

Измерение скорости метропоезда бортовыми оптическими датчиками



Евгений СТАРОВОЙТОВ
Evgeny I. STAROVOITOV

Сергей ВОРОБЬЕВ
Sergey A. VOROBIEV



Старовойтов Евгений Игоревич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва», Московская обл., Россия.

Воробьев Сергей Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ООО «НПП «Свет», Москва, Россия.

Measuring Metro Train's Speed by On-Board Optical Sensors

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 88)

Исследованы оптические методы измерения скорости поездов в метрополитене с помощью бортовых датчиков, в том числе в ситуации сближения состава с другим объектом. При решении этих задач использован опыт разработки оптико-электронной аппаратуры для перспективных космических аппаратов. Показано, что наименьшая погрешность измерений обеспечивается с учетом эффекта геометрических искажений изображения, формируемого КМОП-фотоприемником. Применяемые датчики способны выполнять роль резервных средств в системе управления автоматикой поезда, тем самым повышая надежность и безопасность пассажирских перевозок.

Ключевые слова: метрополитен, поезд, скорость, измерение, оптический датчик, КМОП.

Для обеспечения безопасности движения в метрополитене используется быстродействующая система автоматического регулирования скорости АЛС-АРС частотного типа, в которой кодовые сигналы допустимых скоростей передаются на электроподвижной состав по рельсовой линии с частотой 75–325 Гц [1].

Измерение скорости на борту поезда выполняется одометрически, при помощи электромеханических колесных датчиков. Их недостаток заключается в большой погрешности измерений (5 км/ч или 1,39 м/с), обусловленной проскальзыванием и пробуксовыванием колес [2].

Для передачи сигналов управления автоматикой поезда используется рельсовая цепь, имеющая ограниченную надежность. В перспективных разработках для магистральных железных дорог определение координат поезда и передача на него информации осуществляются посредством радиоканала [3]. Однако в подземных тоннелях метрополитена эксплуатация радиоканала затруднена и невозможно применение спутниковой навигации (ГЛОНАСС, GPS).

При определении пройденного пути и скорости движения железнодорожного транспорта в целом пригодны датчики СВЧ-диапазона [4] или ультразвуковые датчики [5], установленные под днищем локомотива. Но в СВЧ-диапазоне могут возникать помехи, обусловленные интерференцией и перетражением сигналов, а при использовании ультразвука поверхность, с участием которой выполняются измерения, не должна поглощать звуковые колебания.

В данный момент измерения скорости движения электроподвижного состава в туннелях и помещениях метрополитена выполняются устройствами контроля скорости движения поездов (УКСДП), в которых прохождение вагона фиксируется двумя парами оптических датчиков, установленных в начале и конце контролируемого участка. Погрешность показаний составляет 1 км/ч или 0,28 м/с [6]. Достоинствами датчиков оптического диапазона кроме высокой точности являются компактные размеры, малые вес и потребляемая мощность.

Перспективным выглядит разработка бортовых оптических датчиков скорости [2], которые могут брать на себя роль резервных измерителей в системе управления автоматикой метropоезда в дополнение к существующим средствам.

Здесь представляет интерес привлечение потенциала, накопленного в космическом приборостроении. При управлении сближением и стыковкой, а также спуском на поверхность планет различных космических аппаратов (КА) выполняются измерения их относительной скорости. Причем речь идет об оптико-электронной аппаратуре [7-11], обеспечивающей и высокую точность измерений, небольшие габариты измерительной техники.

Под этим углом зрения в статье рассмотрены две практические задачи: измерение скорости сближения поезда с другим объектом — поездом или тупиком в пределах прямой видимости и измерение скорости движения поезда относительно железнодорожного полотна.

1. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СБЛИЖЕНИЯ С ДРУГИМ ОБЪЕКТОМ

При сближении с другим объектом измерение скорости осуществляется относи-

тельно железнодорожного полотна, а дальность до объекта определяется визуально машинистом, который регулирует скоростной режим. Одновременные измерения дальности до объекта (которой соответствует определенная допустимая скорость движения поезда) и измерения фактической скорости сближения оптическим датчиком могут позволить реализовать автоматическое управление скоростным режимом при его превышении и аварийным торможением поезда.

Лазерные доплеровские датчики скорости имеют ограниченные размеры измерительной зоны [12], поэтому их нельзя использовать для измерения скорости сближения. В бортовом датчике лучше применить конечно-разностный или дифференциальный метод фиксации скорости по двум значениям дальности

$$v = \frac{D_1 - D_2}{\Delta t}, \quad (1)$$

$\Delta t = t_2 - t_1$, (2)
где D_1, D_2 — измеренные значения дальности в моменты времени t_1, t_2 . Дальность при этом может определяться пассивным или активным методом.

По этому принципу работают лазерные скоростемеры, контролирующие движение автотранспорта [13].

На практике для измерений дальности широко применяются системы из двух телекамер, разнесенных между собой на некоторое базовое расстояние — стереотелевизионные системы. Дальность находится по величине линейного параллакса, характеризующего взаимное смещение изображений определенной точки объекта.

Дальность от стереотелевизионной системы до объекта равна:

$$D = \frac{l_T \cdot f}{p}, \quad (3)$$

где l_T — размер базы между телекамерами; f — фокусное расстояние объектива; p — линейный параллакс.

Дальность и точность измерений стереотелевизионной системы пропорциональны длине базы, которая должна иметь постоянную величину (быть устойчивой к вибрациям, перепадам температуры и т.д.). Также должна быть обеспечена параллельность оптических осей обеих телекамер.



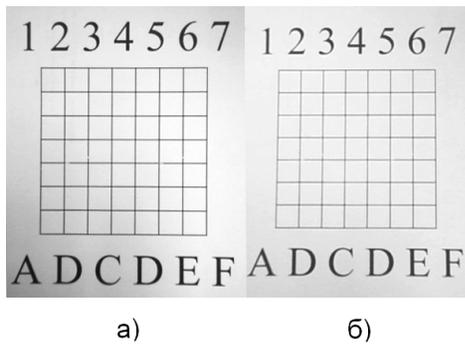


Рис. 1. Геометрические искажения при движении тест-объекта по направлению к датчику: а) тест-объект неподвижен; б) тест-объект приближается.

Примем, что погрешность измерения линейного параллакса стереотелевизионной системой определяется дискретностью матричного фотоприемника $\Delta\omega$, а ошибки при установке телекамер пренебрежимо малы. Тогда погрешность измерения дальности составит

$$\sigma_D = \frac{f \cdot l_T}{p} \cdot \frac{\Delta\omega}{p + \Delta\omega}. \quad (4)$$

Однако использование одной телекамеры в качестве резервного измерителя скорости более предпочтительно.

В этом случае можно реализовать угломерный способ, основанный на известном размере объекта или его части. Исходными данными служат размеры объекта и характеристики телекамеры (угломера).

Дальность от объекта до угломера определяется по выражению

$$D = \frac{l_{об}}{\tan(\phi)}, \quad (5)$$

где $l_{об}$ – линейный размер базы (объекта); ϕ – видимый угловой размер объекта.

В общем случае

$$\phi = \arctan\left(\frac{l_{об}}{D}\right). \quad (6)$$

Погрешность измерения дальности:

$$\sigma_D = \frac{l_{об} + \Delta l_{об}}{\tan(\phi + \Delta\omega)} - \frac{l_{об}}{\tan(\phi)}, \quad (7)$$

где $\Delta l_{об}$ – погрешность определения линейного размера объекта.

Недостаток угломерного метода измерений в том, что линейные размеры объекта должны быть известны с достаточной точностью. В таком случае целесообразно установить на объекте контрастные мишени (оптические маяки) с точно известными размерами.

Измерение скорости сближения с объектом может быть реализовано за счет характерного для матричного КМОП-фотоприемника эффекта геометрических искажений за время одного кадра, обусловленного особенностями работы его электронного затвора [14–16].

В КМОП-фотоприемнике накопление строк происходит не синхронно, а со смещением во времени (бегущий затвор). В результате при длительных выдержках движущийся объект на изображении выглядит искаженным: вертикальные линии становятся наклонными. Вид геометрических искажений зависит от взаимной ориентации в пространстве направления движения наблюдаемого объекта и направлений горизонтальной и вертикальной развертки КМОП-фотоприемника, а их величина – от скорости сближения с объектом, от формата и тактовой частоты телекамеры.

Эффект геометрических искажений при движении тест-объекта по направлению к датчику показан на рис. 1.

Для повышения безопасности контроля скорости сближения при стыковке космического аппарата разработана система на основе эффекта геометрических искажений изображения, включающая датчик с КМОП-фотоприемником, расположенный на активном КА, и четыре оптических маяка на пассивном КА, установленные в плоскости, перпендикулярной оси направления скорости сближения. Оптические маяки пассивного КА образуют прямоугольник в поле зрения телекамеры, при этом две стороны прямоугольника параллельны строкам чувствительных элементов КМОП-фотоприемника (пикселей), что является условием проявления эффекта смаза изображения с маяками [8, 11].

При чрезмерном возрастании скорости сближения за время последовательного накопления сигнала в КМОП-фотоприемнике изображение нижней пары маяков оказывается смазанным относительно верхней пары. В результате база нижней пары маяков получается более растянутой по сравнению с базой верхней пары, и прямоугольник на изображении, формируемый КМОП-фотоприемником, превращается в трапецию (см. рис. 2).

Отношение оснований трапеции определяет величину и направление скорости

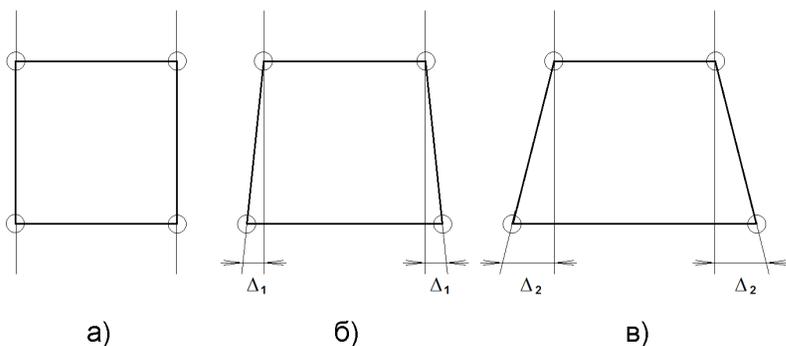


Рис. 2. Изменение расположения оптических маяков на изображении, формируемом КМОП-фотоприемником: а) маяки неподвижны; б) маяки приближаются к датчику со скоростью $v \leq 1$; в) маяки приближаются к датчику со скоростью $v > 1$.

сближения КА. Отношение длины нижнего основания трапеции к верхнему будет увеличиваться с возрастанием скорости сближения. Погрешность измерений скорости зависима от разрешающей способности КМОП-фотоприемника.

Измерения выполняются угломерным методом (5) поочередно для верхней и нижней баз между маяками. Принимая, что погрешность установки маяков пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью дискретности фотоприемника, получим выражение для погрешности определения дальности:

$$\sigma_D = \frac{l_M \cdot (\tan(\phi + \Delta\omega) - \tan(\phi))}{\tan(\phi) \cdot \tan(\phi + \Delta\omega)}, \quad (8)$$

где l_M – размер базы между маяками.

Если оптические маяки сами являются источником излучения, то для работы датчика смаза изображения не требуется внешняя засветка. Использование узкополосного светофильтра обеспечивает надежность измерений при наличии световых помех.

На рис. 3 показана функция установленного на кабине поезда бортового датчика смаза изображения в момент контроля допустимой скорости перед тупиком.

Из выражения (1) следует, что при измерении скорости σ_v дифференциальным методом ее погрешность определяется погрешностями измерения дальности σ_D и временного интервала $\sigma_{\Delta t}$ между измерениями. Формальным образом это можно представить в виде

$$\frac{\sigma_v^2}{v^2} = \frac{\sigma_{D1}^2 + \sigma_{D2}^2}{v^2 \cdot \Delta t^2} + \frac{\sigma_{\Delta t}^2}{\Delta t^2}. \quad (9)$$

Предположим, что $\sigma_{\Delta t} \ll \sigma_D$. Пренебрегая вторым членом в выражении (9), преобразуем его к виду

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{\sigma_{D1}^2 + \sigma_{D2}^2}}{\Delta t}. \quad (10)$$

Выражения (4), (7), (8) и (10) демонстрируют, что погрешность измерения скорости снижается при уменьшении дальности измерений и увеличении временного интервала между ними. Но при этом текущей дальности измерений и частоты выдачи датчиком информации о скорости должно быть достаточно для выполнения экстренного торможения поезда.

Для сравнительного анализа примем скорость движения поезда $v = 2$ м/с (7,2 км/ч), размер базы между телекамерами $l_T = 2,5$ м, линейный размер объекта $l_{об} = 2,7$ м (ширина вагона), базу между маяками $l_M = 2,5$ м. Измерения выполняются в диапазоне дальностей 20–2 м.

Объект (его базы с маяками) на ближней дальности (2 м) должны полностью помещаться в поле зрения бортового датчика, поэтому оно принимается равным 55° . Матричный фотоприемник имеет формат 1024×1024 , его разрешение $\beta = 0,94$ мрад, а дискретность – $\Delta\omega = 0,47$ мрад.

Временной интервал между измерениями стереотелевизионной системы и угломера $\Delta t = 1$ с, а для датчика смаза изображения он определяется временем считывания изображения объекта с маяками:

$$\Delta t = t_c \cdot h, \quad (11)$$

где h – вертикальный размер изображения объекта с маяками, строк; t_c – время считывания строки.



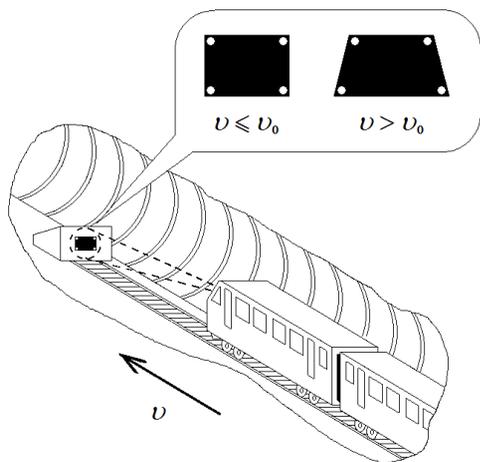


Рис. 3. Использование бортового датчика смаза изображения для контроля допустимой скорости поезда перед тупиком.

Скорость вычисляется по разности длины изображений верхней и нижней базы с маяками (смазу), поэтому интервал между двумя измерениями дальности не должен быть меньше погрешности ее измерений. Таким образом,

$$D_2 \leq D_1 - \sigma_{D1}, \quad (12)$$

$$\Delta t \geq \frac{\sigma_{D1}}{v}. \quad (13)$$

Оценки погрешностей измерения дальностей и скорости для оптических датчиков разного типа представлены в таблице 1.

Из данных таблицы видно, что наименьшие погрешности измерений обеспечиваются при использовании датчика смаза изображения. Однако, как следует из (10) и (11), наименьшая погрешность наблюдается при увеличении времени считывания строки и соответственно длительности экспозиции кадра в целом, в результате чего снижается частота обновления информации, выдаваемой датчиком.

Сравнение датчика смаза изображения с активными измерителями показывает его преимущества. Лазерные скоро-

стеры [13] с погрешностью измерений около 0,42 м/с работают на дальностях не менее 5 м и имеют более сложную конструкцию.

2. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛОТНА

Здесь прежде всего следует иметь в виду использование лазерных доплеровских датчиков, обеспечивающих погрешность измерений скорости до 0,05% от ее величины. Доплеровский датчик, построенный по общепринятой дифференциальной схеме, формирует интерференционную картину в измерительной зоне, где должен находиться объект, при этом вектор его скорости ортогонален к оптической оси датчика [12].

Измерение скорости может выполняться по элементам дорожного полотна, как замеряется скорость движения продукции в прокатных цехах на металлургических предприятиях.

Однако при размещении доплеровского датчика на вагоне поезда колебания и вибрации последнего вызовут сильное увеличение погрешности измерений вследствие смещения измерительной зоны. Кроме того, при малых скоростях из-за низкой крутизны выходного сигнала погрешность измерения тоже резко возрастает [12].

Известен метод измерения скорости движения поезда в метрополитене по изображению рельсовой колеи с использованием оптического датчика на основе ПЗС-фотоприемника. Датчик размещается на днище вагона, среднеквадратическая погрешность измерений скорости составляет 0,84% от ее величины, но на процесс влияют светотехнические условия [2].

Не менее применим метод измерения скорости железнодорожного состава по сдвигу на изображениях железнодорож-

Таблица 1
Оценки погрешностей измерения дальностей и скорости для оптических датчиков разного типа

Измеритель	D_1 , м	σ_{D1} , м	D_2 , м	σ_{D2} , м	σ_v , м/с (км/ч)
Стереотелевизионная система ($f = 0,1$ м)	20,00	0,72	18,00	0,59	0,93 (3,35)
Угломер ($\Delta l_{\text{об}} = 0,1$ м)	20,00	0,67	18,00	0,61	0,90 (3,24)
Датчик смаза изображения ($\Delta t = 0,2$ с; $t_c = 1,5 \cdot 10^{-3}$ с)	20,00	0,08	19,60	0,07	0,53 (1,91)

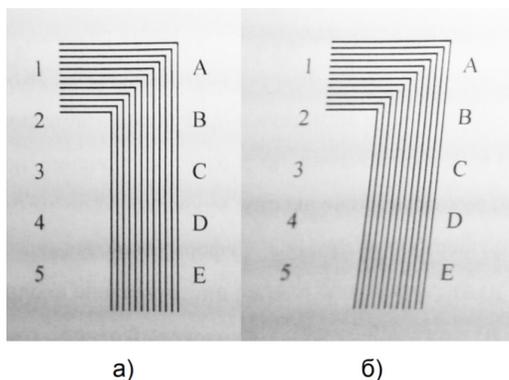


Рис. 4. Геометрические искажения при боковом движении тест-объекта: а) тест-объект неподвижен; б) тест-объект движется влево.

ного полотна, формируемых двумя видеорегистраторами, которые находятся на заданной высоте [17]. Однако и в этом случае работоспособность телекамер сильно зависит от светотехнических условий. Повышения помехоустойчивости измерений можно добиться с помощью оптических маяков.

Датчик смаза изображения однокамерный и за счет использования оптических маяков в меньшей степени зависит от светотехнических условий, что дает ему преимущества по сравнению с двумя упомянутыми методами. Кроме того, размещение датчика над путями под днищем вагонов поезда нежелательно по причине быстрого загрязнения оптических поверхностей.

Предложенная в [8, 11] реализация датчика смаза изображения подразумевает размещение оптических маяков в плоскости, перпендикулярной оси направления скорости сближения. Для измерений на всем протяжении пути следования состава предпочтительнее использовать эффект смаза в плоскости, параллельной направлению движения. Геометрические искажения при боковом движении тест-объекта показаны на рис. 4.

Тогда датчик смаза изображения может устанавливаться на боковой части вагона поезда. Для измерения скорости в качестве оптических маяков в этом случае используются контрастные или подсвечиваемые вертикальные полосы. По углу их наклона на изображении определяется скорость движения поезда (см. рис. 5).

Кроме того, полосы, имеющие наклон в сторону, противоположную смазыванию

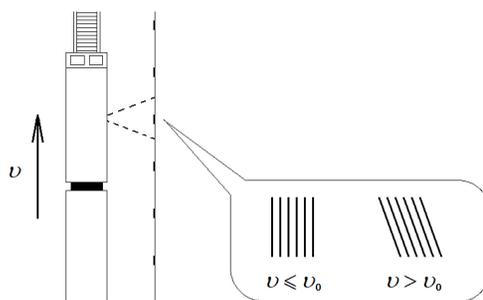


Рис. 5. Использование бортового датчика смаза изображения для поддержания требуемой скорости движения.

на КМОП-фотоприемнике, на изображении будут выглядеть прямыми. Нанесение полос с разной степенью наклона по ходу следования поезда позволяет задать требуемую скорость движения на разных участках пути, и датчик смаза изображения получает возможность непосредственно измерять превышение допустимой скорости. Это помогает реализовать автоматическое управление скоростным режимом на основе информации от датчика смаза изображения.

Как следует из очевидных геометрических отношений, скорость, с которой перемещается маяк относительно датчика смаза изображения, можно определить из выражения

$$v = \frac{D \cdot \tan(s \cdot \beta)}{h \cdot t_c}, \quad (14)$$

где s – смаз пикселей, β – поле зрения пикселя.

Так как измерение выполняется на фиксированной дальности от маяков и заранее известно количество строк, которое они занимают по вертикали (в отсутствие наклона вагона с датчиком), то примем допущение, что погрешность измерения скорости определяется в основном погрешностью определения смаза изображения маяка. Тогда

$$\sigma_v = \frac{D \cdot (\tan(s \cdot \beta + \Delta\omega) - \tan(s \cdot \beta))}{h \cdot t_c}. \quad (15)$$

Погрешность измерений зависит от скорости движения поезда. Принимаем $D = 1$ м; $\beta = 0,94$ мрад; $\Delta\omega = 0,47$ мрад; $t_c = 10^{-4}$ с (соответствует частоте обновления информации около 10 Гц). Если вертикаль-



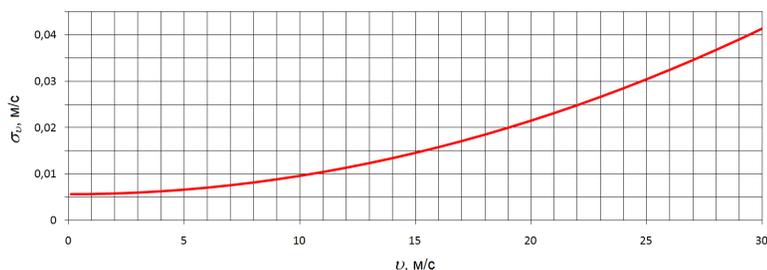
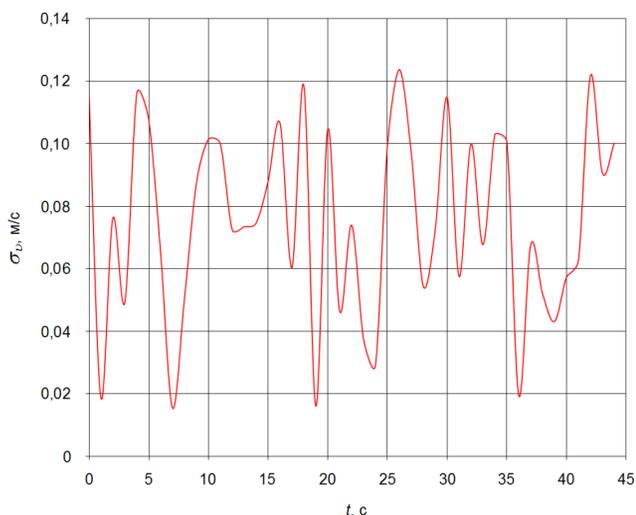


Рис. 6. Зависимость погрешности измерений датчика смаза изображения от скорости движения поезда.

Рис. 7. Погрешность измерений скорости датчиком смаза изображения при равномерном движении поезда со скоростью 40 км/ч.



ная база маяка равна 1 м, тогда $h = 836$. Зависимость погрешности измерения скорости от скорости движения представлена на рис. 6.

Дополнительная погрешность может возникать в результате боковой качки вагона с датчиком, а также неизбежного при большом количестве маяков разброса дальности их установки ΔD вдоль пути следования поезда. Тогда

$$\sigma_v = \frac{(D + \Delta D) \cdot \tan(s \cdot \beta + \Delta\omega) - D \cdot \cos\alpha \cdot \tan(s \cdot \beta)}{\cos\alpha \cdot h \cdot t_c}, \quad (16)$$

где α – угол относительно нормали к плоскости установки маяков.

Сделаем допущение, что ΔD равномерно распределено в диапазоне 0...0,01 м, а угол отклонения вагона при боковой качке, представляющей собой гармонические колебания с частотой 0,7 Гц, не превышает 1°. При скорости движения $v = 40$ км/ч (11,11 м/с) смаз составит $s = 796$ пикселей. На рис. 7 представлены результаты моделирования погрешности измерений скорости датчиком смаза изображения в течение временного интервала 45 с.

Как видно из рис. 7, погрешность измерений скорости поезда датчиком смаза изображения при наличии боковой качки вагонов и вибрации не превысит 0,47 км/ч или 0,13 м/с.

Комбинирование датчиков смаза изображения с электромеханическими датчиками и другими измерителями скорости может повысить надежность и достоверность измерений, что позволяет улучшить точность поддержания скоростного режима поездов в метрополитене.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы возможности измерения скорости поезда в метрополитене бортовыми оптическими датчиками при сближении с другим поездом или тупиком в пределах прямой видимости, а также измерения скорости движения поезда относительно дорожного полотна. При этом использован опыт разработки оптико-электронной аппаратуры для перспективных космических аппаратов.

Сравнение разных оптических методов показывает, что наименьшая погрешность измерений при прочих равных возможностях обеспечивается методом на основе эффекта геометрических искажений изображения, формируемого КМОП-фотоприемником.

Проведен анализ влияния на погрешность измерений бортовым датчиком смаза изображения скорости движения, боковой качки вагонов и разброса дальности установки оптических маяков по ходу следования поезда. Такие датчики дают меньшую погрешность измерений скорости движения (0,47 км/ч или 0,13 м/с) по сравнению с используемыми электро-механическими колесными датчиками (5 км/ч или 1,39 м/с), тем самым повышая точность поддержания скоростного режима поездов в метрополитене.

Что касается погрешности измерений датчиком смаза скорости сближения с объектом (1,91 км/ч или 0,53 м/с), то она меньше в 1,7 раза по сравнению с погрешностью измерений, которые производятся с помощью стереотелевизионных систем и угломеров (3,24–3,35 км/ч или 0,90–0,93 м/с).

Датчики смаза могут быть использованы в качестве резервных измерителей для управления автоматикой поезда в дополнение к существующим средствам, что позволяет повысить надежность и безопасность пассажирских перевозок в метрополитене.

Предполагается, что дальнейшие исследования будут направлены на увеличение быстродействия и повышение помехозащищенности данного типа датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Московский метрополитен. Официальный сайт. Режим доступа: http://mosmetro.ru/about/structure/rollingstock/als_ars/. Доступ 05.06.2015.
2. Файнберг М. Е. Исследование и разработка аппаратно-программных средств оптоэлектронного датчика скорости на ПЗС / Дис... канд. техн. наук. – М., 2005. – 126 с.
3. Тильк И. Г. АЛС с использованием радиоканала // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – № 7. – С. 7–8.
4. Портрет на скорости. Ученые разработали систему высокоточного измерения параметров движения // Гудок. – 2010. – 19 мая.
5. Способ измерения линейной скорости локомотива. Патент РФ № 2189599. Приоритет от 16.07.2001

/ Зарифьян А. А., Кириевский Е. В., Январев С. Г., Колпахчян П. Г.

6. Элком. Оборудование для метрополитена. Устройство контроля скорости движения поездов УКСДП. Режим доступа: <http://elkom-metro.com/products/prochee-oborudovanie/ustroystvo-kontrolya-skorostidvizheniya-poezdov-uksdp/>. Доступ 05.06.2015.

7. Старовойтов Е. И., Савчук Д. В., Зубов Н. Е. Анализ возможностей, оптимизация массы и энергопотребления лазерного высотомера для управления спуском с окололунной орбиты // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 1. – С. 67–74.

8. Старовойтов Е. И., Савчук Д. В. Использование геометрических искажений изображения, формируемого КМОП-фотоприемником для контроля скорости сближения космических аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 4. – С. 66–68.

9. Старовойтов Е. И., Зубов Н. Е., Ивашов В. В., Никульчин А. В. Исследование эффективности и оптимизация параметров лазерного локационного прибора для измерения скорости сближения космических аппаратов // Наука и образование. – 2014. – № 6. Электронное научно-техническое издание. DOI: 10.7463/0614.0712240. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/712240.html>. Доступ 05.06.2015.

10. Старовойтов Е. И., Савчук Д. В., Зубов Н. Е. Оптимизация массы и энергопотребления лазерных локационных систем для управления сближением и стыковкой космических аппаратов // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 3. – С. 39–42.

11. Система контроля скорости космических аппаратов при сближении. Заявка на изобретение № 2013138949. Приоритет от 20.08.2013 / Е. И. Старовойтов, Д. В. Савчук, И. В. Старовойтов. Патент № 2547286.

12. Аникин А., Федосейский А. Лазерные доплеровские измерители в системе учёта горячего проката // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 24–28.

13. ОАО «НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха». Лазерные измерители скорости и дальности. Режим доступа: <http://www.polyus.info/production/speedometers/>. Доступ 05.06.2015.

14. Рычажников А. Е. Методы измерения скоростей движущихся объектов с помощью цифровых видеосистем на основе КМОП-технологии // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символической информации: Сб. мат. VIII межд. конф. – Ч. 2. – Курск, 2008. – С. 86–87.

15. Пилипко Н. Е., Рычажников А. Е. Особенности работы КМОП-фотоприемника в режиме бегущего электронного затвора // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета. – 2008. – № 1. – С. 40–54.

16. Формирователь изображения. Патент РФ № 2389153 / ООО «НПК «ЕС-Экспертс» / Багров В. В., Рычажников А. Е. Заявка № 2008143871/09 от 05.11.2008.

17. Оптический способ определения скорости железнодорожного состава. Патент РФ № 2518078. Приоритет от 25.01.2013 / Разевиг В. В., Ивашов С. И., Бугаев А. С., Ивашов А. И. ●

Координаты авторов: **Старовойтов Е. И.** – post@rsce.ru, **Воробьев С. А.** – info@hcbet.ru.

Статья поступила в редакцию 29.06.2015, принята к публикации 27.08.2015.



MEASURING METRO TRAIN'S SPEED BY ON-BOARD OPTICAL SENSORS

Starovoitov, Evgeny I., JSC «S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», Moscow region, Russia.

Vorobiev, Sergey A., LLC «R&D enterprise «Svet», Moscow, Russia.

ABSTRACT

The optical methods of measuring the speed of trains in metro by onboard sensors are studied, including situations of train's approach to another object. In solving these tasks the experience of the development of opto-electronic devices for probable future spacecrafts is used. It is

shown that the smallest measurement uncertainty is provided by considering the effect of geometric distortion of the image formed by CMOS photodetector. The sensors are able to fulfill the role of reserves in the system of automatic train control, thereby enhancing reliability and safety of passenger traffic.

Keywords: metro, train, speed, measurement, optical sensor, CMOS.

Background. To ensure traffic safety in underground a high-speed automatic speed control system ALS-ARS of frequency type is used, in which code signals of permissible speeds are transmitted to electric rolling stock along a rail line with a frequency of 75-325 Hz [1].

Measuring the speed on the train's board is performed odometrically by means of electromechanical wheel sensors. Their disadvantage is the large measurement errors (5 km/h or 1,39 m/s) due to sliding and skidding of wheels [2].

To transmit automatic train control signals track circuit having limited reliability is used. In promising developments for main railways determination of train's coordinates and transfer of information to it is carried by the radio channel [3]. However, in metro underground tunnels channel operation is difficult and it is impossible to use satellite navigation (GLONASS, GPS).

In determining covered distance traveled and speed of railway transport generally microwave sensors [4] or ultrasonic sensors [5] are suitable, installed underneath the locomotive. But in the microwave range disturbances may occur due to interference and signal reflection, and in case of use of ultrasound surface with which the measurements are performed shall not absorb sound vibrations.

At the moment, the measurement of electric rolling stock speed in tunnels and metro premises are performed by speed control devices UKSDP in which the passage of the car is fixed by two pairs of optical sensors, installed at the beginning and end of the controlled section. Indication error is 1 km/h or 0,28 m/s [6]. The advantages of optical range sensors in addition to high precision are compact size, low weight and power consumption.

Development of on-board optical speed sensors [2] looks promising, which can take on the role of reserve measuring devices in the system of automatic control of metro trains in addition to existing facilities.

There is the interest to attract potential gained in space instrumentation. In controlling approach and coupling, as well as entry of different spacecraft (hereinafter – SC) to the surface of planets measurements of their relative speed are performed. And we are talking about the opto-electronic equipment [7-11], which provides high accuracy of measurements, small size of measuring equipment.

From this perspective, the article discusses two practical problems: measurement of the speed of train's approach to another object – a train or a dead-end in line of sight, and measurement of train's speed with respect to the railway track.

Objective. The objective of the authors is to study the process of measuring metro trains' speed using special onboard sensors.

Methods. The authors use general scientific and engineering methods, modeling and evaluation approach.

Results.

1. Measurement of the speed of train's approach to another object

When approaching another object speed measurement is carried out with respect to the railway track, and the distance to the object is determined visually by a train driver, who regulates the speed limit. Simultaneous measurement of distance to the object (which corresponds to a certain allowable speed of the train) and measurement of actual speed of approach by an optical sensor can allow implementing automated control of speed and emergency braking when it is exceeded.

Laser Doppler speed sensors have limited size of the measuring area [12], so they cannot be used to measure approach speed. In onboard sensors it is better to use finite-difference or differential method of fixing the rate on two values of the range

$$v = \frac{D_1 - D_2}{\Delta t}, \quad (1)$$

$\Delta t = t_2 - t_1$, (2)
where D_1, D_2 are measured values of range at times t_1, t_2 . Range may be determined using passive or active method.

According to this principle works laser speedometers, controlling the movement of vehicles [13].

In practice for range measurements systems of two cameras spaced apart on a base distance are widely used – stereotelevision systems. The range is determined by the value of linear parallax characterizing the mutual displacement of images of a certain point of an object.

Distance from stereotelevision system to an object is equal to:

$$D = \frac{l_T \cdot f}{p}, \quad (3)$$

where l_T is size of base between cameras; f focal length of the lens; p is linear parallax.

The range and accuracy of measurements of the stereotelevision system is proportional to the length of base, which must have a constant value (be resistant to vibration, temperature variations, etc.). Parallelism of optical axes of both cameras should be provided.

We assume that the measurement error of the linear parallax by stereotelevision system is determined by the minimum resolution of matrix photode-

tector $\Delta\omega$, and errors when installing cameras are negligible. Then, the range measurement error will be

$$\sigma_D = \frac{f \cdot l_r}{p} \cdot \frac{\Delta\omega}{p + \Delta\omega} \quad (4)$$

However, the use of one camera as a backup rate meter is preferred.

In this case it is possible to realize goniometric method based on the known dimensions of the object or part thereof. The initial data are the object's dimensions and characteristics of the camera (protractor).

Distance from the object to protractor is determined by the expression

$$D = \frac{l_{ob}}{\tan(\phi)}, \quad (5)$$

where l_{ob} is linear dimension of a base (object); ϕ is apparent angular size of the object.

In general case

$$\phi = \arctan\left(\frac{l_{ob}}{D}\right) \quad (6)$$

Range measurement error:

$$\sigma_D = \frac{l_{ob} + \Delta l_{ob}}{\tan(\phi + \Delta\omega)} - \frac{l_{ob}}{\tan(\phi)}, \quad (7)$$

where Δl_{ob} is error in determining linear dimension of the object.

The disadvantage of goniometric measuring method is that linear dimensions of the object need to be known with sufficient accuracy. In this case it is advisable to install on the object contrast targets (optical beacons) with accurately known dimensions.

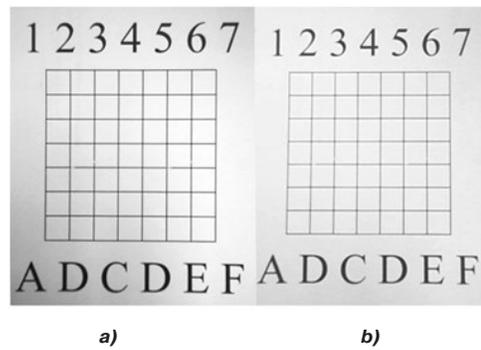
Measuring the speed of approach to an object can be realized by characteristic of matrix CMOS photodetector effect of geometric distortion during one frame due to the work peculiarities of its electronic shutter [14-16].

In CMOS photodetector accumulation of lines is not in sync, and with a shift in time (running shutter). As a result, in long exposures moving object in the image appears distorted: vertical lines become inclined. Kind of geometric distortions depends on the relative orientation in space of the direction of movement of the observed object and directions of horizontal and vertical development of CMOS photodetector, and their value depends on approach speed to the object, as well as the format and the clock rate of camera.

The effect of geometric distortions during the motion of the test object in the direction of the sensor is shown in Pic. 1.

To enhance the security control over approach speed during the coupling of the spacecraft a system is designed on the basis of geometric distortions of the image, including a sensor with a CMOS photodetector, disposed on the active SC, and four optical beacons on the passive spacecraft mounted in a plane perpendicular to the axis direction of approach speed. Optical beacons of passive SC form a rectangle in the camera view, two sides of the rectangle are parallel to the rows of sensitive elements of CMOS photodetector (pixels), which is a prerequisite for manifestation of the effect of blurring the image with beacons [8, 11].

In case of excessive increase in approach speed during successive accumulation of signal in CMOS photodetector image of the lower pair of beacons is blurred in relation to the upper pair. As a result, the base of the lower pair of beacons is more stretched compared with the base of upper pair of beacons and



Pic. 1. Geometric distortion when driving the test object in the direction of the sensor: a) test object is stationary; b) test object approaches.

a rectangle on the image formed by a CMOS photo-detector becomes a trapezoid (see. Pic. 2).

The ratio of the bases of the trapezoid defines magnitude and direction of approach speed of SC. The ratio of the length of the lower base of the trapezoid to the upper base will increase with an increase in approach speed. Speed measurement error is dependent on the resolution of CMOS photodetector.

Measurements are performed by goniometrical method (5) alternately to the upper and lower bases between beacons. Assuming that the error of the beacon is negligible compared with the error of minimum resolution of photodetector, an expression for the error in determining the distance will be:

$$\sigma_D = \frac{l_b \cdot (\tan(\phi + \Delta\omega) - \tan(\phi))}{\tan(\phi) \cdot \tan(\phi + \Delta\omega)}, \quad (8)$$

where l_b is a size of the base between beacons.

If the optical beacons are themselves a source of radiation, for operation of image blurring sensor external illumination is not required. Using a narrow-band filter ensures reliable measurements in the presence of light interference.

Pic. 3 shows the function of installed in the cab of the train on-board image blurring sensor at the time of control of permissible speed in front of railway siding.

From the expression (1) it follows that in the measurement of the speed σ_v using a differential method its error is determined by range measurement errors σ_D and time interval $\sigma_{\Delta t}$ between measurements. This can be formally represented as

$$\frac{\sigma_v^2}{v^2} = \frac{\sigma_{D1}^2 + \sigma_{D2}^2}{v^2 \cdot \Delta t^2} + \frac{\sigma_{\Delta t}^2}{\Delta t^2} \quad (9)$$

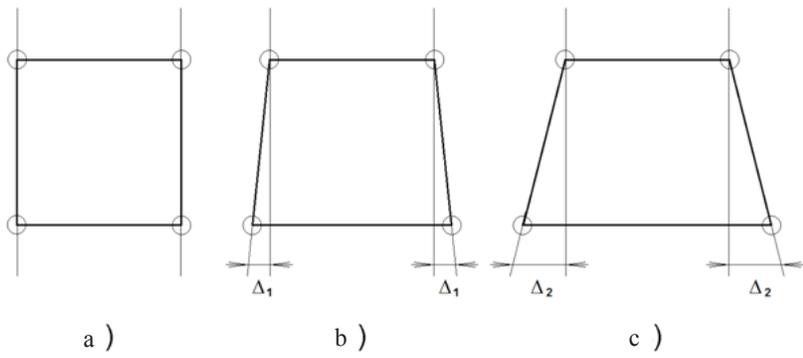
Suppose that $\sigma_{\Delta t} \ll \sigma_D$. Neglecting the second term in the expression (9), convert it to a form

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{\sigma_{D1}^2 + \sigma_{D2}^2}}{\Delta t} \quad (10)$$

Expressions (4), (7), (8) and (10) show that the speed measurement error reduces by reducing measurement range and increasing the time interval between them. But at the current measurement range and frequency of sensor's release of information on the speed should be enough to perform emergency braking of the train.

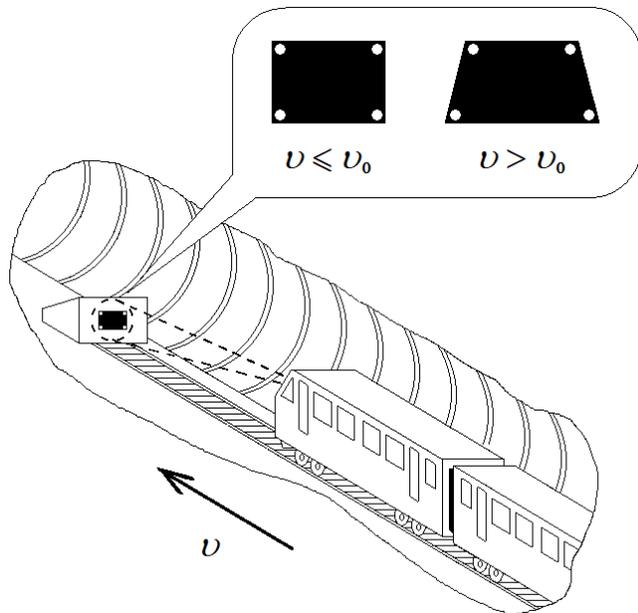
For comparative analysis we take train speed $v = 2 \text{ m/s}$ (7,2 km/h), the size of the base between the cameras $l_r = 2,5 \text{ m}$, the linear dimension of the object $l_{ob} = 2,7 \text{ m}$ (width of the car), the base between





Pic. 2. Changing the arrangement of optical beacons in the image generated by CMOS photodetector: a) stationary beacons; b) beacons approach the sensor at a rate of $v < v_0$; c) beacons approach the sensor at a rate of $v > v_0$.

Pic. 3. Using the on-board image blurring sensor for controlling permissible speed of the train in front of railway siding.



beacons $l_B = 2,5\text{ m}$. The measurements are performed in the range rate of 20-2 m.

The object (its base with beacons) at close range (2 m) must fit in the field of on-board sensors, so it is assumed equal to 55° . The matrix photodetector has a format of 1024×1024 , its resolution of $\beta = 0,94\text{ mrad}$, and minimum resolution $\Delta\omega = 0,47\text{ mrad}$.

The time interval between measurements of stereotelevision system and protractor $\Delta t = 1\text{ s}$, and for image blurring sensor it is determined by the time of reading the image of the object with beacons:

$$\Delta t = t_l \cdot h, \tag{11}$$

where h is vertical dimension of the image of the object with beacons, lines; t_l is time of line's reading.

The speed is calculated from the difference between the length of the image of the upper and lower bases with beacons (blurring), so the interval between two range measurements should not be less than the error of its measurements. Thus,

$$D_2 \leq D_1 - \sigma_{D1}, \tag{12}$$

from which

$$\Delta t \geq \frac{\sigma_{D1}}{v}. \tag{13}$$

Estimates of the errors of range and speed measurements for optical sensors of various types are shown in Table 1.

The data from the table shows that the smallest measurement errors are provided when using image blurring sensor. However, as it follows from (10) and (11), the smallest error is observed with an increase in time of line's reading and accordingly frame exposure time as a whole, thereby reduces the frequency of updating the information supplied by the sensor.

Comparison of image blurring sensor with active measuring instruments shows its benefits. Laser speedometers [13] with measurement errors of about 0,42 m/s operate at ranges of at least 5 m and have a more complex structure.

2. Measuring the speed of the train with respect to the railway bed

Here we should think of using laser Doppler sensors providing speed measurement error of about 0,05% of its value. Doppler sensor, constructed by conventional differential circuit, generates an interference pattern in the measurement zone, where there

Table 1

Estimates of the errors of range and speed measurements for optical sensors of different types

Measuring instrument	D_1, m	σ_{D1}, m	D_2, m	σ_{D2}, m	$\sigma_v, m/s (km/h)$
Stereotelevision system ($f = 0,1 m$)	20,00	0,72	18,00	0,59	0,93 (3,35)
Protractor ($\Delta l_{ob} = 0,1 m$)	20,00	0,67	18,00	0,61	0,90(3,24)
Image blurring sensor ($\Delta t = 0,2 s; t_f = 1,5 \cdot 10^{-3} s$)	20,00	0,08	19,60	0,07	0,53 (1,91)

should be an object, while its velocity vector is orthogonal to the optical axis of the sensor [12].

Speed measurement can be performed on the elements of the railway bed as speed of the products in the rolling mills at the metallurgical enterprises is measured.

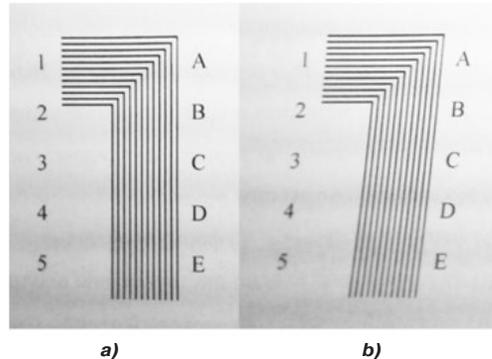
However, in case of placement of the Doppler sensor to the train's car oscillation and vibration of the latter will cause a strong increase in measurement error due to displacement of the measuring area. Furthermore, at low speeds due to the low steepness of the output signal the measurement error also increases dramatically [12].

A method of measuring the speed of the train in the subway on the image of a rail track using an optical sensor based on a CCD image sensor is known. The sensor is placed on the bottom of the car, rms error of speed measurement rate is 0,84% of its value, but the process is affected by lighting conditions [2].

No less applicable is method of speed measurement of the train from the shift in the image of the railway track, formed by two dashboard cameras which are located at a given height [17]. However, in this case working capacity of cameras strongly depends on lighting conditions. Increased noise immunity of measurements can be achieved using optical beacons.

Image blurring sensor is single chamber, and through the use of optical beacons it is less dependent on lighting conditions, which gives it advantages over the above two methods. In addition, placement of the sensor above the railway bed under the bottom of the train is undesirable because of the rapid contamination of optical surfaces.

Proposed in [8, 11] design of image blurring sensor involves placing optical beacons in the plane perpendicular to the axis of direction of approach speed. For measurements throughout the route of

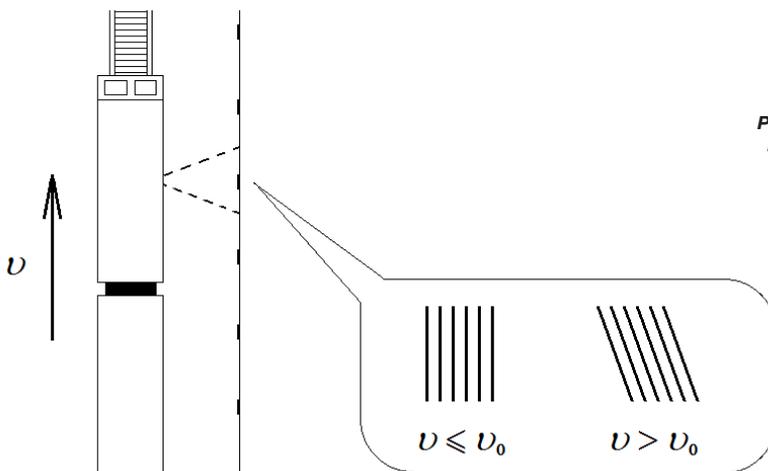


Pic. 4. Geometrical distortion at the lateral movement of the test object: a) test object is stationary; b) test object moves to the left.

the train it is preferable to use the effect of blurring in a plane parallel to the direction of movement. Geometric distortion at lateral movement of the test object is shown in Pic. 4.

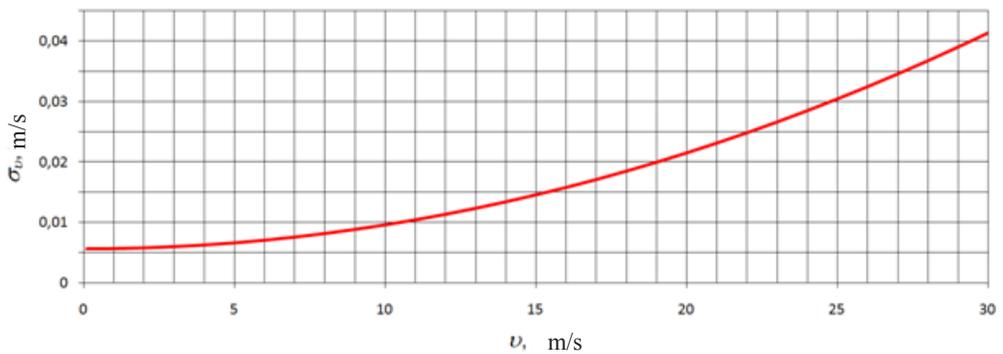
Then image blurring sensor can be installed on the side of the train's car. To measure the speed as optical beacons in this case contrast or backlit vertical stripes are used. According to the angle of slope of the image speed of the train is determined (see Pic. 5).

Furthermore, stripes having a slope in the direction opposite to blurring at CMOS photodetector in the image will appear straight. Striping with varying degrees of slope in the course of the train allows setting the desired speed of movement in different sections of the track, and image blurring sensor is able to measure overspeed directly. It helps to realize the automatic control of the speed on the basis of information from image blurring sensor.



Pic. 5. Using on-board image blurring sensor to maintain the desired speed.





Pic. 6. Dependence of the measurement error of image blurring sensor on the speed of the train.

As obvious from the geometrical relationship, the rate at which the beacon moves relative to the image sensor blurring can be determined from the expression

$$v = \frac{D \cdot \tan(s \cdot \beta)}{h \cdot t_i} \quad (14)$$

where s is blurring of pixels, β is field of view of the pixel.

Since the measurement is performed at a fixed distance from beacons and the number of lines, which they occupy vertically (in the absence of the slope of the car with sensor), is known in advance, then we take the assumption that the speed measurement error is mainly determined by the error in determination of beacon's image blurring. Then

$$\sigma_v = \frac{D \cdot (\tan(s \cdot \beta + \Delta\omega) - \tan(s \cdot \beta))}{h \cdot t_i} \quad (15)$$

Measurement error depends on the speed of the train. We take $D = 1.1$ m; $\beta = 0.94$ mrad; $\Delta\omega = 0.47$ mrad; $t_i = 10^{-4}$ s (corresponds to information update frequency around 10 Hz). If the vertical base of the beacon is 1 m, then $h = 836$. Dependence of speed measurement error on the speed of motion is shown in Pic. 6.

Additional error may result from a lateral rolling of a car with the sensor, as well as the inevitable when a large number of beacons of dispersion of range of their installation ΔD along the route of the train. Then

$$\sigma_v = \frac{(D + \Delta D) \cdot \tan(s \cdot \beta + \Delta\omega) - D \cdot \cos \alpha \cdot \tan(s \cdot \beta)}{\cos \alpha \cdot h \cdot t_i} \quad (16)$$

where α is angle relative to the normal to the plane of installation of beacons.

We make the assumption that ΔD is uniformly distributed in the range $0 \dots 0.01$ m, and the deflection of angle of the car at lateral rolling, which is harmonic oscillations with a frequency of 0.7 Hz, shall not exceed 1° . When speed $v = 40$ km/h (11.11 m/s) blurring will be $s = 796$ pixels. Pic. 7 shows simulation results of speed measurement error of blurring image sensor during a time interval of 45 seconds.

As can be seen from Pic. 7, the measurement error of train by image blurring sensor in case of lateral rolling and vibration will not exceed 0.47 km/h or 0.13 m/s.

Combining of image blurring sensors with electromechanical sensors and other speed measuring devices can improve reliability and accuracy of measurements, thereby improving the accuracy of maintenance of speed limit of metro trains.

Conclusion. The possibilities of measuring speed of the train in the subway by onboard optical sensors when approaching another train or another dead end in line of sight are studied, as well as measuring the speed of the train with respect to the railway bed. For this purpose was used experience in developing optoelectronic devices for future spacecraft.

Comparison of various optical methods shows that the smallest measurement error at other equal opportunity is provided by a method based on the effect of geometric distortion of the image formed by CMOS photodetector.

The analysis is given on the effect of measurement error by on-board image blurring sensor of speed, lateral rolling of cars and dispersion of range of installation of optical beacons along the route of the train. Such sensors provide a smaller speed measurement error (0.47 km/h or 0.13 m/s) compared with used electromechanical wheel sensors (5 km/h or 1.39 m/s), thereby improving the accuracy of maintaining speed limits of trains in the metro.

With regard to the measurement error of blurring sensor in approach speed to an object (1.91 km/h or 0.53 m/s), it is 1.7 times less in comparison with errors in measurements, which are produced using stereo-television systems and protractors (3.24-3.35 km/h or 0.90-0.93 m/s).

Blurring sensors can be used as back-up measuring devices for automatic train control in addition to existing tools that can improve reliability and safety of passenger transportation in the metro.

It is expected that further research will be aimed at increasing the speed and increase noise immunity of this type of sensors.

REFERENCES

1. Moscow Metro. Official site. Access: http://mosmetro.ru/about/structure/rollingstock/als_ars/. Last accessed 05.06.2015.
2. Feinberg, M. E. Research and development of hardware and software for optoelectronic speed sensor CCD. Ph.D. (Eng.) thesis [Issledovanie i razrabotka apparatno-programmnyh sredstv optoelektronnogo datchika skorosti na PZS. Dis... kand. tehn. nauk]. Moscow, 2005, 126 p.
3. Tilk, I.G. ALS using radio channel [ALS s ispol'zovaniem radiokanala]. Avtomatika, svyaz', informatika, 2010, Iss. 7, pp. 7–8.
4. Portrait at speed. Scientists have developed a highly accurate measurement system of motion parameters [Portret na skorosti. Uchenye razrabotali sistemu

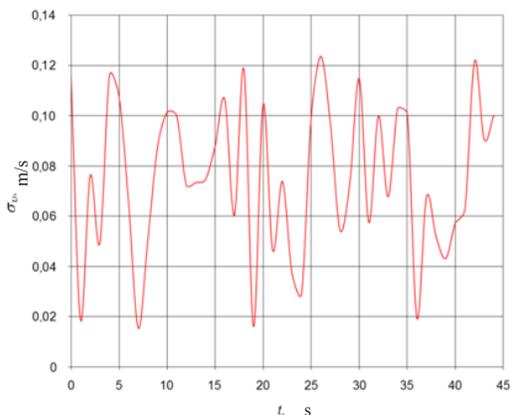


Fig. 7. Speed measurement error of image blurring sensor in uniform motion of the train at a speed of 40 km / h.

vysokotochnogo izmerenija parametrov dvizhenija]. *Gudok*, 2010, May, 19.

5. A method for measuring linear speed of a locomotive. The patent of the Russian Federation № 2189599. The priority of 16.07.2001 [Sposob izmerenija linejnoj skorosti lokomotiva. Patent RF № 2189599. Prioritet ot 16.07.2001]. Authors: Zariifan, A.A., Kirievsky, E.V., Yanarev, S.G., Kolpachyan, P. G.

6. Elcom. Equipment for the metro. Device for control over train speed UKSDP [Elkom. Oborudovanie dlja metropolitena. Ustrojstvo kontrolya skorosti dvizhenija poezdov UKSDP]. Access mode: <http://elkom-metro.com/products/prochee-oborudovanie/ustrojstvo-kontrolya-skorostidvizheniya-poezdov-uksdp/>. Last assessed 05.06.2015.

7. Starovoitov, E.I., Savchuk, D.V., Zubov, N. E. Analysis of opportunities, optimization of mass and energy consumption of the laser altimeter to control the descent from lunar orbit [Analiz vozmozhnostej, optimizacija massy i energopotreblenija lazernogo vysotomera dlja upravlenija spuskom s okololunnoj orbity]. *Kosmicheskaja tehnika i tehnologii*, 2014, Iss. 1, pp. 67–74.

8. Starovoitov, E.I., Savchuk, D. V. Using geometric distortion of the image formed by CMOS photodetector to control the approach speed of spacecraft [Ispol'zovanie geometricheskikh iskazhenij izobrazhenija, formiruemogo KMOP-fotopriemnikom dlja kontrolya skorosti sblizhenija kosmicheskikh apparatov]. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2014, Iss. 4, pp. 66–68.

9. Starovoitov, E.I., Zubov, N.E., Ivashov, V.V., Nikulchin, A. V. Research of efficiency and optimization of parameters of laser radar device to measure approach speed of spacecraft [Issledovanie effektivnosti i optimizacija parametrov lazernogo lokacionnogo pribora dlja izmerenija skorosti sblizhenija kosmicheskikh apparatov]. *Nauka i obrazovanie*, 2014, Iss. 6 [Electronic scientific and technical edition]. DOI: 10.7463 / 0614.0712240. Access: <http://technomag.bmstu.ru/doc/712240.html>. Last assessed 05.06.2015.

10. Starovoitov, E.I., Savchuk, D.V., Zubov, N. E. Optimization of mass and energy consumption of laser radar systems to control approach and coupling of spacecraft [Optimizacija massy i energopotreblenija lazernyh lokacionnyh sistem dlja upravlenija sblizheniem i stykovkoj

kosmicheskikh apparatov]. *Kosmicheskaja tehnika i tehnologii*, 2014, Iss. 3, pp. 39–42.

11. The system of spacecraft speed control when approaching. The application for the invention № 2013138949. The priority of 08.20.2013 [Sistema kontrolya skorosti kosmicheskikh apparatov pri sblizhenii. Zajavka na izobretenie № 2013138949. Prioritet ot 20.08.2013]. Authors: Starovoitov, E.I., Savchuk, D.V., Starovoytov, I. V. Patent № 2547286.

12. Anikin, A., Fedoseysky, A. Laser Doppler measuring devices in the accounting system of hot-rolled mill products [Lazernye doplerovskie izmeriteli v sisteme uchjota gorjachego prokata]. *Sovremennye tehnologii avtomatizacii*, 2007, Iss. 1, pp. 24–28.

13. JSC «Research Institute «Polyus» n. a. M. F. Stelmakh». Laser measuring devices of speed and range [OAO «NII «Poljus» im. M. F. Stel'maha». Lazernye izmeriteli skorosti i dal'nosti]. Access: <http://www.polyus.info/production/speedometers/>. Last accessed 05.06.2015.

14. Rychazhnikov, A. E. Methods for measuring speed of moving objects with the help of digital video systems based on CMOS technology [Metody izmerenija skorostej dvizhushhihsja ob'ektov s pomosh'hju cifrovyh videosistem na osnove KMOP-tehnologii]. *Opto-electronic instruments and devices in the system of pattern recognition, image processing and symbol information: Proceedings of VIII International conference. Part 2*. Kursk, 2008, pp.86–87.

15. Pilipko, N.E., Rychazhnikov, A. E. Features of CMOS photodetector in running shutter mode [Osobennosti raboty KMOP-fotopriemnika v rezhime begushhego elektronnoho zatvora]. *Proceedings of St. Petersburg State Electrotechnical University*, 2008, Iss. 1, pp. 40–54.

16. Image generator. RF patent № 2389153 [Formirovatel' izobrazhenija. Patent RF № 2389153]. Authors: LLC «NPK «EU-Eksperts», Bagrov, V.V., Rychazhnikov, A. E. Application № 2008143871/09 of 05.11.2008.

17. An optical method of determining the speed of the train. The patent of the Russian Federation № 2518078. The priority of 01.25.2013 [Opticheskij sposob opredelenija skorosti zheleznodorozhnogo sostava. Patent RF № 2518078. Prioritet ot 25.01.2013]. Authors: Razevig, V.V., Ivashov, S.I., Bugaev, A.S., Ivashov, A.I. ●

Information about the authors:

Starovoitov, Evgeny I. – Ph.D. (Eng.), senior researcher of JSC «S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energija», Moscow region, Russia, post@rsce.ru.

Vorobiev, Sergey A. – Ph.D. (Eng.), senior researcher of LLC «R&D enterprise «Svet», Moscow, Russia, info@hcbet.ru.

Article received 29.06.2015, accepted 27.08.2015.

