, по данным табл. 2 СКО для карт глубин, построенных по кадрам обработанных этим фильтром, составляет 6,2 см. К тому же по данным табл. 1 среднее время обработки 3D-фильтром на четыре

порядка больше, чем обработки фильтром Гаусса. Таким образом, фильтр Гаусса наиболее эффективен среди представленных для подавления специфического шума изображений АИ ТИС, и обеспечении приемлемой ошибки измерения дальности. Но использование кадров, обработанных фильтром Гаусса с СКО, равным 7, для построения «дальномерного портрета» ОИ с высоким пространственным разрешением является малоэффективным, поскольку чёткость в области измерения ОИ в значительной степени снижается, что делает невозможным отображение мелких деталей объекта.

Литература

- Капустин В.В. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы с повышенной устойчивостью к оптическим помехам: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2017. – 118 с.
- Конюхов А.Л. Критерии оценки отношения сигнал / шум в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах / А.Л. Конюхов, А.Г. Костевич, М.И. Курячий // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 111–115.
- Математическая обработка изображений системы дистанционного зондирования на базе электронно-оптического преобразователя / А.А. Ильин, А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, А.И. Родионов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 3. – С. 106–113.
- Виноградов А.Н. Обработка изображений, полученных при дистанционном зондировании системами на базе ЭОП / А.Н. Виноградов, А.А. Ильин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник тезисов конференции: матер. VII Всерос. открытой ежегодной конф. – М.: ИКИ РАН, 2009. – Вып. 6.
- Тисленко А.А. Оценка точности построения карт глубин, полученных активно-импульсной телевизионной измерительной системой по усреднённым и реальным кадрам / А.А. Тисленко, А.С. Толмачева, А.К. Мовчан // Научная сессия ТУСУР-2023: сб. избр. статей научной сессии ТУСУР: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск: ТУСУР, В-Спектр, 2023. – Ч. 1. – С. 109–113.
- Новгородов А.А. Исследование эффективности восстановления изображений, полученных активно-импульсной телевизионной системой с помощью сверточной нейронной сети шумоподавления / А.А. Новгородов, Н.А. Бородина, М. Назарбек // Электронные средства и системы управления: матер. XVII Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: ТУСУР, В-Спектр, 2021. – Ч. 2. – С. 223–225.
- Сылкова Д.А. Повышение качества изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем с использованием алгоритмов инверсной фильтрации / Д.А. Сылкова, А.Н. Утемисов, В.В. Капустин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 39–42.
- High-resolution LIDAR-based depth mapping using bilateral filter / C. Premebida, L. Garrote., A. Asvadi, A.P. Ribeiro, U. Nunes // IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rio de Janeiro, Brazil. – 2016. – P. 2469–2474. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795953.
- Tislenko A.A. Improving the Distance Measurement Accuracy of Active-Pulse Television Measuring Systems Using Polynomial Approximation / A.A. Tislenko, A.K. Movchan, V.V. Kapustin // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2022. – P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002953.

10. Мовчан А.К. Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2022. – 141 с.
11. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
12. Трёхмерная фильтрация изображений, искажённых смешанным мультипликативно-аддитивным шумом / В.Ф. Кравченко, В.И. Пономарев, В.И. Пустовойт, А. Паласиос-Энрикес // Доклады РАН. Математика, информатика, процессы управления. – 2020. – Вып. 494. – С. 414–417.
13. Ахизер Н.И. Лекции по теории аппроксимации. – М.: Гостехиздат, 1947. – 324 с.
14. Галеев Э.М. Теория аппроксимации. – Баку: Изд-во МГУ, 2016. – 108 с.
15. Данилов А.М. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 168 с.
16. Монич Ю.И. Оценки качества для анализа цифровых изображений / Ю.И. Монич, В.В. Старовойтов // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 376–386.

Тисленко Алексей Александрович

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т., 40, г. Томск, Россия, 643050
ORCID: 0009-0009-8082-6753
Тел.: +7-952-894-07-51
Эл. почта: tislenco_1999-2012@mail.ru

Tislenko A.A.

Improving the accuracy of depth maps generation in an active-pulse television measuring system using digital image filtering

A study was carried out to improve the accuracy of maps generation for spatial depths in an active-pulse television measuring system built on the basis of an image intensifier, when processing the output images of the system with a Gaussian filter, a median filter and a 3D filter. A comparative assessment of the quality of the resulting images and an assessment of the range measurement were carried out. It is shown that the use of Gaussian filtering provides one of the highest efficiencies of noise suppression on images obtained by an active-pulse television measuring system built on the basis of an image intensifier, and thereby makes it possible to generate maps of spatial depths with the highest accuracy when using the result of finding the measuring functions using the approximation method. The achieved parameters of the system under consideration include the accuracy of constructing spatial depth maps, which is equal to 4.5 cm.

Keywords: filtering, image intensifier tube, noise component, signal-to-noise ratio, range measurement.

doi: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-41-48

References

1. Kapustin V.V. Aktivno-impul'snyye televizionnyye izmeritel'nyye sistemy s povyshennoy ustoychivost'yu k opticheskim pomerkham [Active-pulse television measuring systems with increased resistance to optical interference. Dissertation for Candidate of sciences title]. Tomsk, 2017, 118 p. (in Russ.).

2. Konyukhov A.L., Kostevich A.G., Kuryachiy M.I. Kriterii otsenki otnosheniya signal/shum v aktivno-impul'snykh televizionno-vychislitel'nykh sistemakh [Criteria for assessing the signal-to-noise ratio in active-pulse television-computing channels]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 2 (26), pt. 1, pp. 111–115. (in Russ.).

3. Ilyin A.A., Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P., Rodionov A.I. Matematicheskaya obrabotka izobrazheniy sistemy distan-tsionnogo zondirovaniya na baze elektronno-opticheskogo preobrazovatelya [Mathematical processing of images of a remote sensing system based on an image intensifier tube]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]*, 2013, vol. 10, no. 3, pp. 106–113 (in Russ.).

4. Vinogradov A.N., Ilyin A.A. Obrabotka izobrazheniy, poluchennykh pri distantsionnom zondirovanii sistemami na baze EOP [Processing of Images Obtained by Remote Sensing Systems Based on Image Intensifier]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Sbornik tezisov konferentsii: Materi-aly Sed'moy Vserossiyskoy otkrytoy yezhegodnoy konfe-rentsii [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. Collection of Abstracts of the Conference: Proceedings of the Seventh All-Russian Open Annual Conference]*. Moscow, IKI RAS, 2013, vol. 6 (in Russ.).

5. Tislenko A.A., Tolmacheva A.S., Movchan A.K. Issledovaniye effektivnosti vosstanovleniya izobrazhe-niy, poluchennykh aktivno-impul'snoy televizionnoy si-stemoy s pomoshch'yu svertochnoy neyronnoy seti shumopo-davleniya [Assessment of the accuracy of building depth maps obtained by an active-pulse television measuring system using averaged and real frames]. *Nauchnaya sessiya TUSUR–2023. Sbornik izbrannykh statey nauchnoy sessii TUSUR: Materialy Mezhdunarodnoy Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchonykh [Scientific session TUSUR-2023. Collection of selected articles of the TUSUR scientific session: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]*. Tomsk, TUSUR, 2023. Part 1, pp. 109–113 (in Russ.).

6. Novgorodov A.A., Borodina N.A., Nazarbek M. [Investigation of the efficiency of restoring images obtained by an active-pulse television system using a convolutional neural network for noise reduction]. *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya: Materialy XVII Mezhdunarodnoy Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Electronic Devices and Control Systems: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference]*. Tomsk, TUSUR, 2021, part 2, pp. 223–225 (in Russ.).

7. Sytkova D.A., Utemisov A.N., Kapustin V.V. Povysheniye kachestva izobrazheniy aktivno-impul'snykh televizionno-vychislitel'nykh sistem s ispol'zovaniyem algoritmov inverznoy fil'tratsii [Improving the quality of images of active-pulse television computing systems using inverse filtering algorithms]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 39–42 (in Russ.).

8. Premebida C., Garrote L., Asvadi A., Ribeiro A.P., Nunes U. High-resolution LIDAR-based depth mapping using bilateral filter, *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2016, pp. 2469–2474. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795953.

9. Tislenko A.A. Improving the Distance Measurement Accuracy of Active-Pulse Television Measuring Systems Using Polynomial Approximation / A.A. Tislenko, A.K. Movchan, V.V. Kapustin // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002953

10. Movchan A.K. Metody i algoritmy pretsizionnogo izmereniya dal'nosti v aktivno-impul'snykh televizionnykh izmeritel'nykh sistemakh [Methods and algorithms for precision

range measurement in active-pulse television measuring systems. Cand. Diss.]. Tomsk, 2022. 141 p. (in Russ.).

11. Gonzalez R., Woods R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital Image Processing]. Moscow, Technosphere, 2012, 1104 p. (in Russ.).

12. Kravchenko V.F., Ponomarev V.I., Pustovoi V.I., Palacios-Enriques A. Trekhmernaya fil'tratsiya izobrazheniy, iskazhonnykh smeshannym mul'tiplikativno-additivnym shumom [3D filtering of images distorted by mixed multiplicative-additive noise]. Doklady RAN. Matematika, informatika, protsessy upravleniya [Reports of the Russian Academy of Sciences. Mathematics, Informatics, Control Processes]. 2020, iss. 494, pp. 414–417 (in Russ.).

13. Akhiezer N.I. Lektsii po teorii approksimatsii [Lectures on Approximation Theory]. Moscow, Gostekhizdat, 1947, 324 p. (in Russ.).

14. Galeev E.M. *Teoriya approksimatsii* [Approximation theory]. Baku: branch of the publishing house of Moscow State University, 2016, 108 p. (in Russ.).

15. Danilov A.M., Garkina I.A. Interpolyatsiya, ap-proksimatsiya, optimizatsiya: analiz i sintez slozhnykh sistem

[Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems]. Penza: PGUAS, 2014, 168 p. (in Russ.).

16. Monich Y.I., Starovoitov V.V. Otsenki kachestva dlya analiza tsifrovyykh izobrazheniy [Quality assessments for digital image analysis]. *Iskusstvennyy intellekt [Artificial Intelligence]*, 2008, no. 4, pp. 376–386 (in Russ.).

Alexey A. Tislenko

Master student, Department of Television and Control (TC), Tomsk State University of Control Systems

and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 643050

ORCID: 0009-0009-8082-6753

Phone: +7-952-894-07-51

Email: tislenko_1999-2012@mail.ru