

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ToF-КАМЕР
НА РЕЗУЛЬТАТ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ГЛУБИНЫ**

С. Ю. ГУКОВ*, А. М. ТЮРЛИКОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия,
sg_brui@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований по определению степени влияния интенсивности появления пользователей, одновременно использующих ToF-камеры, в области видимости на вероятность некорректного построения карты глубины. Процесс появления пользователей в области видимости описывается пространственным точечным пуассоновским распределенным процессом с интенсивностью λ . Приведены результаты моделирования с использованием камеры модели Intel RealSense D455. Проведены расчеты площади съемочной области, где ToF-камеры при мультикамерной съемке могут создавать взаимные помехи; также вычислена длительность сигнала и определена выдержка глубинной камеры. На основе полученных данных рассчитана вероятность некорректного построения карты глубины и построен график ее зависимости от интенсивности появления пользователей в области видимости. Приведены результаты эксперимента по определению зависимости количества помех от удаленности пересекающихся камер от объекта.

Ключевые слова: камера глубины, длительность сигнала, пуассоновский точечный процесс, карта глубины, область видимости, перекрытие сигналов, мультикамерная съемка, ToF-камера

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00305 „Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом абонентов“.

Ссылка для цитирования: Гукон С. Ю., Тюрликов А. М. Оценка влияния интенсивности использования ToF-камер на результат построения карты глубины // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 9. С. 731—740. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-731-740.

**ASSESSING THE INFLUENCE OF ToF-CAMERAS USE INTENSITY
ON THE RESULT OF A DEPTH MAP CONSTRUCTING**

S. Yu. Gukov*, A. M. Tyurlikov

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia
sg_brui@mail.ru

Abstract. Results of studies on influence of the intensity of the appearance of users simultaneously using ToF-cameras in the field of view on the probability of incorrect construction of a depth map are presented. The process of users appearing in the field of view is described by a spatial point Poisson distributed process with a given intensity. Simulation results using the Intel RealSense D455 camera are presented. Calculations are performed of the shooting region area where ToF-cameras can create mutual interference during multi-camera shooting. The duration of the signal is also evaluated, and the shutter speed of the deep chamber is determined. Based on the data obtained, the probability of incorrectly constructing a depth map is estimated and a graph of its dependence on the intensity of the appearance of users in the visibility area was constructed. Results of an experiment to determine the dependence of the amount of interference on the distance of intersecting cameras from the object are presented.

Keywords: depth camera, signal duration, spatial Poisson point process, depth map, field of view, signal overlap, multi-camera shooting, ToF-camera

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00305 “Space-time stochastic models of wireless networks with a large number of subscribers.”

For citation: Gukov S. Yu., Tyurlikov A. M. Assessing the influence of ToF-cameras use intensity on the result of a depth map constructing. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 9. P. 731—740 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-731-740.

Введение. В настоящее время разными компаниями активно ведется разработка технологий для получения карт глубины, формируемых непосредственно ToF-камерами (Time of Flight — время пролета). Такие камеры в достаточном количестве представлены на рынке. Принцип действия ToF-камер стандартный и состоит в одновременном формировании двух видов изображений: обычного RGB-кадра и карты глубины, получаемой с помощью инфракрасных излучателей и датчиков. Изображение, содержащее данные о глубине, может использоваться для компьютерного зрения и робототехники, манипуляций с изображенными объектами и их анализа или как естественный для человека интерфейс управления компьютерными системами с помощью мимики и жестов. Подобные камеры применяются в беспилотных летательных аппаратах, игровых системах, платформах виртуальной и дополненной реальности и пр.

Инфракрасные сенсоры характеризуются несколькими проблемами [1]. Во-первых, солнце легко засвечивает относительно слабый проектор, встроенный в камеру. Даже в тени, если рядом есть, например, белая стена здания, освещенная солнцем, могут возникнуть проблемы со съемкой. Другая проблема — это отражения и переотражения [1, 2]. Поскольку инфракрасный свет также отражается, то заснять объекты из нержавеющей стали, объекты с лаковым покрытием или стеклянные объекты проблематично. И, наконец, главная, но неочевидная проблема — две и более камеры, снимающие один и тот же объект или сцену: несколько камер искажают дальность до объекта, так как их отдельные источники света мешают друг другу. Такая ситуация продемонстрирована на рис. 1.

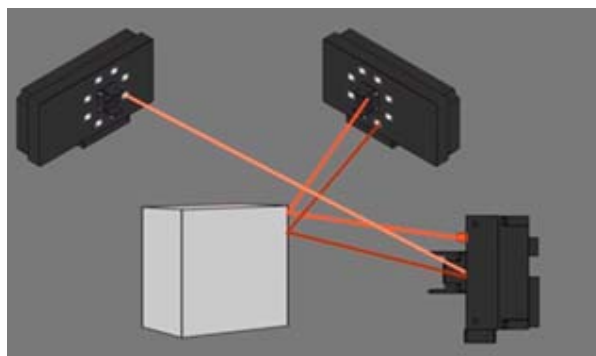


Рис. 1

Принцип работы ToF-камеры и способы уменьшения взаимных помех. При мультикамерной съемке камерами глубины, построенными на технологии Time-of-Flight и находящимися в непосредственной близости друг от друга, возникают помехи. Это происходит из-за того, что отраженный инфракрасный свет от разных камер перемешивается и возвращается не в свой источник. Рассмотрим подробнее принцип работы ToF-камеры.

Первоначально световые импульсы направляются на объект с использованием инфракрасного света. Световые импульсы имеют определенную частоту и амплитуду, которые задаются камерой.

Второй шаг — измерение времени прохождения света. Световые импульсы отражаются от объекта и возвращаются в камеру. Камера измеряет время (time of flight), которое требуется для прохождения импульса света от камеры до объекта и обратно. Это время позволяет камере определить расстояние до объекта.

Следующий шаг — фазовая модуляция. Для повышения точности измерения расстояний камера использует фазовую модуляцию, где лазерный импульс модулируется в зависимости от его фазы. При этом производятся несколько этапов измерения, которые обычно называются „циклы модуляции фазы“. На каждом цикле модуляции фазы световой импульс, содержащий информацию о фазе, направляется от камеры к объекту. Затем отраженный импульс, содержащий эту же информацию о фазе, возвращается в камеру. Фазовый сдвиг между

отправленным и принятым сигналом может быть определен на основе разницы во времени между отправлением и получением импульсов и на основе частоты модуляции светового сигнала. Чтобы определить фазовый сдвиг, отраженный световой сигнал замеряется несколько раз при разных фазах. Обычно это происходит при четырех этапах фазовой модуляции. После того как расстояние измерено на каждом этапе фазовой модуляции, камера использует эти данные для вычисления фазового сдвига и восстановления точной фазы светового сигнала. На основе этой точной фазы светового сигнала и известной скорости света ToF-камера может рассчитать расстояние до объекта.

Формирование кадра состоит из следующих основных этапов — захват изображения (затвор, освещение, интегрирование) и считывание изображения (обработка или оцифровка) [3]. В начале захвата изображения включается блок освещения (освещая сцену), открывается затвор, после чего пиксели становятся светочувствительными (этап интегрирования). По истечении установленного времени интегрирования подсветка выключается, а затвор закрывается. За фазой интеграции следует фаза считывания, на которой данные пикселей оцифровываются и передаются с датчика изображения на микроконтроллер. Микроконтроллер сохраняет кадры и впоследствии вычисляет глубину изображения. Поскольку, как правило, камера измеряет амплитуду отраженного света четыре раза, чтобы определить фазу, для одного изображения глубины требуется четыре кадра. На рис. 2 показан 4-кадровый цикл формирования карты глубины. Полосы на рисунке отображают активное освещение/интегрирование. Когда две световые волны накладываются друг на друга, как на рис. 3, они образуют другую волну. Несколько ToF-камер, работающих одновременно, создают результирующую интерференцию световой волны во время захвата изображения, что приводит к ошибкам в расчетах глубины. Следовательно, при одновременном использовании нескольких близко расположенных ToF-камер необходимы стратегии уменьшения интерференции света. Один из вариантов — уменьшение интерференционных артефактов при постобработке изображения с помощью статистических расчетов [3, 4]. Однако предпочтительным вариантом является уменьшение помех непосредственно во время формирования режимов работы камер. Режим работы определяет принцип совместного функционирования нескольких камер.

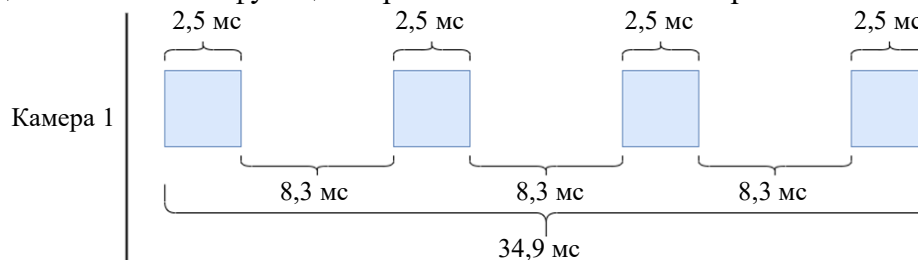


Рис. 2

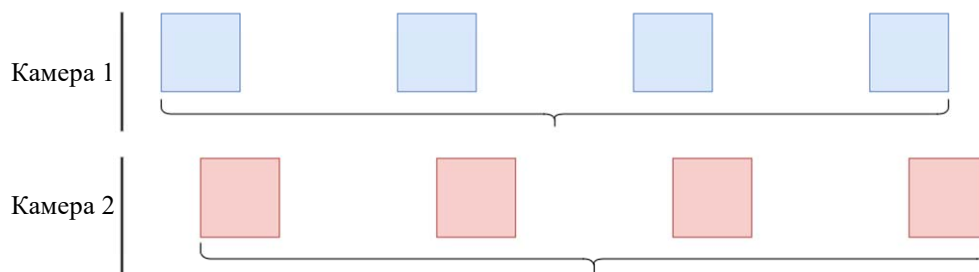


Рис. 3

Производители ToF-камер используют, как правило, метод множественного доступа с частотным разделением каналов (FDMA — Frequency Division Multiple Access). Суть этого метода заключается в том, что каждой камере выделяется уникальный диапазон частот для передачи сигналов, который не должен перекрываться с диапазонами других камер [5, 6]. При таком подходе свет, модулированный другими камерами, воспринимается как окружающий.

Однако увеличение количества ToF-камер приводит к насыщению пикселей и, соответственно, к ошибочным измерениям глубины. Уменьшение мощности освещения позволяет решить эту проблему, но может ухудшить отношение сигнал/шум и, как следствие, точность измерений.

Существуют и другие методы множественного доступа, например метод множественного доступа с волновым разделением (WDMA — Wavelength Division Multiple Access). При этом подходе каждой камере выделяется свой уникальный диапазон инфракрасных длин волн, которые используются для передачи сигналов. Сигналы, полученные от разных камер, имеют разные длины волн, что позволяет их различать. Система обработки данных должна уметь различать сигналы, полученные от каждой камеры.

Суть метода множественного доступа с кодовым разделением (CDMA — Code Division Multiple Access) заключается в том, что каждая ToF-камера имеет свой уникальный код, который применяется к оптическому сигналу, генерируемому инфракрасным источником. Коды могут быть длиннее или короче, в зависимости от требуемого уровня разделения сигналов, и должны быть выбраны таким образом, чтобы они не пересекались между камерами. Система обработки данных также должна уметь различать сигналы, полученные от каждой камеры.

Метод множественного доступа с временным разделением (TDMA — Time Division Multiple Access) также позволяет избежать проблем, связанных с помехами, создаваемыми камерами. Данный метод реализуется путем выделения каждой камере своего уникального временного интервала, в течение которого камера может передавать данные. Эти интервалы могут повторяться с определенным периодом для повторной передачи информации. В отличие от метода FDMA, где каждой камере выделяется своя частота, при использовании TDMA каждая камера использует одну и ту же частоту, но работает в различных временных интервалах. При этом важно, чтобы все камеры работали в согласованных временных интервалах и периодах. Метод TDMA может быть более энергоэффективным, поскольку камеры могут быть выключены во время передачи данных. Однако введение временных интервалов снижает максимальную частоту кадров, формируемых камерой, из-за более длительных пауз между захватами изображений. В стандартном случае для использования метода TDMA требуется синхронизирующее или координирующее устройство, которое обеспечивает временную синхронизацию и присваивает жестко подключенным к нему камерам временные интервалы. Также недостатком метода TDMA является невозможность поддерживать излишне высокую плотность камер, так как количество временных интервалов ограничено. Если же какая-то камера начинает передачу данных вне своего выделенного интервала, это может привести к коллизиям и потере данных.

Т. Вуббенхорстом был предложен метод преодоления ограничения статической установки TDMA в виде необходимого координирующего устройства — метод множественного доступа с контролем несущей (CSMA — Carrier Sense Multiple Access) [7, 8]; он предложил использовать оптический путь синхронизации в виде дополнительных прикрепленных к камерам фотодиодов, которые будут фиксировать завершение времени сбора данных другой камерой и запускать свою собственную фазу сбора данных. Однако метод Вуббенхорста также требует технического вмешательства — внедрения специального светодиода.

Преимущество же оптической синхронизации заключается в простоте настройки многокамерной системы, которая может синхронизироваться сама. ToF-камеры работают последовательно, одна за другой.

Оценка взаимного влияния ToF-камер на точность построения карты глубины. Рассмотрим вопрос: влияет ли и насколько сильно различная удаленность камер от объекта, расположенных относительно объекта, например, как на рис. 4, на точность построения карты глубины.

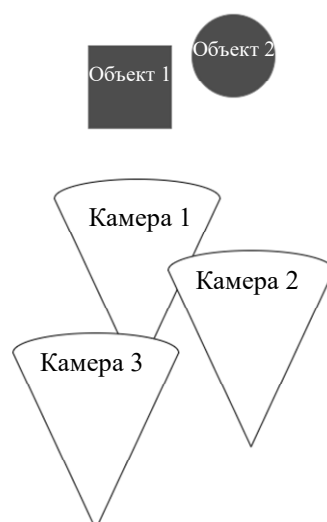


Рис. 4

Для моделирования подобной ситуации и проведения опыта на практике была использована камера Intel RealSense D455. Современная технология Intel использует две камеры для расчета глубины сцены и позволяет устройствам взаимодействовать с окружающей средой. Ниже представлены характеристики камеры D455 [9].

Определение глубины	Двойной ИК-луч
Тип затвора	Глобальный
Размер пиксела, мкм.....	3×3
Размер поля глубины, ...°	86×57
Разрешение поля глубины	1280×720
Параметры RGB-потока.....	1280×800 & 90 FPS
Диапазон глубины, м.....	0,4—20
Датчик IMU.....	Есть
Размер камеры (ш×г×в), мм.....	124×26×29

Камера D455 может применяться как внутри помещений, так и на открытых пространствах при различных условиях освещения. Специализированная интегральная схема внутри процессора обеспечивает обработку в реальном времени до $36,6 \cdot 10^6$ пкс/с. Устройство содержит два ToF-датчика глубины сцены, RGB-сенсор и инфракрасный проектор. Оптимальная дальность действия камеры составляет 6 м. Согласно официальным характеристикам, погрешность расчета глубины сцены не превышает 2 % при точности угла поля зрения ($\Gamma \times \Psi$) $86 \times 57^\circ$. Для улучшения параметров цветового выравнивания и идентификации глубины все датчики расположены на одной раме, а расстояние между ToF-датчиками составляет 95 мм [10].

Расположив три камеры так, как показано на рис. 4, и проведя опыт на практике, получим результаты, приведенные в таблице, где „реал“ — реальное расстояние до объекта, „м/с“ — режим мультикамерной съемки, „о/с“ — режим одиночной съемки, „одл“ — режим съемки при расположении камер в одну линию (расстояния R_{o1} и R_{o2} до объектов 1 и 2, см. рис. 4, равны 120 и 143 см соответственно).

ToF-камера	R_{o1} , см				R_{o2} , см			
	реал	м/с	о/с	одл	реал	м/с	о/с	одл
Камера 1	103	104,2	103,9	121,1	123	123,9	124,2	142,7
Камера 2	120	121	122,3	120,7	143	144,8	143,1	143,2
Камера 3	150	153,6	150,8	120,9	173	175,1	173,5	143,4

Как видно из таблицы, камеры, находящиеся дальше от объекта и имеющие перед собой другие камеры, показывают результаты с несколько большей погрешностью (погрешность увеличивается на 0,5—1,5 %). Для определения погрешности были проведены тесты с каждой

камерой в отдельности в режиме одиночной съемки с сохранением их расположения относительно друг друга. Также был проведен тест с расположением камер в одну линию.

Таким образом, можно сделать вывод, что расстояние от камеры до объекта или сцены при наличии перед снимающей камерой других камер не влияет на уровень помех, так как инфракрасный свет при отражении может вернуться не в свой источник.

Оценка вероятности некорректного построения карты глубины. Для расчета вероятности некорректного построения ToF-камерой карты глубины необходимо сначала определить и рассчитать параметры зоны влияния помех.

Предположим, что имеются некий объект (например, скульптура, памятник или сцена) и находящиеся рядом пользователи — так будем называть людей, использующих ToF-камеру для фотосъемки некоторого объекта. Процесс появления пользователей в области видимости (от англ. field of view) камеры будем описывать пространственным точечным пуассоновским распределенным процессом с интенсивностью λ . Параметр интенсивности λ описывает, сколько в среднем пользователей появляется на единицу площади в течение единицы времени. В дальнейших расчетах будем отталкиваться от предположения, что значение параметра λ изменяется в диапазоне от 0,1 до 5 [11]. Также для простоты расчетов введем допущение, что при появлении любого пользователя в области видимости камеры происходит моментальная съемка. Соответственно, оценим вероятность некорректного построения карты глубины при условии появления новых пользователей в области видимости камеры.

Параметром S обозначим площадь области видимости, которая представляет собой некоторый сектор окружности. Это область, в которой гипотетически должны находиться камеры, чтобы снимать объект и создавать при этом друг другу помехи. Для вычисления параметра S необходимо, во-первых, знать рабочее расстояние, на котором камера может снимать объекты без значимой потери в качестве и точности съемки, и, во-вторых, знать область, в которой должна находиться камера, для определения возможности возникновения помех.

Обозначим выдержку камеры параметром t_s . Один из вариантов перекрытия сигналов двумя камерами показан на рис. 3. Так как в цикле происходят четыре повторения, а камер может быть больше двух, то таких вариантов перекрытия может быть множество. Исходя из этого и используя свойства пространственного точечного пуассоновского распределенного процесса, можно сказать, что влиять на вероятность некорректного построения карты глубины будут только длительность сигнала и количество повторений.

На основе описанных выше характеристик можно определить вероятность некорректного результата съемки по следующей формуле:

$$P = 1 - \exp(-\lambda S \cdot 2 \cdot 4 \cdot t_s). \quad (1)$$

Таким образом, вероятность некорректного построения ToF-камерой карты глубины напрямую зависит от интенсивности появления пользователей и свойств используемой камеры — площади области видимости и выдержки.

Определим далее все необходимые для формулы (1) параметры.

Как было сказано выше, угол обзора камеры (D455) по горизонтали составляет 86° . Соответственно, можно предположить, что и угол обзора сцены будет равен $\approx 86^\circ$. Вместе с тем оптимальная дальность действия камеры на практике варьируется в пределах от 0,4 до 6 м.

На рис. 5 представлен сектор окружности — область видимости камеры. Рассчитаем его параметры.

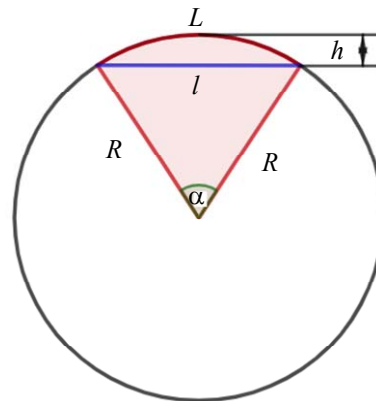


Рис. 5

Итак, радиус R окружности равен оптимальной дальности действия камеры, т.е. 6 м. Угол α сектора равен углу обзора камеры, т.е. 86° . Вычислим длину дуги сектора и высоту сегмента:

$$L = \frac{\pi R}{180} \alpha = \frac{3,14 \cdot 6}{180} \cdot 86 = 9,006 \text{ м},$$

$$h = R(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) = 6 \cdot (1 - \cos \frac{86}{2}) = 1,612 \text{ м}.$$

Используем эти данные для определения длины хорды:

$$l = 2R \sin \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 6 \cdot \sin \frac{86}{2} = 8,184 \text{ м}.$$

И, наконец, рассчитываем площадь сектора окружности:

$$S = \frac{\pi R^2 \alpha}{360} = \frac{3,14 \cdot 36 \cdot 86}{360} = 27,018 \text{ м}^2.$$

Найденные параметры области видимости камеры позволяют определиться с тем, где должны находиться другие камеры по отношению к рассматриваемой основной камере для определения вероятности возникновения взаимных помех. (Отметим, что полученные значения определены для камеры Intel D455, однако их можно считать оптимальными для большинства актуальных аналогичных камер.)

Как указано выше, для полного понимания проблемы взаимных помех необходимо выяснить вероятность того, что результат съемки будет некорректным, т.е. вероятность перекрытия сигналов от разных камер. Для этого нужно знать так называемую задержку распространения, т.е. выдержку камеры. Теоретически задержка распространения должна во много раз превышать длительность сигнала — разницу между временем движения импульса света до объекта и обратно для камеры, установленной около объекта на ближней границе области видимости, и таким же временем для камеры, установленной на дальней границе области видимости. В этом случае использование параметра t_s в формуле (1) можно считать оправданным.

Камера D455 оснащена быстрым глобальным затвором как для RGB-камеры, так и для камеры датчиков глубины. Физическая выдержка на камерах RealSense зависит от настроек. В стандартных настройках для затвора RGB время экспозиции составляет около 33 мс, а для глубинной камеры — около 2,5 мс [12, 13].

Приняв $\Delta\tau$ за длительность сигнала, определим ее по формуле

$$\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}. \quad (2)$$

Чтобы вычислить τ_{\max} и τ_{\min} , необходимо знать расстояния (дальность) d_{\max} и d_{\min} , на которых работает камера (рис. 6), а также скорость, с которой распространяется сигнал, в данном случае — инфракрасный свет. Все эти значения известны: скорость света — 299 792 458 м/с, d_{\max} — 6 м, d_{\min} — 0,4 м (согласно характеристикам камеры D455).

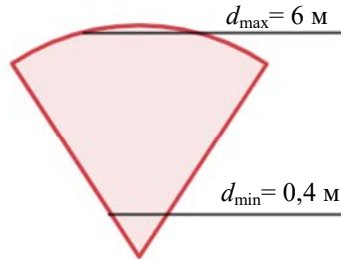


Рис. 6

Тогда

$$\tau_{\max} = \frac{d_{\max}}{c} = \frac{6}{299792458} = 2,0013845e^{-8} \text{ с} = 0,02 \text{ мкс},$$

$$\tau_{\min} = \frac{d_{\min}}{c} = \frac{0,4}{299792458} = 1,33425e^{-9} \text{ с} = 0,0013 \text{ мкс}$$

и согласно (2)

$$\Delta\tau = 0,02 - 0,0013 = 0,019 \text{ мкс}.$$

Сравнение физической выдержки глубинной камеры, равной 2,5 мс, и длительности сигнала, равной $19 \cdot 10^{-6}$ мс, показывает, что t_s значительно превышает $\Delta\tau$.

Рассчитаем и построим график зависимости вероятности некорректной съемки, т.е. съемки с построением некорректной карты глубины, от интенсивности появления пользователей в области видимости. Приведем пример расчета по формуле (1) при $\lambda = 0,5$:

$$P(0,5) = 1 - \exp(-0,5 \cdot 27,018 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 0,0025) = 1 - 0,764 = 0,236.$$

График построенной зависимости представлен на рис. 7.

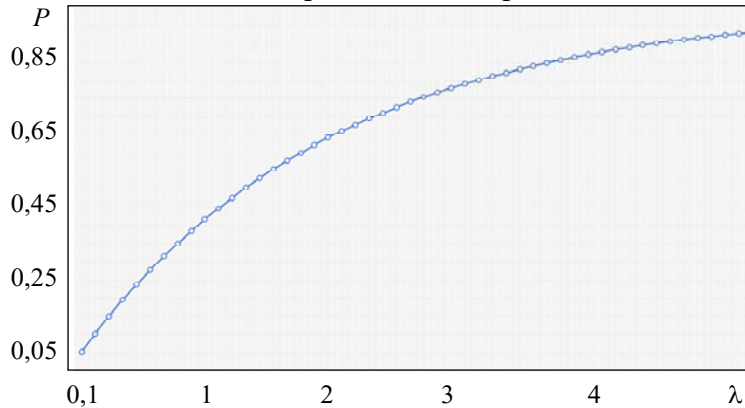


Рис. 7

Заключение. Приведены результаты исследования по оценке влияния интенсивности появления пользователей в области видимости на вероятность некорректного построения карты глубины ToF-камерой: установлено, что при высокой интенсивности вероятность ошибок увеличивается, что приводит к некорректному построению карты глубины.

Для повышения точности работы ToF-камер при мультикамерной съемке можно использовать два пути. Первый путь — попытка скорректировать созданную ошибочную карту глубины при постобработке [14], что потребует, однако, применения достаточно быстрых алгоритмов и мощного, встроенного в камеры оборудования [15]. Второй путь — использование существующих методов уменьшения интерференции между камерами и снижения влияния окружающей среды на получаемые карты глубин, т.е. изначальное ограничение на одно-

временную работу камер. Однако известные методы имеют существенные недостатки, что обуславливает необходимость разработки другого метода, который позволит достичь более точной и надежной работы по построению камер глубины при мультикамерной съемке и в будущем расширить возможности использования таких камер в различных областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gukov S. Y. Comparative analysis of ways to solve the interference problem tof-cameras // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems: Conf. Proc. St. Petersburg, 2021.
2. Гуков С. Ю., Тюрликов А. М. Проблема формирования карты глубины с использованием задержки светового сигнала в условиях взаимных помех при мультикамерной съемке // Сб. докл. Междунар. науч. конф. „Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах ‘21“. СПб: СПбГУАП, 2021.
3. Wermke F., Wübbenhorst T., Meffert B. Optical Synchronization of Multiple Time-of-Flight Cameras Implementing TDMA // IEEE Sensors, Rotterdam, Netherlands. 2020, P. 1—4. DOI: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278667.
4. Wermke F., Wübbenhorst T., Meffert B. Interference Avoidance for Two Time-of-Flight Cameras Using Autonomous Optical Synchronization // 6th Intern. Conf. on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Singapore, 2020. P. 586—595. DOI: 10.1109/ICCAR49639.2020.9107975.
5. Volak J., Koniar D., Jabloncik F., Hargas L., Janisova S. Interference artifacts suppression in systems with multiple depth cameras // 42nd Intern. Conf. on Telecommunications and Signal Processing (TSP). 2019.
6. Li L., Xiang S., Yang Y., Yu L. Multi-camera interference cancellation of time-of-flight (tof) cameras // IEEE Intern. Conf. on Image Processing (ICIP). 2015.
7. Wübbenhorst T., Wermke F., Meffert B. Synchronization of Multiple Time-of-Flight Cameras Using Photodiodes // IEEE Sensors, Rotterdam, Netherlands. 2020. P. 1—4. DOI: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278774.
8. Wübbenhorst T. Frame-basierte optische synchronisation von time-of-flight (tof) sensoren: Master’s Thesis. Humboldt-Universität zu Berlin, 2019.
9. Wermke F., Meffert B. Interference Model of Two Time-Of-Flight Cameras // IEEE Sensors. 2019.
10. Gukov S. Y., Afanasieva A. V., Turlikov A. M. Analysis of approaches to remote user interface transfer // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems: Conf. Proc. St. Petersburg, 2020.
11. Предтеченский В. М., Милинский А. И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков. М.: Стройиздат, 1979. 375 с.
12. YuJie Fang, Xia Wang, ZhiBin Sun, Kai Zhang, BingHua Su. Study of the depth accuracy and entropy characteristics of a ToF camera with coupled noise // Optics and Lasers in Engineering. 2020. Vol. 128.
13. Yuzhi Song, Chunqing Lu, Fenzhi Wu, Zhongxiang Cao, Xiao Liang. A method for evaluating 3D-TOF camera ranging performance // Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application: Proc. of SPIE. 2019.
14. Conde M. H. A Material-Sensing Time-of-Flight Camera // IEEE Sensors Letters. 2020. Vol. 4, N 7. P. 1—4.
15. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V. Model and interaction efficiency of computer nodes based on transfer reservation at multipath routing // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECNF 2019). 2019. P. 8840647.

Сведения об авторах

Сергей Юрьевич Гуков

— Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Институт информационных технологий и программирования, кафедра информационных систем и технологий; ст. преподаватель; E-mail: sg_brui@mail.ru

Андрей Михайлович Тюрликов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий, кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи; заведующий кафедрой; E-mail: turlikov@k36.org

Поступила в редакцию 14.05.2023; одобрена после рецензирования 22.06.2023; принята к публикации 31.07.2023.

REFERENCES

1. Gukov S.Y. 2021 *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*, Proc. of the Conference, St. Petersburg, Russia, 31 May–4 June 2021, pp. 201–205.
2. Gukov S.Yu., Tyurlikov A.M. *Obrabotka, peredacha i zashchita informatsii v komp'yuternykh sistemakh* (Processing, Transmission and Protection of Information in Computer Systems), 2021, vol. 21. (in Russ.)
3. Wermke F., Wübbenhorst T., Meffert B. 2020 *IEEE SENSORS*, Rotterdam, Netherlands, 2020, pp. 1–4, DOI: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278667.
4. Wermke F., Wübbenhorst T., Meffert B. *6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, Singapore, 2020, pp. 586–595, DOI: 10.1109/ICCAR49639.2020.9107975.
5. Volak J., Koniar D., Jabloncik F., Hargas L., Janisova S. *42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2019.
6. Li L., Xiang S., Yang Y., Yu L. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2015.
7. Wübbenhorst T., Wermke F., Meffert B. *IEEE Sensors*, Rotterdam, Netherlands, 2020, pp. 1–4, DOI: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278774.
8. Wübbenhorst T. *Frame-basierte optische synchronisation von time-of-flight (tof) sensoren*, Master's thesis, Humboldt-Universität zu Berlin, 2019.
9. Wermke F., Meffert B. *Interference Model of Two Time-Of-Flight Cameras*, 2019.
10. Gukov S.Y., Afanasieva A.V., Turlikov A.M. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*, 2020.
11. Predtechensky V.M., Milinsky A.I. *Proyektirovaniye zdaniy s uchetom organizatsii dvizheniya lyudskikh potokov* (Design of Buildings Taking into Account the Organization of the Movement of Human Flows), Moscow, 1979, 375 p. (in Russ.)
12. YuJie Fang, Xia Wang, Zhi Bin Sun, Kai Zhang, Bing Hua Su. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 128.
13. Yuzhi Song, Chunqing Lu, Fenzhi Wu, Zhongxiang Cao, Xiao Liang. *Sixth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Application*, 2019.
14. Conde M.H. *IEEE Sensors Letters*, 2020, no. 7(4), pp. 1–4.
15. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019)*, 2019, pp. 8840647.

Data on authors

- Sergey Yu. Gukov** — St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Computing Systems and Programming, Department of Information Systems and Technologies; Senior Lecturer; E-mail: sg_brui@mail.ru
- Andrey M. Tyurlikov** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Radio Engineering, Electronics and Communications, Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems; Head of the Department; E-mail: turlikov@k36.org

Received 14.05.2023; approved after reviewing 22.06.2023; accepted for publication 31.07.2023.