

Особенности проектирования специализированных беспилотных автотранспортных средств с учетом специфики дорожной инфраструктуры России

М. В. Гриднев, А. Е. Пудовкин, С. Г. Хомутов

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

Аннотация. Для построения объемной модели местности в системах управления беспилотными автомобилями, основными используемыми элементами считаются 3D-лидары. Однако, сравнительно недавно разработанные автомобильные 4D-радары высокого разрешения, не имеющие ограничений по условиям применения, могут стать достойной заменой лидарам в сложных дорожных условиях.

Ключевые слова: лидар, радар, адаптивная антенная решетка с множественными антенными элементами, моделирование, прототипирование, Matlab/Simulink, алгоритм обработки сигнала

I. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что активная разработка беспилотных автотранспортных средств (БАС) началась с восьмидесятых годов 20-го века, широкие перспективы по их проектированию и массовому изготовлению с целью экономически выгодного и относительно безопасного использования стали появляться только в 2010-х годах. Это было обусловлено усовершенствованием элементной базы датчикопреобразующей аппаратуры, входящей в состав системы машинного зрения БАС и повышением вычислительных мощностей, используемых для обработки поступающих от нее данных.

До появления таких элементов машинного зрения, как 3D-LiDAR (Light Detection And Ranging «обнаружение и определение дальности с помощью света»), автоматическое управление БАС могло эффективно осуществляться лишь при наличии качественной специально оборудованной дорожной сети – с ровным и однородным дорожным покрытием с наличием четкой дорожной разметки и дорожных знаков. Поэтому, по-настоящему автономное функционирование БАС на большей части дорожной сети РФ представлялось проблематичным. Но и с появлением таких элементов машинного зрения, как 3D-LiDAR, функционирование БАС в более сложной дорожной обстановке может происходить только в условиях отсутствия в окружающей среде значительного количества взвешенных частиц (дождь, снег, пыль). Датчик LiDAR – это комплекс из излучателя и сенсора, который использует лазерные импульсы (ультрафиолет или инфракрасное излучение) для обнаружения объектов вокруг себя. Проходя от излучателя на автомобиле до ближайшей поверхности и обратно к фотосенсору, лазер измеряет расстояние между ними с помощью метода фазового сдвига. Использование лазера не избавляет лидар от влияния внешних помех и отсутствия

освещенности, что допускает серьезное искажение или даже полное блокирование сигналов лидара. К тому же, из-за высокой цены лидаров, а также значительной цены других элементов машинного зрения, рентабельным представляется их использование в специализированных БАС коммерческого и военного назначения.

Повышает шансы на появление в ближайшем будущем полностью автоматизированных БАС, по крайней мере, в военном и коммерческом сегменте, появившийся в 2018 году автомобильный радар высокого разрешения – 4D-радар с планарной антенной системой, способный измерять дальность, азимут, угол места и скорость, и таким образом, заменить дорогостоящий и не всегда корректно работающий лидар.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Типичный набор сенсоров машинного зрения для БАС включает видеокамеры, а также работающие на дальней дистанции в любую погоду радары в системах активной безопасности и способный делать точные измерения трехмерной сцены 3D-лидар. Хотя стоимость такого лидара колеблется в диапазоне от десятков до сотен тысяч долларов, он используется только для получения трехмерного облака точек и не позволяет отказаться от прочих сенсоров.

Ранее, автомобильные радары БАС не могли определять высоту объекта, а обозначение 3D означало, что за счет физических свойств сигнала (эффект Доплера) они измеряют 3 параметра: расстояние и угол (азимут) до объекта, а также скорость и ее знак (удаляется или приближается объект к излучателю).

В 2018 году отечественной фирмой Cognitive Pilot был впервые представлен 4D Imaging MIMO радар с планарной антенной системой, способный измерять дальность, азимут, угол места и скорость и заменить дорогостоящий лидар. Для получения высокого углового разрешения конструкция антенны радара была выполнена в форме фазированной антенной решетки по планарной технологии, когда антенная система реализована в виде дорожек особой формы (микрорешеток), на платах из высокочастотной керамики, закрепленных на титановом основании (из-за коэффициента температурного расширения титана и керамики, чтобы платы не треснули при перепадах температур).

Технология MIMO – Multiple Input Multiple Output заключается в применении адаптивных антенных

решеток с множественными антенными элементами. Системы ММО значительно увеличивают пропускную способность системы за счет пространственного разнесения каналов, а также дают энергетический выигрыш за счет использования пространственно-временных кодов. С возрастанием количества передающих и приемных антенн системы ММО пропускная способность канала возрастает практически пропорционально росту числа антенн, однако большому увеличению их количества препятствует усложнение разработки эффективных пространственно-временных кодов и увеличение габаритов конечного устройства.

То есть, все 4D-радиолокационные датчики работают по принципу ММО (множественные входы, множественные выходы – метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала). Блоки приемников и передатчиков разнесены геометрически, при этом передатчики могут излучать сигнал по очереди (временное разделение каналов – TDMA (Time Division Multiple Access) – метод множественного доступа с разделением по времени) или в виде разных кодовых последовательностей (кодовое разделение каналов – DDMA (Digital Dynamic Multiple Access) – цифровой вариант TDMA с динамическим распределением слотов), а также сочетая эти подходы. Таким способом можно улучшить характеристики радара без усложнения и удорожания конструкции. Главным преимуществом такого подхода является уменьшение необходимого количества приемных каналов. Поэтому 4D Imaging ММО радар нашел применение в качестве автомобильного радара БАС благодаря своей способности получать хорошие угловые разрешения по азимуту и высоте, при небольшом размере корпуса.

Помимо совершенствования аппаратной части, важную роль играет развитие алгоритмической части системы управления БАС, что позволяет упростить аппаратную составляющую и снизить ее стоимость. В сложных системах управления движением БАС, программное обеспечение (ПО) делится на два уровня: нижний и верхний. Нижний уровень отвечает за взаимодействие с датчиками и исполнительными устройствами, верхний – за реализацию алгоритма управления движением БАС.

При разработке новых алгоритмов, с целью экономии времени и материальных ресурсов, производится моделирование их поведения с использованием специализированных пакетов моделирования. Наилучшими возможностями для тестирования систем управления БАС в настоящее время обладает среда Matlab/Simulink, позволяющая использовать технологию быстрого прототипирования.

Технология быстрого прототипирования позволяет упростить разработку ПО встраиваемых систем, таких как датчики системы машинного зрения. Графическое представление программ и автоматическая генерация кода избавляют разработчика от составления алгоритма, написания программного кода и его отладки. Повышается надежность кода, так как стандартные операции и алгоритмы разработаны и отлажены поставщиком среды.

Необходимо отметить, что в Matlab/Simulink оперативно добавляется математический аппарат для

моделирования вновь появляющихся технических средств, в том числе, и элементов машинного зрения. Так с 2021 года в состав пакета Simulink системы Matlab включена возможность моделирования работы автомобильного радара высокого разрешения - 4D Imaging ММО, с помощью инструмента RadarTransceiver в составе Radar Toolbox (инструментов проектирования радара). Radar Toolbox включает алгоритмы и инструменты для проектирования, моделирования, анализа и тестирования многофункциональных радиолокационных систем. Данный набор инструментов включает модели передатчиков, приемников, каналов распространения, целей и источников помех и позволяет моделировать радары на разных уровнях абстракции, используя различные вероятностные модели и модели уровней сигналов ввода-вывода. Для автомобильных приложений Radar Toolbox позволяет моделировать радарные датчики на вероятностном и физическом уровнях и моделировать данные, включая микро-доплеровские сигнатуры и списки объектов. Кроме возможности обрабатывать радиолокационные изображения, сгенерированные по результатам моделирования на основе выбранных моделей, возможна также обработка радиолокационных данных, собранных с использованием реальных радиолокационных систем. Обработка может производиться с использованием указанных ранее специальных алгоритмов обработки сигналов и данных – TDMA и DDMA, также представленных в наборе инструментов.

При множественном доступе с временным разделением (TDMA) сигнал передается только с одного элемента антенной решетки в определенный момент времени. Одновременное использование только одного элемента передачи обеспечивает необходимую ортогональность, но за счет снижения общей мощности и максимальной скорости передачи радара.

При множественном доступе с доплеровским разделением (DDMA), ортогональность поддерживается в частотной области за счет сдвига сигналов, передаваемых каждой антенной в доплеровском режиме. Разделение сигналов от передающих антенн происходит не по времени, а по поддиапазнам доплеровской частоты в приемнике, что реализуется с помощью весовых коэффициентов, которые модулируют сигнал каждой передающей антенны в ее собственный поддиапазон доплеровской частоты. Максимальная скорость передачи радара при использовании DDMA тоже уменьшается из-за неэффективного использования слотов – если с какой-то из антенн нет передачи, то слот для нее пропадает зря (количество пиков передаваемых сигналов, распределенных по доплеровскому пространству, меньше количества передающих антенн антенной решетки). Поэтому используется адаптация DDMA ММО, введением в обработку неиспользуемой области доплеровского изображения, без учета равномерно расположенных пиков сигналов, путем добавления в матрицу виртуальных элементов передачи, что позволяет поддерживать максимальную скорость сигнала радара. Для адаптации используется определенная форма сигнала – FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) или радарные импульсы с линейно-изменяющейся частотой, т. е. использующие линейно-частотную модуляцию (ЛЧМ). FMCW ММО (Frequency Modulated Continuous Wave Multiple Input

Multiple Output) – метод, который использует одновременно несколько антенн для передачи и приема сигналов с ЛЧМ. Импульсы ЛЧМ одновременно передаются с разных антенн, а отраженные сигналы также принимаются разными антеннами. Сигнал FMCW не меняет свою форму для передающих элементов, но обладает для каждого элемента уникальным доплеровским смещением. Введение виртуальных антенн позволяет определять доплеровские смещения для неиспользуемых виртуальных передающих элементов. Эти неиспользуемые доплеровские смещения позволяют устранить доплеровские неоднозначности, предотвращая снижение максимальной скорости сигнала радара.

Все описанные инструменты, имеющиеся в Simulink, позволяют пользователю произвести качественное прототипирование такого передового элемента системы машинного зрения БАС как автомобильный 4D-радар высокого разрешения и моделирование работы полученного прототипа с получением трехмерной матрицы радарных данных, представляющей собой радиолокационное изображение высокой четкости.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Недавно появившиеся элементы машинного зрения БАС такие как автомобильный 4D-радар высокого разрешения, а также их качественная реализация в среде моделирования Matlab/Simulink, значительно упрощают возможность проектирования и внедрения БАС с полной автономностью функционирования, эксплуатация которых в условиях российского бездорожья, сложных погодных условий и больших расстояний будет экономически выгодна и целесообразна, а самое главное – безопасна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шаошань Лю, Лионь Ли, Цзе Тан, Шуаш Ву, Жан-Люк Годье. Разработка беспилотных транспортных средств / науч. ред. В.С. Яценков; пер. с англ. П.М. Бомбаковой. М.: ДМК Пресс, 2022. 246 с.
- [2] Деменков Н.П., Микрин Е.А. Управление в технических системах: учебник. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 452 с.
- [3] Сюй Ф., Воробьев С.А. и Янг Ф. Автомобильный радар ММО на основе DDMA в пространстве луча передачи: перевод // IEEE. Технология, том 71, № 2, стр. 1669-1684, февраль 2022 г.
- [4] Янсен Ф. втомобильный радар с доплеровским разделением ММО с возможностями разрешения неоднозначности скорости // 16-я Европейская конференция по радиолокации (EuRAD) 2019 г., Париж, Франция, октябрь 2019 г., стр. 245-248.
- [5] Дорохин С.В., Азарова Н.А., Рудь В.А. Проблемы и перспективы использования беспилотного транспорта на дорогах крупных городов РФ // В сборнике: Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий и научно-технических решений. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Воронеж, 2022. С. 64–66.
- [6] <https://robogeek.ru/nauchnye-razrabotki-programmnoe-obespechenie/cognitive-technologies-predstavlyayet-pervyi-promyshlennyi-4d-radar>
- [7] https://www.mathworks.com/help/radar/automotive-radar.html?s_tid=CRUX_lftnav
- [8] <https://www.mathworks.com/help/radar/multifunction-and-cognitive-radar.html>
- [9] <https://bespilot.com/news/307-3891818>
- [10] Matlab: сайт компании. Режим доступа: <http://matlab.ru/products/matlab> (дата обращения 23.01.2024).