

УДК 681.786.23

Способ измерения 3D размеров крупногабаритного движущегося объекта без механического сканирования

Рю Чжэел, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

Научный руководитель: Бокшанский В.Б., к.т.н., доцент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[*vassily@bmstu.ru*](mailto:vassily@bmstu.ru)

Из года в год в России постоянно увеличивается количество автомобилей. Одной из мер разгрузки дорог, а также поддержания их на удовлетворительном уровне качества является строительство платных автомобильных дорог (ПАД), а также платных парковок. Очевидно, что величина платежа должна зависеть от типа и класса автомобиля. Так, чаще всего класс автомобиля определяют по его весу с помощью датчика давления, которые устанавливаются под дорожное полотно ПАД. Такой подход влечет за собой такие проблемы, как трудность монтажа и дороговизна технического обслуживания. Например, если по какой-то причине датчик перестал работать правильно, происходит закрытие дороги, а следственно и прекращение движения, для проведения процедуры проверки датчиков. В связи с этим, представляет интерес опыт зарубежных стран по альтернативным способам оценки веса/габаритов автомобилей. С недавних пор в Республике Корея, в системе ПАД, определяющей класс автомобиля и сумму платежа, появилась тенденция замены системы определения типа автомобиля по весу лазерной системой, оценивающей габариты автомобиля, отличающейся дешевизной, компактностью и быстротой работы.

Настоящая работа посвящена разработке концепции построения малогабаритного датчика для оценки габаритов движущихся транспортных средств и его скорости, в основе которой лежит бесконтактный способ зондирования транспортных средств. При этом, отличительной особенностью разрабатываемого прибора от существующих аналогов является полное отсутствие механического сканера лазерного пучка.

1. Концептуальная модель измерения размеров автомобиля

В качестве модели автомобиля принимается прямоугольный параллелепипед. Соответственно, его основные параметры - это длина, ширина и высота. Пусть данный параллелепипед движется со скоростью v .

Предполагается, что прибор, определяющий размеры автомобиля, находится на расстоянии 1 м от дорожного полотна, а оптическая ось прибора располагается относительно плоскости дороги так, как показано на рис. 1.

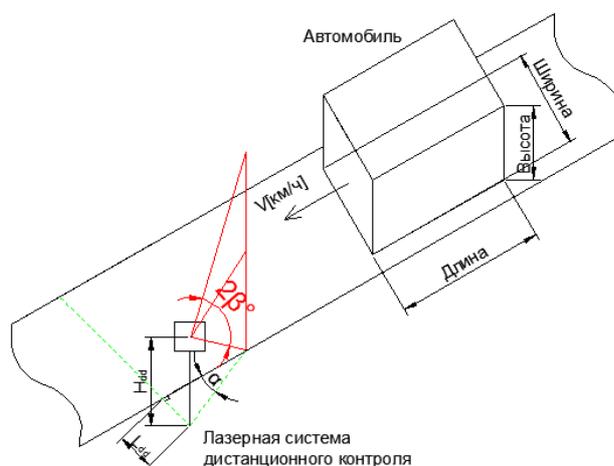


Рис. 1. Упрощённая модель автомобиля при распознавании

Такое расположение позволяет произвести измерение двух проекций параллелепипеда: ширину и длину автомобиля. Как было сказано ранее, высота измеряется с помощью вертикальной развертки посредством ДОЭ.

На рис. 2 показана схема, поясняющая принцип работы ЛСДК при измерении высоты автомобиля. Также на рис. 3 и рис. 4 представлены концептуальные оптические схемы приемного и передающего каналов. Малогабаритный полупроводниковый лазер генерирует излучение с длиной волны 1.55 мкм , которая безопасна для глаз человека. Через коллиматор плоскопараллельный пучок проходит через ДОЭ, который представляет собой матрицу из 30 фокусаторов (см. рис. 3). Лазерные пучки фокусируются в фокальной плоскости ДОЭ, совпадающего с фокальной плоскостью объектива, формирующего параллельный пучок лучей.

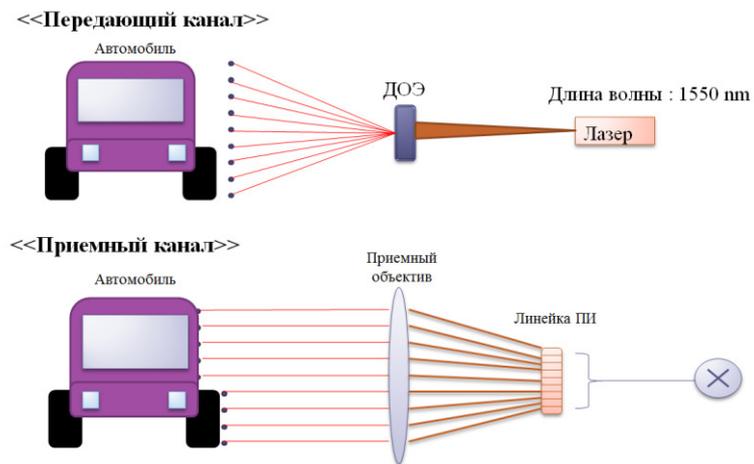


Рис. 2. Пояснение принципа работы ЛСДК при измерении высоты автомобиля

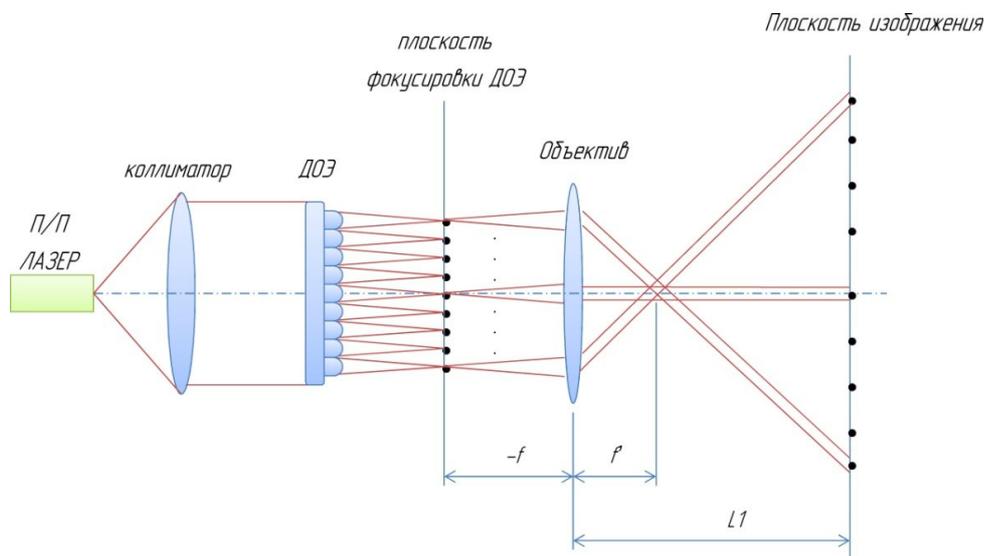


Рис. 3. Функциональная схема передающего канала ЛСДК

После отражения от зондируемого объекта лазерные пучки через объектив попадают на линейку приемников (см. рис. 4).

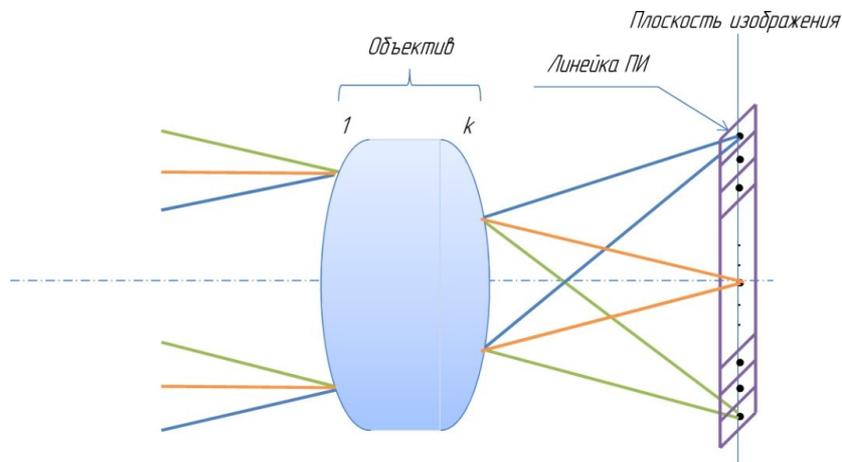


Рис. 4. Функциональная схема приемного канала

В данном случае ДОЭ представляет собой матрицу из 30 фокусаторов.

В литературе [4] представлено выражение для расчёта фокусатора плоского волнового фронта в поперечный отрезок. Данная формула описывает фазовую функцию одного фокусатора:

$$\varphi(u, v) = -k \frac{\left(1 - \frac{d}{a}\right) \cdot u^2 + v^2}{2f},$$

где $2a$ -размер стороны апертуры фокусатора; k - волновое число; u, v – координаты на плоскости ДОЭ; d - размер отрезка, f -фокусное расстояние.

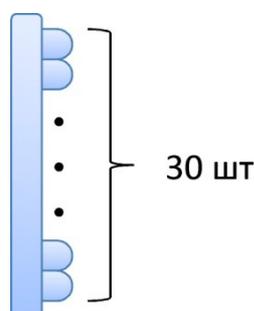


Рис. 5. Модель ДОЭ

На рис. 5 представлена функциональная схема модели ДОЭ.

Результаты численного расчета распределения интенсивности от фокусатора с параметрами $f=50$ мм, $\lambda=1,55$ мкм, $d=0.1$ мм, $a=1$ мм показаны ниже.

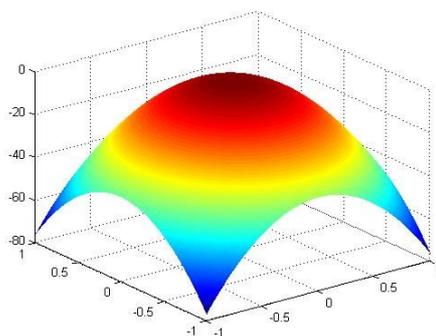


Рис. 6. График фазовой функции фазометра ДОЭ

Далее рассмотрим процесс измерения двух габаритных размеров объекта: ширины и длины.

На рис. 7 изображён ход лучей дальнометра и движущийся со скоростью v к полю зрения прибора автомобиль. Обозначим через t_1 время, когда автомобиль пересечёт пучок

подсветки прибора. Сразу после этой временной отметки этот пучок будет двигаться по фронтальной части автомобиля, после чего дойдёт до точки Б противоположной вершины. Этот момент обозначим как t_2 . Затем пучок начнет движение по боковой части автомобиля и дойдет до конца автомобиля, точки В. Этот момент обозначим как t_3 . Очевидно, что основной задачей анализа является определение моментов времени t_1, t_2, t_3 , а также скорости v .

Рассмотрим алгоритмы, которые позволят нам определить параметры автомобиля.

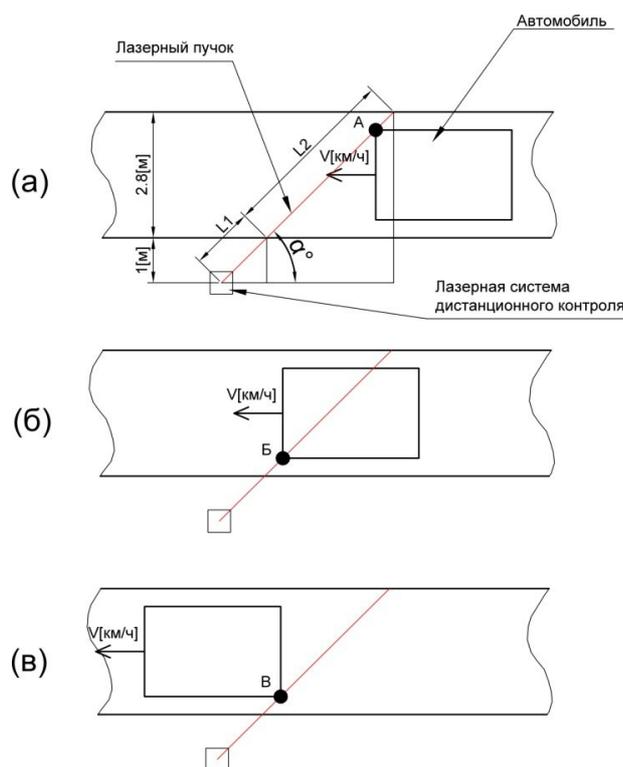


Рис. 7. Схема расположения автомобиля по времени: $t=t_1$ (а), $t= t_2$ (б) , $t= t_3$ (в)

В качестве измерителя дальности выбран лазерный фазовый дальномер (ЛФД), т.к. измеряемая дальность небольшая, а погрешность измерения должна быть ниже 10см.

Из геометрических соображений принята максимальная дальность $l_{max} = 15$ м, требуемая точность измерения $\Delta l = 50$ мм.

Частота модуляции для «грубого» измерения (условия устранения неоднозначности) может быть рассчитана по формуле [1]:

$$f_1 \leq \frac{c \cdot \varphi}{4\pi \cdot l_{max}} = 5 \text{ МГц}$$

Частота модуляции для уточненного измерения:

(примем погрешность измерения фазометра $\Delta\varphi = 0.5^\circ$)

$$f_2 \geq \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi \cdot \Delta l} = 4.17 \text{ МГц}$$

Отсюда следует, что частота в диапазоне [4,17, 5] МГц обеспечит оба требования: максимальная дальность L_{\max} и точность измерения Δl .

$$4,17 \text{ МГц} \leq f_1 = f_2 \leq 5 \text{ МГц}$$

По инженерному соображению принимаем частоту сигнала $f_c = 5 \text{ МГц}$.

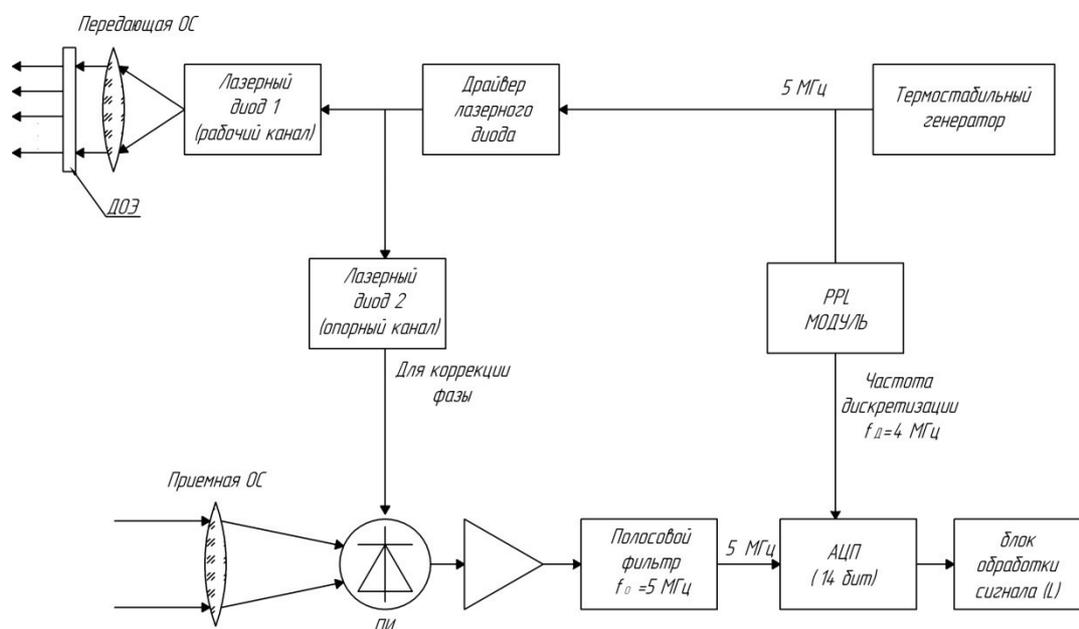


Рис. 8. функциональная схема двухлазерного фазового дальномера в ЛСДК

На рис. 8 представлена функциональная схема двухлазерного фазового дальномера. Как предложено в [2] методом фазовой коррекции является метод, основанный на использовании двух лазерных излучателей. Первый лазерный диод используется для измерения дальности, а второй диод – для компенсации фазового сдвига, возникающего в электронном тракте прибора. Лазерный пучок из первого лазерного диода проходит через ДОЭ и расщепляется на 30 пучков.

После отражения от зондируемого объекта лазерные пучки через приемный объектив попадают на линейку приемников. А пучок света от второго лазерного диода воспринимается линейкой приемников непосредственно, без отражения от объекта. Поскольку расстояние от второго лазерного диода до линейки приемников заранее известно, вычитание фазовых сдвигов при работе с первым и вторым лазерами позволит получить фазовый сдвиг, зависящий исключительно от двойного расстояния до объекта.

В схеме дальномера используется один генератор, сигналы из которого преобразуются в сигналы с разной частотой с помощью PLL-модуля для преобразования в частоту дискретизации $f_D = 4 \text{ МГц}$, которая получена по следующему отношению[2]:

$$f_D = \frac{4 \cdot f_c}{4q + 1}$$

где p – целое число. При таком выборе опорный сигнал принимает только три значения: $-1, 0, 1$, что позволяет упростить вычисления при реализации квадратурного синхронного детектора в электронном блоке. В нашем случае p соответствует 1.

При таком выборе частоты дискретизации происходит эффект переноса частоты сигнала в низкочастотную область (undersampling), который позволяет получить сигнал с низкой частотой с сохранением фазы, используя эффект размножения спектров при дискретизации. В результате, дискретизированный сигнал будет иметь частоту разности частот сигналов $f_c - f_D = 5 - 4 = 1 \text{ МГц}$. (см. рис. 9)

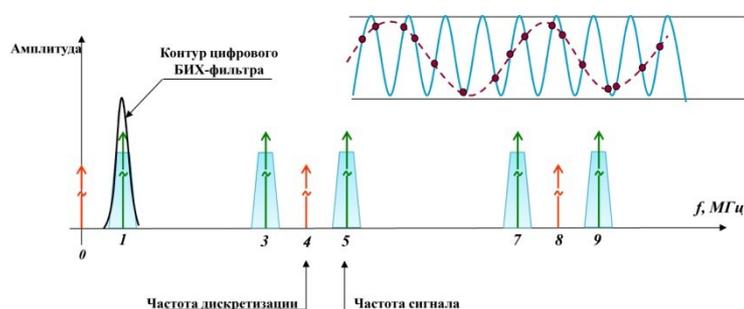


Рис. 9. Схема процесса снижения частоты (undersampling)

Далее вычисление фазы осуществляется с помощью квадратурного синхронного фазометра, реализованного полностью в цифровом виде, который подробно описан [1].

2. *Расчет определения размеров автомобиля*

На рис. 10 представлена функциональная схема ЛСДК. Линейка приемников, состоящая из 30 лавинных фотодиодов, принимает информацию о дальностях вертикального профиля $L_1 \dots L_{30}$. Эти сигналы приходят в соответствующий блок обработки, в котором определяются моменты времени t_1, t_2 и t_3 . Далее, по этим значениям блок определения габарита автомобиля вычисляет размеры автомобиля, после чего происходит классификация типа транспортного средства.

На рис. 11 представлен график зависимости дальности до автомобиля в зависимости от времени в случае отсутствия шума и неровностей на поверхности автомобиля.

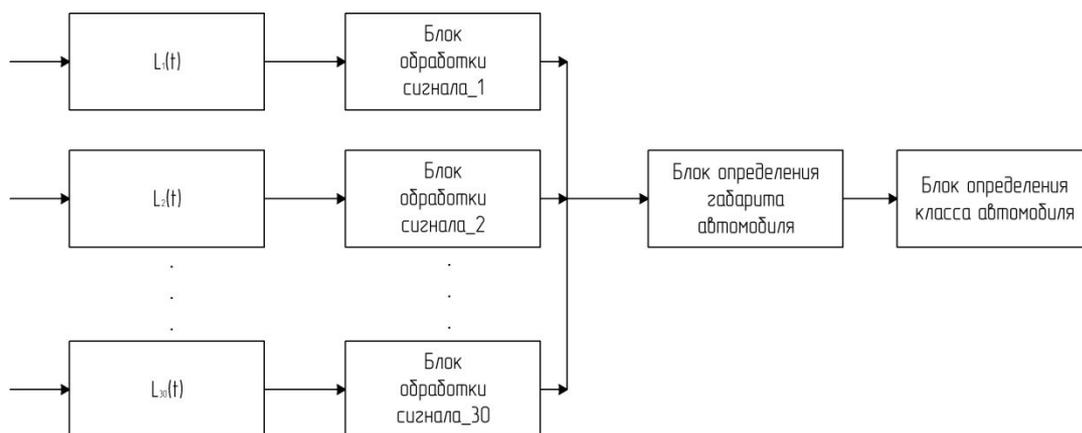


Рис. 10. Функциональная схема лазерной системой дистанционного контроля (ЛСДК) габаритов движущихся транспортных средств



Рис. 11. график дальности в зависимости от времени

Скорость автомобиля рассчитывается отношением разности дальности в моментах времени t_2 и t_1 к промежутку времени t_1 и t_2 с учетом угла α :

$$V = \frac{\Delta L \cdot \cos(\alpha)}{\Delta t_1}$$

,где $\Delta t_1 = t_2 - t_1$, $\Delta L = |L(t_2) - L(t_1)|$

Ширина автомобиля определяется отношением выше рассчитанной скорости к промежутку времени Δt_1 :

$$A1 = \frac{V}{\Delta t_1}$$

Длина автомобиля определяется произведение скорости автомобиля и промежутка времени $\Delta t_2 = t_3 - t_2$:

$$A2 = V \cdot \Delta t_2$$

Дальномер, интегрированный в прибор, измеряет дальность до автомобиля с частотой $f = 100$ Гц. Если будут определены три значения времени t_1, t_2, t_3 , то далее не представит труда определить ширину, длину и скорость автомобиля по следующим простым формулам. Однако в реальных условиях данные, полученные дальномером, не будут представлены в форме прямых линий подобно модели с идеальным параллелепипедом. Сигнал будет искажён в виде присутствия шумов, а также вследствие того, что реальная форма автомобиля значительно отличается от параллелепипеда.

3. Процедуры обработки сигнала (моделирование процесса обработки сигнала)

В данном разделе будут рассмотрены методы борьбы с шумами в реальных показаниях дальномера.

Рассмотрим зашумленный сигнал, т.е. идеальный сигнал + аддитивный шум.

В качестве шума в модели использован белый шум. В этом случае среднеквадратичное значение (СКЗ) суммарного шума определяется с помощью выражения:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{авт}^2 + \sigma_{дал}^2}$$

где $\sigma_{авт}$ – СКЗ шума, обусловленного неровностями формы автомобиля, $\sigma_{дал}$ – СКЗ шума, обусловленного погрешностью измерения дальности дальномером.

СКЗ неровностей шума формы автомобиля примем равным 200 мм, поскольку в обычном случае у автомобиля не бывает неровностей больших, чем 200мм. СКЗ погрешности дальномера примем равным 50 мм, т.к. такая погрешность заложена в конструктивных параметрах ЛФД. Принимая выше сказанные допущения, суммарная СКЗ будет равна: $\sigma_{\Sigma} = 206,16$ мм.

Для моделирования необходимо задать отношение сигнал/шум:

$$c/u = \frac{L_{max} - L_{min}}{\sigma_{\Sigma}}$$

, где L_{max} - максимальное значение дальности, L_{min} - минимальное значение дальности. Как видно на рис. 12, $L_{max} - L_{min}$ равна 7 м при моделировании с шириной параллелепипеда $A1=2$ м и длиной $A2=4$ м (см. рис. 12). Для этого случая отношение сигнал/шум будет равно $c/u=33,98$.

При моделировании отношение сигнал/шум было принято $c/w=25$ с целью определения габаритов в худшем случае.

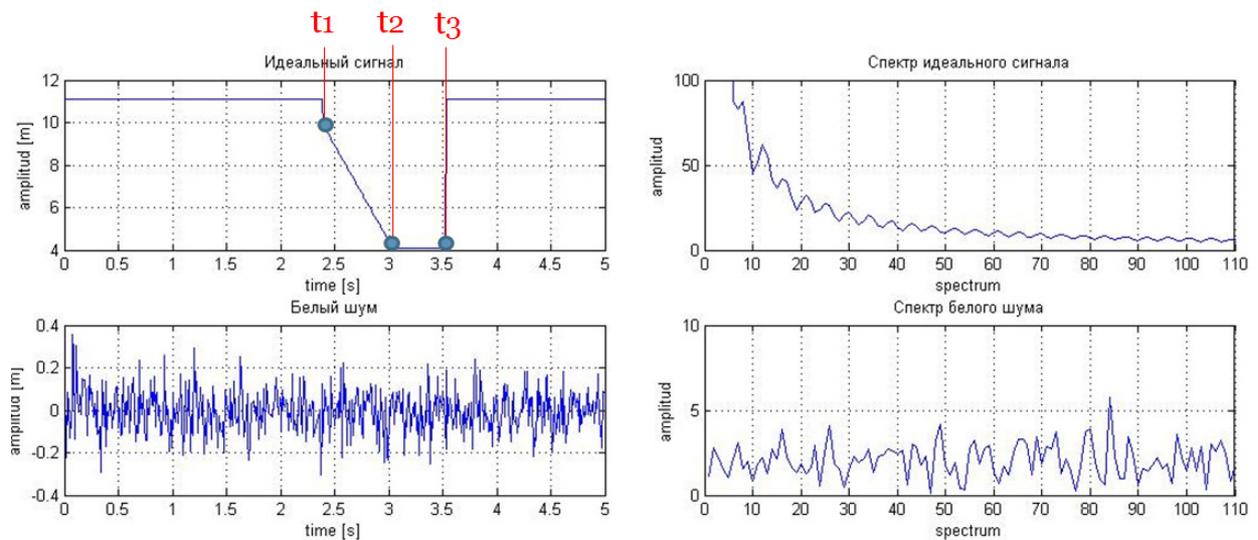


Рис. 12. Графики идеальной дальности и шума в зависимости от времени, и их спектры



Рис. 13. Схема алгоритма обработки сигнала при проведении моделирования

На рис. 13 представлен алгоритм обработки сигнала при проведении моделирования в среде MathLaB. Низкочастотный полосовой фильтр применяется для подавления шума, так как спектр шума сосредоточен в высокочастотной области спектра.(см. рис. 14). На рис. 14 видно, что дальность отфильтрованного сигнала менее зашумлена, однако имеет выброс (скачок) при резкоизменяющейся дальности в моментах перехода от t_1 в t_2 и от t_2 в t_3 . (далее алгоритмическим способом обойдем этот недостаток).

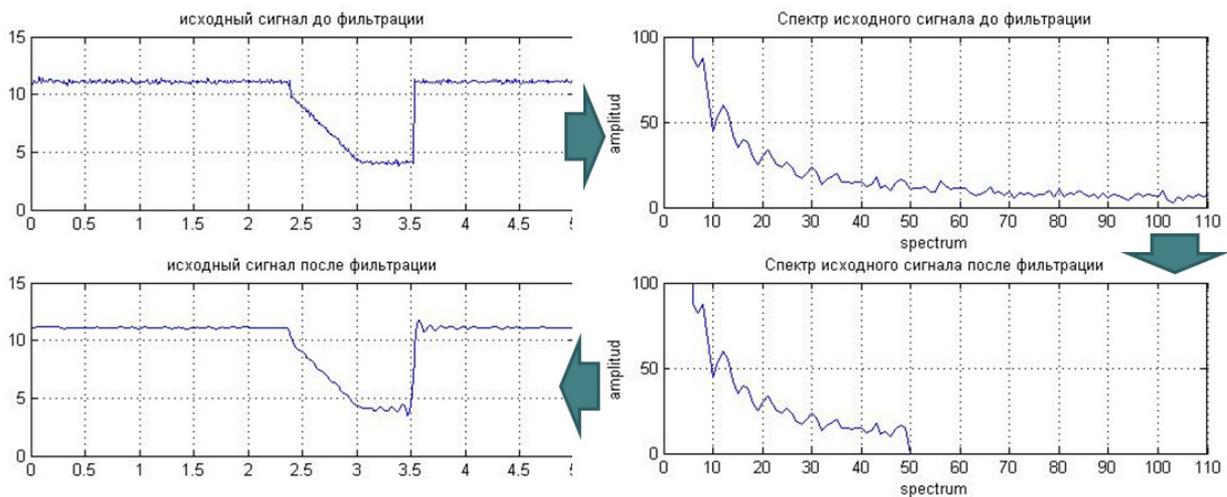


Рис. 14. Графики зашумленного и отфильтрованного сигнала, а также его спектры

Далее дифференцируем сигнал для нахождения моментов времени t_1 и t_3 , t_3 , когда происходит резкое изменение дальности. (см. рис. 15) Поскольку момент времени t_2 выделить надежно сложно, особенно в условиях наличия шумов, требуется поиск альтернативного способа.

Суть альтернативного метода состоит в следующем: находим среднее значение дальности \bar{L} в промежутке времени $(t_3 - 30/f, t_3)$ для компенсации резкоизменяющегося скачка, после чего производим поиск времени, когда дальность станет меньше \bar{L} . Данный момент и будет соответствовать времени t_2 .

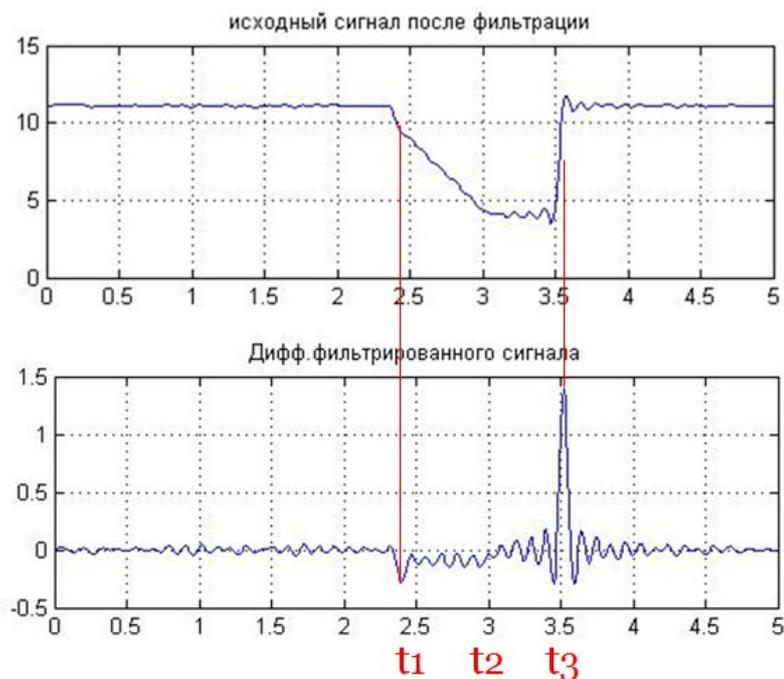


Рис. 15. Графики отфильтрованного сигнала и его дифференциальной функции

Автором была разработана специальная программа для моделирования процесса обработки сигнала в ЛСДК, рабочее окно которой представлено на рис. 16.

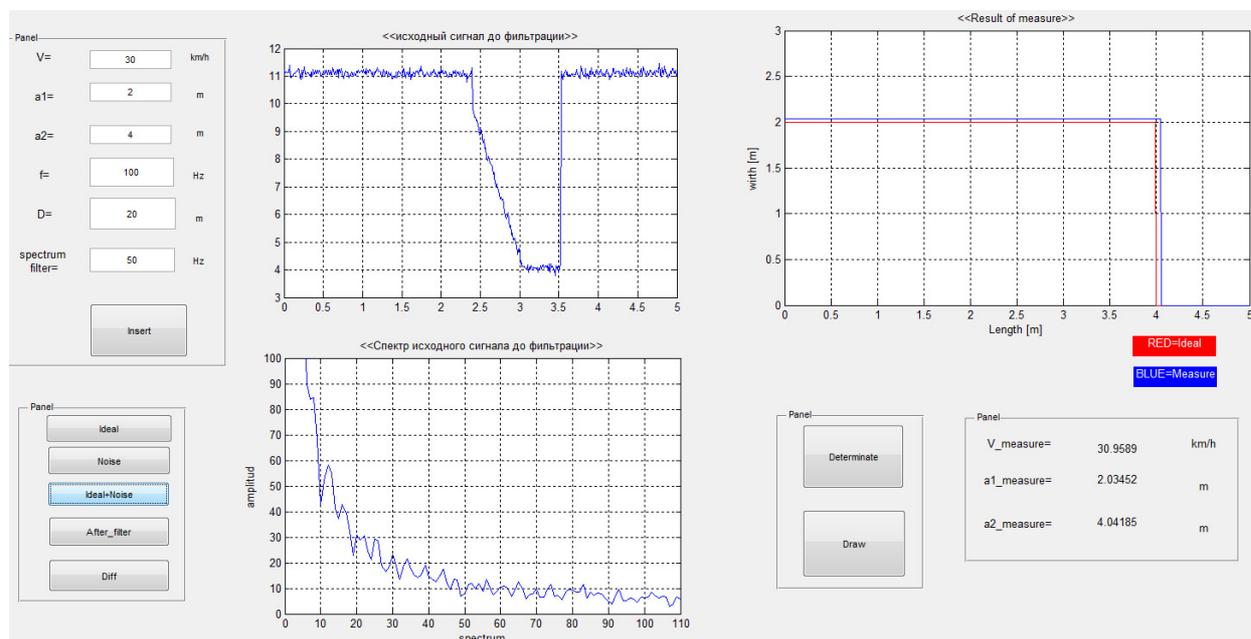


Рис. 16. Рабочее окно разработанной программы в среде MatLab

В левой рамке экрана программы вводятся параметры (скорость, длина, ширина, частота измерения дальности, начальное положение автомобиля относительно ЛСДК, спектр среза при фильтрации) измеряемой модели автомобиля. Ниже этой рамки находятся кнопки для обработки сигнала по предложенному алгоритму (см. рис. 13). В центре приведены график зависимости дальности от времени, а ниже его Фурье образ. В правой части экрана показаны заданные размеры (ширина и длина) модели красным цветом и его измеренные - синим цветом. В правом нижнем углу выведены численные результаты измеренных размеров автомобиля.

Заключение

В данной работе представлены результаты разработки и моделирования перспективного прибора контроля габаритов транспортных средств. В результате моделирования была показана принципиальная возможность создания прибора контроля габаритов автомобилей в движении на скорости до 40 км/час, определяющего скорость движения, а также высоту, длину и ширину транспортного средства и производящего автоматическую классификацию типа.

Было проведено компьютерное моделирование процесса обработки сигнала с помощью специально разработанной программы. При этом исходными параметрами

симуляции модели были: скорость 30 км/ч, ширина 2м, длина 4м. После обработки симулированного сигнала программа определила, что автомобиль едет со скоростью 30,959 км/ч, ширина 2,035, длина 4,042м. Таким образом, погрешность измерения скорости составляет 3.2% , ширины 1,8%, длины 1,1%. Данный результат удовлетворяет требованиям с точки зрения задачи определения класса автомобиля.

Список литературы

1. Лазерные методы и приборы измерения дальности / В.Б. Бокшанский, Д. Бондаренко, М.В. Вязовых, И.В. Животовский, А.А. Сахаров, В.П. Семенов под ред. Карасика В.Е., М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012. 96 с.
2. Рю Чжэел Методы повышения точности измерения в лазерном фазовом дальномере // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 9. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/608496.html> (дата обращения: 26.02.2014).
3. S. Poujouly, B. Journet A twofold modulation frequency laser range finder // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2002. № 4. С. 356-363.
4. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, П.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер, В.С. Соловьев, Г.В. Успенев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина. М.: Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2003. 688с.