

Oleg Vyacheslavovich AGEEV<sup>1)</sup>, Anatoliy Evgenevich ERYVANOV<sup>1)</sup>, Mikhail Aleksandrovich PADALKO<sup>2)</sup>,  
Konstantin Viktorovich BABARYKIN<sup>1)</sup>, Yuriy Adgamovich FATYKHOV<sup>1)</sup>,  
Vladimir Naumovich ERLIKHMAN<sup>1)</sup>, Natalya Vladimirovna SAMOYLOVA<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Department of food and refrigerating machines, Kaliningrad State Technical University

<sup>2)</sup> Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies, Immanuel Kant Baltic Federal University

## Математическое моделирование сигналов при активной лазерной локации пищевых продуктов круглой формы

### Аннотация

Показана актуальность применения активной лазерной локации для измерения геометрических параметров пищевых продуктов. Рассмотрены режимы лазерной локации продукта круглой формы при круговом сканировании подсвечивающего элемента. Поставлена задача математического моделирования локационных сигналов. Выведены основные соотношения и получена математическая модель, описывающая отраженный световой поток в функции скорости движения объекта, частоты сканирования, радиуса зоны сканирования и радиуса подсвечивающего элемента. Численным методом исследованы зависимости отраженного светового потока от времени при различных скоростях движения измеряемого объекта круглой формы, различных радиусах подсвечивающего элемента и различных частотах кругового сканирования. Установлено, что точность измерения геометрических параметров продукта находится в прямой зависимости от режимных параметров локации и определяется соотношениями скорости движения объекта, размера подсвечивающего элемента и частоты кругового сканирования. Рекомендовано увеличивать частоту кругового сканирования и уменьшать размер подсвечивающего элемента для повышения точности измерений, что позволяет компенсировать потери и искажения сигнала, связанные с перемещением объекта в зоне сканирования. В дальнейших исследованиях предполагается учесть, что светимость в пределах подсвечивающего элемента распределена по нормальному закону.

**Ключевые слова:** лазер, локация, сканирование, подсвечивающий элемент, светимость, световой поток, продукт, модель

## Mathematical modeling of signals with active laser detection of food products of round shape

### Summary

The relevance of the using active laser location for measuring of the geometric parameters of food products is shown. The modes of laser detection of the product of a circular shape are examined with a circular scanning of the illuminating element. The problem of mathematical modeling of location signals was posed. The basic relationships are derived and a mathematical model describing the reflected light flux as a function of the object's speed, the scanning frequency, the radius of the scanning zone and the radius of the illuminating element is obtained. The dependence of the reflected light flux on time at different speeds of the measured object of circular shape, different radii of the illuminating element and various frequencies of circular scanning was studied numerically. It is established that the accuracy of measuring the geometric parameters of the product depends on the regime parameters of the location and is determined by the ratio of the speed of movement of the object, the size of the illuminating element and the frequency of circular scanning. It is recommended to increase the frequency of circular scanning and reduce the size of the illuminating element to improve the accuracy of measurements, which allows to compensate losses and signal distortions associated with moving the object in the scanning area. In further studies it is assumed that the luminosity within the illuminating element is distributed according to the normal law.

**Key words:** laser, laser detection, scanning, illuminating element, luminosity, light flux, product, model

## Modelowanie matematyczne sygnałów z czynną laserową detekcją produktów spożywczych o kolistym kształcie

### Streszczenie

Poniższa praca przedstawia możliwości zastosowania czynnej detekcji laserowej do mierzenia geometrycznych parametrów artykułów spożywczych. Przeanalizowano modele laserowego określania kolistego kształtu obiektu z zastosowaniem kolistego elementu oświetlającego. Omówiono zagadnienie modelowania matematycznego sygnałów lokalizacji. Wyprowadzono zależności oraz zbudowano model matematyczny przedstawiający odbity strumień światła, jako funkcję prędkości przedmiotu, częstotliwości skanowania, promienia strefy skanowania i promienia elementu oświetlającego. Z wykorzystaniem metod numerycznych przeanalizowano zależności pomiędzy strumieniem odbitego światła a czasem przy różnych prędkościach mierzonego kolistego przedmiotu, różnych promieniach elementu oświetlającego oraz różnych częstotliwościach skanowania. Ustalono, że dokładność pomiarów parametrów geometrycznych przedmiotu zależy od parametrów lokalizacji, tj. stosunek prędkości ruchu przedmiotu, wielkości elementu oświetlającego i częstotliwości skanowania. Zaleca się by zwiększać częstość skanowania a zmniejszać wielkość elementu oświetlającego, pozwala to na zrekomensowanie strat i zniekształceń sygnału wynikających z ruchu obiektu w obszarze skanowania. Przyjmuje się także, że jaskrawość elementu oświetlającego jest zgodna z rozkładem normalnym.

**Słowa kluczowe:** laser, detekcja laserowa, skanowanie, oświetlanie obiektów, jaskrawość, pulsacja światła, produkt, model

$A$ – точка пересечения границы подсвечивающего элемента и границы измеряемого объекта;	$k$ – коэффициент аналого-цифрового преобразования;
$B$ – точка пересечения границы подсвечивающего элемента и границы измеряемого объекта;	$l$ – расстояние между центром подсвечивающего элемента и центром измеряемого объекта;
$B(x,y)$ – функция распределения яркости в подсвечивающем элементе;	$r_1$ – радиус подсвечивающего элемента;
$D$ – половина области, образованной пересечением подсвечивающего элемента и измеряемого объекта;	$r_2$ – радиус измеряемого объекта;
$L$ – расстояние между центром измеряемого объекта и центром вращения подсвечивающего элемента в заданный момент времени;	$t$ – время движения объекта;
$L_0$ – расстояние между центром объекта и осью вращения подсвечивающего элемента в начальный момент времени;	$\angle \alpha$ – угол между полярной осью $OO'$ и отрезком $OA$ ;
$O$ – центр подсвечивающего элемента;	$\beta$ – угол между осью абсцисс и отрезком $O''O$ в заданный момент времени;
$O'$ – центр измеряемого объекта;	$\beta_0$ – угол между осью абсцисс и отрезком, соединяющим ось вращения подсвечивающего элемента и центр элемента в начальный момент времени;
$O''$ – центр вращения подсвечивающего элемента;	$v$ – скорость движения измеряемого объекта;
$R$ – радиус зоны сканирования подсвечивающего элемента	$\omega$ – частота кругового сканирования;
$U_c$ – мгновенное значение локационного сигнала;	$\Phi$ – отражённый от объекта световой поток;

### Wведение

Значительные достижения квантовой электроники позволяют разрабатывать оптико-электронные модули для сбора данных на основе средств активной лазерной локации. При этом реализуются следующие функции: автоматическое измерение параметров продукции прямым методом; сбор данных для активного контроля технологического процесса; обеспечение точности настройки рабочих органов оборудования; повышение качества обработки сырья; экономия ценных пищевых ресурсов.

Применение лазера в качестве источника света позволяет получить световое пятно (подсвечивающий элемент) малого диаметра и тем самым исследовать весьма малые участки и тонкие структуры. Техническая реализация активного лазерного локатора, основанного на

фотометрическом методе, состоит в том, что исследуемый объект подсвечивается узким лучом лазера. Луч с помощью оптической системы формируется в пятно малого диаметра, которое линейно перемещается вдоль поверхности объекта, а объект перемещается относительно луча лазера. Фотоприемник облучается отраженным от объекта световым потоком, причем сила фототока определяется облученностью приемного зрчка.

Информация, которую заключают в себе локационные сигналы, содержит данные о геометрических параметрах измеряемого продукта. Для надежного выделения полезного сигнала из помех требуется, чтобы сигнал обладал признаками, существенно отличающимися от признаков помех.

Электрические сигналы в активной системе лазерной локации возникают в результате модуляции отраженного

светового потока при переходе подсвечивающего элемента с фона на поверхность объекта. При этом фон обладает минимальной отражающей способностью, а на объекте отраженный световой поток существенно увеличивается. Для исследования формы и параметров сигналов, а также для определения условий, при которых надежно измеряются геометрические параметры объекта, требуются математические модели локационных сигналов.

Наиболее удобным средством математического описания локационных сигналов являются двойные интегралы от функции распределения яркости в области подсвечивающего элемента. Формирование сигнала при таком подходе является результатом изменения границ и областей интегрирования, образующихся при пересечении движущегося подсвечивающего элемента с подвижным объектом.

### Постановка задачи математического моделирования локационных сигналов

Пусть пищевой продукт (объект) для определенности имеет круглую форму и перемещается под лазерным локатором прямолинейно с постоянной скоростью. Подсвечивающий элемент представляет собой световое пятно, которое имеет форму круга. Установим, что отражающие свойства фона и объекта одинаковы во всех точках, а коэффициенты отражения фона и объекта равны 0 и 1 соответственно. Положим, что светимость внутри подсвечивающего элемента распределена равномерно, при этом локационный сигнал в фотоприемнике формируется отраженным световым потоком. Начало координат в любой момент времени совпадает с центром подсвечивающего элемента.

Из вышеизложенного следует, что минимум сигнала имеет место при расположении подсвечивающего элемента вне объекта, когда отраженный световой поток достигает минимального значения. Максимум сигнала соответствует полному расположению подсвечивающего элемента на объекте. Таким образом, при измерении мгновенного значения локационного сигнала задача состоит в определении площади участка подсвечивающего элемента, наложенного на объект:

$$U_c = k \cdot \Phi, \quad (1)$$

где  $U_c$  – мгновенное значение локационного сигнала,  $B$ ;  $\phi$  – отраженный от объекта световой поток, лм;  $k$  – коэффициент аналого-цифрового преобразования, В/лм.

### Вывод основных соотношений

Рассмотрим режим кругового сканирования подсвечивающего элемента, при котором элемент вращается вокруг неподвижного центра с постоянной угловой скоростью. При круговом сканировании

возможны четыре основных случая взаимного расположения подсвечивающего элемента и объекта.

1 случай. Наложение подсвечивающего элемента на объект отсутствует (рис. 1).

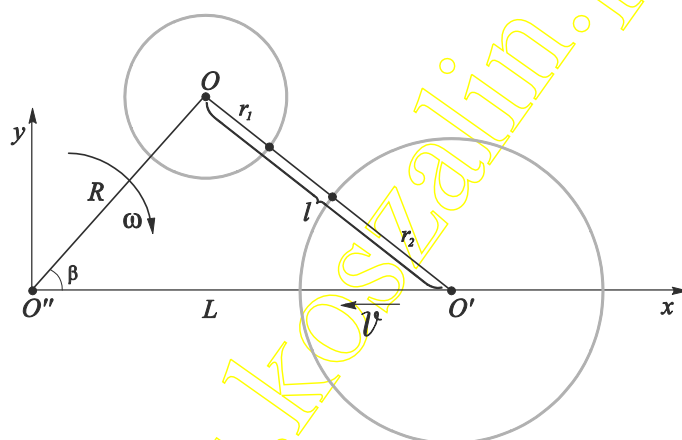


Рис. 1. Схема лазерной локации объекта (первый случай)

Fig. 1. Scheme of laser location of the object (first case)

Rys. 1. Schemat detekcji laserowej obiektu (pierwszy przypadek)

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $O''$  – центр вращения подсвечивающего элемента;  $R$  – радиус зоны сканирования подсвечивающего элемента;  $\beta$  – угол между осью абсцисс и отрезком  $O''O$  в заданный момент времени  $t$ ;  $\omega$  – частота кругового сканирования;  $L$  – расстояние между центром измеряемого объекта и центром вращения подсвечивающего элемента в заданный момент времени  $t$ ;  $O$  – центр подсвечивающего элемента;  $r_1$  – радиус подсвечивающего элемента;  $r_2$  – радиус измеряемого объекта;  $l$  – расстояние между центром подсвечивающего элемента и центром измеряемого объекта;  $O'$  – центр измеряемого объекта;  $v$  – скорость движения измеряемого объекта.

В первом случае выполняется следующее условие:

$$l > (r_1 + r_2). \quad (2)$$

В связи с этим отраженный световой поток определяется выражением:

$$\Phi_1 = \iint_D (2 \cdot B(x, y)) dx dy = 0, \quad (3)$$

Где  $D$  – половина области, образованной пересечением подсвечивающего элемента и измеряемого объекта;  $B(x, y)$  – функция распределения яркости в подсвечивающем элементе (функция распределения светимости подсвечивающего элемента).

2 случай. Подсвечивающий элемент частично накладывается на измеряемый объект (рис. 2).

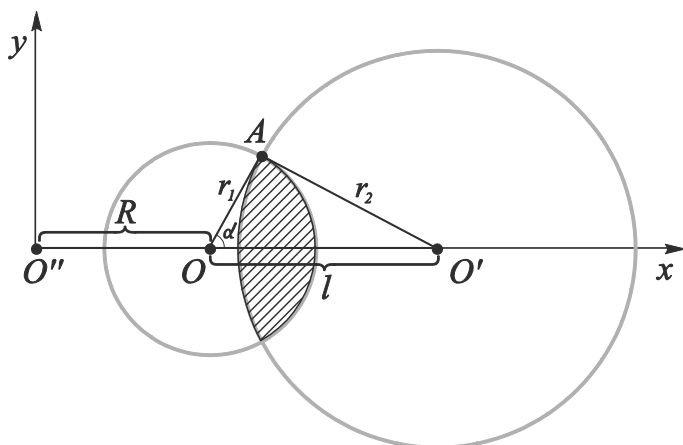


Рис. 2. Схема лазерной локации объекта (второй случай)

Fig. 2. Scheme of laser location of the object (second case)

Rys. 2. Schemat detekcji laserowej obiektu (dugi przypadek)

На рис. 2 приняты следующие обозначения: А – точка пересечения границы подсвечивающего элемента и границы измеряемого объекта;  $\angle \alpha$  – угол между полярной осью  $OO'$  и отрезком  $OA$ . В втором случае выполняется следующее условие:

$$r_2 < l \leq (r_1 + r_2). \quad (4)$$

Согласно теореме косинусов:

$$\begin{aligned} r_1^2 - 2 \cdot l \cdot r_1 \cdot \cos \alpha + l^2 &= r_2^2; \\ 2 \cdot l \cdot r_1 \cdot \cos \alpha &= r_1^2 + l^2 - r_2^2; \\ \alpha &= \arccos \left( \frac{r_1^2 + l^2 - r_2^2}{2 \cdot l \cdot r_1} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Введем систему полярных координат с началом отсчета в центре подсвечивающего элемента. Запишем в полярных координатах уравнение контура подсвечивающего элемента и уравнение распределения яркости в подсвечивающем элементе:

$$r(\varphi) = r_1, \quad (6)$$

$$B(r, \varphi) = B_0. \quad (7)$$

Выполним преобразования в уравнении контура объекта:

$$\begin{aligned} r^2 - 2 \cdot r \cdot l \cdot \cos \alpha + l^2 &= r_2^2; \\ r^2 - 2 \cdot r \cdot l \cdot \cos \alpha + l^2 + l^2 \cdot \cos^2 \varphi &= r_2^2 + l^2 \cdot \cos^2 \varphi; \\ (r - l \cdot \cos \varphi)^2 &= r_2^2 + l^2 \cdot \cos^2 \varphi - l^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (r - l \cdot \cos \varphi)^2 &= r_2^2 + l^2 \cdot (\cos^2 \varphi - 1); \\ (r - l \cdot \cos \varphi)^2 &= r_2^2 - l^2 \cdot \sin^2 \varphi; \\ r &= \sqrt{r_2^2 - l^2 \cdot \sin^2 \varphi} + l \cdot \cos \varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Отраженный световой поток в этом случае определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= 2 \cdot \iint_D (B(r, \varphi) \cdot r) dr d\varphi = 2 \cdot \left( \int_0^\alpha d\varphi \int_0^{r_1} (B(r, \varphi) \cdot r) dr - \right. \\ &\quad \left. - \int_0^\alpha d\varphi \int_0^r (B(r, \varphi) \cdot r) dr + \int_0^\alpha d\varphi \int_r^{r_1} (B(r, \varphi) \cdot r) dr \right). \end{aligned} \quad (9)$$

3 случай. Подсвечивающий элемент частично накладывается на объект таким образом, что центр подсвечивающего элемента находится в пределах контура объекта (рис. 3).

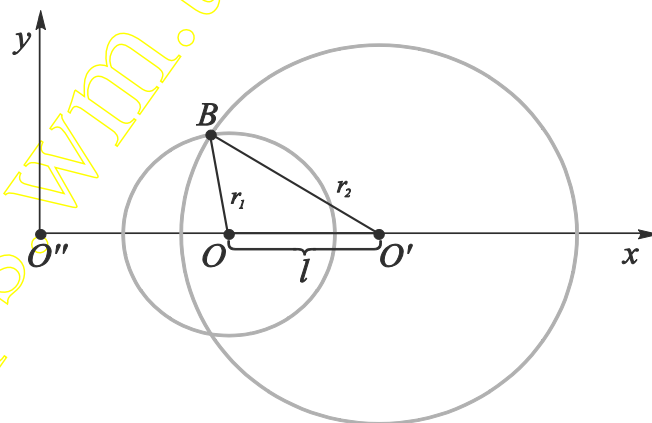


Рис. 3. Схема лазерной локации объекта (третий случай)

Fig. 3. Scheme of laser location of the object (third case)

Rys. 3. Schemat detekcji laserowej obiektu (trzeci przypadek)

На рис. 3 приняты следующие обозначения: В – точка пересечения границы подсвечивающего элемента и границы измеряемого объекта. При этом выполняется следующее условие:

$$(r_2 - r_1) < l \leq r_2. \quad (10)$$

С учетом (3) и (5)-(7), в этом случае отраженный световой поток определяется выражением:

$$\Phi_3 = 2 \cdot \int_0^\alpha d\varphi \int_0^{r_1} (B(r, \varphi) \cdot r) dr + 2 \cdot \int_\alpha^\pi d\varphi \int_0^r (B(r, \varphi) \cdot r) dr. \quad (11)$$

4 случай. Подсвечивающий элемент полностью накладывается на объект. Выполняется следующее условие:

$$l < (r_2 - r_1). \quad (12)$$

$$\beta = \beta_0 - \omega \cdot t, \quad (15)$$

В этом случае отраженный световой поток определяется выражением:

$$\Phi_4 = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_1} (B(r, \varphi) \cdot r) dr. \quad (13)$$

Для учета прямолинейного равномерного движения объекта определим расстояние между центром объекта и центром вращения подсвечивающего элемента (рис. 1):

$$L = L_0 - v \cdot t, \quad (14)$$

Где  $v$  – скорость движения объекта;  $L_0$  – расстояние между центром объекта и осью вращения подсвечивающего элемента в начальный момент времени  $t=0$ ;  $t$  – время движения объекта.

Угол между осью абсцисс и отрезком, соединяющим ось вращения подсвечивающего элемента и центр элемента:

где  $\beta_0$  – угол между осью абсцисс и отрезком, соединяющим ось вращения подсвечивающего элемента и центр элемента в момент времени  $t=0$ ;  $\omega$  – частота кругового сканирования;  $t$  – время движения объекта.

Введем дополнительную систему координат с центром отсчета в точке  $O''$  Полярные координаты центра подсвечивающего элемента относительно оси кругового сканирования:

$$x = R \cdot \cos(\beta_0 - \omega \cdot t); \quad (16)$$

$$y = R \cdot \sin(\beta_0 - \omega \cdot t). \quad (17)$$

С учетом (14)-(17) расстояние между центром подсвечивающего элемента и центром объекта определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{(x_{O_1} - x_{O_2})^2 + (y_{O_1} - y_{O_2})^2} = \\ &= \sqrt{(R \cdot \cos(\beta_0 - \omega \cdot t) - L)^2 + (R \cdot \sin(\beta_0 - \omega \cdot t))^2} = \\ &= \sqrt{R^2 \cdot \cos^2(\beta_0 - \omega \cdot t) - 2 \cdot R \cdot L \cdot \cos(\beta_0 - \omega \cdot t) + L^2 + R^2 \cdot \sin^2(\beta_0 - \omega \cdot t)} = \\ &= \sqrt{R^2 + L^2 - 2 \cdot R \cdot L \cdot \cos(\beta_0 - \omega \cdot t)} = \\ &= \sqrt{R^2 + (L_0 - v \cdot t)^2 - 2 \cdot R \cdot (L_0 - v \cdot t) \cdot \cos(\beta_0 - \omega \cdot t)} \end{aligned} \quad (18)$$

Подставив выражение (18) в выражения (9) и (11), получим математическую модель лазерной локации продукта круглой формы с учетом движения объекта в следующем виде:

$$\Phi = \begin{cases} \Phi_1 = \iint_D 2 \cdot (B(r, \varphi) \cdot r) dr d\varphi = 0, l > (r_1 + r_2); \\ \Phi_2 = 2 \cdot \left( \int_0^M d\varphi \int_0^{r_1} (B(r, \varphi) \cdot r) dr - \int_0^M d\varphi \int_0^N (B(r, \varphi) \cdot r) dr + \int_0^M d\varphi \int_N^{r_1} (B(r, \varphi) \cdot r) dr \right), r_2 < l \leq (r_1 + r_2); \\ \Phi_3 = 2 \cdot \int_0^M d\varphi \int_0^{r_1} (B(r, \varphi) \cdot r) dr + 2 \cdot \int_M^{\pi} d\varphi \int_0^N (B(r, \varphi) \cdot r) dr, (r_2 - r_1) < l \leq r_2; \\ \Phi_4 = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_1} (B(r, \varphi) \cdot r) dr, l > (r_2 - r_1), \end{cases} \quad (19)$$

где :

$$\begin{aligned} M &= \arccos \left( \frac{r_1^2 + \left( \sqrt{R^2 + (L_0 - v \cdot t)^2 - 2 \cdot R \cdot (L_0 - v \cdot t) \cdot \cos(\beta_0 - \omega \cdot t)} \right)^2 - r_2^2}{2 \cdot r_1 \cdot \left( \sqrt{R^2 + (L_0 - v \cdot t)^2 - 2 \cdot R \cdot (L_0 - v \cdot t) \cdot \cos(\beta_0 - \omega \cdot t)} \right)} \right); \\ N &= \sqrt{r_2^2 - \left( \sqrt{R^2 + (L_0 - v \cdot t)^2 - 2 \cdot R \cdot (L_0 - v \cdot t) \cdot \cos(\beta_0 - \omega \cdot t)} \right)^2} \cdot \sin^2 \varphi + \\ &+ \left( \sqrt{R^2 + (L_0 - v \cdot t)^2 - 2 \cdot R \cdot (L_0 - v \cdot t) \cdot \cos(\beta_0 - \omega \cdot t)} \right) \cdot \cos \varphi. \end{aligned}$$

Система (19) является математической моделью локационного сигнала в функции скорости движения объекта, частоты сканирования, радиуса зоны сканирования и радиуса подсвечивающего элемента.

#### Численное моделирование локационных сигналов

Для оценки влияния режимных параметров на процесс лазерной локации необходимо численным методом

исследовать модель (19), описывающую форму локационных сигналов в режиме кругового сканирования. Для этого аналитически решены интегралы в модели (19). Для определенности положим распределение лазерного излучения в подсвечивающем элементе (светимость подсвечивающего элемента) в следующем виде:  $B(r,\varphi)=B_0=\text{const}$ . В этом случае имеем:

$$\Phi_2 = 2 \cdot B_0 \cdot (I_1 + I_2 + I_3), \quad (20)$$

$$\text{где } I_1 = \int_0^\alpha d\varphi \int_0^r r dr = \frac{1}{2} \int_0^\alpha (r_1^2) d\varphi = \frac{r_1^2 \cdot \alpha}{2};$$

$$I_2 = \int_0^\alpha d\varphi \int_0^r r dr = \frac{1}{2} \cdot \int_0^\alpha \left( \sqrt{r_2^2 - l^2 \cdot \sin^2 \varphi} + l \cdot \cos \varphi \right)^2 d\varphi =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \int_0^\alpha \left( r_2^2 - l^2 \cdot \sin^2 \varphi + 2 \cdot l \cdot \cos \varphi \sqrt{r_2^2 - l^2 \cdot \sin^2 \varphi} + l^2 \cdot \cos^2 \varphi \right) d\varphi =$$

$$= \frac{1}{2} \left( r_2^2 \cdot \alpha - \frac{l^2 \cdot \cos 2\alpha}{2} + l \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{r_2^2 - l^2 \cdot \sin^2 \alpha} + r_2^2 \cdot \arcsin \left( \frac{l \cdot \sin \alpha}{r_2} \right) \right);$$

$$I_3 = \frac{1}{2} \cdot \left( (r_1^2 - r_2^2) \cdot \alpha - \frac{l^2 \cdot \cos 2\alpha}{2} + l \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{r_2^2 - l^2 \cdot \sin^2 \alpha} + r_2^2 \cdot \arcsin \left( \frac{l \cdot \sin \alpha}{r_2} \right) \right).$$

$$\Phi_3 = 2 \cdot B_0 \cdot \int_0^\alpha d\varphi \int_0^r r dr + 2 \cdot B_0 \cdot \int_\alpha^\pi d\varphi \int_0^r r dr = B_0 \cdot \left( \int_0^\alpha (r_1^2) d\varphi + \int_\alpha^\pi (r_2^2) d\varphi \right) =$$

$$= B_0 \cdot \left( r_1^2 \cdot \alpha + \int_\alpha^\pi \left( l \cdot \cos \varphi + \sqrt{r_2^2 - l^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right)^2 d\varphi \right) =$$

$$= B_0 \cdot \left( r_1^2 \cdot \alpha + r_2^2 \cdot (\pi - \alpha) - \frac{l^2}{2} \cdot \sin 2\alpha - I_4 \right), \quad (21)$$

$$\text{где } I_4 = l \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{r_2^2 - l^2 \cdot \sin^2 \alpha} + r_2^2 \cdot \arcsin \left( \frac{l \cdot \sin \alpha}{r_2} \right).$$

$$\Phi_4 = B_0 \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^r r dr = B_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \int_0^{2\pi} (r_1^2) d\varphi = B_0 \cdot \pi \cdot r_1^2. \quad (22)$$

На рис. 4-6 приведены зависимости отраженного светового потока от времени при трех различных скоростях движения измеряемого объекта круглой формы ( $r_1=10$  мм;  $\omega$  0,05·π радиан/с).

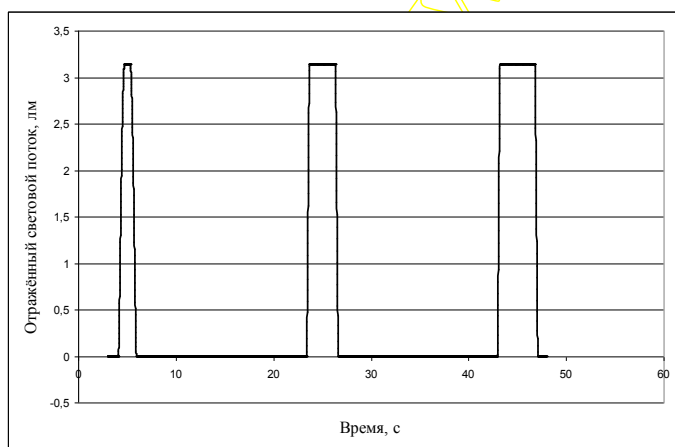


Рис. 4. Локационный сигнал при скорости объекта  $v = 2,5$  мм/с

Fig. 4. The locating signal at object speed  $v = 2.5$  mm/s

Rys. 4. Sygnał lokalizujący przy prędkości obiektu  $v = 2,5$  mm/s

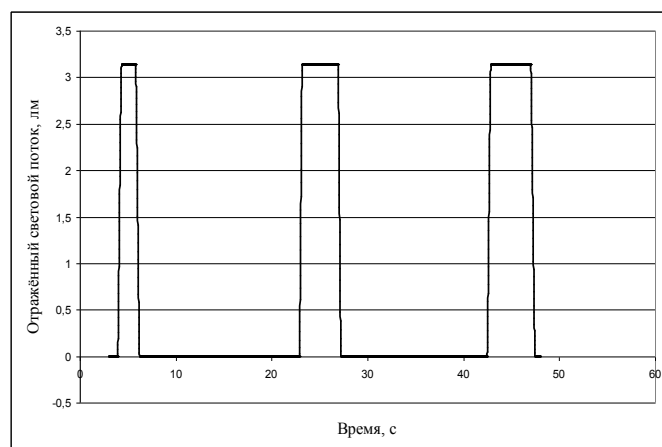


Рис. 5. Локационный сигнал при скорости объекта  $v = 5$  мм/с

Fig. 5. The locating signal at object speed  $v = 5$  mm/s

Rys. 5. Sygnał lokalizujący przy prędkości obiektu  $v = 5$  mm/s

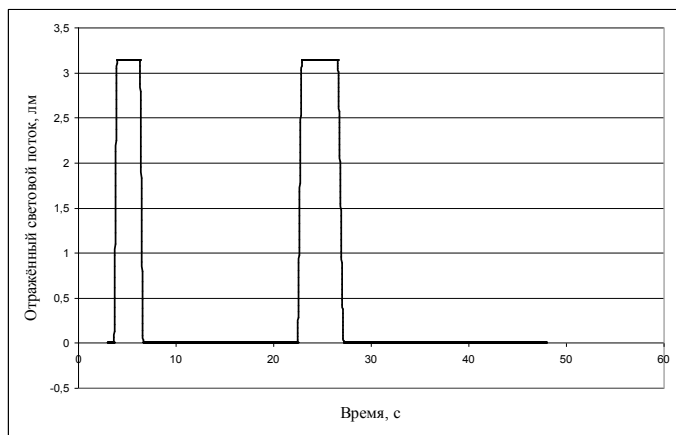


Рис. 6. Локационный сигнал при скорости объекта  $v = 10$  мм/с

Fig. 6. The locating signal at object speed  $v = 10$  mm/s

Rys. 6. Sygnał lokalizujący przy prędkości obiektu  $v = 10$  mm/s

На рис. 7-9 приведены зависимости отраженного светового потока от времени при трех различных радиусах подсвечивающего элемента ( $v = 5$  мм/с;  $\omega = 0,05 \cdot 2\pi$  радиан/с).

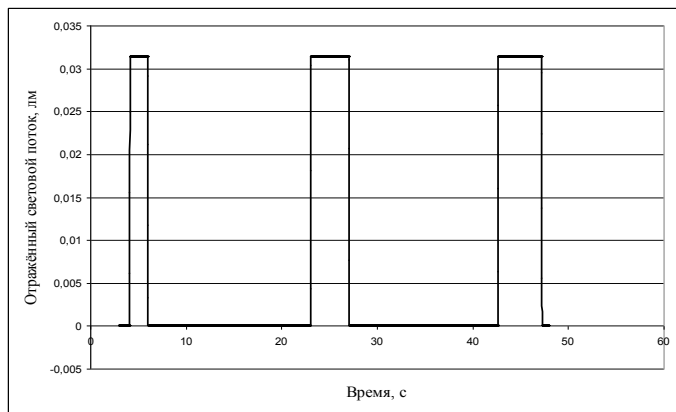


Рис. 7. Локационный сигнал при радиусе подсвечивающего элемента  $r_1 = 1$  мм

Fig. 7. The locating signal at the radius of the illumination element  $r_1 = 1$  mm

Rys. 7. Sygnał lokalizujący przy średnicy obiektu oświetlającego obiekt  $r_1 = 1$  mm

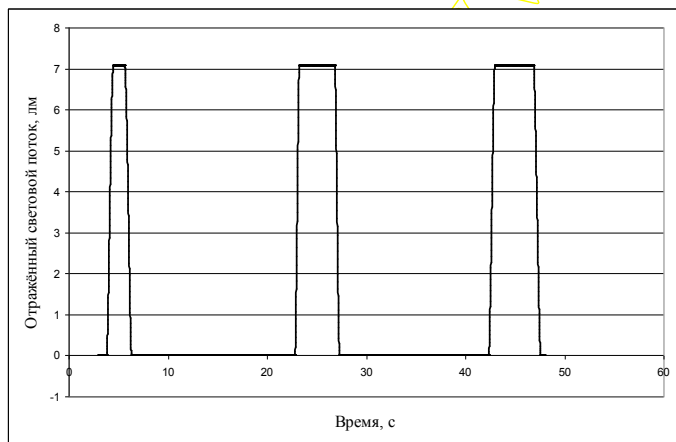


Рис. 8. Локационный сигнал при радиусе подсвечивающего элемента  $r_1 = 15$  мм

Fig. 8. The locating signal at the radius of the illumination element  $r_1 = 15$  mm

Rys. 8. Sygnał lokalizujący przy średnicy obiektu oświetlającego obiekt  $r_1 = 15$  mm

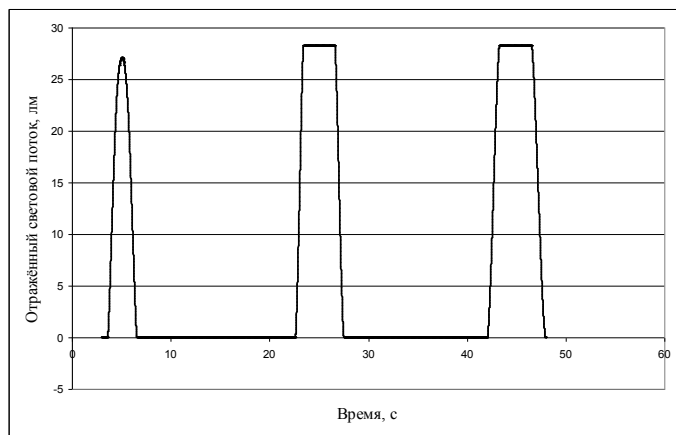


Рис. 9. Локационный сигнал при радиусе подсвечивающего элемента  $r_1 = 30$  мм

Fig. 9. The locating signal at the radius of the illumination element  $r_1 = 30$  mm

Rys. 9. Sygnał lokalizujący przy średnicy obiektu oświetlającego obiekt  $r_1 = 30$  mm

На рис. 10-12 приведены зависимости отраженного светового потока от времени при трех различных частотах кругового сканирования ( $r_1 = 10$  мм;  $v = 10$  мм/с).

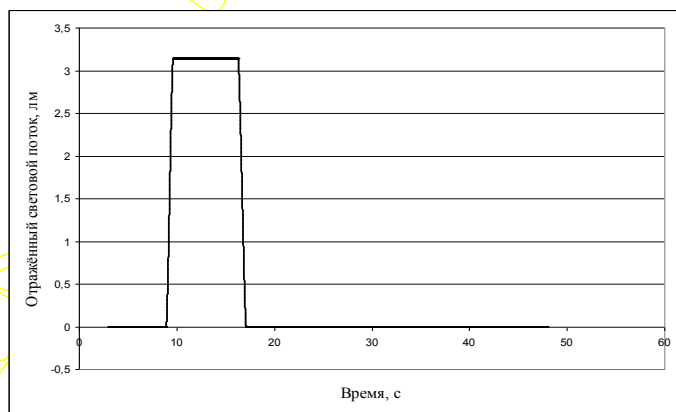


Рис. 10. Локационный сигнал при частоте сканирования  $\omega = 0,02 \cdot 2\pi$  радиан/с

Fig. 10. The locating signal at scanning frequency  $\omega = 0,02 \cdot 2\pi$  radian/s

Rys. 10. Sygnał lokalizujący przy częstotliwości  $\omega = 0,02 \cdot 2\pi$  rad/s

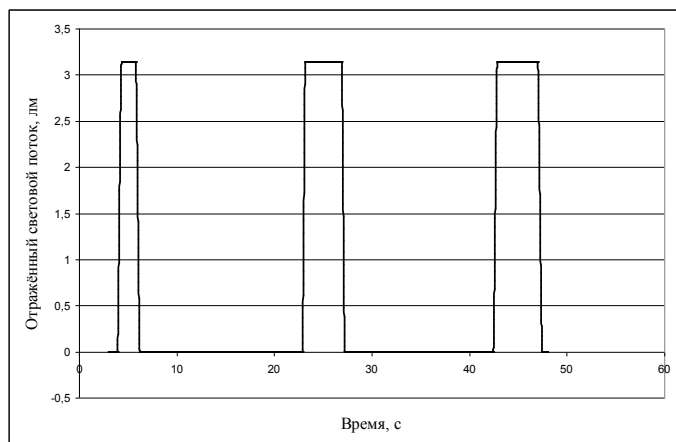


Рис. 11. Локационный сигнал при частоте сканирования  $\omega = 0,05 \cdot 2\pi$  радиан/с

Fig. 11. The locating signal at scanning frequency  $\omega = 0,05 \cdot 2\pi$  radian/s

Rys. 11. Sygnał lokalizujący przy częstotliwości  $\omega = 0,05 \cdot 2\pi$  rad/s

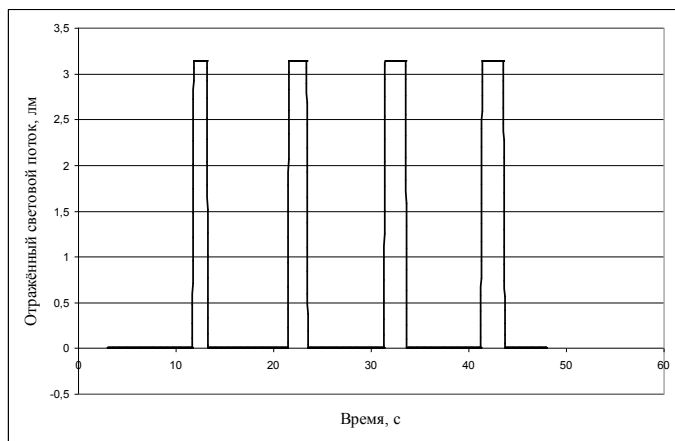
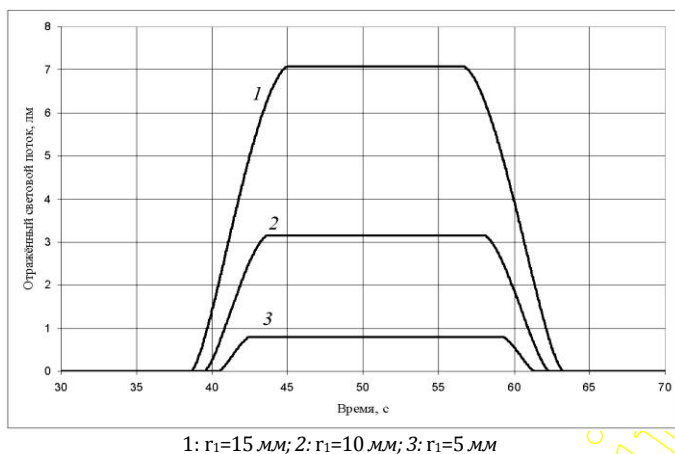


Рис. 12. Локационный сигнал при частоте сканирования  $\omega=0,1 \cdot 2\pi$  радиан/с

Fig. 12. The locating signal at scanning frequency  $\omega=0,1 \cdot 2\pi$  radian/s

Rys. 12. Sygnał lokalizujący przy częstotliwości  $\omega=0,1 \cdot 2\pi$  rad/s

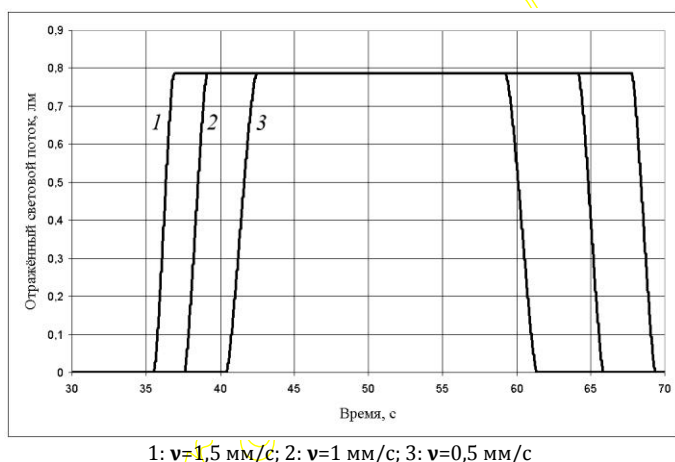


1:  $r_1=15$  мм; 2:  $r_1=10$  мм; 3:  $r_1=5$  мм

Рис. 13. Локационные сигналы при различных размерах подсвечивающего элемента.

Fig. 13. The locating signals for different sizes of the illuminating element

Rys. 13. Sygnał lokalizujący dla różnych promieni elementu oświetlającego



1:  $v=1,5$  мм/с; 2:  $v=1$  мм/с; 3:  $v=0,5$  мм/с

Рис. 14. Локационные сигналы при различной скорости движения объекта ( $r_1=5$  мм,  $\omega=0,05 \cdot 2\pi$  радиан/с)

Fig. 14. The locating signals at different speeds of the object ( $r_1=5$  мм,  $\omega=0,05 \cdot 2\pi$  rad/s)

Rys. 14. Sygnał lokalizujący przy różnych prędkościach obiektu ( $r_1=5$  мм,  $\omega=0,05 \cdot 2\pi$  rad/s)

На рис. 13 приведены зависимости отраженного светового потока от времени при различных размерах подсвечивающего элемента, координаты центра которого одинаковы для всех трех случаев.

На рис. 14 приведены зависимости отраженного светового потока от времени при различной скорости движения объекта и постоянном размере подсвечивающего элемента.

### Обсуждение результатов моделирования

Как видно из рис. 4-14, заметное влияние на форму локационного сигнала оказывают скорость движения объекта, размер подсвечивающего элемента и частота кругового сканирования.

При увеличении скорости движения объекта количество его пересечений с подсвечивающим элементом сокращается. Уровень локационных сигналов при этом не меняется. В связи с этим, происходят потери полезного сигнала, несущего информацию о геометрической форме объекта и его размерах. Следовательно, снижается точность измерения геометрических параметров объекта, что видно из рис. 14. Для компенсации этого явления необходимо снижать скорость перемещения объекта, что не всегда возможно, а также увеличивать частоту кругового сканирования.

При увеличении радиуса подсвечивающего элемента существенно возрастает отраженный световой поток, что повышает надежность локации объекта в условиях помех. Однако, как видно из рис. 13, это приводит к затратам электрической мощности лазерного источника и заметному снижению точности измерения геометрических параметров объекта. Кроме того, повышаются требования к классу безопасности лазерного прибора. Таким образом, требуются рациональные соотношения между светочувствительностью фотоприемника, мощностью лазерного источника и точностью измерения параметров объекта.

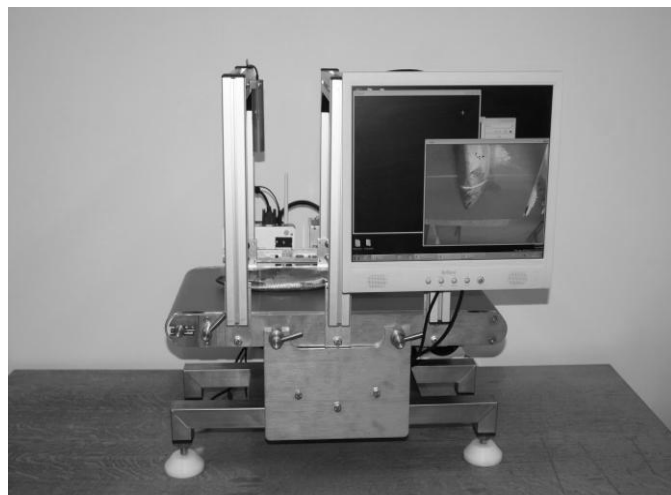


Рис. 15. Общий вид установки для лазерной локации пищевых продуктов

Fig. 15. View of the device for food products analysis

Rys. 15. Widok urządzenia do analizy produktów spożywczych



При увеличении частоты кругового сканирования заметно увеличивается количество пересечений объекта подсвечивающим элементом, в связи с чем возрастает точность измерения геометрических параметров. В локационном сигнале с ростом частоты сканирования содержится больше информации о форме объекта и его размерах.

Полученные модельные сигналы (рис. 4-14) очень близки по форме к реальным локационным сигналам в экспериментальной установке лазерной локации (рис. 15) в случае кругового сканирования.

## Заключение

Предложенная математическая модель локационных сигналов при круговом сканировании учитывает четыре различных случая взаимного расположения подсвечивающего элемента и объекта, в связи с чем отраженный световой поток описан кусочно-определенной функцией. При радиусе подсвечивающего элемента 15 мм, 10 мм, 5 мм обеспечивается отраженный световой поток 7,1 лм, 3,2 лм, 0,8 лм соответственно. При этом со снижением размера подсвечивающего элемента и уменьшением отраженного светового потока возрастает точность измерения геометрических параметров объекта. Это позволяет снизить мощность лазерного источника, но предъявляет требования к светочувствительности фотоприемника и устранению вредных засветок зоны сканирования. Наличие математической модели позволяет научно обоснованно выполнить расчет параметров лазерной установки для локации пищевых продуктов.

Точность измерения геометрических параметров продукта находится в прямой зависимости от режимных параметров локации и определяется соотношениями скорости движения объекта, размера подсвечивающего элемента и частоты кругового сканирования. Принимая в качестве исходных параметров мощность лазерного источника и точность измерения, представляется возможным определить параметры фотоприемника и режимные параметры локации продукта.

Для повышения точности измерений рекомендуется увеличивать частоту кругового сканирования, что позволяет компенсировать потери и искажения сигнала, связанные с перемещением объекта в зоне сканирования. Также рекомендуется уменьшать размер подсвечивающего элемента.

Вместе с тем, принято допущение, что светимость в пределах подсвечивающего элемента имеет равномерное

распределение. В дальнейших исследованиях предлагается учитывать, что светимость в пределах подсвечивающего элемента распределена по нормальному закону, а также имеется фоновая засветка.

## Библиография

Фатыхов, Ю.А., Агеев, О.В. (2013). Разработка средств лазерной локации для мехатронного оборудования пищевых производств. *Электронный научный журнал Института холода и биотехнологий. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 1 (март). Шифр: Эл № ФС77-33458. Режим доступа:*

<http://processes.open-mechanics.com/articles/706.pdf>

Fatykhov, J.A. (2012). Opticoelectronic system for measuring morphometers of fish by a direct method J.A. Fatykhov, O.V. Ageev, D. Dutkiewicz. *Budowa I Eksploatacja Maszyn Przemysłu Spożywczego "BEMS-2012": XV Konferencja Naukowo-Techniczna. - Koszalin-Kołobrzeg: Politechnika Koszalińska, s. 55.*

Агеев, О.В., Фатыхов, Ю.А. (2015). Применение видеокomпьютерной техники для исследования морфо-метрических параметров рыбы (Часть 1. Разработка аппаратного обеспечения видеокomпьютерного устройства) / О.В. Агеев, // *Электронный научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 1 (23), Шифр: Эл № ФС77-55245. Режим доступа:*

<http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/11452.pdf>

Агеев, О.В., Фатыхов, Ю.А. (2015). Применение видеокomпьютерной техники для исследования морфо-метрических параметров рыбы (Часть 2. Разработка программного обеспечения видеокomпьютерного устройства). *Электронный научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2 (24), Шифр: Эл № ФС77-55245. Режим доступа:*

<http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/13407.pdf>

Агеев, О.В. (2016). Способ и алгоритм ориентирования рыбы на основе мехатроники. *Известия Калининградского государственного технического университета, 42, 89-103.*

**Oleg Vyacheslavovich Ageev**

Department of food and refrigerating machines,  
Kaliningrad State  
Technical University,  
Sovetskiy prospekt 1,  
236022, Kaliningrad, Rossiya  
e-mail: [oleg.ageev@klgtu.ru](mailto:oleg.ageev@klgtu.ru)