

УДК 681.518

## ПОЛУЧЕНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ДОРОЖНОЙ СЦЕНЫ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ

А.В. Аверин (*averin-artem2007@yandex.ru*)И.А. Костин (*kostin.ivan.a@gmail.com*)Н.В. Панокин (*nik\_p@mail.ru*)Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС», Москва

**Аннотация.** Данная статья посвящена проблемам проектирования систем технического зрения на базе технологии миллиметровой радиолокации. Рассмотрена архитектура программного обеспечения для моделирования работы миллиметрового радиолокатора с использованием математических моделей, имитирующих различные объекты дорожной сцены. Проведено исследование трехмерных дорожных сцен различных конфигураций с учетом влияния подстилающей поверхности. Показана возможность классификации дорожных препятствий и подвижных агентов дорожной сцены путем анализа радиолокационных данных с автомобильного радара.

**Ключевые слова:** трехмерная дорожная сцена, радиолокатор, классификация объектов.

### Введение

Формирование реалистичной трехмерной модели дорожной сцены необходимо для отработки методов обработки и интерпретации трехмерных данных с целью повышения эффективности детектирования и распознавания объектов. Для этого необходимо обеспечить решение следующих задач [Якимов и др., 2015]: синтеза проезжей части и стационарных объектов; синтеза реалистичной динамики виртуального мира в условиях ограниченности вычислительных ресурсов.

Данные задачи могут быть решены, в свою очередь, для моделей разного уровня детализации, которые принято делить на:

- *макроскопические* – модели, позволяющие анализировать дорожные объекты с точки зрения взаимодействия потока частиц (пример пакет TRANSIMS (TRansportation ANalysis and SIMulation System) [Angshuman G], [Патент, RU2601133C2], [Barcelo, 2005]);

- *микроскопические* – модели, позволяющие моделировать действия небольшого числа объектов дорожной сцены с помощью правил, определяющих геометрические, скоростные параметры объекта, а также различные маневры движения и взаимодействия объектов между собой (пример пакет VISSIM [Патент, RU2601133C2], [Lownes, 2006]);

- *мезоскопические* – модели, которые занимают среднее положение по уровню детализации между макро- и микроскопическими моделями и призваны описывать на высоком уровне детализации объекты и на низком уровне взаимодействие объектов (пример пакет Paramics [Патент, RU2601133C2], [Cameron, 1994]).

Получение данных о трехмерной дорожной сцене возможно с помощью сенсорного подхода и имитационного моделирования. Сенсорный подход основан на анализе данных с камер и лидаров, которые формируют систему технического зрения. Данные, получаемые с этих систем, можно промоделировать в существующих средах имитационного моделирования AirSim, CARLA, V-Rep, Gazebo. Вариант сенсорного подхода получения радиолокационных данных [Беляев, 2018] в среде CARLA (Car Learning to Act) позволяет создавать изображения дорожной сцены, а также семантическую сегментацию и карту глубины (рисунок 1).



Рис. 1. Среда моделирования CARLA.

Имитационный подход получения радиолокационных данных вплоть до частот 79 ГГц и выше реализован в среде WaveFarer [WaveFarer, Электронный ресурс]. Имитационные средства получения радиолокационной информации часто являются узкоспециализированными и не всегда позволяют в полной мере исследовать качество методов детектирования и распознавания объектов трехмерной дорожной сцены в реальных условиях быстроменяющейся дорожной обстановки. На рынке отсутствуют среды моделирования радиолокационных систем ближнего

(Short Range Radar - SRR) и дальнего (Long Range Radar – LRR) действий [Беляев, 2018], которые сочетали бы возможность имитационного и сенсорного подходов получения радиолокационных данных с возможностью отработки методов детектирования и распознавания трехмерных объектов.

Таким образом, существует необходимость разработки методов математического, в том числе, имитационного моделирования с целью выяснения эффективности разрабатываемых методов обработки радиолокационной информации и уточнения требуемых характеристик 3D радара, используемого для построения трехмерной дорожной сцены.

## **2 Архитектура программного обеспечения для формирования трехмерной дорожной сцены**

Пример построения математической и имитационной модели радиолокатора, на которой основана разрабатываемая модель для системы формирования трехмерной дорожной сцены, описана в [Отчет, RFMEFI57815X0130]. Функционал описанной модели был расширен, в частности, внесением следующих доработок: введено частотное качание луча в плоскости угла места, введена возможность моделирования радара в диапазонах 24 и 77 ГГц, введена возможность моделирования объектов дорожной сцены, введен учет амплитудно-частотных рассогласований в приемных каналах, разработан модуль визуализации результатов обработки радиолокационного сигнала, введен учет влияния подстилающей поверхности.

В радаре используется микрополосковая антенная решетка с частотным качанием луча в плоскости угла места и последующим цифровым диаграммоформированием в горизонтальной плоскости. Характеристики данного радара приведены в таблице 1.

Проектирование программного обеспечения для моделирования системы обработки радиолокационной информации проводилось в соответствии с разработанной архитектурой. Архитектура программного обеспечения (ПО) для обработки радиолокационной информации в случае сигнала с линейной частотной модуляцией и формирования трехмерной дорожной сцены разработана согласно основным принципам проектирования [Гамма, 2001] и отражает основные требования верхнего уровня ко всем составляющим частям системы обработки.

Таблица. 1. Основные характеристики 3D-радара

Параметр	Значение
Центральная частота	24,5 ГГц
Ширина полосы частот	1 ГГц
Количество каналов на передачу	1
Количество каналов на прием	8
Количество элементов в патче	16
Угол обзора по азимуту	101 град
Угол обзора по углу места	16 град
Максимальная дальность действия	67 м

Общая структура ПО представлена на рисунке 2 состоит из: модуля дорожной сцены; модуля формирования сигналов биений; диспетчера (синхронизатора); модуля автокалибровки; модуля первичной обработки; модуля вторичной обработки; модуля визуализации.

Как показано на рисунке 2, архитектура системы предполагает обработку данных, полученных из различных источников. Сигналы биений могут быть получены непосредственно от радара и обработаны сразу, либо сначала записаны на информационный носитель системы хранения данных (например, жесткий диск), а затем прочитаны с него для обработки, либо получены от модуля формирования сигналов биений. В первых двух случаях, при этом, будут обрабатываться реальные данные, а в последнем – смоделированные.

Основной задачей модуля имитации дорожной сцены является вычисление текущих координат объектов дорожной сцены в соответствии с их законами движения. Поскольку каждый объект в рассматриваемой модели трехмерной дорожной сцены является распределенным объектом, его можно представить в виде системы из N отражателей [Бондарев, 1990].

Модуль формирования сигналов биений позволяет создавать имитационные сигналы, обработка которых позволяет оценивать следующие характеристики: максимальная и минимальная дальность при работе 3D радара заданной конфигурации; разрешающая способность по углу, скорости, дальности; минимальное отношение сигнал/шум, обеспечивающее эффективную работу методов обработки сигнала; степень соответствия построенной трехмерной дорожной сцены реальной дорожной сцене.

В модуле первичной обработки радиолокационной информации проводится поэтапное применения БПФ сначала по времени, потом по пространству.

На вход модуля вторичной обработки радиолокационной информации поступает вещественный массив данных, содержащий следующую информацию: количество задетектированных объектов в кадре, координаты каждого из объектов, спектральная плотность мощности.

Модуль автоматической компенсации амплитудно-фазовых рассогласований в приемных каналах АР необходим для учета меняющихся во времени внутренних флуктуаций приемо-передающего тракта радара, которые приводят к амплитудно-фазовым искажениям (рисунок 3). Результатом амплитудно-фазовых искажений являются: искажение формы главного лепестка диаграммы направленности и увеличение уровня боковых лепестков. В разработанной модели предусмотрено несколько типов распределенных объектов, наполняющих трехмерную дорожную сцену: одиночная блестящая точка, человек, легковой автомобиль, грузовой автомобиль, мотоцикл, столбы по краям дороги. Параметры остальных объектов данного типа задаются индивидуально, путем определения параметров каждой блестящей точки, входящей в состав моделируемого распределенного объекта.

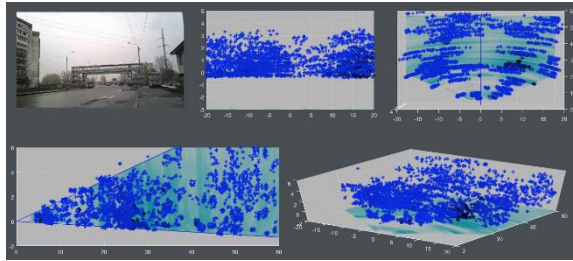
Кроме того, модуль имитации дорожной сцены предусматривает расширение списка моделируемых объектов путем добавления новых систем блестящих точек и написания программных функций, описывающих законы движения новых объектов.

### **3 Классификация объектов трехмерной дорожной сцены**

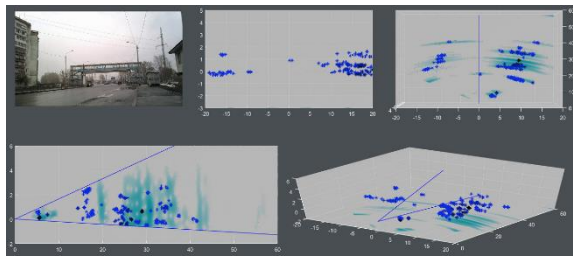
Помимо эвристических методов, основанных на определении меры расстояния между отметками (аналогично методу имитации отжига [Кирсанов, 2007]), применяется широко распространенный метод k-средних [Coates, 2012], суть которого заключается в минимизации квадратичного отклонения отметок от центров соответствующих им объектов.



Квалификация может проводиться как для отдельных отметок, так и для выделенных кластеров. Целью квалификации является определение типа объекта, выделение препятствий, дорожных конструкций, других транспортных средств и иных участников дорожного движения. В классической теории радиолокации и распознавании образов квалификация целей базируется на априорной информации о количестве и качественном составе классов объектов, причем известно, что с ростом числа классов ее достоверность падает [Горелик, 1963]. Набором признаков в данном случае является вектор  $x_e = [R, V, \theta, \varphi, l, a]$  в  $\mathbf{R}^6$ , где  $R$  – радиальная дальность,  $V$  – радиальная скорость,  $\theta$  – направление по азимуту,  $\varphi$  – направление по углу места,  $l$  – оценка линейного размера,  $a$  – ЭПР.



(a)



(б)

Рис. 3. Результат первичной обработки радиолокационной информации до автоматической компенсации амплитудно-частотных рассогласований каналов AP (а) и после нее (б)

Однако, в настоящее время широко распространены технологии машинного и глубокого обучения для обнаружения и квалификации объектов трехмерной дорожной сцены, где в качестве исходных данных выступают характеристики массивов отражающих точек (рисунок 4, 5).

Одним из таких методов автоматического анализа трехмерной дорожной сцены по радиолокационному изображению является подход, основанный на сверточных нейронных сетях [Huijing Zhao, 2012; Wang, 2003] для предоставления информации о количестве и расположении значимых объектов на трехмерной дорожной сцене (рисунок 6).

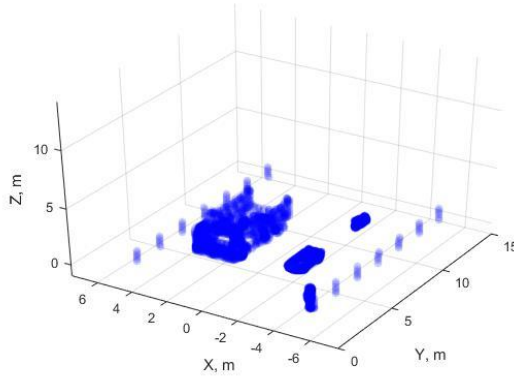


Рис.4. Пример моделируемой трехмерной дорожной сцены (отбойники по краям дороги, человек у края проезжей части, грузовой автомобиль, легковой автомобиль, мотоцикл)

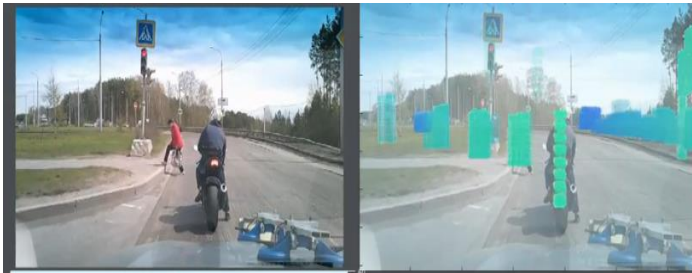


Рис.5. Кластеры отражающих точек с наложением на видеоизображение (цвет отображает расстояние до объекта)



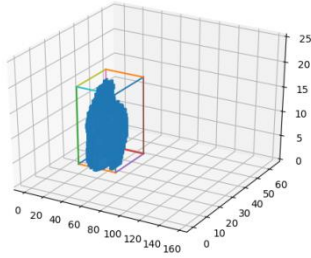


Рис.6. Локализация объекта известного класса при глубоком обучении

Реальные данные были получены с помощью разработанного прототипа радара, работающего в диапазоне 24ГГц (рисунок 7).

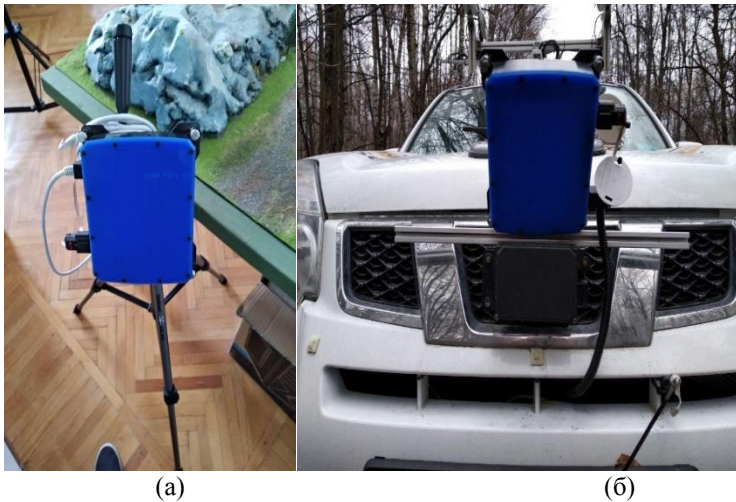


Рис. 7. 3D-радар 24ГГц, (а) – на штативе, (б) – установлен на автомобиль

## Список литературы

- [Беляев, 2018] А.А. Беляев, Т.А. Суанов, Д.О. Троц. Моделирование работы автомобильного радара в задаче автономного движения. Инженерный вестник Дона, №2 (2018).
- [Бондарев, 1990] Бондарев Л.А. Отражающие свойства моделей сложных радиолокационных целей. – Радиотехника. – 1990. – № 7. С. 8-13.

- [Гамма, 2001] Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влссидес. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. – СПб: Питер, 2001. – 368с.: ил. (Серия «Библиотека программиста»).
- [Горелик, 1963] А.Л. Горелик, Ю.Л. Барабаш. Селекция и распознавание на основе локационной информации. – М.: Радио и связь, 1990 – 240 с. || Ю.Л. Барабаш, Б.В. Варский, В.Т. Зиновьев. Автоматическое распознавание образов – Киев: КВАИУ, 1963 – 168 с.
- [Кирсанов, 2007] Кирсанов М.Н. Графы в Maple. – М.: Физматлит, 2007. – С.151-154
- [Патент, RU2601133С2] «Имитационная модель движения транспортных и пешеходных потоков в городских условиях на основе агентно-ориентированного подхода (RU2601133С2)».
- [Отчет, RFMEF157815X0130] Отчет о прикладных научных исследованиях и экспериментальных разработках. «Разработка грузового автомобиля повышенной безопасности, оснащённого программным комплексом на базе технологий миллиметровой радиолокации для целей обнаружения и классификации препятствий и других транспортных средств с обеспечением функции управления торможением» по соглашению с МОН № 14.578.21.0130 от 27.10.2015, уникальный идентификатор проекта RFMEF157815X0130.
- [Якимов и др., 2015] П.Ю. Якимов, С.А. Разлацкий. Применение метода Хафа для детектирования объектов в трехмерной сцене. Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2015): материалы Международной конференции и молодежной школы. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. – с. 324-328.
- [Angshuman G] Angshuman G., Introduction to TRANSIMS.
- [Barcelo, 2005] Barcelo J. Microscopic traffic simulation: a tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems // Journal of intelligent and robotic systems. - 2005. - Vol. 41, №2-3. - P. 173-203.
- [Cameron, 1994] Cameron G. PARAMICS - moving vehicles on the connection machine / G. Cameron, B. Wylie, D. McArthur // Proceedings of the conference on supercomputing. - IEEE computer society press, 1994. - P. 291-300.
- [Coates, 2012] Adam Coates and Andrew Y. Ng. Learning Feature Representations with K-means, Stanford University, 2012
- [Lownes, 2006] Lownes N.E. VISSIM: a multi-parameter sensitivity analysis / N.E. Lownes, R.B. Machemehl // Proceedings of the 38th conference on Winter simulation. - 2006. - P. 1406-1413.
- [Wang, 2003] C.C. Wang, C. Thorpe, and S. Thrun, “Online Simultaneous Localization and Mapping with Detection and Tracking of Moving Objects: Theory and Results from a Ground Vehicle in Crowded Urban Areas,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2003.
- [Huijing Zhao, 2012] Huijing Zhao, Jie Sha, Yipu Zhao, Junqiang Xi, Jinshi Cui, Hongbin Zha and Ryosuke Shibasaki. Detection and Tracking of Moving Objects at Intersections Using a Network of Laser Scanners. Article (PDF Available) in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 13(2):655-670, 2012
- [WaveFarer, Электронный ресурс] <https://www.remcom.com/wavefarer-automotive-radar-software>. (дата обращения 3.12.2015)