

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИДАРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЯЕМОГО СКАНИРОВАНИЯ ДОРОГ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ¹

© 2021 г. В. Я. Ким^а, В. М. Лисицын^{а,*}, С. М. Мужичек^а, К. В. Обросов^а

^а ФНЦ ФГУП “ГосНИИАС”, Москва, Россия

*e-mail: lvm@gosniias.ru

Поступила в редакцию 25.08.2020 г.

После доработки 02.09.2020 г.

Принята к публикации 28.09.2020 г.

Анализируются проблемы применения двулучевых лазерно-локационных систем (часто называемых лидарами) на беспилотных транспортных средствах для обеспечения безопасности движения и пути их решения. Предложен экономически выгодный способ реализации лидарной системы с управляемым (адаптивным) сканированием дорожного покрытия. Разработаны алгоритмы обработки информации и управления углом наклона лазерных лучей для зондирования на заданной дальности поверхности дороги со сложным продольным профилем. Предложен и обоснован метод оценки вероятности измерения скорости сближения с другими транспортными средствами в процессе управляемого сканирования дороги. Выполнено моделирование системы, адекватность которого обусловлена результатами проведенных натурных экспериментов с реальным лидаром. Методами моделирования и статистической обработкой данных получена зависимость вероятности измерения скорости сближения с объектами от величины этой скорости и времени, затрачиваемого на измерения. Такая зависимость свидетельствует об эффективности применения двулучевого управляемого сканирования на беспилотных транспортных средствах.

DOI: 10.31857/S000233882101008X

Введение. Многие автомобильные фирмы пытаются разрабатывать различные системы интеллектуального вождения, которые применяются либо в помощь водителю, либо с целью создания беспилотных транспортных средств (БТС). Основной задачей таких разработок является обеспечение гарантированной безопасности движения по дорогам транспортных средств (ТС) и пешеходов. К настоящему времени созданы достаточно надежные телевизионные (ТВ) и тепловизионные (ТП) системы для автоматического обнаружения и дешифрирования дорожных знаков, дорожной разметки и светофорной сигнализации. Однако для безопасного движения БТС необходима текущая 3D-информация о ситуации на проезжей части дороги. Такая информация может быть получена с помощью радаров, лазерно-локационных (ЛЛ) систем [1, 2] и систем на основе использования стереопар пассивных датчиков изображения [3, 4]. ЛЛ-системы при соответствующей обработке информации позволяют выделять проезжую часть дороги, отличая ее от тротуаров, а также обнаруживать на ней различные объекты, которые представляют угрозу для безопасного движения, в том числе другие ТС и случайно оказавшегося на дороге человека. В известных ЛЛ-системах для решения этих задач предлагается использовать несколько десятков лазерных каналов дальнометрирования, которые формируют при азимутальном сканировании столько же строк, содержащих измерения дальностей до поверхности дороги и до объектов [5]. Применение стольких каналов дальнометрирования существенно увеличивает стоимость БТС, усложняет оптическую систему и ухудшает массогабаритные характеристики ЛЛ-системы. Поэтому их предполагается устанавливать только на небольшом числе экспериментальных и эксклюзивных БТС.

1. Проблемные вопросы управляемого сканирования дороги. Существенное уменьшение числа лазерных каналов может быть достигнуто путем применения так называемого адаптивного сканирования [6–10], которое при соответствующем управлении угловым положением лучей позволяет экономно расходовать лазерные импульсы, необходимые для обновления дальностного

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-06077-мк).

поля с требуемым периодом повторения. Это приводит к возможности уменьшения до минимума (до двух) количества используемых лазеров. Два канала дальнометрирования необходимы для надежного выделения проезжей части дороги, т.е. обнаружения краев тротуаров, и оценки уклона дороги в месте ее зондирования. В процессе адаптивного сканирования выделяются области интереса на дороге для ТВ- и ТП-систем, размещенных на БТС.

Наиболее простой (и, следовательно, дешевой) реализацией управляемого сканирования дороги одним лучом является вращение с постоянной угловой скоростью лазерного луча вокруг вертикальной оси. При этом луч заметает коническую поверхность с управляемым углом при вершине конуса. Сечение такого конуса поверхностью дороги формирует при движении БТС последовательность траекторий зондирования поверхности дороги (следов движения лазерного пятна) с измерениями дальностей до дороги в точках, которые соответствуют моментам излучения зондирующих импульсов. Угловые колебания БТС обуславливают необходимость гиросtabilизации оси конического вращения. Управление углом наклона луча должно обеспечить на каждом периоде сканирования зондирование дороги на заданной дальности от БТС, используя результаты измерений дальностей на предыдущих периодах. Для создания такой системы управления необходимо задаться продольным профилем дороги, называемой далее тест-дорогой. Такой профиль должен содержать дуги окружностей с минимальными радиусами [11]. Поэтому тестовой будем считать ситуацию, в которой БТС движется по дороге, проложенной через холм, т.е. с продольным профилем, состоящим из пяти участков: горизонтального до въезда на холм; вогнутого при переходе на подъем; выпуклого в окрестности вершины холма; вогнутого при съезде с холма и снова горизонтального. Продольный профиль тест-дороги является плавным сопряжением трех дуг окружностей с радиусом 4000 м и горизонтальных линий в начале и конце пути БТС.

Из простых геометрических построений следует, что даже при расположении ЛЛ-системы на крыше БТС (на высоте 1.8 м) и требовании зондирования дороги на дальностях 35–50 м одной гиросtabilизации положения оси конического вращения недостаточно для решения задачи мониторинга поверхности тест-дороги и необходимо управление углом наклона луча по результатам обработки измерений дальностей, проведенных на последних (относительно текущего) периодах сканирования дороги.

Проблемы создания системы управления углом наклона лазерного луча обусловлены следующими причинами.

Большие ошибки измерения дальности при настильном зондировании поверхностей. Угол настильности (угол между лучом и отражающей поверхностью) в случае зондирования выпуклых участков тест-дороги (на вершине холма) может быть равен 1.6° при дальности 40 м. Тогда использование известных моделей [12] формирования лазерного эхо-сигнала и измерения дальности путем выделения энергетического центра развертки импульса эхо-сигнала по времени приводят к оценкам диапазона возможных ошибок измерения $\pm(3-5)$ м при угле расходимости лазерного луча 3 угл. мин и диаметра выходной апертуры 3–6 см. Такие ошибки вызовут соответствующие реакции системы управления наклоном луча, в результате которых встреча луча с объектом на двух соседних периодах сканирования (через 0.15 с) будет гарантирована только при скорости сближения с ним более 40 м/с, т.е. когда катастрофа неминуема. Поэтому при таких ошибках измерения дальностей до дороги оценивать скорость сближения по двум замерам дальности до объекта не имеет смысла, т.е. необходимо уменьшить ошибки при настильном зондировании не менее чем в 10 раз.

Сложность обеспечения в динамике дальностей зондирования дороги близких к заданной при движении БТС из-за значительных изменений углов настильности и, следовательно, случайного изменения в широком диапазоне эквивалентного коэффициента усиления сигнала рассогласования по дальности при управлении углом наклона лазерного луча. Небольшие изменения этого угла могут приводить к значительным и неизвестным заранее изменениям дальности, что в сочетании с большими ошибками их измерения часто приводит к потере устойчивости и срыву сопровождения дороги на заданной дальности, а также практической невозможности эффективного комплексования ЛЛ-системы с ТВ- и ТП-системами.

Невозможность корректной оценки чувствительности при измерении скорости сближения с объектом, так как для этого требуется определить минимальную скорость, при которой может быть проведено ее измерение с заданной вероятностью. Для решения такой задачи необходимо знать достаточные статистики интервалов между следами лазерного пятна на дороге, которые являются зависимыми случайными величинами с неизвестными вероятностными характеристиками.

От успехов решения этих проблем зависит эффективность применения ЛЛ-систем на БТС и возможность комплексирования с ТВ- и ТП-системами.

2. Постановка задачи. Решение перечисленных выше проблем связано с проведением следующих исследований систем управляемого двулучевого сканирования.

1. Для уменьшения ошибок измерения дальностей можно использовать в приемнике принцип срабатывания по переднему фронту эхо-импульса. Для этого варианта необходимо выполнить экспериментальные исследования ошибок измерения дальностей лазерным локатором по переднему фронту эхо-импульса при настильном зондировании дорожного покрытия и провести регистрацию ошибок для обеспечения адекватности моделирования системы управляемого сканирования дороги.

2. Для системы управляемого сканирования необходимо разработать методы и алгоритмы обработки ЛЛ-информации “угол-угол-дальность” в контуре управления наклоном двух лазерных лучей: верхнего и нижнего с постоянным угловым отклонением одного от другого. Управление должно производиться по информации, содержащей измерения дальностей, которые получены при сканировании дороги за счет вращения лучей вокруг вертикальной оси с периодом не более 0.15 с. При этом предполагается, что на каждом периоде сканирования происходит выделение минимум двух азимутальных секторов, в которых лазерные лучи (лазерные пятна) попадают на дорогу, а не на другие ТС, едущие по ней. Методы и алгоритмы должны при настильном зондировании дороги минимизировать модуль разности дальностей до дороги на любых двух соседних периодах сканирования при ограничении на отклонения измеряемых дальностей от заданного значения.

3. Для определения при моделировании минимальной скорости сближения с объектом, при которой возможно ее измерение, необходимо разработать метод оценки гарантированной вероятности измерения скорости движения объекта относительно БТС в процессе сканирования дороги и одновременно обнаружении “на проходе” ТС, участвующих в движении. Метод должен позволять получать зависимости вероятности измерения скорости сближения с объектом и времени, затрачиваемого на ее измерение, от этой скорости.

4. Должно быть проведено моделирование системы управления наклоном диаграмм направленности (ДН) излучения и приема при лазерном зондировании тест-дороги перед БТС для решения следующих задач:

– определение влияния положений и размеров хотя бы двух азимутальных секторов, в которых возможно зондирование дороги между едущими ТС, на статистические характеристики дальностей зондирования дороги на соседних периодах сканирования;

– отработка параметров системы управления наклоном лазерных лучей для обеспечения устойчивости сопровождения дороги в ограниченном диапазоне дальностей ее зондирования;

– формирование статистических рядов дальностей зондирования на последовательности периодов управляемого сканирования при движении БТС по тест-дороге и их обработка для получения статистик, необходимых при оценке гарантированной вероятности измерения скорости сближения с объектом на дороге;

– построение по результатам моделирования зависимости гарантированной вероятности измерения скорости сближения и затрачиваемого на измерение времени от величины этой скорости с целью оценки эффективности применения предлагаемой системы управления сканированием.

3. Результаты экспериментальных исследований ошибок измерения дальностей по переднему фронту эхо-импульса. В импульсных лазерных дальномерах измерение дальностей до отражающей (рассеивающей) поверхности осуществляется путем запуска и остановки счетчика тактовых импульсов. Такой счетчик измеряет интервал времени между моментом излучения зондирующего импульса и моментом приема отраженного от поверхности эхо-сигнала. Большие ошибки измерения при настильном зондировании поверхности возникают из-за того, что отраженный импульс эхо-сигнала имеет значительно большую длительность, чем излученный. Это связано с тем, что лазерный луч имеет не бесконечно малый диаметр (апертуру) и рассеяние энергии продолжается до тех пор, пока отражающая поверхность находится в пределах апертуры луча. Проблема больших ошибок измерения дальностей при настильном зондировании отражающей поверхности может быть решена, если останавливать счетчик тактовых импульсов по переднему фронту импульса эхо-сигнала. Такой способ применяется при измерении небольших дальностей и был реализован в лазерном локаторе для проведения экспериментов. Локатор излучал на длине волны 1.54 мкм импульсы длительностью 5 нс с частотой следования 30 кГц. Выходная апертура

излучателя и геометрическая расходимость луча были равны 0.06 м и 1.5 угл. мин соответственно. Тактовый генератор дальномерного канала обеспечивал дискретное измерение времени между излученным и принятым импульсами, которое соответствует измерению дальности с дискретом $q = 0.47$ м. Локатор формировал последовательность измеренных дальностей в результате азимутального сканирования горизонтальной поверхности дороги при угле наклона лазерного луча $\alpha = 1.6^\circ$ (угол между лучом и поверхностью дороги, т.е. угол настильности зондирования дороги). Такой угол равен минимальному углу настильности при движении БТС по тест-дороге для указанных выше условий. В результате эксперимента формировалась последовательность отклонений δS_i при $i = 1, 1120$ измеренных дальностей от математического ожидания (МО). Такая последовательность соответствует максимально возможной дисперсии ошибок измерения дальностей при движении БТС по тест-дороге и будет использована при моделировании системы управляемого сканирования. Экспериментальная оценка дисперсии отклонений дальностей от МО при угле настильности 1.6° составляет

$$\sigma_\Sigma^2 = 0.62 \text{ м}^2.$$

Эти отклонения являются суммой двух независимых составляющих:

- ошибки, возникающей из-за дискретности измерения дальностей (соответствующей частоте тактовых импульсов в дальномере);
- случайного значения дальности, на которой уровень нарастающего переднего фронта эхо-импульса становится больше порога срабатывания в детекторе приемника излучения.

Первая составляющая не зависит от угла настильности зондирования, а вторая зависит. Дисперсия второй составляющей является разностью экспериментально полученной суммарной дисперсии и σ_Σ^2 и дисперсии ошибки дискретности, которую можно рассчитать по формуле $q^2/12$, где q – дискрет измерений дальности. При настройке локатора на заданную дальность зондирования порог срабатывания устанавливается в соответствии с критерием Неймана–Пирсона, т.е. максимизируется вероятность правильного обнаружения эхо-сигнала при заданной вероятности ложных тревог. В результате, при дальностях, значительно меньших максимально возможных, порог срабатывания много меньше, чем максимум эхо-сигнала. Поэтому разброс измерений дальности определяется началом нарастающего переднего фронта эхо-импульса. Дисперсия второй составляющей равна

$$\sigma_S^2 = \sigma_\Sigma^2 - \frac{q^2}{12} = 0.6 \text{ м}^2,$$

т.е. практически совпадает с σ_Σ^2 . Следовательно, при угле настильности $\alpha = 1.6^\circ$ основной является вторая составляющая ошибок измерения, даже в случае срабатывания приемного устройства по переднему фронту эхо-импульса.

4. Алгоритмы обработки информации и управляемого сканирования проезжей части дороги. Минимальное число каналов дальнометрирования, одновременно формирующих на дороге следы движения лазерных пятен (строк) при движении БТС и сканировании дороги, должно быть не меньше двух: нижнего (*Low*) и верхнего (*Up*). Только тогда возможно надежное обнаружение границ между дорогой и тротуаром и оценка угла настильности зондирования дороги. Для решения этих задач угловое расстояние между верхним и нижним лучом должно находиться в диапазоне $\Delta\alpha = 0.1115 - 0.3026^\circ$ при анализе сцен на дальностях 35–50 м. Малость угла $\Delta\alpha$ позволяет использовать общий дефлектор и один объектив при формировании нижнего и верхнего лучей, а также соответствующих ДН приема эхо-сигнала. При управлении углом наклона нижний луч – ведущий, а верхний – ведомый с постоянным углом $\Delta\alpha$, т.е. рассматривается простейшая оптико-механическая система сканирования. В процессе изменения продольного уклона дороги при движении БТС необходимо так управлять углом наклона зондирования, чтобы результаты измерений дальностей до дороги по нижнему лучу не выходили за заданные пределы. Следовательно, сигналом рассогласования на i -м периоде сканирования при таком управлении должно быть отклонение от заданной величины S оценки дальности $S_{L,i}$, полученной в результате обработки измерений. Значение оценки $S_{L,i}$ должно соответствовать дальности от ЛЛ-системы до дороги по направлению нижнего луча в плоскости симметрии БТС, т.е. непосредственно перед ним. Прямое измерение этой дальности не всегда возможно из-за ошибок и заслоняющих ТС, едущих перед БТС. Поэтому необходимо оценку $S_{L,i}$ получать с использованием аппроксимации измерений дальностей в направлениях, при которых возможен оптический контакт с дорогой между

едущими впереди ТС. Такой аппроксимацией в случае зондирования по образующим конуса может быть дуга эллипса. Продольный профиль дороги заранее неизвестен, поэтому для определения параметров аппроксимирующего эллипса необходима обработка дальностей хотя бы в двух интервалах азимутальных углов $\psi_1 \pm \delta\psi/2$ и $\psi_2 \pm \delta\psi/2$, в которых возможны оптические контакты с дорогой. Если обработка измерений в каждом из этих интервалов сформировала оценки дальностей $S_{1,i}$, $S_{2,i}$ как соответствующие углам ψ_1 и ψ_2 , то в результате аппроксимации эллипсом траектории зондирования можно найти его полуоси, и, следовательно, оценку величины $S_{L,i}$ для нижнего канала дальнометрирования по формуле

$$S_{L,i} \approx \sqrt{\frac{\sin^2 \psi_1 - \sin^2 \psi_2}{\frac{\sin^2 \psi_1}{S_{2,i}^2} - \frac{\sin^2 \psi_2}{S_{1,i}^2}}}. \quad (4.1)$$

Аналогично может быть получено значение оценки $S_{U,i}$ в верхнем канале дальнометрирования. Определение минимально возможных азимутальных интервалов $\delta\psi$ и оценка влияния их положения на статистики разностей оценок дальностей в соседних периодах сканирования является одной из задач моделирования.

Знание на текущем периоде сканирования дороги оценок $S_{L,i}$, $S_{U,i}$ и измеренного угла наклона нижнего луча $\alpha_{L,i}$ (угол между горизонтальной прямой и лучом в плоскости симметрии БТС) позволяет найти сигнал рассогласования $\widehat{\delta\alpha}_i$ в контуре управления углом наклона нижнего луча. Величина $\widehat{\delta\alpha}_i$ является результатом фильтрации поправок, рассчитываемых при изменениях угла наклона лучей на нескольких периодах, чтобы на следующем периоде сканирования оценка $S_{L,i+1}$ максимально приблизилась к заданной дальности зондирования S . Из геометрических построений следует, что требуемое значение угла наклона нижнего луча можно рассчитать по формуле

$$\hat{\alpha}_i = \arcsin \frac{S_{L,i} S_{U,i} \sin \Delta\alpha}{S\sqrt{S_{U,i}^2 + S_{L,i}^2 - 2S_{L,i}S_{U,i} \cos \Delta\alpha}} - \arcsin \frac{S_{L,i} \sin \alpha_{L,i} - S_{U,i} \sin(\alpha_{L,i} - \Delta\alpha)}{\sqrt{S_{U,i}^2 + S_{L,i}^2 - 2S_{L,i}S_{U,i} \cos \Delta\alpha}}. \quad (4.2)$$

Поэтому на i -м периоде сканирования следует определять поправку как разность между требуемым и измеренным углами наклона нижнего луча:

$$\delta\alpha_i = \hat{\alpha}_i - \alpha_{L,i}. \quad (4.3)$$

Если по каким-либо причинам на данном периоде отсутствуют оценки $S_{L,i}$ или $S_{U,i}$, то поправке присваивается нулевое значение.

Ошибки оценок $S_{L,i}$, $S_{U,i}$ могут приводить к недопустимо большим значениям поправок $\delta\alpha_i$, при которых велика вероятность срыва сопровождения дороги на заданной дальности S и мала вероятность события, заключающегося в том, что две строки пройдут через объект, появившийся на дальности меньше S в диапазоне углов сканирования по азимуту. Поэтому для формирования сигнала рассогласования в контуре управления углом наклона необходима особая фильтрация последовательности поправок, которая должна исключить многочисленные выбросы, сформировать выборку значений поправок, не приводящих к резким изменениям дальности зондирования дороги, и экстраполировать последовательность выбранных значений поправок на момент времени, когда будет формироваться очередная траектория сканирования. Методами моделирования были исследованы различные алгоритмы фильтрации. Отбор проводился по критерию минимума дисперсии разности дальностей зондирования тест-дороги на соседних периодах сканирования при ограничении сверху на динамические ошибки управления дальностью зондирования, возникающие из-за фильтрации. В результате был выбран следующий алгоритм нелинейной фильтрации с логическими операциями.

Фильтрация последовательности поправок $\{\delta\alpha_i\}_{i=1, \overline{N}}$ осуществляется путем обработки (после i -го периода сканирования) значений поправок, рассчитанных по формулам (4.1) и (4.2) на последних девяти периодах, т.е. обрабатываются значения из стек-памяти $\delta\alpha_i, \delta\alpha_{i-1}, \dots, \delta\alpha_{i-8}$, которые соответствуют моментам времени их формирования $t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,9}$. За ноль временной шкалы на i -м периоде принимается будущий момент времени, до которого необходимо прогнозировать сигнал рассогласования $\widehat{\delta\alpha}_i$ по углу в контуре управления наклоном нижнего луча, следовательно-

но, все значения $t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,9}$ меньше нуля. При фильтрации последовательность из девяти поправок, записанных в стек-память, обрабатывается “скользящим окном”, содержащим пять значений поправок, из которых выбирается одно с наименьшим модулем. Выбранные значения поправок и соответствующие им времена являются выборкой для линейной аппроксимации методом наименьших квадратов, с помощью которой производится экстраполяция на будущий (нулевой) момент времени. Экстраполированное значение служит сигналом рассогласования по углу в контуре управления наклоном нижнего луча. Описанный алгоритм фильтрации может быть представлен в виде следующих математических выражений:

$$\widehat{\delta\alpha}_i = \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 \widetilde{\delta\alpha}_{i,m} - \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 t_{i,m} \frac{\frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 t_{i,m} \widetilde{\delta\alpha}_{i,m} - \left(\frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 t_{i,m} \right) \left(\frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 \widetilde{\delta\alpha}_{i,m} \right)}{\sum_{m=1}^5 t_{i,m}^2 - \left(\frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 t_{i,m} \right)^2}. \quad (4.4)$$

В (4.4) величины $\widetilde{\delta\alpha}_{i,m}$ при $m = \overline{1,5}$ являются результатами нелинейной обработки “скользящим окном” девяти последних поправок $\delta\alpha_i, \delta\alpha_{i-1}, \dots, \delta\alpha_{i-8}$ в соответствии с выражением

$$\widetilde{\delta\alpha}_{i,m} = \text{sign}(\delta\alpha_{j_0}) (\min_j \{ |\delta\alpha_j| : j \in [i - m - 3, \dots, i - m + 1] \}), \quad (4.5)$$

где минимум достигается при $j = j_0$ и

$$\text{sign}(\delta\alpha_{j_0}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \delta\alpha_{j_0} \geq 0, \\ -1, & \text{если } \delta\alpha_{j_0} < 0. \end{cases}$$

При равных интервалах между временами $t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,9}$ выражение (4.4) упрощается и принимает вид

$$\widehat{\delta\alpha}_i = 1.2\widetilde{\delta\alpha}_{i,1} + 0.9\widetilde{\delta\alpha}_{i,2} + 0.6\widetilde{\delta\alpha}_{i,3} + 0.3\widetilde{\delta\alpha}_{i,4} - 0.4 \sum_{m=1}^5 \widetilde{\delta\alpha}_{i,m}, \quad (4.6)$$

где значение $\widetilde{\delta\alpha}_{i,5}$ рассчитано по формуле (4.5) на последнем (текущем) периоде сканирования, $\widetilde{\delta\alpha}_{i,4}$ – на предпоследнем и т.д., $\widetilde{\delta\alpha}_{i,1}$ – на четвертом периоде до текущего i -го. Полученная оценка поправки $\widehat{\delta\alpha}_i$ после умножения на коэффициент K подается на обработку, т.е. приводит на следующем $(i + 1)$ -м периоде сканирования к установке нового значения угла наклона $\alpha_{L, i+1}$.

В результате формирования и обработки поправок по формулам (4.1)–(4.6) при движении БТС по дороге со сложным продольным профилем появляется такая последовательность сигналов рассогласования $\{\widehat{\delta\alpha}_i\}$, при которой достигается компромисс между динамическими (из-за запаздываний) и случайными (из-за погрешностей измерений) ошибками сопровождения дороги на заданной дальности, если в системе управления углом наклона луча установлен коэффициент усиления $K = 0.4$. При этом самые резкие изменения продольных уклонов дороги не приводят к существенным нарушениям заданной дальности S и наблюдается приблизительное равенство интервалов между траекториями зондирования дороги на соседних периодах сканирования.

5. Метод оценки гарантированной вероятности измерения скорости сближения. Время зондирования дороги δt значительно меньше периода сканирования T (например, при $T = 0.15$ с составляет величину $\delta t < 0.025$ с). Поэтому можно считать, что за это время сформированный системой управления угол между ДН и гириостабилизированной вертикальной осью ЛЛ-системы не изменится. Следовательно, при i -м периоде сканирования траектория движения лазерного пятна по полотну дороги перед БТС полностью определяется углом наклона луча $\alpha_{L, i}$ в момент его попадания в плоскость симметрии БТС и пространственным положением сканируемого участка дороги в системе координат, связанной с ЛЛ-системой. Рассмотрим процесс формирования оценок дальностей до дороги $\{S_{L,i}\}_{i=\overline{1,N}}$ при попадании оси ДН нижнего луча в плоскость симметрии БТС как случайный процесс с дискретным временем $\{t_i\}_{i=\overline{1,N}}$, причем разность $t_{i+1} - t_i = T$ является периодом сканирования лазерным лучом дорожного покрытия перед БТС. Скорость сближения с объектом может быть измерена в случае обнаружения объекта на двух периодах сканирования, т.е. при формировании двух траекторий движения лазерного пятна, сформированного

нижним лучом. Выбор нижнего луча связан с требованием точного измерения дальности, которая достигается при зондировании объекта двумя лучами, что гарантировано при попадании на объект нижнего луча. Обнаружение на i -м периоде сканирования (событие A_i) происходит, если во время развертки траектории движения лазерного пятна дальность до объекта $S_{c,i}$ станет меньше оценки дальности до дороги $S_{L,i}$, т.е. лазерное пятно начнет попадать на объект. Далее выделяется диапазон азимутальных углов, в котором измеренные дальности заметно меньше $S_{L,i}$, т.е. являются результатами зондирования объекта, а не дороги, и по этим измерениям оцениваются и запоминаются дальность до объекта $\tilde{S}_{c,i}$ и его угловые координаты. Если на $(i+k)$ -м периоде тоже происходит обнаружение того же объекта (событие A_{i+k}) с оценкой дальности $\tilde{S}_{c,i+k}$, то возможно определить скорость сближения по формуле

$$\Delta V = (\tilde{S}_{c,i} - \tilde{S}_{c,i+k})/kT.$$

Точность такой оценки соответствует средним квадратическим ошибкам (СКО) оценок скорости сближения 0.52, 0.26, 0.17, 0.13 м/с при затрачиваемых на измерения интервалах времени kT , равных 0.15, 0.3, 0.45, 0.6 с соответственно, при измерениях дальностей с СКО 0.5 м и попадании на объект 80 лазерных импульсов, что характерно для ТС шириной 2 м, едущего на расстоянии 35 м. Однако присутствие значительных случайных составляющих в оценках дальностей $S_{L,i}$, $S_{L,i+k}$ приводит к случайности события A_{i+k} , т.е. обнаружения объекта на $(i+k)$ -м периоде, из-за того, что дальность до дороги может уменьшиться так, что выполнится неравенство $S_{c,i+k} > S_{L,i+k}$ и измерение скорости сближения на $(i+k)$ -м периоде станет невозможным. Очевидно, что при большой скорости сближения ΔV и обнаружении объекта на i -м периоде (событие A_i) вероятность обнаружения на $(i+1)$ -м периоде практически равна единице. Однако в случае малых скоростей ΔV это не так. Наиболее сложная ситуация возникает при движении ТС в потоке с интервалом близким к заданной дальности S , когда чередование возможности и невозможности измерения скорости сближения может происходить достаточно часто. Поэтому характеристикой возможности измерения скорости сближения является вероятность Q_k события, заключающегося в том, что на интервале времени kT после появившегося обнаружения произойдет второе обнаружение того же впереди едущего объекта. Причем первому обнаружению, случившемуся на i -м периоде сканирования, должен предшествовать $(i-1)$ -й период, на котором объект обнаружен не был. Степень угрозы столкновения определяется зависимостью вероятности Q_k от величины скорости сближения ΔV и времени kT , затрачиваемого на измерение. Такую вероятностно-временную характеристику ЛЛ-системы необходимо построить для различных скоростей сближения, т.е. для разных степеней угрозы столкновения. Выражение для величины Q_k имеет вид

$$Q_k = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_k), \quad (5.1)$$

где p_1 – вероятность обнаружения объекта на $(i+1)$ -м периоде, p_2 – на $(i+2)$ -м независимо от обнаружения на $(i+1)$ -м, ..., p_k – вероятность обнаружения на $(i+k)$ -м независимо от обнаружения на $(i+1)$, $(i+2)$, ..., $(i+k-1)$ -м периодах (все вероятности при условии необнаружения объекта на $(i-1)$ -м и обнаружении на i -м периоде).

Из вышеизложенного следует, что необходимо оценить условную вероятность $p_k = P\{A_{i+k} | A_i \cap \bar{A}_{i-1}\}$, где A_{i+k} и A_i – события, заключающиеся в обнаружениях объекта на $(i+k)$ -м и i -м периодах сканирования соответственно, т.е. при $S_{c,i+k} \leq S_{L,i+1}$ и $S_{c,i} \leq S_{L,i}$, а \bar{A}_{i-1} – логическое отрицание обнаружения на $(i-1)$ -м периоде. Оценке такой вероятности снизу соответствует случай, когда на i -м периоде дальности до объекта и до дороги приблизительно равны друг другу, т.е. $S_{c,i} \approx S_{L,i}$, так как при уменьшении дальности до объекта вероятность его обнаружения на $(i+k)$ -м периоде сканирования может только увеличиваться. Поэтому для оценки снизу вероятности измерения скорости можно использовать условную вероятность

$$P\{(S_{c,i+k} < S_{L,i+k}) | (S_{c,i} = S_{L,i}) \cap (S_{c,i-1} > S_{L,i-1})\}. \quad (5.2)$$

Введем следующие обозначения для разностей дальностей до дороги на различных интервалах kT : $X_i = S_{L,i} - S_{L,i-1}$; $X_{i+1} = S_{L,i+1} - S_{L,i}$; $X_{i+2} = S_{L,i+2} - S_{L,i}$; ...; $X_{i+k} = S_{L,i+k} - S_{L,i}$. Тогда, используя выражения для дальностей до впереди едущего ТС или другого объекта при скорости сближения ΔV

$$S_{c,i} = S_{c,i-1} - T\Delta V; \quad S_{c,i+1} = S_{c,i} - T\Delta V; \quad S_{c,i+2} = S_{c,i} - 2T\Delta V; \quad \dots; \quad S_{c,i+k} = S_{c,i} - kT\Delta V,$$

условную вероятность (5.2) представим в виде

$$p_k = P\{(X_{i+k} > -kT\Delta V) | (S_{c,i} = S_{L,i}) \cap (X_i > -T\Delta V)\} \quad \text{при } k \geq 1. \quad (5.3)$$

Далее для уменьшения громоздкости выражений условие $S_{c,i} = S_{L,i}$ будем опускать, всюду предполагая его присутствие.

Разности дальностей X_i и X_{i+k} в общем случае являются зависимыми случайными величинами, т.е. искомая вероятность события $X_{i+k} > -kT\Delta V$ зависит от того, какое значение приобрела случайная величина X_i . Поскольку в (5.3) условием служит выполнение неравенства $X_i > -T\Delta V$ и искомая вероятность p_k – функция значений случайной величины X_i , удовлетворяющих этому неравенству, то выражение (5.3) можно представить в следующем виде:

$$p_k = \int_{-T\Delta V}^{\infty} P\{(X_{i+k} > -kT\Delta V) | (X_i = x)\} f_{X_i}(x) dx, \quad (5.4)$$

где x и $f_{X_i}(x)$ – возможные значения и функция плотности вероятности случайной величины X_i .

Первый сомножитель подынтегрального выражения в (5.4) можно выразить через условную функцию плотности вероятности случайной величины X_{i+k} , соответствующую значению $X_i = x$:

$$P\{(X_{i+k} > -kT\Delta V) | (X_i = x)\} = \int_{-kT\Delta V}^{\infty} f_{X_{i+k}}(y|x) dy, \quad (5.5)$$

где y , $f_{X_{i+k}}(y|x)$ – возможные значения и условная функция плотности вероятности случайной величины X_{i+k} при условии $X_i = x$.

Подставив условную вероятность (5.5) в выражение (5.4), получим искомую вероятность в виде

$$p_k = \int_{-T\Delta V}^{\infty} \left(\int_{-kT\Delta V}^{\infty} f_{X_{i+k}}(y|x) dy \right) f_{X_i}(x) dx. \quad (5.6)$$

Из-за множества причин, порождающих случайность величин X_{i+k} и X_i , их законы распределения вероятности можно считать нормальными. Поэтому выражение (5.6) полностью определяется МО $M[X_{i+k} | X_i = x]$, $M[X_i]$ и дисперсиями $D[X_{i+k} | X_i = x]$, $D[X_i]$ соответствующих случайных величин. Условные МО и дисперсия $m_{i+k,i}(x) = M[X_{i+k} | X_i = x]$, $\sigma_{i+k,i}^2(x) = D[X_{i+k} | X_i = x]$ в случае нулевого безусловного МО случайной величины X_{i+k} и безусловной дисперсии, равной σ^2 , имеют вид

$$\begin{aligned} m_{i+k,i}(x) &= \beta_{i+k,i} x, \\ \sigma_{i+k,i}^2 &= \sigma^2 (1 - \beta_{i+k,i}^2), \end{aligned} \quad (5.7)$$

где $\beta_{i+k,i}$ – коэффициент регрессии случайной величины X_{i+k} на X_i . Таким образом, условное МО зависит от двух факторов: значения x и номеров периодов сканирования, а условная дисперсия – только от второго фактора. Коэффициент регрессии $\beta_{i+k,i}$ при одинаковых безусловных дисперсиях равен коэффициенту корреляции между этими случайными величинами.

Если случайной последовательности $\{X_i\}_{i=1, \overline{N}}$ соответствует ковариационная функция $\text{cov}(X_{i+j}, X_i) = M[(X_{i+j} - m_{i+j,i})X_i]$; $j = \overline{-N, N}$, то ее значения определяют коэффициенты регрессии случайной величины X_{i+j} на X_i по формуле

$$\beta_{i+j,i} = \frac{\text{cov}(X_{i+j}, X_i)}{\sigma^2}. \quad (5.8)$$

При нормальных законах распределения случайных величин X_{i+k} , X_i выражение для искомой вероятности (5.6) с учетом (5.7) и (5.8) примет вид

$$p_k = \frac{1}{2\pi\sigma\sigma_{i+k,i}} \int_{-T\Delta V}^{\infty} \left[\int_{-kT\Delta V}^{\infty} \exp\left(-\frac{(y - m_{i+k,i}(x))^2}{2\sigma_{i+k,i}^2}\right) dy \right] \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx. \quad (5.9)$$

Параметры σ ; $\sigma_{i+k,i}$; $m_{i+k,i}(x)$ определяются ковариационной функцией $\text{cov}(X_{i+j}, X_i)$, значения которой при $j = 0$ равно дисперсии σ^2 , а при $j = k$ позволяет найти другие два параметра, используя формулы (5.7), (5.8). Разность дальностей X_{i+k} можно представить в виде

$$X_{i+k} = \sum_{j=1}^k \Delta X_{i+j}, \quad (5.10)$$

где величина $\Delta X_{i+j} = S_{L,i+j} - S_{L,i+j-1}$, т.е. равна изменению дальности до дороги за время одного периода.

Далее величину ΔX_{i+j} будем называть приращением дальности на $(i+j)$ -м периоде. Из определения ковариации и выражения (5.10) следует, что

$$\text{cov}(X_{i+k}, X_{i+1}) = \sum_{j=1}^k \text{cov}(\Delta X_{i+j}, \Delta X_{i+1}). \quad (5.11)$$

Пользуясь этим, можно получить следующую формулу для условной дисперсии случайной величины X_{i+k} :

$$\sigma_{i+k,i}^2 = k\sigma^2 - \frac{1}{\sigma^2} \text{cov}^2(\Delta X_{i+1}, \Delta X_i) + 2(k-1) \text{cov}(\Delta X_{i+1}, \Delta X_i). \quad (5.12)$$

Условное МО случайной величины X_{i+k} можно выразить через коэффициент регрессии

$$m_{i+k,i}(x) = \sum_{j=1}^k m_{i+j,i}(x) = x \sum_{j=1}^k \beta_{i+j,i}.$$

Учитывая (5.8), (5.10) и (5.11), получим

$$m_{i+k,i}(x) = x\sigma^{-2} \sum_{j=1}^k \text{cov}(\Delta X_{i+j}, \Delta X_i), \quad (5.13)$$

т.е. МО случайной величины X_{i+k} при условии, что случайная величина X_i приняла значение x .

Для использования выражений (5.12), (5.13) при определении значений p_k по формуле (5.9) и вероятности Q_k по формуле (5.1) необходимо методами моделирования найти зависимость ковариации приращений дальностей на i -м и $(i+j)$ -м периодах сканирования $\text{cov}(\Delta X_{i+j}, \Delta X_i)$ от разностей номеров периодов j , т.е. временного интервала jT между приращениями дальностей, которые сформировались к моментам времени iT и $(i+j)T$ относительно $(i-1)T$ и $(i+j-1)T$ соответственно. Все эти моменты времени фиксируются при попадании лазерного луча в плоскость симметрии БТС, а приращения рассчитываются по оценкам дальностей, которые получены по формуле (4.1) с использованием осреднений измерений дальностей до дороги в интервалах азимутальных углов $\psi_1 \pm \delta\psi/2$ и $\psi_2 \pm \delta\psi/2$, соответствующим просветам между едущими ТС.

6. Моделирование работы ЛЛ-системы при движении носителя по тест-дороге. Функциональная блок-схема моделирования системы управления углом наклона лучей для зондирования дороги на заданной дальности S представлена на рис. 1. Изображенные на рис. 1 блоки имеют следующие функции.

1. Оценка требуемого угла наклона нижнего луча $\hat{\alpha}_i$ на i -м периоде сканирования дороги.
2. Фильтрация поправок $\delta\alpha_i$, рассчитываемых для изменения угла наклона лучей на последних девяти периодах с целью определения рассогласования по углу $\widehat{\delta\alpha}_i$.
3. Усиление (ослабление) сигнала рассогласования по углу с коэффициентом K .
4. Интегрирование (суммирование) для формирования угла наклона нижнего луча $\alpha_{L,i}$ при попадании оси ДН в плоскость симметрии БТС.
5. Определение дальностей до дороги по осям ДН нижнего $S_{L,a}(t)$ и верхнего $S_{U,a}(t)$ лучей, а также углов настильности зондирования дороги нижним и верхним лучами $\alpha_L(t)$ и $\alpha_U(t)$, в дискретные моменты времени t при формировании строки на дороге на i -м периоде сканирования. Такая задача решается на языке MAX Script в среде трехмерного моделирования Autodesk 3D S MAX с использованием ее "глобальной" системы координат, в которой строится поверхность тест-дороги с продольным профилем $y_r = y_r(x_r)$; рассчитываются текущие углы ориентации

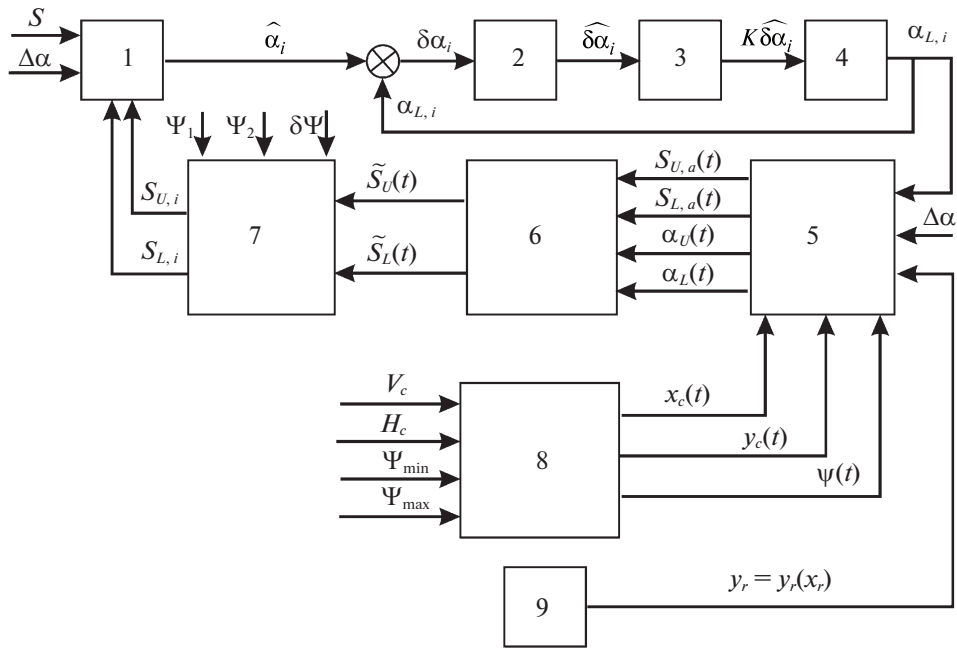


Рис. 1. Функциональная блок-схема моделирования

лазерных лучей при сканировании дороги на i -м периоде; решается задача встречи лучей с поверхностью дороги, в результате чего определяются две последовательности координат точек зондирования дороги (для верхнего и для нижнего лучей); по этим координатам и значениям $x_c(t)$ и $y_c(t)$ определяются последовательности текущих значений дальностей $S_{L,a}(t)$, $S_{U,a}(t)$ и оцениваются углы настильности, которые необходимы для формирования результатов измерения дальностей.

6. Формирование результатов измерений дальностей до дороги $\tilde{S}_L(t)$ и $\tilde{S}_U(t)$ с реальными ошибками в дискретные моменты времени t на i -м периоде сканирования с использованием экспериментальных регистраций ошибок дальнометрирования.

7. Расчет дальностей до дороги $S_{L,i}$, $S_{U,i}$ в продольной плоскости симметрии БТС на i -м периоде сканирования по результатам обработки измерений $\tilde{S}_L(t)$ и $\tilde{S}_U(t)$ в назначенных азимутальных секторах $\psi_1 \pm \delta\psi/2$ и $\psi_2 \pm \delta\psi/2$.

8. Определение в среде Autodesk 3D S MAX для дискретных моментов времени t координат ЛЛ-системы $x_c(t)$, $y_c(t)$ и азимутального отклонения сканирующего луча $\psi(t)$ от продольной плоскости симметрии БТС в пределах сектора сканирования (ψ_{\min} , ψ_{\max}) по данным о скорости БТС V_c и высоте расположения ЛЛ-системы H_c .

9. Задание продольного профиля дороги, т.е. зависимости ее высоты от горизонтальной координаты x_r в “глобальной” системе координат.

В результате моделирования процессов движения БТС по всей тест-дороге и управляемого сканирования дороги двулучевой ЛЛ-системой были получены следующие результаты.

1. Определена зависимость максимальных модулей приращений дальностей перед БТС от величины азимутальных секторов $\delta\psi$, в которых проводятся осреднения измерений дальностей, при случайных (с равномерным законом распределения) ориентациях этих секторов ψ_1 и ψ_2 (предположительно соответствующих просветам между едущими ТС). Зависимость имеет экспоненциальный характер с асимптотой 0.5 м, к которой приближается максимальный модуль приращений дальностей при увеличении величины $\delta\psi$. Значению $\delta\psi = 4^\circ$ соответствуют максимальные приращения дальностей 0.6 м, т.е. близкие к минимально возможному 0.5 м. Такой результат был получен при коэффициенте усиления $K = 0.4$ в контуре управления наклоном ДН нижнего луча. Поэтому в дальнейшем моделировании использовались значения $\delta\psi = 4^\circ$, $K = 0.4$.

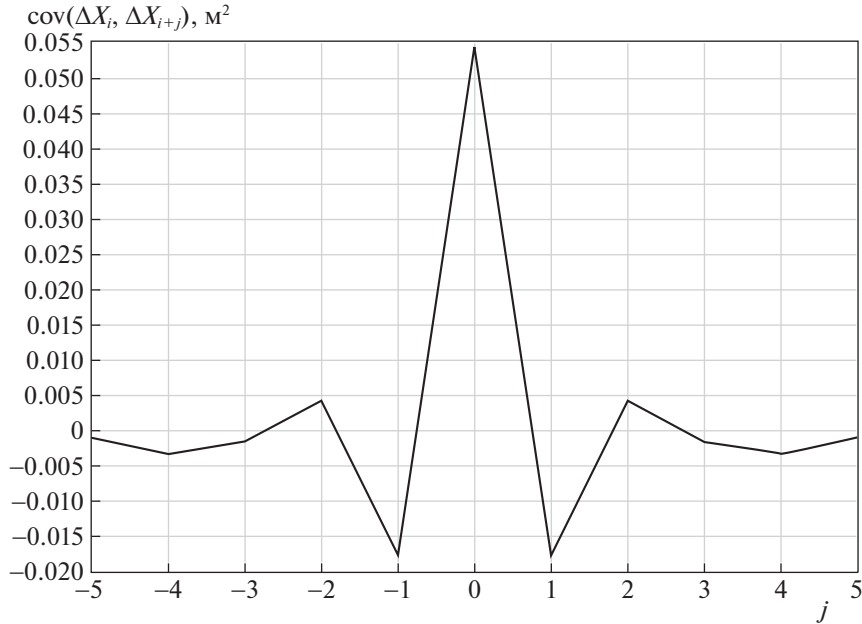


Рис. 2. Ковариационная функция приращения дальностей

II. При неслучайном выборе ориентации секторов Ψ_1, Ψ_2 и варьировании модуля разности $\Delta\Psi = |\Psi_2 - \Psi_1|$ в диапазоне от 5 до 23° оценки СКО приращений дальностей от МО этих приращений не выходят из диапазона 0.2–0.25 м при движении БТС со скоростью менее 80 км/ч по различным участкам тест-дороги, в том числе при быстрых переходах с подъема на спуск. Следовательно, разработанные алгоритмы обработки информации и управления можно считать робастными по основному показателю стабильности интервалов между соседними траекториями движения лазерного пятна по дороге. Такая стабильность позволяет за кратчайшее время после обнаружения впереди едущего ТС определять скорость сближения с ним независимо от продольного профиля дороги. При этом отклонения от заданной дальности зондирования дороги нижним лучом имеют плавный характер изменений и не выходят за пределы ± 1.5 м.

III. При моделировании процессов управляемого сканирования исследовались вероятностно-временные характеристики возможности измерения скорости сближения с впереди едущим ТС в соответствии с методикой, изложенной в разд. 5. В связи с этим была проведена статистическая обработка приращений дальностей $\{\Delta X_i\}_{i=1, N}$ зондирования дороги в процессе движения БТС и получена зависимость ковариации $\text{cov}(X_{i+j}, X_i)$ от числа периодов j , соответствующего времени jT , прошедшего между двумя парами соседних периодов сканирования, на которых фиксировались разности дальностей (по линиям зондирования) ΔX_i и ΔX_{i+j} . Такая ковариационная функция приращений дальностей, представленная на рис. 2, свидетельствует о корреляционной связи случайных приращений дальности для лазерного пятна на различных парах соседних периодов. Из графика на рис. 2 следует, что учитывать необходимо только статистическую зависимость соседних случайных приращений, т.е. при $|j| = 1$. На интервалах времени больше T случайные приращения дальностей статистически независимы, так как при $|j| \geq 2$ ковариация $\text{cov}(\Delta X_{i+j}, \Delta X_{i+1}) \approx 0$. Значение ковариационной функции при $j = 0$, соответствующее дисперсии случайных приращений ΔX_i дальностей на соседних периодах сканирования, равно $\sigma^2 = 0.054 \text{ м}^2$. Ковариация таких приращений на интервале времени между ними, равном T (т.е. при $j = 1$), имеет значение $\text{cov}(\Delta X_i, \Delta X_{i+1}) = -0.018 \text{ м}^2$. Следовательно, коэффициент регрессии случайной величины X_{i+1} на X_i равен

$$\beta_{i+1,i} = \frac{\text{cov}(X_{i+1}, X_i)}{\sigma^2} = -0.333.$$

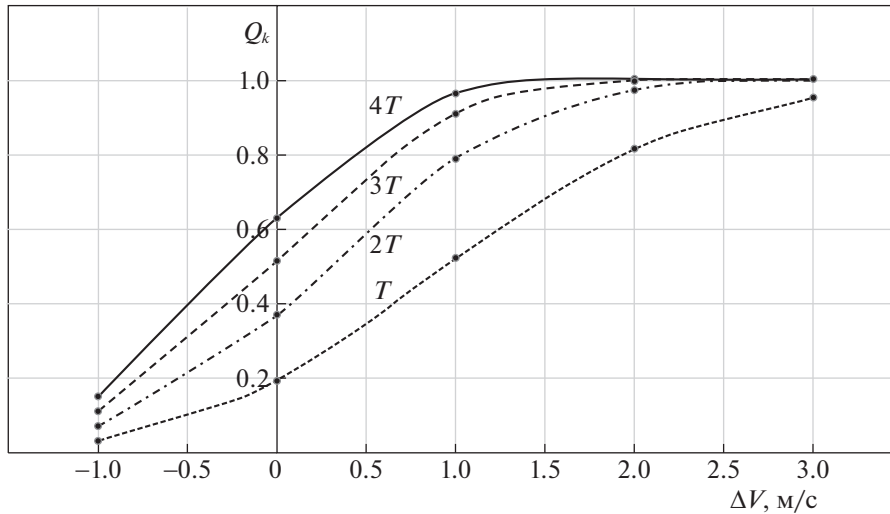


Рис. 3. Гарантированные вероятности измерения скорости сближения за время $T, 2T, 3T, 4T$ после обнаружения объекта

Тогда по формуле (5.12) условная дисперсия случайной величины X_{i+k} соответствует выражению $\sigma_{i+k,i}^2 = 0.018k + 0.03 \text{ м}^2$, а по формуле (5.13) условное МО

$$m_{i+k,i}(x) = x\sigma^{-2} \text{cov}(\Delta X_{i+1}, \Delta X_i) = -0.333x.$$

IV. Используя полученные результаты статистического моделирования, можно по формуле (5.9) найти условную вероятность p_k обнаружения впереди едущего объекта на $(i+k)$ -м периоде сканирования после первого обнаружения на i -м независимо от обнаружений или необнаружений на $(i+1), (i+2), \dots, (i+k-1)$ -м периодах. Под “первым” понимается обнаружение на i -м после необнаружения на $(i-1)$ -м периоде. Получив зависимость p_k от значений k , можно по формуле (5.1) определить гарантированную вероятность Q_k проведения измерения скорости сближений за время kT после обнаружения объекта. Графики зависимостей вероятности Q_k от скорости сближения ΔV для временных интервалов $T, 2T, 3T, 4T$ представлены на рис. 3. Соответствующие точные значения вероятностей измерений скорости приведены в таблице. Точности оценок скорости сближения для тех же временных интервалов приведены в разд. 5. Из таблицы и графиков следует, что, например, относительно небольшая скорость сближения $\Delta V = 1 \text{ м/с}$ будет измерена с вероятностями не хуже 0.91 и 0.96 за время $3T = 0.45 \text{ с}$ и $4T = 0.6 \text{ с}$ соответственно, а измерение скорости $\Delta V = 2 \text{ м/с}$ произойдет с вероятностью 0.995 за время 0.45 с после обнаружения объекта. Самые опасные скорости сближения (больше 3 м/с), требующие экстренного торможения, измеряются с вероятностями, близкими к единице, за время 0.15 с. Это свидетельствует о достаточно высокой эффективности системы управляемого сканирования при выбранном периоде обновления информации $T = 0.15 \text{ с}$.

Таблица 1

$\Delta V, \text{ м/с}$	T	$2T$	$3T$	$4T$
-1	0.032082	0.071146	0.111914	0.152618
0	0.193734	0.370132	0.514055	0.627581
1	0.521379	0.787383	0.908055	0.96078
2	0.813509	0.969963	0.995381	0.999305
3	0.951453	0.99815	0.999934	0.999998

Заключение. Управляемое ЛЛ-сканирование дорожного покрытия перед БТС позволяет свести к минимуму число используемых лазеров и каналов дальнометрирования. Предложенный технический облик системы с адаптивным управлением ориентацией двух лазерных лучей не сложен в реализации и обеспечивает своевременное обнаружение объектов на проезжей части дороги с измерением опасных скоростей сближения за время 0.15–0.45 с с вероятностью, близкой к единице. При движении в потоке управляемое сканирование с вероятностью 0.995 позволяет за время меньше 0.5 с принимать решения о притормаживании и формировании других сигналов для адаптивного автоматического управления скоростью. Такими вероятностно-временными характеристиками ЛЛ-система обладает при движении БТС по дорогам с быстро изменяющимися уклонами в пределах значительно больше допустимых. При этом сопровождение дорожного покрытия на заданной дальности обеспечивается в условиях загороживания 80% поля обзора другими ТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Себряков Г.Г., Обросов К.В., Ким В.Я., Лисицын В.М. Сравнительный анализ тепловидения и лазерной локации при обеспечении безопасности маловысотного полета вертолетов в ограниченно-сложных погодных условиях // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 12. С. 12–22.
2. Мужичек С.М., Обросов К.В., Лисицын В.М. Автономная навигация беспилотных транспортных средств на основе лазерно-локационного сканирования и семантического описания 3D-сцены // 31-я Всероссийск. научно-практическая конф. “Передача, обработка, отображение информации”. Сборник научных трудов. Краснодар: Экспертно-аналитический центр Минобрнауки России, 2020. С. 217–221.
3. Lisitsyn V.M., Obrosov K.V. Concept of Building an Electro-Optical System of Semi-Automatic Car Driving on Highways // International Archives of ISPRS. 1998. V. XXXII. Pt B5. P. 757–762.
4. Lisitsyn V.M., Tikhonova S.V. 3D-object Detection Method Based on the Stereo Image Transformation to the Common Observation Point // International Archives of ISPRS. 2000. V. XXXIII. Pt B-3/1. P. 534–539.
5. T.B. Lee. How 10 Leading Companies are Trying to Make Powerful, Low-cost Lidar // <https://arstechnica.com/cars/2019/02/the-ars-technica-guide-to-the-lidar-industry/>
6. Мужичек С.М., Обросов К.В., Ким В.Я. и др. Пат. 2706912 Российская Федерация, МПК G01C 23/00 C2. Способ адаптивного сканирования подстилающей поверхности лучом лазерного локатора в режиме информационного обеспечения маловысотного полета / Патентообладатель ФГУП ГосНИИАС. Оpubл. 21.11.2019 Бюл. № 33.
7. Ким В.Я., Лисицын В.М., Мужичек С.М., Обросов К.В. Активно-пассивная система безопасного пилотирования на предельно малых высотах // Изв. РАН. ГиСУ. 2018. № 2. С. 69–84.
8. Себряков Г.Г., Обросов К.В., Ким В.Я., Лисицын В.М. Лазерно-локационная система автоматического управления полетом на предельно малых высотах // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2019. № 3 (177). С. 11–19.
9. Мужичек С.М., Обросов К.В., Ким В.Я. и др. Дальность действия лазерного локатора в режиме информационного обеспечения маловысотного полета // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 2. С. 3–10.
10. Себряков Г.Г., Обросов К.В., Ким В.Я., Лисицын В.М. Лазерно-локационное позиционирование летательного аппарата относительно взлетно-посадочной полосы при посадке // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2019. № 10 (184). С. 44–51.
11. Строительные нормы и правила. 2.05.02-85. Автомобильные дороги. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП. 2004.
12. Обросов К.В., Лисицын В.М. Точность лазерно-локационного дальнометрирования при настильном зондировании поверхности объектов // Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропотекающих процессах: сб. докл. XXVIII Всероссийск. науч.-техн. конф. школы-семинара (Сочи, октябрь 2017 г.). М.: ООО “Издательский дом Академии им. Н.Е. Жуковского”, 2017. С. 411–415.