

БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И МОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Е.В. Галушко, канд. техн. наук, М.А. Прищепов, докт. техн. наук, доцент, Ю.А. Сидоренко, канд. техн. наук, доцент (УО БГАТУ); В.Н. Ильин, докт. техн. наук (Институт электроники НАНБ)

Аннотация

Проведен анализ способов измерения скорости перемещения различных объектов, представлены результаты исследований по формированию оптических изображений протяженных объектов при различных способах освещения, разработан спекл-навигационный способ контроля скорости движения протяженного объекта, включающий вычисление корреляционной функции при покадровой фиксации изображений спеклов поверхности протяженного объекта.

Введение

Точные измерения скорости движения, длины и пройденного пути необходимы во многих отраслях промышленности и транспорта. В промышленности - это, в первую очередь, измерения скорости движения и длины длинномерных материалов (прокат, проволока, кабели, ткани, бумага, пленка, фанера и пр.) для систем управления, раскроя и учета. На транспорте - бортовые устройства для измерения скорости движения, ускорения, поперечного сноса, пройденного пути и других параметров при полигонных испытаниях автомобилей; скорости, ускорения и пройденного пути рельсового транспорта.

Все перечисленные задачи традиционно решаются с помощью различных контактных, механических или электромеханических устройств на базе измерительных роликов, гусеничных ремней. Для транспортных систем таким измерительным роликом является колесо автомобиля или локомотива. Однако перечисленные методы не отвечают современным требованиям по точности, быстродействию и надежности, а также имеют определенные ограничения по применению, например, для высокотемпературных, клейких, деформируемых, абразивных и химически активных материалов.

С 1960-1970-х годов в США, Германии, Дании, Японии, а также в России и Беларуси начали разрабатывать лазерные и оптические измерители скорости и длины на базе доплеровских, времяимпульсных, корреляционных и растровых методов [1]. Эти приборы не имеют механического контакта с объектом, информация передается посредством электромагнитного поля. Оптические сенсоры используют маломощные источники излучения, обычно в пределах нескольких милливольт, поэтому излучение не вызывает изменений структуры и состава поверхности. Они обеспечивают возможность дистанционных измерений с высокой точностью в большом диапазоне измеряемых величин, обладают

достаточным быстродействием и надежностью для широкой номенклатуры контролируемых объектов.

Из известных измерителей следует выделить двухканальный оптический измеритель [2], который может быть использован для измерения скорости и длины длинномерной продукции в процессе ее производства, раскроя и учета, а также в качестве бортового измерителя скорости и пройденного расстояния различных транспортных средств (железнодорожного, метро, автомобильного и др.).

Измеритель содержит оптический датчик и электронный блок. Оптический датчик включает в себя оптически согласованные излучатель, приемную линзу, два растровых анализатора, два фотоприемника и две идентичные линзы, расположенные после приемной линзы и оптически согласованные с приемной линзой и растровыми анализаторами. Линзы расположены по разные стороны от оптической оси датчика и, соответственно, на заданном расстоянии от приемной линзы. Обеспечивается высокая точность измерения при вибрациях.

Следующее устройство [3] обеспечивает совмещение функций измерения скорости, длины и направления движения объекта в одном устройстве, что позволяет измерять длину объектов, направления движения которых может меняться в процессе измерений. Устройство содержит оптический датчик и электронный блок. Датчик имеет передающий оптический канал, приемный оптический канал, оптический растр, образованный входными торцами волоконных световодов, и три фотоприемника. Электронный блок содержит два сумматора, измеритель фазы, измеритель частоты и вычислительное устройство.

Перспективными являются измерители, основанные на доплеровском эффекте. Описанный в [4] измеритель содержит оптически согласованный лазер, цилиндрический объектив, расщепитель лазерного пучка и объектив, фотоприемник и электронный блок измере-

ния скорости. Объектив выполнен в виде ассимметричного двухфокусного киноформного оптического элемента, состоящего из расположенных в одной плоскости длиннофокусного фокусирующего и короткофокусного приемного киноформов, в котором приемный киноформ расположен на оптической оси измерителя скорости, а фокусирующий киноформ занимает два фрагмента общей площади приемного киноформа, расположенных симметрично относительно его оси и ограниченных по площади апертурами, проходящих через него лазерных пучков. При этом обеспечивается уменьшение погрешности измерения и габаритов.

Новые поколения компактных датчиков для измерения продольных и боковых параметров основаны на принципе CORREVIГ и разработаны фирмой Leitz Company Wetzlar [5]. Датчики обеспечивают бесконтактное измерение скорости в транспортном средстве по трем координатам для всех видов стандартных испытаний по вождению в сложных условиях, таких как испытание на повышенной скорости.

Стандартизация различных параметров, необходимых для понимания поведения транспортного средства и безопасности вождения, не достигла той стадии, на которой можно точно описать характеристики его вождения. Критериями являются, например, стабильность направления, точность рулевого управления, способность разворачиваться, изменение полосы движения, чередование нагрузки, тормозная реакция.

Математическое и физическое описание динамических испытаний по вождению существенно усложняется в ряде случаев нелинейной зависимостью параметров транспортного средства. Связать эти параметры можно только в пределах ограниченной области. Благодаря способности современного компьютера осуществлять вычисления с высокой скоростью, возможно моделирование динамических условий вождения.

Устройство позволяет осуществлять измерение скорости и расстояния немаркированных объектов относительно базового положения, при условии, что объект, подлежащий измерению, имеет оптическую структуру (предпочтительно распределенную стохастически по размерам и положению). Устройство работает в соответствии со способом оптической корреляции, с пространственно-частотной фильтрацией, при котором поверхностная структура воспроизводится на решётке. Полевая линза, которая расположена позади решётки (рис.1), собирает свет на фотозлектрический детектор. При перемещении поперечно к линиям решётки объект производит модуляцию фототока. Частота принимаемого сигнала пропорциональна скорости, с которой поле изображения перемещается перпендикулярно к линиям решётки, согласно формуле:

$$f = \frac{M}{g} \times g,$$

где M - проксционный масштаб оптики,

g - постоянная решётки,

f - частота сигнала и

g - скорость объекта.

Низкочастотная постоянная составляющая света формируется в сигнале посредством структуры объекта, которая составляет больше половины постоянной решётки детектора. Низкочастотная составляющая выделяется посредством призмной решётки путём двухтактного расположения фотоприемников, на которые свет собирается полевой линзой (рис.1).

Фотоприемники расположены симметрично относительно оптической оси в фокальной плоскости линзы на расстоянии друг от друга равном полу диаметра линзы (рис.2). На выходах формируются два сигнала, сдвинутых по фазе на 180° .

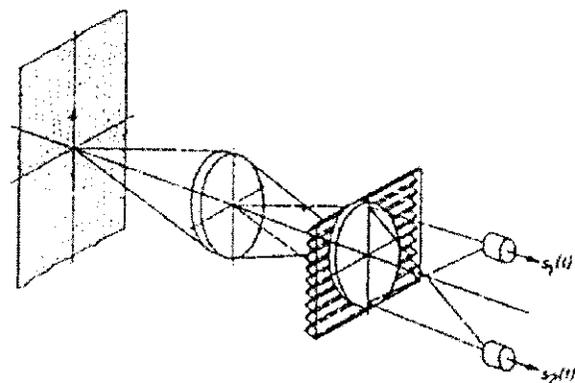


Рисунок 1. Двухтактное расположение двух фотоприемников.

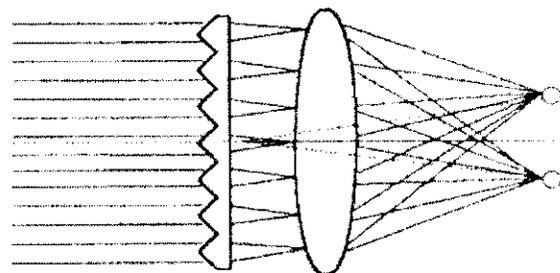


Рисунок 2. Схема формирования двух сигналов, сдвинутых по фазе на 180° .

Таким образом, из существующих методов измерения скорости наиболее простыми, с точки зрения принципа функционирования, являются навигационные измерители. Задача определения скорости в них решается посредством сбора и анализа оптической информации, заключенной в отраженном или излучаемом объектом потоке света. Они обладают гораздо более низкой стоимостью и конструктивной простотой по сравнению, например, с лазерными доплеровскими измерителями скорости.

Основная часть

Авторами проведены исследования по формированию оптических изображений протяженных объек-

тов при различных способах освещения. Рассмотрим оптическую схему в соответствии с рис. 3.

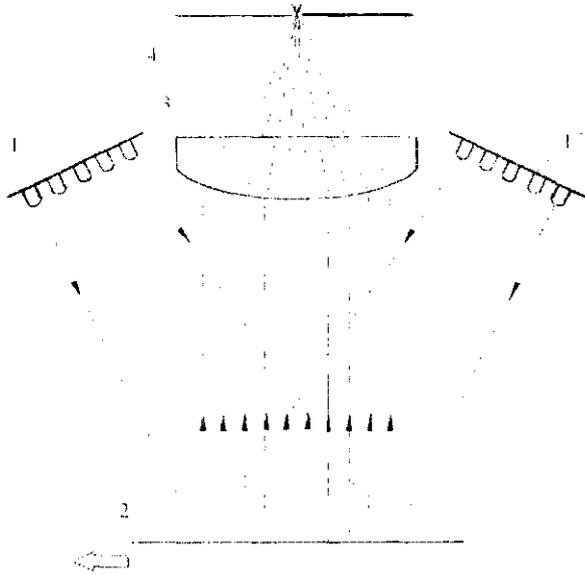


Рисунок 3. Схема формирования изображения поверхности объекта.

Если система сфокусирована, и на экране 4 сформировано изображение участка поверхности проволоки 2, освещенного некогерентным немонохроматическим источником 1, то в зависимости от оптического увеличения системы 3, ее разрешающей способности и мощности осветителя, на экране 4 будут различаться неоднородности, в общем случае стохастически распределенные по поверхности проволоки. Будем считать линзу тонкой с диаметром апертуры D и фокусным расстоянием f . Таким образом можно записать [6]:

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{m} - \frac{1}{f} = 0,$$

В этом случае линейное увеличение системы

$$\beta = m/l,$$

а диаметр кружка разрешения

$$d = 1,22\lambda l / D,$$

где λ - длина волны излучения осветителя.

Если осветитель представляет собой источник лазерного (когерентного и монохроматического) излучения, и его луч направлен под углом к исследуемой поверхности, то выходная апертура линзы становится источником спеклов [7], средние размеры которых определяются следующим соотношением:

$$\varepsilon_{\perp} \approx 3\lambda m / D.$$

Как следует из выражения (1), спеклы увеличиваются при уменьшении разрешения оптической системы (рис. 4). Таким образом, в случае, если поверхность проволоки не отполирована до размеров шероховатостей порядка 0,1 длины волны (0,063 мкм) и менее, наблюдаются спеклы. Причем наиболее яркие пятнистые структуры возникают, когда характерный размер неоднородностей сравним с длиной волны источника света. На изображении спеклы локализованы вдоль поверхности проволоки, что хорошо видно при смешанном облучении объекта когерентным монохроматическим и некогерентным немонохроматическим излучением (рис. 5). Если привести проволоку в движение, то спекл-картина смещается вслед за поверхностью и задача определения скорости сводится к вычислению смещения посредством обработки последовательных кадров.

Спекл-картина чувствительна к изменениям угла освещения и угла между нормалью к поверхности анализа и оптической осью системы. К изменению спекл-картины приводит также дефокусировка системы. Чувствительность системы к дефокусировке определяется продольным размером спеклов, который, в свою очередь, зависит от входной апертуры линзы и расстояния до экрана:

$$\varepsilon_{\parallel} \approx 8\lambda m^2 / D^2.$$

При изменениях m порядка $0,5\varepsilon_{\parallel}$, между картинками будет существовать некая корреляция. Для

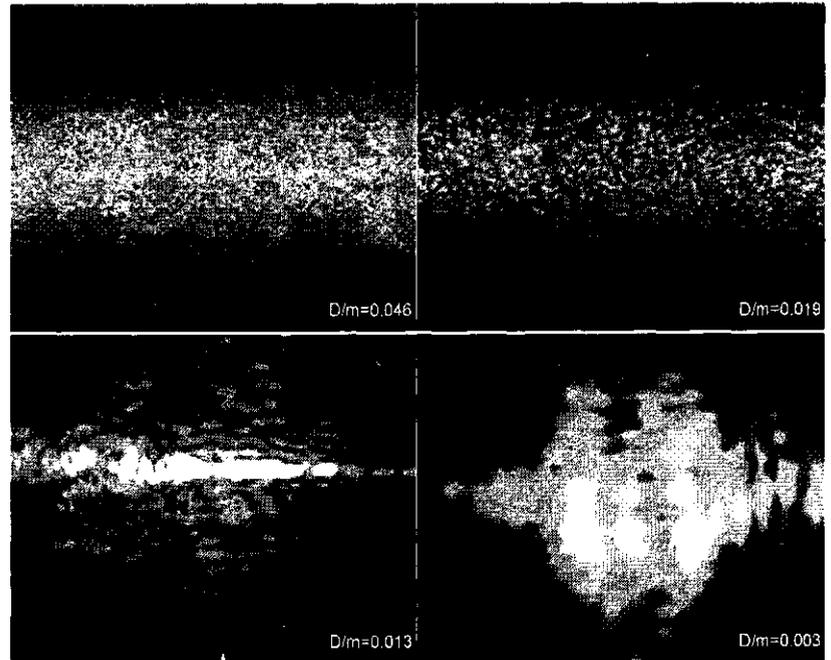


Рисунок 4. Спеклы, наблюдаемые в рассеянном проволокой когерентном излучении.

того, чтобы картина хорошо сохранялась, необходимо наложить более жесткое ограничение $\Delta m < 0,1\varepsilon_{\parallel}$.

(1)

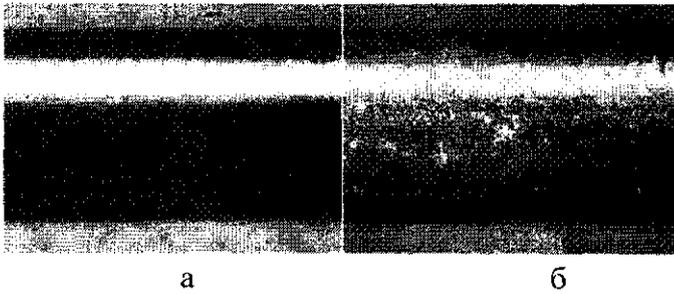


Рисунок 5. К пояснению пространственной локализации спеклов: а - некогерентное освещение, б - смешенное освещение.

На рисунке 6 приведена графическая зависимость допустимых сдвигов, в зависимости от диаметра апертуры линзы.

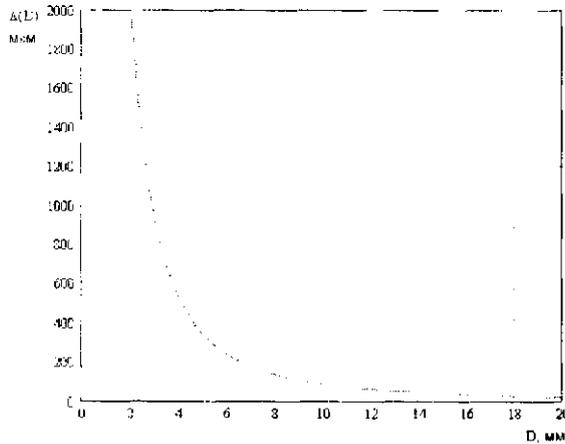


Рисунок 6. Зависимость величины допустимого изменения расстояния от объекта до линзы, не приводящего к заметному изменению спекл-картины.

Чувствительность системы к изменениям углов, под которыми поверхность освещается и анализируется, зависит от характера неоднородностей и обычно определяется экспериментально.

Введем определенные ограничения для упрощения дальнейших рассуждений и описания: проволока движется в заранее известном направлении; смещением проволоки в направлении перпендикулярном вектору скорости за время между моментами взятия двух последовательных кадров можно пренебречь; время экспозиции фоточувствительной матрицы t_e пренебрежимо мало по сравнению с интервалом времени между последовательными экспозициями.

Существует ряд методов вычисления смещения по двум кадрам [8]:

- дифференциальные методы первого порядка, включающие в себя метод наименьших квадратов, пространственно-временные энергетические модели, тензорные методы;

- дифференциальные методы второго порядка, включающие в себя прямой метод, многокритериальный метод наименьших квадратов; а также корреляционные, фазовые методы и др.

По сравнению с дифференциальными методами, которые исходят из непрерывности оптического потока, корреляционные методы не чувствительны к изменению яркости изображений. Последнее обстоятельство играет существенную, а часто определяющую роль, поскольку в результате вибраций, неравномерности освещения поверхности анализа, пульсаций тока в цепи питания осветителя и множества других факторов яркость двух последовательных кадров может меняться существенно. С другой стороны, корреляционные методы требуют серьезных вычислительных (временных) затрат.

Оценка взаимной корреляции для двумерного (одномерного) случая задается следующим образом [8]:

$$k(s) = \frac{\sum_x (g_1(x) - \bar{g}_1)(g_2(x-s) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_x (g_1(x) - \bar{g}_1)^2} \sqrt{\sum_x (g_2(x-s) - \bar{g}_2)^2}} \quad (2)$$

Максимум модуля функции взаимной корреляции определяет степень идентичности образов.

Каждый кадр представляет собой массив пикселей размером $W \times H$, где W, H - количество пикселей по горизонтали и вертикали, соответственно. Обозначим матрицы соответствующие следующим друг за другом кадрам через g^1, g^2 . Выберем в качестве эталона область g^1 с индексами (координатами) $x \dots (x+w-1), y \dots (y+h-1)$, где w и h задают размеры эталона, а x, y - его положение. Будем сравнивать эталон с областью g^2 с координатами $(x+sx) \dots (x+sx+w-1), (y+sy) \dots (y+sy+h-1)$, где sx, sy - смещение области g^2 относительно аналогичной области g^1 , считая, что изображение движется в сторону увеличения индексов. Положим очевидные ограничения на значения введенных переменных:

$$\begin{aligned} 0 \leq w \leq W & ; & 0 \leq x \leq W-w & ; & x \leq sx \leq W-w \\ 0 \leq h \leq H & ; & 0 \leq y \leq H-h & ; & y \leq sy \leq H-h \end{aligned}$$

Тогда (2) запишется следующим образом:

$$k(sx, sy) = \frac{\sum_{j=y}^{y+h-1} \sum_{i=x}^{x+w-1} (g_{i,j}^1 - \bar{g}^1)(g_{j+sy, i+sx}^2 - \bar{g}^2)}{\sqrt{\sum_{j=y}^{y+h-1} \sum_{i=x}^{x+w-1} (g_{i,j}^1 - \bar{g}^1)^2} \sqrt{\sum_{j=y}^{y+h-1} \sum_{i=x}^{x+w-1} (g_{j+sy, i+sx}^2 - \bar{g}^2)^2}}$$

В качестве оценки математического ожидания здесь используются средние арифметические значения:

$$\bar{g}^1 = \frac{1}{W \cdot H} \sum_{j=0}^{H-1} \sum_{i=0}^{W-1} g_{i,j}^1, \quad \bar{g}^2 = \frac{1}{W \cdot H} \sum_{j=0}^{H-1} \sum_{i=0}^{W-1} g_{i,j}^2 \quad (3)$$

Значения s_x, s_y , соответствующие максимуму функции $k(s_x, s_y)$, определяют смещение объекта. Для случая одномерного смещения вдоль координаты x , значение переменной s_y следует положить равным нулю. Зная характерный размер пикселя dp , оптическое увеличение системы β и интервал времени между последовательными экспозициями t_k , можно получить реальное смещение объекта в предметной плоскости s и скорость v :

$$s = \frac{s_x \cdot dp}{\beta}; \quad v = \frac{s}{t_k} = \frac{s_x \cdot dp}{\beta \cdot t_k} \quad (4)$$

Как видно из соотношений (3-4), требуются высокие вычислительные затраты, поэтому на практике и в цифровой обработке сигналов в качестве оценки взаимной корреляции используют выражения типа:

$$k(s_x, s_y) = \frac{1}{w \cdot h} \sum_{j=y}^{y+h-1} \sum_{i=x}^{x+w-1} g_{j,i}^1 g_{j+y, i+x}^2,$$

которое при использовании в качестве сенсора фоточувствительной линейки преобразуется к виду:

$$k(s_x) = \frac{1}{w} \sum_{i=x}^{x+w-1} g_{y,i}^1 g_{y,i+s_x}^2.$$

В последнем случае матрицы g^1, g^2 вырождаются в линии анализа, и существенно снижаются вычислительные затраты.

В зависимости от характера спекл-картины, оптических характеристик системы требуется различная длина эталона. Максимальное смещение, которое позволяет фиксировать прибор, составляет $W - w$, а минимальное соответствует размеру одного пикселя dp . Время между фиксацией двух последовательных кадров t_k определяет частоту следования кадров f_{ps} . Тогда максимальное и минимальное измеряемые значения скорости определяются следующим образом:

$$v_{\max} = \frac{(W - w) \cdot dp}{\beta} f_{ps}, \quad v_{\min} = \frac{dp}{\beta} f_{ps} \quad (5)$$

Из выражений (5) видно, что с ростом частоты фиксации кадров, растут и максимальные и минимальные измеряемые значения скорости, однако, если понижение частоты следования кадров не представляет больших трудностей и лишь увеличивает время измерения, то наращивание последней может быть существенно ограничено аппаратными и программными возможностями измерительной системы. На рисунке 7 приведена графическая зависимость v_{\max} и v_{\min} от f_{ps} для значений $dp = 14,8 \mu\text{м}$, $W = 320$, $w = 80$ и $\beta = 6,82$ (выбранные значения соответствуют параметрам измерительного стенда).

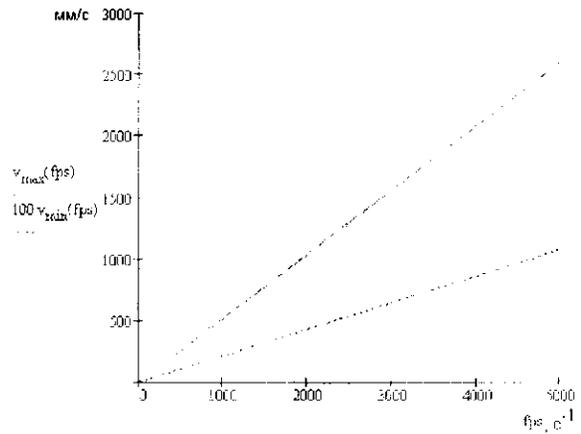


Рисунок 7. Зависимость $v_{\max}, 100v_{\min}$ от f_{ps} .

Выводы

Таким образом, в статье проведен анализ перспективных способов измерения скорости перемещения различных объектов, проанализированы изображения объекта при различных условиях освещения, разработан спекл-навигационный способ контроля скорости движения протяженного объекта, включающий вычисление корреляционной функции при покадровой фиксации изображений спеклов поверхности протяженного объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Звенигородский Э.Г., Каминский Ю.Д., Проскурнев С.Ю., Рогов П.В., Родина В.К. Лазерные и оптические измерители скорости и длины // Датчики и Системы, №7, 2003. - С. 2-7.
2. Каминский Ю.Д., Проскурнев С.Ю., Мартынова В.И., Рогов П.В. Пат. RU №2124732 С1 МПК⁶ G01P 3/36 / Двухканальный оптический измеритель скорости - № 97110754/28; заявл. 26.06.1997; опубл. Бюллетень «Изобретения. Полезные модели», №3, 10.01.1999.
3. Каминский Ю.Д. и др. Пат. RU №2160450 С1 МПК⁶ G01P 3/36 / Оптический измеритель скорости, длины и направления движения - №99121015/28.; заявл. 06.10.1999; опубл. Бюллетень «Изобретения. Полезные модели», №9, 10.12.2000.
4. Соболев В.С., Щербаченко А.М. Пат. RU №2144194 С1 МПК⁷ G01P 3/36 / Лазерный доплеровский измеритель скорости = №98104206/28; заявл. 10.03.1998; опубл. Бюллетень «Изобретения. Полезные модели», №1, 10.01.2000.
5. Huhnke, B. Exakt definierte Anrengungsfunktion mit dem CORRSYS- Meblenkrad als Voraussetzung für fahrtdy-namische Messungen, ATZ- №9, 1994.- S.25-34.
6. Борн М., Вольф Е. Основы оптики. - М., 1973.- 423с.
7. М. Франсон. Оптика спеклов / Пер. с франц. под ред. проф. Ю.И. Островского. М.: Мир, 1980. - 382с.
8. Булашев С.В. Статистика для трейдеров. - М.: Компания Спутник+, 2003. - 98 с.