

УДК 681.786.2

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ МНОГОЗОННЫМИ МЕТОДАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАНЫМ

© В. В. Капустин, А. К. Мовчан, А. А. Тисленко

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),  
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40  
E-mail: peregnin@mail.ru*

В работе представлены результаты оценки точности построения карт глубин пространства с использованием активно-импульсной телевизионной измерительной системы по экспериментальным данным. Описаны два многозонных метода построения карт глубин. Представлены результаты оценки абсолютных и среднеквадратичных ошибок измерения дальности для карт глубин, построенных по реальным и усреднённым кадрам, которые получены с использованием описанных многозонных методов в ходе экспериментальных исследований. В качестве измерительных функций, по которым осуществлялось построение карт глубин, были взяты аппроксимирующие функции линейного и полиномиального видов, вычисленные по методу наименьших квадратов.

*Ключевые слова:* аппроксимация, карта глубин, дальность, импульс, среднеквадратичная ошибка, активно-импульсная телевизионная измерительная система, эксперимент.

DOI: 10.15372/AUT20240113

EDN: EFPOVI

**Введение.** Современные системы видеонаблюдения постоянно совершенствуются, решая одну крупную, до сих пор актуальную, задачу — повышение качества выходного изображения, которое включает в себя процесс подавления шумовых составляющих и процесс улучшения качества изображения. Помимо этой основной проблемы, решается ряд других вопросов разработки систем видеонаблюдения, одним из которых является определение по получаемым изображениям дальности до объектов интереса. Одним из решений данного вопроса является построение карт глубин пространства, каждый пиксель которой отражает численное значение дальности до объекта интереса [1, 2]. На сегодняшний день существует ряд устройств и методов, которые позволяют реализовывать это решение, но все они обладают определёнными недостатками и погрешностями в измерении дальности [3–6]. В данной работе рассматриваются методы построения карт глубин пространства с использованием активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС). Применение данной системы может распространяться на задачи наблюдения за областью интереса различными беспилотными мобильными системами и интеллектуальными транспортными средствами в силу способности измерять дальность до объектов при наличии в поле зрения различных помех, таких как дымка, туман, осадки и т. д.

Целью представленной работы является экспериментальная оценка точности построения карт глубин АИ ТИС при использовании многозонных методов измерения дальности с модуляцией усиления фотоприёмника и без неё с применением аппроксимирующих функций линейного и полиномиального видов.

**Структурная схема АИ ТИС и принцип её работы.** Работа АИ ТИС основана на принципе стробирования по дальности [7–10]. Данный принцип заключается в оцен-

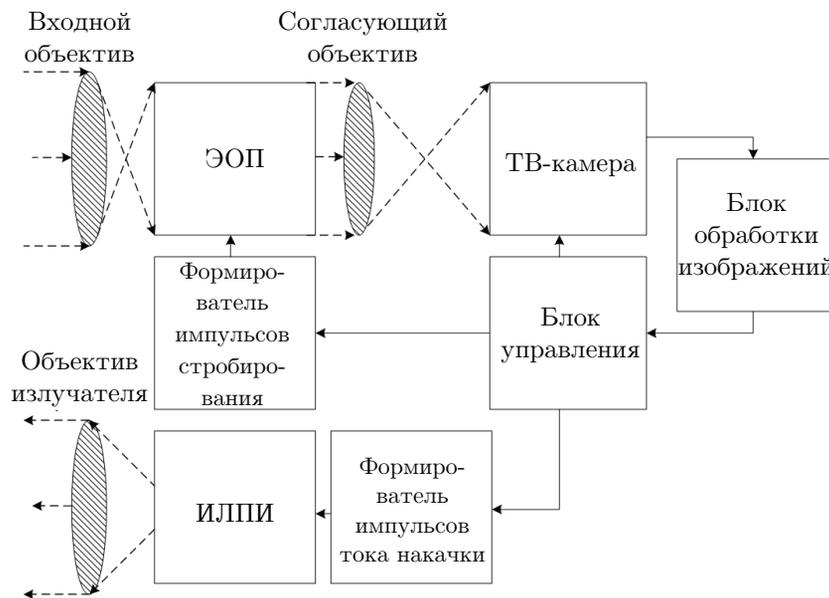


Рис. 1. Структурная схема АИ ТИС

ке времени распространения света до объекта и обратно. Структурная схема АИ ТИС приведена на рис. 1.

Работа АИ ТИС описывается следующим образом: блок управления подаёт сигнал на формирователь импульсов тока накачки, который обеспечивает формирование импульсов тока определённой формы и длительности. Данные импульсы тока подаются на импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ), в котором возникает электромагнитное излучение в невидимом для глаза частотном диапазоне света (инфракрасный диапазон (ИК) длин волн — 850 нм). Затем полученный световой поток проходит через объектив излучателя, который формирует требуемый угол расходимости, и распространяется в пространство. При попадании излучения ИЛПИ на объект оно отражается от него и образует обратный световой поток. Ко времени достижения обратного светового потока входного объектива блок управления подаёт сигнал на формирователь импульсов стробирования фотоприёмника, который открывает затвор фотоприёмника. При прохождении через входной объектив обратный световой поток попадает на электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который выполняет роль быстродействующего затвора и усилителя яркости изображения. Усиление яркости в данном случае необходимо, потому что обратный световой поток, прошедший через рассеивающую среду, обладает малой интенсивностью. Усиленный световой поток, выходящий из экрана ЭОП, проходит через согласующий объектив, фокусируясь на матрице ТВ-камеры, где впоследствии формируется необработанное изображение. ТВ-камера синхронизирована через блок управления с ЭОП. Кадровая частота ТВ-датчика равна 50 Гц, частота работы ЭОП — 5 кГц. Таким образом, за 1 кадр в ТВ-датчике может быть проинтегрировано до 100 кадров, сформированных на экране ЭОП. Блок обработки изображений позволяет получить из необработанного изображения конечное выходное. Выходными данными АИ ТИС является последовательность кадров, каждый из которых представляет собой карту глубин. Ниже описаны основные параметры, используемые для управления работой АИ ТИС.

**Основные параметры АИ ТИС.** Часть просматриваемого пространства, которое подсвечивается световым излучением, исходящим от АИ ТИС, определяется рядом основных параметров таких импульсов, как импульс подсвета пространства (ИПП) и импульс

стробирования фотоприёмника (ИСФ). Модель распределения света по глубине в поле зрения АИ ТИС может быть получена путём вычисления линейной свёртки ИПП и ИСФ.

Распределение света по глубине в поле зрения АИ ТИС назовём для краткости активной зоной видения (АЗВ), которая является графиком зависимости распределения энергии света в пространстве от времени распространения излучения. Форма АЗВ и её протяжённость в пространстве зависят от параметров ИПП и ИСФ [11].

**Методы измерения дальности АИ ТИС.** Методы измерения дальности делятся на следующие виды: однозонные (ОМИД), двузонные (ДМИД) и многозонные (ММИД) [12]. Однозонные и двузонные методы измерения не обеспечивают достаточной точности определения дальности до объекта интереса. В частности, при использовании ОМИД в реальной ситуации, когда неизвестно, на какой дальности располагается объект, требуется сканирование пространства по глубине путём многократного изменения задержки стробирования с определённым шагом, что приводит к большим временным затратам. При использовании же ДМИД для обеспечения приемлемой точности требуется обеспечить минимально возможные фронты ИПП и ИСФ, что значительно повышает требования к компонентам системы. Методы, относящиеся к ММИД, рассматриваются в данной работе более подробно. Многозонный метод измерения дальности предполагает формирование отдельных кадров с разными АЗВ. Каждый нечётный кадр видеопоследовательности содержит первую АЗВ, которая формируется с помощью суммирования совокупности АЗВ, полученных при одинаковых параметрах путём многократного повторения излучения света и приёма обратного светового потока за время накопления одного кадра в ТВ-камере. Математически яркость пикселя с координатами  $(x, y)$  кадров с первой АЗВ описывается следующим образом:

$$I_1(x, y) = I(x, y, \tau_{d_0})N,$$

где  $\tau_{d_0}$  — начальная задержка стробирования;  $N$  — количество АЗВ, отображённых в кадре.

Каждый чётный кадр видеопоследовательности содержит суммарную АЗВ. Данный тип АЗВ представляет собой сумму смещённых в пространстве АЗВ. Смещение в пространстве АЗВ осуществляется путём многократного изменения длительности задержки стробирования на некоторый дискретный шаг (шаг задержки стробирования) за время накопления одного кадра в ТВ-камере. Математически яркость пикселя с координатами  $(x, y)$  кадров в суммарной АЗВ описывается следующим образом:

$$I_2(x, y) = \frac{N}{M} \sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d_0} + (m-1) \Delta\tau_d)],$$

где  $\Delta\tau_d$  — шаг задержки стробирования,  $M$  — количество различных задержек стробирования.

После получения чётного и нечётного кадров производится нормирование кадров с суммарной АЗВ относительно кадров с первой АЗВ

$$I(x, y) = \frac{I_2(x, y)}{I_1(x, y)} = \frac{\frac{N}{M} \sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d_0} + (m-1) \Delta\tau_d)]}{I(x, y, \tau_{d_0})N}.$$

Данная процедура обусловлена тем, что в реальных условиях обратный световой поток распространяется по закону обратных квадратов, а также подвержен влиянию поглощения и рассеяния в среде распространения. В соответствии с этим форма каждой АЗВ

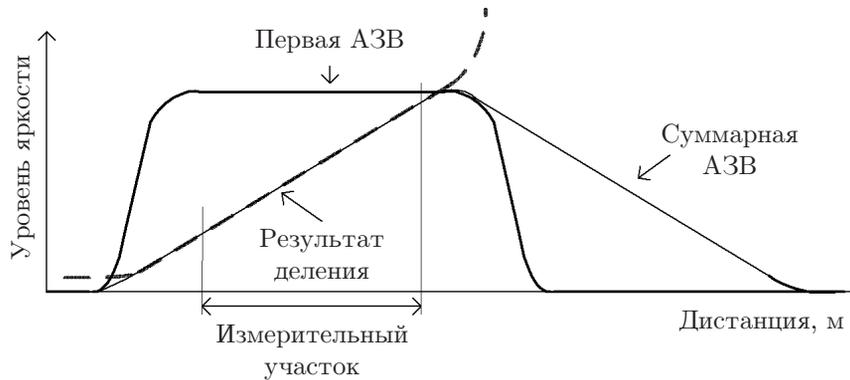


Рис. 2. Графики зависимостей относительных уровней яркости для разных групп кадров и результат их нормировки

в значительной мере искажается, что влияет на яркость объектов интереса и точность измерения дальности. Нормирование кадров относительно друг друга позволяет снизить влияние этих искажений на результат. Полученные нормированные кадры далее применяются для построения карт глубин пространства. Графики зависимостей относительных уровней яркости кадров с первой и суммарной АЗВ и результат их нормировки приведены на рис. 2. Стоит также отметить, что согласно рис. 2 в ММИД результат нормировки (измерительная функция) в идеальном случае не может превышать глубину первой АЗВ, тем самым ограничивая динамический диапазон измерения дальности.

Как было указано ранее, в ЭОП обратный световой поток усиливается. В вышеприведённом методе коэффициент усиления (КУ) микроканальной пластины (МКП), входящей в состав ЭОП и обеспечивающей усиление сигнала в зависимости от амплитуды напряжения питания, остаётся постоянным при формировании какой-либо группы кадров.

Кроме описанного метода, существует метод многозонного измерения дальности с модуляцией (ММИДМ) [13]. Данный метод, как и в предыдущем случае, предполагает формирование кадров двух групп. Принцип формирования кадров двух групп (чётных и нечётных) в ММИДМ аналогичен принципу формирования кадров с суммарной АЗВ в ММИД. Отличие состоит лишь в том, что нечётные кадры регистрируются АИ ТИС при постоянном КУ МКП, а чётные кадры — при модуляции КУ МКП, т. е. в этом случае КУ изменяется на дискретный шаг.

Математически яркость пикселя с координатами  $(x, y)$  кадра с постоянным КУ описывается следующим образом:

$$I_1(x, y) = \frac{N}{M} \sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d_0} + (m-1)\Delta\tau_d) K_0],$$

где  $K_0$  — значение КУ.

Яркость пикселя с координатами  $(x, y)$  кадра с модуляцией КУ описывается следующим образом:

$$I_2(x, y) = \frac{N}{M} \sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d_0} + (m-1)\Delta\tau_d), (K_0 + (m-1)\Delta K)],$$

где  $\Delta K$  — шаг изменения КУ.

Так же, как и в предыдущем описанном методе, производится нормирование кадров с модуляцией КУ относительно кадров с постоянным КУ.

Использование ММИДМ в отличие от ММИД позволяет получать измерительную функцию для большего диапазона дальностей, который в идеальном случае будет равен полной глубине суммарных АЗВ, участвующих в нормировке.

Получаемые нормированные кадры в каждом пикселе содержат информацию об носительной световой энергии в виде относительных значений уровней квантования яркости. Эти значения варьируются в диапазоне от 0 до 1 и используются в качестве выборки данных для определения значений коэффициентов аппроксимирующей функции, которая принимается за измерительную функцию дальности. Построение карт глубин осуществляется на основании преобразования относительных значений уровней квантования яркости по найденной аппроксимирующей функции в значения дальности для каждого пикселя нормированного изображения. Таким образом, с помощью АИ ТИС формируется карта глубин пространства. Ниже рассмотрены основные сведения о применяемом методе приближения.

**Краткие сведения об аппроксимации.** В данной работе определяются коэффициенты таких видов аппроксимирующих функций, как линейный и полиномиальный. В качестве степеней полиномиальной функции были выбраны 3-я, 5-я и 7-я. Эмпирически установлено, что степени больше 7-й обеспечивают некорректную ошибку измерения дальности, а степени, не входящие в эту совокупность и меньшие семи, — большую ошибку.

Представим общий вид линейной аппроксимирующей функции:

$$y(x_i) = a_1 x_i + a_0,$$

где  $y(x_i)$  — значение аппроксимирующей функции в отсчёте  $x_i$ ;  $a_0$  и  $a_1$  — коэффициенты аппроксимирующей функции.

Общий вид полиномиальной аппроксимирующей функции  $n$ -й степени

$$y(x_i) = a_n x_i^n + a_{n-1} x_i^{n-1} + \dots + a_2 x_i^2 + a_1 x_i + a_0.$$

В качестве критерия приближения выбран среднеквадратичный критерий

$$\sum_{n=1}^L (y(x_i) - g(x_i))^2 \rightarrow \min,$$

где  $g(x_i)$  — значение исходной выборки в отсчёте  $x_i$ ,  $L$  — количество отсчётов выборки.

Для вычисления коэффициентов линейной аппроксимирующей функции используются следующие аналитические выражения:

$$a_0 = \frac{\sum_{l=1}^L x_l \sum_{l=1}^L y_l - n \sum_{l=1}^L (x_l y_l)}{\left(\sum_{l=1}^L x_l\right)^2 - n \sum_{l=1}^L x_l^2},$$

$$a_1 = \frac{\sum_{l=1}^L x_l \sum_{l=1}^L (x_l y_l) - n \sum_{l=1}^L x_l^2 \sum_{l=1}^L y_l}{\left(\sum_{l=1}^L x_l\right)^2 - n \sum_{l=1}^L x_l^2}.$$

Таблица 1

## Параметры первого эксперимента

Название параметра	Группа кадров	
	Кадры с первой АЗВ	Кадры с суммарной АЗВ
Количество АЗВ в кадре	20	
Длительность ИПП	30 нс	
Длительность ИСФ	130 нс	
Начальная задержка стробирования	60 нс	
Шаг задержки стробирования	—	6 нс

Таблица 2

## Параметры второго эксперимента

Название параметра	Группа кадров	
	Кадры с первой АЗВ	Кадры с суммарной АЗВ
Количество АЗВ в кадре	20	
Длительность ИПП	30 нс	
Длительность ИСФ	130 нс	
Начальная задержка стробирования	40 нс	
Шаг задержки стробирования	6 нс	
Начальное значение напряжения МКП	709 В	
Шаг изменения напряжения МКП	—	8 В

Коэффициенты полиномиальных аппроксимирующих функций были получены путём нахождения частных производных по аналитическим выражениям и составлены в системе линейных алгебраических уравнений, решение которых осуществлялось методом Крамера.

В качестве входных значений аппроксимирующей функции берётся выборка эталонных значений дальности, которые измеряются с использованием лазерного дальномера, и выборка средних относительных значений яркости, которые вычисляются по области измерения, лежащей в области объекта интереса.

**Исходные параметры экспериментов и показатели оценки точности.** Для сравнения точности построения карт глубин пространства были проведены два эксперимента: по ММИД, параметры которого приведены в табл. 1, и по ММИДМ (табл. 2).

Для оценки точности построения карт глубин пространства использовались такие показатели, как абсолютная ошибка (АО) измерения дальности и среднеквадратическое отклонение (СКО) измерения. В качестве объектов измерения выступали транспаранты, устанавливаемые с шагом 1 м в измеряемом диапазоне дальностей. Для получения значений дальности по построенным картам глубин выделялась область измерения (на транспаранте), и вычислялось среднее значение дальности по этой области измерения. В обоих экспериментах оценивался диапазон измерения дальности от 8 до 20 м.

Абсолютная ошибка измерения вычисляется как

$$AO = D_{\text{этал}} - D_y, \quad (1)$$

где  $D_{\text{этал}}$  — эталонное значение дальности;  $D_y$  — значение дальности, рассчитанное по карте глубин.

Таблица 3

**Значения коэффициентов аппроксимирующих функций для ММИД  
по реальным кадрам**

Коэффициенты	Вид аппроксимирующей функции			
	Линейный	Полиномиальный 3-й степени	Полиномиальный 5-й степени	Полиномиальный 7-й степени
$a_0$	4,2970	1,9947	1,6713	-12,9776
$a_1$	16,6787	31,4475	32,6497	211,8334
$a_2$	—	-28,1324	-23,4985	-866,6931
$a_3$	—	16,3289	-9,8441	1894,7103
$a_4$	—	—	38,0601	-1958,1141
$a_5$	—	—	-17,60901	462,6026
$a_6$	—	—	—	676,5124
$a_7$	—	—	—	-387,5898

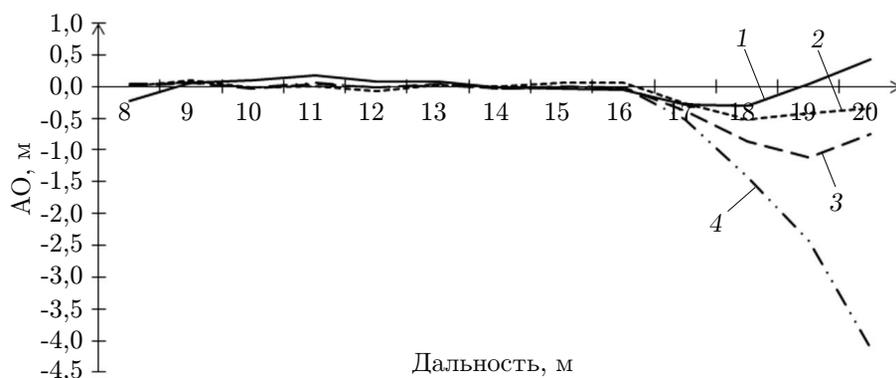


Рис. 3. Графики зависимости АО от дальности для ММИД по реальным кадрам. Обозначения: 1 — линейная аппроксимация, 2 — полиномиальная аппроксимация 3-й степени, 3 — полиномиальная аппроксимация 5-й степени, 4 — полиномиальная аппроксимация 7-й степени

Среднеквадратическое отклонение измерения вычисляется как

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \text{АО}_l^2}. \quad (2)$$

В качестве данных, используемых для построения карт глубин пространства, были использованы реальные (отдельно взятые кадры видеопоследовательности) и усреднённые кадры (по 190 отдельных кадров видеопоследовательности).

**Результаты построения карт глубин пространства.** Результаты вычисления коэффициентов аппроксимирующих функций по реальным кадрам в эксперименте по ММИД приведены в табл. 3.

По приведённым в табл. 3 коэффициентам аппроксимирующих функций различного вида были построены карты глубин пространства. Абсолютные ошибки измерений дальности были вычислены по выражению (1). Результаты вычисления представлены как графики зависимостей АО от значений дальности для различных аппроксимирующих функций (рис. 3).

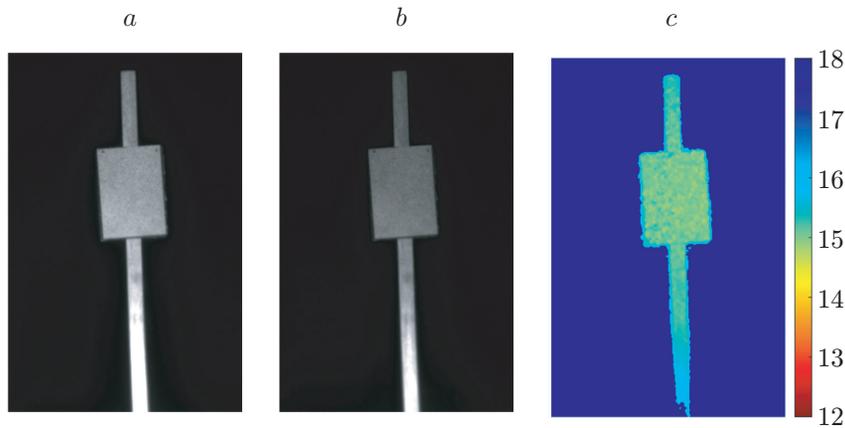


Рис. 4. Изображение транспаранта на дистанции 15 м: для первой АЗВ (а), суммарной АЗВ (b), карты глубин (с)

Таблица 4

Значения коэффициентов аппроксимирующих функций для ММИДМ по реальным кадрам

Коэффициенты	Вид аппроксимирующей функции			
	Линейный	Полиномиальный 3-й степени	Полиномиальный 5-й степени	Полиномиальный 7-й степени
$a_0$	-0,3027	-13,3815	-83,9525	-70,1458
$a_1$	47,4370	124,7521	934,0453	612,7396
$a_2$	—	-132,3025	-3657,0712	-765,8649
$a_3$	—	67,2816	7388,7326	-5965,9088
$a_4$	—	—	-7291,9865	27387,2092
$a_5$	—	—	2800,6823	-48319,8007
$a_6$	—	—	—	39902,3188
$a_7$	—	—	—	-12798,5047

На рис. 4, а, b приведены изображения транспаранта, расположенного на дистанции 15 м от АИ ТИС, снятые в режиме ММИД для первой и суммарной АЗВ соответственно. На рис. 4, с показан результат построенной карты глубин с использованием линейной аппроксимации и цветовой карты для полученного кадра.

Во втором эксперименте по реальным кадрам для ММИДМ были выполнены аналогичные вычислительные операции, как и для предыдущего метода. В табл. 4 представлены вычисленные коэффициенты аппроксимирующих функций для ММИДМ, по которым были построены карты глубин пространства, вычислены значения АО и построены графики зависимостей АО от значения дальности по реальным кадрам для различных аппроксимирующих функций (рис. 5).

Результаты вычисления коэффициентов аппроксимирующих функций по усреднённым кадрам в эксперименте по ММИД приведены в табл. 5, по ММИДМ — в табл. 6.

По полученным коэффициентам аппроксимирующих функций были построены карты глубин пространства. Графики зависимостей АО по усреднённым кадрам для эксперимента по ММИД приведены на рис. 6, по ММИДМ — на рис. 7.

Для сравнения точности всех вышепредставленных вычислений по (2) были определены СКО измерения дальности для каждого типа используемых кадров и каждого метода. Полученные СКО приведены в табл. 7.

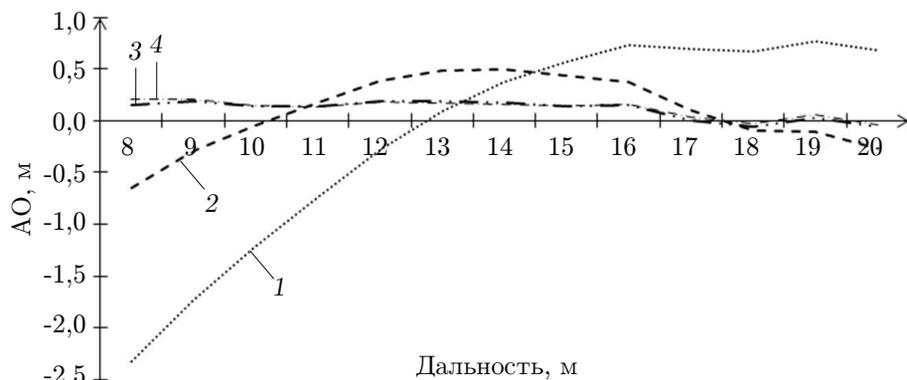


Рис. 5. Графики зависимости АО от дальности для ММИДМ по реальным кадрам. Обозначения такие же, как на рис. 3

Таблица 5

**Значения коэффициентов аппроксимирующих функций для ММИД по усреднённым кадрам**

Коэффициенты	Вид аппроксимирующей функции			
	Линейный	Полиномиальный 3-й степени	Полиномиальный 5-й степени	Полиномиальный 7-й степени
$a_0$	4,3255	1,6472	-3,4149	-15,3328
$a_1$	16,6577	33,9938	92,4482	285,0257
$a_2$	—	-33,3068	-286,1065	-1562,0225
$a_3$	—	19,4780	532,1829	5025,4069
$a_4$	—	—	-490,2400	-9585,6403
$a_5$	—	—	177,9908	10785,7449
$a_6$	—	—	—	-6618,9313
$a_7$	—	—	—	1709,8081

Таблица 6

**Коэффициенты аппроксимирующих функций для ММИДМ по усреднённым кадрам**

Коэффициенты	Вид аппроксимирующей функции			
	Линейный	Полиномиальный 3-й степени	Полиномиальный 5-й степени	Полиномиальный 7-й степени
$a_0$	-0,5592	-12,7426	-80,9240	-0,6802
$a_1$	48,3965	120,3941	891,5165	-555,7762
$a_2$	—	-122,6944	-3425,8913	7380,7829
$a_3$	—	61,6598	6793,8827	-36496,6216
$a_4$	—	—	-6566,1182	93971,2945
$a_5$	—	—	2465,5693	-133070,5132
$a_6$	—	—	—	98381,9931
$a_7$	—	—	—	-29722,2389

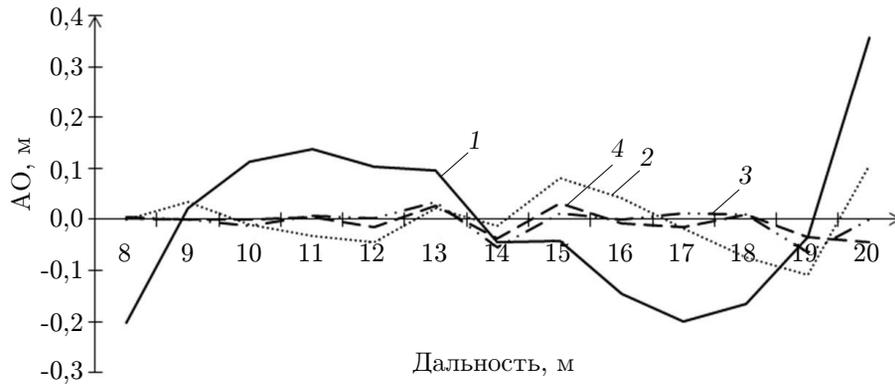


Рис. 6. Графики зависимости АО от дальности для ММИД по усреднённым кадрам. Обозначения такие же, как на рис. 3



Рис. 7. Графики зависимости АО от дальности для ММИДМ по усреднённым кадрам. Обозначения такие же, как на рис. 3

Таблица 7

Значения СКО

Название метода	Тип кадров	Вид аппроксимирующей функции			
		Линейный	Полиномиальный 3-й степени	Полиномиальный 5-й степени	Полиномиальный 7-й степени
ММИД	Реальный	0,1919	0,2230	1,3900	0,4566
	Усреднённый	0,1548	0,0568	0,0261	0,0232
ММИДМ	Реальный	1,0170	0,3502	0,1390	0,1411
	Усреднённый	0,9923	0,3594	0,0312	0,0282

**Заключение.** Проведены экспериментальные исследования по оценке точности построения карты глубин АИ ТИС с использованием многозонных методов измерения дальности и применением аппроксимирующих функций линейного и полиномиального видов. В ходе исследования было установлено, что построение карты глубин пространства по реальным кадрам в ММИД с использованием линейной аппроксимирующей функции характеризуется наивысшей точностью, равной 0,1919 м. При этом наибольшая АО составила 0,4215 м для дистанции 20 м. Построение карт глубин пространства по реальным кадрам в ММИДМ с использованием полиномиальной аппроксимирующей функции 5-й степени характеризуется наивысшей точностью для этого метода, равной 0,139 м, при этом АО на 12 м равна 0,1931 м, что является наибольшей АО для этого случая.

Сравнение случаев построения карты глубин по реальным и усреднённым кадрам показывает, что применение элементарной обработки в виде усреднения кадров по времени с целью подавления шумовой составляющей изображения обеспечивает повышение точности построения карты глубин за счёт увеличения точности аппроксимации данных полиномиальными функциями. Так, для ММИД с учётом применения полиномиальной аппроксимирующей функции 7-й степени точность увеличилась в 6,8 раза (0,0232 м) относительно лучшего результата для реальных кадров. Для ММИДМ с учётом применения полиномиальной аппроксимирующей функции 7-й степени точность возросла в 4,9 раза (0,0282 м). Из этого следует вывод о том, что кадры АИ ТИС требуют предобработки для повышения их отношения сигнал/шум с целью достижения наибольшей точности измерения дальности многозонными методами.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Технология изготовления карт глубины для неподвижных изображений // Информационно-управляющие системы. 2017. № 5. С. 52–61.
2. Чугунов Р. А., Кульневич А. Д., Аксенов С. В. Методика построения карт глубин стереоизображения с помощью капсульной нейронной сети // Доклады ТУСУР. 2019. 22, № 1. С. 83–86.
3. Falie D., Buzuloiu V. Distance error correction for the time of flight (ToF) cameras // Proc. of the European Conference on Circuits and Systems for Communications. Bucharest, Romania, 10–11 July, 2008. P. 193–196. DOI: 10.1109/ECCSC.2008.4611675.
4. Hussmann S., Hermanski A. Real-time image processing of TOF range images using a single shot image capture algorithm // Proc. of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Graz, Austria, 13–16 May, 2012. P. 1551–1555. DOI: 10.1109/I2MTC.2012.6229140.
5. Козлов В. Л. Методики повышения точности измерения расстояний на основе корреляционного анализа стереоизображения // Приборы и методы измерений. 2018. 9, № 1. С. 48–55.
6. Мищенко Н. И. Трёхмерные активно-импульсные системы наблюдения и измерения параметров объектов // Доклады ТУСУР. 2017. 20, № 3. С. 119–123. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-119-123.
7. Мищенко Н. И., Пустынский И. Н. Методы и средства повышения технических характеристик активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем наблюдения // Доклады ТУСУР. 2014. 33, № 3. С. 47–52.
8. Xinwei W., Yan Z., Songtao F. et al. Four-dimensional flash trajectory imaging using time-delay-modulated range-gated viewing // Opt. Lett. 2011. 36, Iss. 3. P. 364–366. DOI: 10.1364/OL.36.000364.

9. **Xinwei W., Youfu L., Yan Z.** Triangular-range-intensity profile spatial-correlation method for 3D super-resolution range-gated imaging // Appl. Opt. 2013. **52**, Iss. 30. P. 7399–7406. DOI: 10.1364/AO.52.007399.
10. **Алантьев Д. В., Борзов С. М., Козик В. И. и др.** Экспериментальное исследование метода лазерной импульсной локации для обнаружения световозвращающих объектов // Автометрия. 2021. **57**, № 1. С. 103–111. DOI: 10.15372/AUT20210111.
11. **Капустин В. В., Мовчан А. К., Зайцева Е. В., Курячий М. И.** Активно-импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспортных средств в сложных метеоусловиях // Транспортные системы и технологии. 2018. **4**, № 1. С. 68–83.
12. **Мовчан А. К., Капустин В. В., Курячий М. И., Чалдина Е. С.** Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами // Доклады ТУСУР. 2020. **23**, № 2. С. 7–14.
13. **Капустин В. В., Мовчан А. К.** Многозонные методы формирования карт глубин с использованием активно-импульсных телевизионных измерительных систем // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2023. № 2. С. 44–54.

*Поступила в редакцию 21.06.2023*

*После доработки 30.06.2023*

*Принята к публикации 03.07.2023*

---