

Разработка средств лазерной локации для мехатронного оборудования пищевых производств

Д.т.н. Фатыхов Ю.А., к.т.н. Агеев О.В.
procyon@mail.ru

Калининградский государственный технический университет

Показана актуальность применения лазерных измерительных систем в мехатронном пищевом оборудовании. Изложены особенности лазерной локации объектов пищевой инженерии. Приведены математические модели подсвечивающего лазерного излучения. Рассмотрены особенности фотометрического метода измерения. Приведены математические модели рассеянного лазерного излучения, проанализировано влияние светового фона и физических свойств пропускающей среды на параметры принимаемого сигнала. Показаны пути построения лазерных локаторов для пищевой инженерии на основе современных полупроводниковых приборов. Изложены основные характеристики лазерных локаторов. Рассмотрен лазерный локатор с линейной разверткой для мехатронного оборудования рыбных производств.

Ключевые слова: лазерная локация, пищевая инженерия, прямой метод, математическая модель, оптикоэлектронная система, мехатроника, микроЭВМ, автоматическая настройка, ресурсосбережение.

В настоящее время на пищевых производствах требуется рациональное использование сырья на основе ресурсосберегающих технологий. Эффективное решение этой задачи предполагает автоматическое измерение параметров объектов обработки прямым методом. Данный метод осуществляется средствами, встроенными в технологическое оборудование, а его результаты используются для непосредственного воздействия на технологический процесс с целью обеспечения заданного качества продукции. Устройство, основанное на прямом методе, свободно от недостатков косвенного метода измерения и позволяет осуществлять управление или регулирование производственного процесса, высвобождая оператора от ручного выполнения этих функций.

Одновременно, в области технологического оборудования для пищевых производств происходит очередная смена поколений. Это связано с тем, что достижения мехатроники позволяют создать принципиально новые технологические машины с признаками робототехнических систем. Совершенствование техники пищевой инженерии привело к разработке нового класса технических систем – мехатронных комплексов с интеллектуальными управляющими системами.

Такое оборудование является мехатронной техникой и состоит из следующих концептуально связанных подсистем: оптикоэлектронного модуля для сбора данных, цифровых датчиков давления и расхода, управляющей микроЭВМ, программного обеспечения, цифрового электропривода для настройки рабочих органов, а также автоматического конвейерного оборудования для перемещения сырья и порций готового продукта.

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

Наряду с этим, наличие средств лазерной локации в мехатронном оборудовании создает основу для реализации адаптивного управления при изменении условий внешней среды, существенно расширяет универсальность и приспособляемость пищевого оборудования, позволяет выполнять автоматическую перенастройку на различные виды сырья и готовой продукции. Это способствует интеграции мехатронного пищевого оборудования в гибкие производственные линии (ГПС), и далее - в безлюдные технологические потоки. Средства лазерной локации являются неотъемлемой составной частью универсальной мехатронной платформы для построения пищевых производств будущего.

Все вышеизложенное обуславливает актуальность разработки средств лазерной локации для оборудования пищевых производств. Эффективность разрабатываемой лазерной системы характеризуется видом получаемой информации, точностью и скоростью работы, а также простотой технической реализации. Существенный вклад в упрощение реализации лазерных локаторов внесло появление полупроводниковых лазеров, обладающих низким энергопотреблением, высокой надежностью и большим сроком службы, а также разработка быстродействующих полупроводниковых фотодетекторов в видимом и инфракрасном диапазоне волн.

Лазерная локация позволяет получать разнородную информацию об объекте пищевой инженерии: геометрические размеры, характеристики поверхности, химический состав вещества объекта, оптическое изображение, в том числе - трехмерное. Таким образом, следует обоснованно выбирать технологические параметры, которые следует контролировать средствами лазерной локации, поскольку от этого зависят сложность наукоёмкого изделия и затраты на его проектирование.

Лазерный локаатор должен иметь сравнительно небольшие габаритные размеры для монтажа в пищевом технологическом оборудовании, иметь защиту от воздействий неблагоприятных производственных факторов, быть энергетически выгодным, обладать технологичностью при изготовлении.

Важным достоинством лазерного локатора является то, что его сканирующий сигнал возможно собрать в узком телесном угле, что при использовании объективов в приемной части позволяет выполнять сбор данных на значительном расстоянии от объекта. Это особенно важно в тех производственных условиях, где затруднено расположение средств контроля и управления в непосредственной близости от объекта обработки.

С учётом наличия высокоточных методов лазерной локации, для применения в мехатронном пищевом оборудовании на начальном этапе достаточно двух методов – фотометрического и триангуляционного. Как показывает проведенный анализ, условиям применения на пищевых производствах наиболее соответствует активная система лазерной локации с точечной или линейной проекцией луча. Следует отметить, что при локации пищевых объектов, имеющих поверхность с зеркальной составляющей, возможно применение интерференционных методов для точного контроля размеров и профиля. Поскольку пищевое сырьё с такими поверхностями встречается редко, методы, основанные на интерференции, могут применяться при контроле тары и упаковки.

Точность и помехоустойчивость повышается при частотной модуляции лазерного излучения, однако это связано с усложнением и удорожанием практических конструкций локаторов.

При разработке средств лазерной локации должны применяться принципы квантовой электроники, математические модели лазерных локационных сигналов, а также алгоритмы обработки пространственной структуры принимаемого сигнала. Вместе с тем, математическое моделирование лазерного локационного сигнала предполагает учёт значительного количества физических явлений. При лазерной локации происходит генерация излучения, прохождение луча через формирующую оптическую систему, распространение в среде, рассеяние на наблюдаемом объекте, регистрация принимаемого отраженного излучения, обработка информации. Практически все из указанных физических явлений имеют флуктуационный характер, в связи с чем требуется построение адекватной статистической модели лазерного сигнала. Однако, стремление к учёту всех возможных эффектов в математической модели приведет к её излишней громоздкости и сложности для математических исследований при синтезе лазерных локационных систем.

Поэтому целесообразно и допустимо рассмотреть отдельные частные модели, которые наиболее полно учитывают отдельные физические явления, и для некоторых практических ситуаций являются адекватными. При разработке конкретного лазерного локатора для мехатронного пищевого оборудования достаточно использовать соответствующие частные модели передаваемого и принимаемого лазерных сигналов.

При общем математическом описании лазерного локационного сигнала должны использоваться такие характеристики, которые не зависят от особенностей конкретных образцов лазеров, однако позволяют учесть специфические особенности типа лазера. Важными особенностями,

характеризующими лазерное излучение, являются пространственная и временная когерентность светового сигнала. При построении частных моделей подразумевается, что оптическая система локатора несущественно нарушает общую структуру лазерного излучения при масштабных преобразованиях выходного пучка. Это допущение возможно принять, если учесть, что в мехатронном пищевом оборудовании не требуется большой размер излучающей области лазера, а расстояние от неё до поверхности объекта в большинстве случаев не превышает одного-двух метров. В связи с этим, сложные оптические системы телескопического типа для масштабного увеличения пучка не требуются, однако целесообразно применять простые по конструкции коллиматоры для увеличения диаметра пучка и обеспечения достаточной направленности излучения.

Если принять, что излучение лазера имеет идеальную монохроматичность и высокую направленность, то выражение для электрического поля на раскрыве выходной апертуры Ω_a имеет следующий вид [1, 2, 3]:

$$\varepsilon_a(\vec{\rho}, t) = \text{Re} \sqrt{2 P_e} \tilde{\varepsilon}_a e^{-i\omega_0 t}, \quad (1)$$

где $\vec{\rho}$ - радиус-вектор точки, принадлежащий области Ω_a ; $\tilde{\varepsilon}_a$ - комплексная амплитуда, равная нулю, когда $\vec{\rho}$ не принадлежит области Ω_a ; когда $\vec{\rho}$ принадлежит Ω_a , то $\tilde{\varepsilon}_a$ имеет некоторое постоянное значение по модулю равное единице; аргумент $\tilde{\varepsilon}_a$ описывает фазу излучаемого колебания; ω_0 - круговая частота излучения, связанная с длиной волны λ и скоростью света \tilde{n} соотношением $\omega_0 = 2\pi \cdot \tilde{n}/\lambda$; P_e - интенсивность лазерного излучения, имеющая обратную зависимость от площади выходной апертуры Ω_a .

Распространяясь в пространстве, электрическое поле на некотором расстоянии R от лазерного локатора в плоскости \vec{r} , коллинеарной $\vec{\rho}$, принимает следующий вид:

$$E(\vec{r}, t) = \text{Re} \sqrt{2 P_e} \tilde{E}(\vec{r}) e^{-i\omega_0 t}, \quad (2)$$

$$\tilde{E}(\vec{r}) = \int_{\Omega_a} \tilde{\varepsilon}_a H(\vec{\rho} - \vec{r}) d\vec{\rho}, \quad (3)$$

где $H(\vec{\rho} - \vec{r})$ - функция передачи свободного пространства.

Модель (1) соответствует случаю, когда распределение интенсивности лазерного излучения по площади выходной апертуры Ω_a постоянно. Если распределение интенсивности $J(\vec{r})$ принять $J(\vec{r}) = J(0)$, когда \vec{r} принадлежит кругу с радиусом Δr_0 , а вне этого круга $J(\vec{r}) = 0$, то Δr_0 определяется следующим выражением [1, 2, 3]:

$$\begin{aligned} \Delta r_0^2 &= \frac{1}{\pi J(0)} \int_{-\infty}^{+\infty} J(\vec{r}, t) d\vec{r} = \frac{1}{\pi S_a^2} \int_{\Omega_a} \int_{\Omega_a} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-i \frac{k}{R} \vec{r}(\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2)\right) d\vec{\rho}_1 d\vec{\rho}_2 d\vec{r} = \\ &= \frac{(\lambda R)^2}{\pi S_a^2} \int_{\Omega_a} \int_{\Omega_a} \delta(\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2) d\vec{\rho}_1 d\vec{\rho}_2 = \frac{(\lambda R)^2}{\pi S_a} \end{aligned} \quad (4)$$

Если область выходной апертуры Ω_a представляет собой круг с диаметром a_a , то получаем

$$\Delta r_0 = \frac{2 \lambda R}{\pi a_a}. \quad (5)$$

Из выражения (5) возможно сделать вывод, что основная энергия, излученная лазером, попадает в область с размером $2\Delta r_0 \approx \frac{4 \lambda R}{\pi a_a}$, что соответствует углу расходимости порядка λ/a_a . Предел этого угла устанавливается дифракцией электромагнитных волн на области Ω_a .

Частная модель излучения (1) наиболее соответствует одномодовому режиму работы лазера, при котором генерируется одно гармоническое колебание (одна мода). Следует отметить, что от лазеров для мехатронного пищевого оборудования в большинстве случаев не требуется повышенная выходная мощность, в связи с чем возможно обеспечить одномодовый режим работы. Наряду с низкой мощностью таких лазеров, положительное значение имеют микроминиатюрные размеры формирующей оптической системы. Если естественные флуктуации лазерных пучков в пространстве и во времени являются слабыми, что определяется типом лазерного источника, то применение модели (1) является оправданным.

При повышении мощности лазерного излучения генерируется большое число статистически независимых гармонических колебаний, то есть лазер работает в многомодовом режиме. При выборе конкретных образцов лазеров убедиться в этом возможно при помощи интерферометра Фабри-Перо. Это связано с многомодовостью спектра собственных колебаний оптического резонатора. Так как фазы отдельных мод являются случайными, то случайным является и все излучение. При этом разрушается как пространственная, так и временная когерентность излучения.

При значительном числе мод в силу центральной предельной теоремы лазерное излучение достаточно точно описывается нормальным законом распределения, причем независимо от того, имеют ли все излученные моды одну частоту, или их частоты отличаются. Поскольку нормальный закон описывается двумя первыми статистическими моментами, то генерируемое излучение характеризуется, прежде всего, корреляционной функцией.

Вид корреляционной функции зависит от конкретного типа лазера, а также от свойств оптического резонатора и формы зеркал. В некоторых типах лазеров излучение генерируется статистически пространственно однородным, в других типах – статистически неоднородным. Неоднородность в ряде случаев проявляется в виде зависимости усредненной по времени излучаемой интенсивности от координаты. Выражения функции корреляции существенно различаются для плоского и сферического резонаторов.

Практическое значение имеет радиус корреляции, то есть радиус области, в которой сосредоточены основные значения функции корреляции. Известно, что для многомодовых лазерных пучков радиус корреляции прямо пропорционален линейному размеру зеркала резонатора и обратно пропорционален числу возбуждаемых поперечных мод.

Отметим, что для фотометрического и триангуляционного методов измерения статистические свойства лазерного излучения не имеют решающего значения, однако для интерференционных методов они оказывают значительное влияние на точность измерений. Флуктуации параметров лазера и окружающей среды приводят к неизбежным случайным спектральным смещениям, что обуславливает необходимость систем стабилизации – температуры и силы тока.

Следует учитывать, что существенное нарушение пространственной когерентности излучения лазера приводит к увеличению угла расходимости пучка. Также к увеличению расходимости пучка приводит нарушение регулярной плавной структуры излучения по плоскости, пересекающей распространяющийся луч. Даже при использовании фотометрического и триангуляционного методов это приводит к заметному снижению точности измерения. Таким образом, следует стремиться к высокой пространственной когерентности излучения. При выборе лазеров для мехатронного пищевого оборудования известным преимуществом в этом аспекте обладают полупроводниковые приборы по сравнению с гелий-неоновыми лазерами.

В случае существенно нарушенной пространственной когерентности интенсивность лазерного излучения, падающего на объект, представляет собой результат сложения всех возможных реализаций интенсивностей, возникающих при случайных соотношениях между фазами генерируемых мод. Статистическая связь между значениями интенсивностей в различных точках распадается, поэтому значения интенсивностей могут значительно отличаться друг от друга. При использовании фотометрического и триангуляционного методов будут наблюдаться нежелательные перепады интенсивностей излучения, имеющих форму пятен со случайными формами и размерами, что будет вносить погрешность в измерения. В случае применения интерференционных методов возникают области затемнения по мере удаления от источника излучения, что приводит к потере информации и ошибкам измерения.

Предположим, что лазерный локатор освещает объект, находящийся на операционном конвейере мехатронного пищевого оборудования и расположенный на расстоянии R от источника излучения. Лазерный свет отражается от объекта, проходит расстояние R и попадает на приёмную апертуру Ω_r . Очевидно, свойства отражённого излучения определяются характером подсвечивающего излучения, с одной стороны, и свойствами объекта, с другой стороны.

Для выявления влияния свойств подсвечивающего излучения, примем допущение, что объект является плоским и неподвижным. Поскольку объекты (сырье, продукт) в мехатронном пищевом оборудовании перемещаются с относительно невысокими скоростями, возможно считать, что объект является неподвижным на время очередного опроса приёмника отраженного излучения (фотодетектора). Управляющая цифровая микроЭВМ получает информацию от приёмника в дискретном режиме, определяемом либо периодом квантования микроЭВМ, либо частотой опроса

фотодетектора, либо периодом квантования автономного аналого-цифрового преобразователя, встроенного в фотодетектор. Учитывая, что период квантования в микроЭВМ при опросе микропроцессором фотодетектора возможно задать достаточно коротким (тысячные доли секунд), условно считаем, что приёмник фиксирует стоп-кадры неподвижного объекта, сформированные отраженным излучением.

Пусть гладкая область объекта Ω_i имеет коэффициент отражения $k(\vec{r}, \omega)$. Электрическое поле в области приёмной апертуры определяется следующим выражением [1, 2, 3]:

$$\varepsilon_i(\vec{\rho}, t) = \text{Re} \sqrt{2 P_i} \tilde{\varepsilon}(\vec{\rho}, t) e^{-i\omega_0 t}, \quad (6)$$

где

$$\tilde{\varepsilon}(\vec{\rho}, t) = \int_{\Omega_i} \int_{-\infty}^{+\infty} k(\vec{r}, \omega + \omega_0) \cdot \tilde{E}_0(\vec{r}) \cdot H_{\omega + \omega_0}(\vec{r} - \vec{\rho}) \cdot e^{-i\omega t} d\vec{r} d\omega; \quad (7)$$

$$P_i = \frac{1}{ST} \int_{\Omega_i} \int_0^T \langle \varepsilon^2(\vec{\rho}, t) \rangle d\vec{\rho} dt. \quad (8)$$

Конкретное значение интенсивности отраженного излучения P_i зависит от мощности подсвечивающего излучения, расстояния до объекта, поглощения и рассеяния в воздухе и т.д.

Функция $\tilde{E}_0(\vec{r})$ является спектром комплексной амплитуды $\tilde{E}_0(\vec{r}, t)$ и определяется следующим выражением:

$$\tilde{E}_0(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}_0(\vec{r}, t) e^{i\omega t} dt \quad (9)$$

В режиме несинхронизированных мод подсвечивающее поле $E(\vec{r}, t)$ является нормальным. Поле $\varepsilon_i(\vec{r}, t)$ также является нормальным. Связь между корреляционной функцией комплексных амплитуд $\tilde{\varepsilon}(\vec{\rho}, t)$ и интенсивностью на приёмной апертуре $J_i(\vec{\rho}, t)$ имеет следующий вид:

$$K_{J_i}(\vec{\rho}_1, t_1; \vec{\rho}_2, t_2) = |P_i \tilde{K}_\varepsilon(\vec{\rho}_1, t_1; \vec{\rho}_2, t_2)|^2 \quad (10)$$

Примеры распределения интенсивностей лазерных пучков показаны на рис. 1, 2. От вида профиля интенсивности лазерного пучка зависят равномерность распределения энергии излучения и концентрация света.

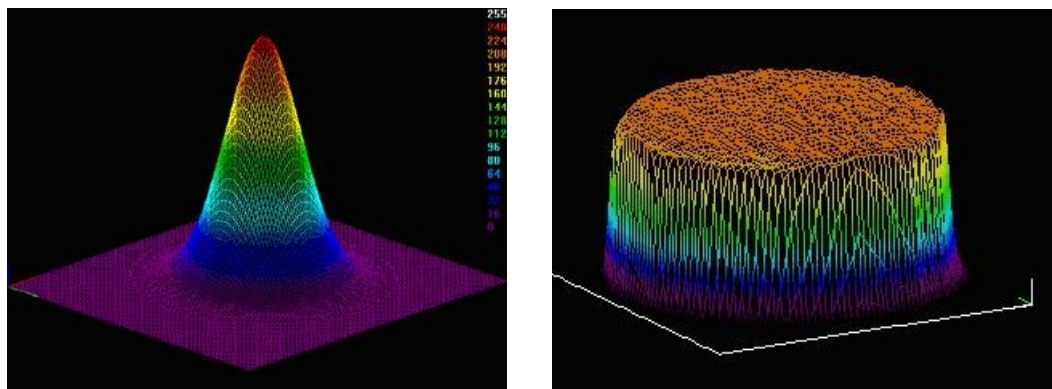


Рис. 1. Профили интенсивности идеальных лазерных пучков [4]

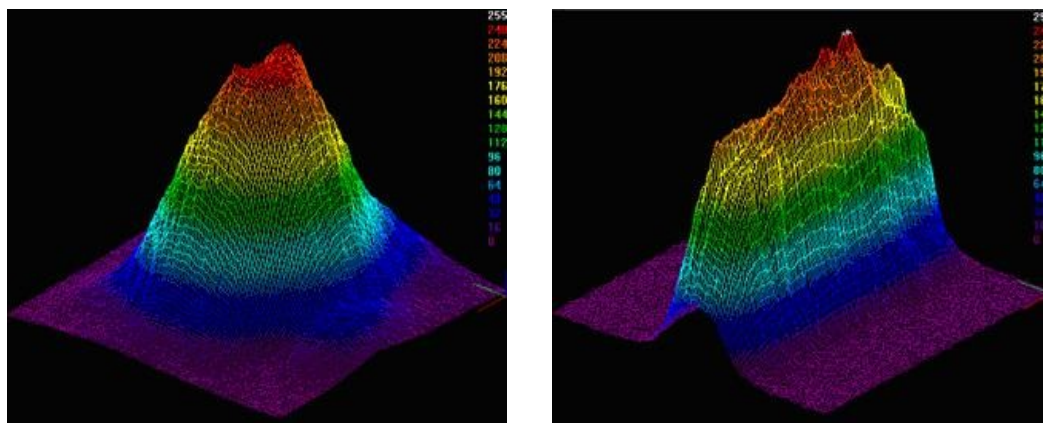


Рис. 2. Профили интенсивности реальных лазерных пучков [4]

Большинство реальных объектов имеют такие поверхности, которые в оптическом диапазоне рассматриваются как шероховатые. Так как микроструктура поверхностей является случайной, дифракция волн на микронеровностях является статистической задачей. Решение этой задачи может установить связь между падающим и отраженным излучением, а также установить связь статистических характеристик рассеянного излучения со статистическими характеристиками поверхности.

Рассеянное поле формируется на поверхности объекта отдельными блестящими точками (блестками, спеклами). Блестящие точки – это такие точки, которые вместе с прилежащими к ним небольшими окрестностями отражают падающее на них излучение в противоположном направлении. Точки располагаются на поверхности объекта случайным образом, независимо друг от друга, имеют случайные независимые коэффициенты отражения. Образующая при этом так называемая спекл-структура является результатом взаимной интерференции когерентных волн, имеющих случайные сдвиги фаз и случайные наборы интенсивностей. При исследовании поверхности спекл-структура содержит информацию о микрорельефе и форме объекта, о приповерхностном слое, о распределении и движении рассеивателей в нём. Из статистической обработки спеклов возможно получить информацию о таких параметрах, как смещение, скорость движения, в том числе и рассеивателей в приповерхностном слое, амплитуде и частоте вибраций.

В реальных условиях пищевого производства наряду с полезным локационным сигналом приёмником фиксируется аддитивный световой фон. Он порождается рассеянным солнечным светом, проникающим в производственное помещение, а также источниками внутрицехового электрического освещения.

Временная реализация фона носит явно выраженный случайный характер и обладает широким частотным спектром, который в пределах пропускания приёмных оптических систем возможно считать постоянным.

Особенности пространственных характеристик рассеянного светового фона связаны с тем, что для каждой монохроматической компоненты световой фон представляет собой суперпозицию отдельных плоских волн, приходящих с различных направлений. Комплексная амплитуда фона в плоскости наблюдения пропорциональна

$$\varepsilon_{\delta}(\vec{\rho}) \approx \int_{\Omega} E_{\delta}(\vec{\alpha}) e^{i k \vec{\alpha} \vec{\rho}} d\vec{\alpha} \quad (11)$$

где $E_{\delta}(\vec{\alpha})$ - комплексная амплитуда плоской волны, приходящей из направления, определяемого единичным вектором $\vec{\alpha}$.

Величины $E_{\delta}(\vec{\alpha})$ случайны и независимы между собой, так что $\langle E_{\delta}(\vec{\alpha}_1) E_{\delta}^*(\vec{\alpha}_2) \rangle = \langle |E_{\delta}|^2 \rangle \delta(\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2)$. Парциальные волны могут порождаться источниками, находящимися на различных расстояниях от плоскости наблюдения, их абсолютные фазовые набегги могут колебаться в весьма широких пределах, поэтому $\langle E_{\delta}(\vec{\alpha}) \rangle = 0$. С учётом этого, возможно с достаточной достоверностью считать, что комплексные амплитуды фона в плоскости наблюдения являются нормальными случайными величинами, среднее значение и функция корреляции которых равны

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_{\delta}(\vec{\rho}) \rangle &= 0; \\ \langle \varepsilon_{\delta}(\vec{\rho}_1) \varepsilon_{\delta}^*(\vec{\rho}_2) \rangle &\approx \langle |E_{\delta}|^2 \rangle \int_{\Omega} e^{i k \vec{\alpha} (\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2)} d\vec{\alpha} \end{aligned} \quad (12)$$

Из (12) следует, что размеры области, в которой значения фона коррелированы между собой, определяются величиной поля зрения. В большинстве случаев пространственный радиус корреляции флуктуаций фона существенно меньше радиуса корреляции поля, отраженного от объекта. Это позволяет принять, что рассеянный фон δ -коррелирован по плоскости наблюдения. Тогда корреляционная функция фонового излучения в плоскости наблюдения имеет следующий вид [1, 2, 3]:

$$\begin{aligned} \langle n(\vec{\rho}, t) \rangle &= 0; \\ K_{\vec{r}}(\vec{\rho}_1, t_1; \vec{\rho}_2, t_2) &= \langle n(\vec{\rho}_1, t_1) n(\vec{\rho}_2, t_2) \rangle = N_0 \delta(\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2) \delta(t_1 - t_2) \end{aligned} \quad (13)$$

где $n(\vec{\rho}, t)$ - δ -коррелированная спектральная составляющая фона; N_0 - пространственно-временная спектральная плотность фонового излучения.

Следует отметить, что при наличии в поле зрения приёмника вспомогательных объектов (элементов конвейера, монтажных приспособлений, рабочих органов оборудования), от них появляется дополнительная фоновая составляющая принимаемого излучения. Световой фон представляет собой интегральную и дискретную сумму большого числа случайных статистически независимых между собой величин. В силу центральной предельной теоремы, значения фона должны с достаточной точностью подчиняться нормальному закону распределения. Так как в большинстве случаев отраженный от объекта сигнал также подчиняется нормальному распределению, весь принимаемый сигнал также является нормальным. Таким образом, полное статистическое описание принимаемого

сигнала однозначно определяется двумя первыми статистическими моментами - средним значением и корреляционной функцией.

Поскольку зачастую оптическая система приёмника содержит собирающую линзу и имеет широкое поле зрения, фоновая составляющая излучения оказывает существенное влияние на выходной сигнал фотодетектора. При использовании фотометрических методов случайное изменение интенсивности фона является причиной ощутимой погрешности измерения. Для устранения этого влияния принимаются соответствующие меры – закрытие рабочей зоны лазерного локатора светонепроницаемым корпусом, а также установка на приёмной апертуре селективного оптического фильтра (цветного светофильтра). Это придает селективность приёмнику, снижает интенсивность фоновой составляющей излучения, однако не устраняет её полностью. Также для устранения влияния фонового излучения применяется закрытие рабочей зоны локатора прозрачными цветными барьерами, пропускающими свет с длиной волны, на которой работает лазер и к которой сенсibilизирован приёмник. Другим перспективным направлением является облучение объекта частотно-модулированным лазерным светом, а также включение в электронную схему приёмника полосового фильтра и амплитудного детектора. Вместе с цветными светофильтрами такие меры дают существенное снижение фоновой составляющей принимаемого сигнала, однако и в этом случае не устраняют её полностью, поскольку фоновое излучение обладает широким непрерывным спектром.

В реальных производственных условиях возможно распространение лазерного луча в условиях запыления, задымления, а также при наличии водяного пара. Вследствие этого, в излучение вносятся искажения, приводящие к ослаблению суммарной энергии, её перераспределению в окрестностях измеряемого объекта, нарушению информационного содержания принимаемого сигнала.

Существенное влияние на лазерное излучение оказывают явления рассеяния и поглощения. Такие эффекты обуславливаются молекулами воздуха, а также взвешенными материальными частицами (пыль, дым, водяной пар).

Интенсивность $I(z)$ коллимированного пучка лазерного излучения на расстоянии z от коллиматора для однородного участка пропускающей среды связаны с интенсивностью I_0 на выходе коллиматора следующим выражением [1, 2, 3]:

$$I(z) = \tau(z) I_0, \quad (14)$$

$$\tau(z) = \exp[-(\beta_{i.D.} + \beta_{e.D.} + \beta_{i.I.} + \beta_{e.I.})z] \quad (15)$$

где $\beta_{i.D.}, \beta_{e.D.}, \beta_{i.I.}, \beta_{e.I.}$ - соответственно коэффициенты молекулярного и корпускулярного рассеяния и поглощения в среде. Для неоднородного пути распространения лазерного пучка в среде длиной z функция $\tau(z)$ определяется следующим выражением:

$$\tau(z) = e^{-T(z)} \quad (16)$$

$$T(z) = \int_0^z [\beta_{i.D.}(z) + \beta_{\dot{E}.D.}(z) + \beta_{i.I.}(z) + \beta_{\dot{E}.I.}(z)] dz \quad (17)$$

Следует отметить, что коэффициенты молекулярного и корпускулярного рассеяния и поглощения возрастают обратно пропорционально величине длины волны в четвертой степени. Молекулярное (релеевское) рассеяние света всегда имеет место и почти не изменяется во времени, однако практически не препятствует прохождению лазерного света.

Явления поглощения и рассеяния лазерного излучения, с одной стороны, вносят искажения, но, с другой стороны, являются физической основой для неразрушающего контроля параметров объектов на пищевых производствах.

Оптические свойства изотропной среды описываются двумя постоянными: показателем преломления молекулярного и корпускулярного рассеяния и поглощения n , а также показателем поглощения k , однозначно определяющими амплитуду и фазу плоской световой волны в такой среде. В случае нормального падения волны на среду с комплексным показателем преломления $n^* = n - ik$ происходит поглощение света, проходящего вдоль оси x , по экспоненциальному закону $\exp(-2\omega kx/c) = \exp(-\alpha x)$. Величина $\alpha = 4\pi k/\lambda$ является коэффициентом поглощения, определяющим долю энергии, которая теряется за счёт поглощения при прохождении через слой вещества единичной толщины. Материалы пищевых объектов являются в большинстве случаев оптически неоднородными, что приводит к неравномерному распределению интенсивности по сечению лазерного луча. Это объясняется неравномерностью поглощения луча различными элементами материалов, что используется в ряде методов лазерной локации объектов пищевой инженерии.

Применение лазера в качестве источника света позволяет получить световое пятно (световой зонд) малого диаметра, и тем самым исследовать весьма малые участки и тонкие структуры. Техническая реализация 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, или объект перемещается относительно луча лазера. При этом определяется коэффициент пропускания, который при помощи конкретных решений может быть найден во многих точках объекта.

Пусть объект представляет собой плоскопараллельную пластину с толщиной d , коэффициентом отражения R , показателем преломления n , коэффициентом поглощения α , определяющими свойствами материала. Имеет место интерференционная картина между поверхностями объекта. В таком случае коэффициент пропускания T для нормального падения излучения определяется следующим выражением:

$$T = \frac{(1 - R^2) \exp(-\alpha \cdot d)}{1 + R^2 \exp(-2\alpha \cdot d) - 2R \cdot \exp(-\alpha \cdot d) \cos 2(\psi + \varphi)} \quad (18)$$

где $\varphi = 4\pi \cdot n \cdot d / \lambda$; $\psi = \arctg 2k / (n^2 + k^2 + 1)$.

Коэффициент отражения определяется следующим выражением:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (19)$$

При пренебрежении интерференцией света в плоскопараллельной пластине ошибка в измерении при $\alpha \cdot d = 1 \div 2$ составляет не более 20%. Для получения количественных данных электрический сигнал, возникающий в приёмнике, усиливается и регистрируется в измерительном приборе.

подавляющее большинство объектов пищевой инженерии имеет поверхность с диффузным рассеянием. Диффузное отражение характеризуется тем, что индикатриса отраженного излучения не зависит от угла падения, а зависит от величины потока.

Математическая модель процесса регистрации отраженного от объекта излучения имеет следующий вид [1, 2, 3]:

$$F = \cos(\gamma) \frac{\exp\left(-\frac{d^2}{(\phi H)^2}\right)}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\rho \cdot r_{i0} S_{i0}}{\phi H^3} \cdot \exp(-2\mu H) - \frac{\Phi_{i0}}{W_0} \quad (20)$$

где F - поток излучения на входной апертуре приёмника; γ - угол наклона плоскости падения зондирующего луча по отношению к вертикали; d - диаметр зондирующего луча; H - расстояние до объекта; ρ - полусферический коэффициент диффузного отражения поверхности объекта; r_{i0} - радиус поперечного сечения объекта; S_{i0} - площадь входного зрачка приёмника; ϕ - угол поля зрения приёмника; μ - коэффициент поглощения среды; Φ_{i0} - порог чувствительности приёмника; W_0 - максимальное значение потока излучения источника.

Из выражения (20) очевидно, что основной вклад в принимаемый поток излучения вносят следующие группы параметров:

- параметры источника излучения и приёмника $\Phi_{i0}, W_0, S_{i0}, \phi, d$;
- параметры среды μ , сильно зависящие от явлений поглощения и рассеяния лазерного излучения;
- параметры измеряемого объекта ρ, r_{i0} ;
- условия локации H, γ .

Как показывает проведённый анализ, наибольший интерес в качестве источников излучения для мехатронного пищевого оборудования имеют твердотельные лазеры, в частности - полупроводниковые. В таких источниках активная среда создаётся в объеме электронно-дырочного перехода в полупроводнике за счёт инжекции в область перехода неравновесных носителей заряда. Для создания полупроводниковых лазеров применяются химические соединения GaAlAs, InP, PbSe, PbS и другие. Вследствие малых объёмов электронно-дырочного перехода такие приборы имеют малую мощность возбуждения и небольшую выходную мощность (единицы и десятки мВт). Вместе с тем, они обладают миниатюрными

размерами, которые составляют доли миллиметров, а вместе с корпусом и теплоотводом уместаются в объеме 1 см². В зависимости от химического состава активной среды возможно получение излучения на длинах волн в диапазоне 0,6-1,6 мкм.

Наряду с этим, наибольший интерес для применения в качестве приёмников в мехатронном пищевом оборудовании представляют фотодиоды. Эти приборы являются монокристаллическими структурами, содержащие две области с различными типами проводимости. Лавинные фотодиоды обладают свойством внутреннего усиления фототока, протекающего через освещенный р-п-переход. Кремниевый фотодиод может работать в фотодиодном и фотогальваническом режимах, обладает высокой светочувствительностью, хорошей линейностью в большом диапазоне фототоков, большим размером светочувствительной поверхности.

В фотодиодном режиме р-п-переход фотодиода смещается в обратном направлении под действием приложенного напряжения. Величина смещения зависит от типа фотодиода и варьируется в пределах от единиц до сотен вольт. От величины смещения зависит быстродействие прибора, а также величина протекающего через него тока. Однако при увеличении обратного тока (с увеличением падающего светового потока) увеличивается уровень шума, в то время как уровень полезного сигнала остается постоянным. В фотогальваническом режиме диод выступает в роли источника ЭДС с большим внутренним сопротивлением. При отсутствии облучения в цепи фотодиода протекает темновой ток силой в несколько микроампер. Источниками неустраняемого зашумления сигнала служат процессы генерации и рекомбинации носителей заряда, а также дробовой эффект на р-п-переходе. Методы цифровой фильтрации позволяют снизить потери информации, обусловленные шумовой составляющей сигнала.

При проектировании лазерных локаторов должны учитываться требования ГОСТ Р МЭК 60825-1-2009 “Безопасность лазерной аппаратуры”. В общем случае, лазерный локатор для мехатронного пищевого оборудования характеризуется следующими основными параметрами:

1. Порог чувствительности - наименьший поток излучения или наименьшая освещенность, при действии которых на входную апертуру локатора обеспечивается заданная вероятность обнаружения объекта. Порог чувствительности определяет дальность действия при заданных условиях обнаружения. Величина, обратно пропорциональная порогу чувствительности является обнаружительной способностью.

2. Поле обзора – пространственный угол с вершиной в центре входного отверстия оптической системы, в пределах которого объект может быть обнаружен локатором. При отсутствии сканирования этот параметр называется полем зрения.

3. Разрешающая способность – угол между двумя точечными источниками излучения, которые отдельно могут быть обнаружены прибором. В случае использования фотометрического метода определяется диаметром лазерного зонда.

4. Точность – среднеквадратическое значение ошибки, с которой возможно измерить заданный параметр при определённых условиях.

5. Спектральная чувствительность приёмника – отношение силы выходного тока к потоку излучения на заданной длине волны.

На рис. 3 показан общий вид опытного лазерного локатора, предназначенного для применения в пищевом мехатронном оборудовании [5]. Длина волны монохроматического лазерного света составляет 635 нм (красный лазер), мощность излучения – 1 мВт, напряжение питания – 12 В.

Локатор в реальном масштабе времени формирует сигнал, предназначенный для обработки в управляющей микроЭВМ. Выходной сигнал имеет либо аналоговый, либо цифровой вид в зависимости от исполнения прибора. Метод измерения – фотометрический, приёмник является физическим объективным фотометром прямого отсчёта. Обзор поля излучения объекта осуществляется путём последовательной регистрации селективным приёмником потоков излучения за счёт пространственной линейной развертки.

Прибор автоматически выделяет пространственный сигнал объекта, при этом возможно измерение его геометрических параметров, а также распознавание и подсчет количества различных объектов, прошедших в поле зрения. При нанесении на объекты различных штриховых меток возможен их количественный учёт. Работа с новыми объектами предполагает предварительное метрологическое обеспечение энергетического фотометрирования.

Лазерный локатор подключается непосредственно к управляющей микроЭВМ, которая по результатам обработки измерительной информации в реальном масштабе времени формирует управляющие воздействия на исполнительные механизмы. В случае применения цифрового шагового электропривода для настройки рабочих органов появляется возможность построения компактной эффективной системы автоматического управления мехатронным пищевым оборудованием [5, 7, 9]. Широкие возможности для обработки измерительной информации в микроЭВМ дают методы математического программирования, а также современные методы распознавания образов.



Рис. 3. Измерение морфометрических параметров рыбы лазерным локатором

Средства лазерной локации находят широкое применение в мехатронной технике пищевой инженерии. Для дальнейших научно-технических исследований существенное значение имеет использование лазерных локационных систем с двухкоординатной разверткой и частотной модуляцией в качестве экспериментальных средств.

Список литературы

1. Застрогин Ю.Ф. Прецизионные измерения параметров движения с использованием лазера / Ю.Ф. Застрогин. – М: Машиностроение, 1986. – 272 с.
2. Медведев Е.М. Лазерная локация земли и леса / Е.М. Медведев, И.М. Данилин, С.Р. Мельников. – М.: Геолидар, Геокосмос, 2007. – 230 с.
3. Матвеев И.Н. Лазерная локация / И.Н. Матвеев [и др]. – М: Машиностроение, 1984. – 272 с.
4. Carlos B. Roundy Current Technology of Laser Beam Profile Measurements. / С. В. Roundy. – Spiricon, Inc., 2000. – 43 с.
5. Фатыхов Ю.А. Оптикоэлектронная система для измерения морфометрических параметров рыбы прямым методом / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев, Д. Дуткевич // Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego. – 2012. – № 2/4-2012(2). – С. 11-14.
6. Haralick R.M., Stanley R.S., Xinhua Z. Image analysis using mathematical morphology // IEEE Transact. Pattern Anal. Machine Intelligence. – 1987. - № 9 (4). – С. 532-550.

7. Фатыхов Ю.А. Подход к разработке рыбообделочного устройства на основе шагового привода с цифровым управлением / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев, В.М. Евтропков, А.З. Мацонко // Известия КГТУ. – 2012. – № 25. – С. 25-32.
8. Фатыхов Ю.А. Мехатроника в оборудовании для разделывания и филетирования рыбы. Ресурсосберегающее адаптивное управление процессом производства рыбного филе на основе мехатроники: монография / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев. – Саарбрюкен: Изд-во LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 264 с.
9. Фатыхов Ю.А. Выбор системы электропривода для рыбообделочной машины с электронной настройкой рабочих органов / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев, А.З. Мацонко, В.М. Евтропков // Инновации в науке и образовании – 2011: IX Международная научная конференция: труды. – В 2-х частях. – Калининград, ФГОУ ВПО «КГТУ», 2011. – Часть 1. – С. 320-323.
10. Фатыхов Ю.А. Перспективы разработки мехатронных комплексов для первичной обработки рыбы / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев, В.М. Евтропков, А.З. Мацонко // Известия КГТУ. – 2010. – № 18. – С. 11-17.
11. Фатыхов Ю.А. Мехатроника в рыбообделочном оборудовании: монография / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев. – Калининград: ФГОУ ВПО «КГТУ», 2008. – 279 с.
12. Фатыхов Ю.А. Моделирование цифровой следящей системы управления процессом филетирования рыбы / Ю.А. Фатыхов, В.Н. Эрлихман, О.В. Агеев // Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии: сб. науч. тр. / Московский государственный университет прикладной биотехнологии (МГУПБ). – М., 2008. – С. 153-157.
13. Фатыхов Ю.А. Ресурсосберегающее мехатронное управление оборудованием для разделывания и филетирования рыбы: учеб. пособие / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев. – Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2007. – 158 с.
14. Агеев О.В. Принципы построения адаптивной системы управления модульной рыбообделочной линией / О.В. Агеев, А.В. Шлемин // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2007. – №25(1). – Шифр Информрегистра: 0420700012\0001. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2007/01/pdf/13.pdf>.

Developing laser location devices for mechatronical equipment of food productions

Fatykhov J.A., Ageev O.V.

High priority of using laser measuring systems in mechatronical food equipment has been demonstrated. Peculiar features of laser location of food engineering objects have been discussed. Mathematic models for illuminating laser light are given. Peculiarities of photometric measurement method are discussed. Mathematic models of dissipated laser light are given, the influence of light background and physical properties of media on parameters of receiving signal are analysed. The ways of constructing laser locators for food engineering on the basis of modern semiconductor instruments are demonstrated. The basis characteristics of laser locators are given. Laser locator with linear sweep for mechatronical equipment of food production has been studied.

Key words: laser location, food engineering, direct method, mathematic model, mechatronics, microcomputer, automatic tuning, resource saving.