



Рисунок 3 – Зависимость емкости от времени измерения для образцов *Bacillus megatherium* (а) и *Escherichia coli B* (б) с разной степенью разбавления: 1 – исходная культура, 2 – культура разведена в 100 раз, 3 – культура разведена в 10000 раз

УДК 621.384.3

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКЛ-ВИБРОМЕТРИИ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Интерференционная картина (спекл-поле) [1, 2] лазерного излучения на шероховатой поверхности обусловлена фазовыми соотношениями интерферирующих волн, которые в свою очередь весьма чувствительны к параметрам вибраций данных поверхностей.

При дистанционных измерениях, когда $\ell_1/\ell_2 \gg 1$ (ℓ_1 – расстояние от поверхности объекта до фотодетектора; ℓ_2 – расстояние от фотодетектора до плоскости изображения приемной оптической системы) и малости угла приема сигналов динамику спеклов определяет лишь нормальное к поверхности смещение. Проведенный анализ показал, что с ростом амплитуды вибраций постоянная составляющая спектра отраженного сигнала $G_m (m=0)$ монотонно уменьшается, оставаясь всегда больше остальных компонент. Компоненты гармоник спектра с $m \neq 0$ при отсутствии колебаний поверхности равны нулю.

Без ограничения общности в предположении, что вектор градиента $\nabla f(0)$ виброколебаний поверхности лежит в одной из координатных плоскостей, получено выражение для оценки нормированного среднего квадрата модуля амплитуды G_m , которая характеризует относительную долю мощности, сосредоточенную в m – той гармонике

В результате проведенной серии экспериментов определено время формирования «пленки» с микроорганизмами в зависимости от выбранного биоматериала. Установлено, что питательная среда для клеток микроорганизмов после высыхания на поверхности биоанализатора не оказывает существенного влияния на значение емкости устройства. Проведены исследования выходных характеристик биоанализаторов. Разработана методика обработки поверхности устройств, позволяющая проводить измерение выходного сигнала на одном модуле несколько раз.

Работа выполнялась в рамках Государственной программы научных исследований «Конвергенция-2020», подпрограммы «Объединение».

Литература

1. Grieshaber D. Electrochemical biosensor – sensor principles and architectures / D. Grieshaber [et al.] // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8. – P. 1400-1458.
2. Реутская О.Г. Конструкции биосенсоров на основе матриц иммобилизирующих слоев / О.Г. Реутская // *Материалы 15-ой Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике»*. Минск, БНТУ, 2018: в 4 т. Т.3. С.387.

спектра отраженного лазерного сигнала при одномодовом характере виброколебаний с частотой акустической моды W_0

$$G_m = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-\frac{x^2}{2}} J_m(Vx) dx, \quad (1)$$

где $J_m(Vx)$ – функция Бесселя первого рода; $V = 2k\rho_0 A_0$ – амплитуда вибраций; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; ρ_0 – параметр, характеризующий линейное разрешение приемной оптики; $A_0 = |\nabla f(0)|$ – амплитуда угловых колебаний вектора нормали к поверхности в точке наблюдения.

По мере увеличения амплитуды виброколебаний эти компоненты сначала возрастают до некоторого максимального значения, а затем начинают монотонно уменьшаться, при этом компоненты более низкого порядка остаются всегда больше компоненты более высокого порядка. Когда амплитуда колебаний поверхности достаточно мала $\gamma \leq 1$ в спектре кроме постоянной составляющей присутствует лишь одна компонента с частотой равной частоте акустических колебаний w_0 , т. е. временная зависимость интенсивности сигнала в плоскости изображения приемной оптики описывается синусоидой с частотой w_0 . С возрастанием амплитуды колебания в спектре принимаемого

сигнала появляются гармоники основной частоты все более высокого порядка, а разброс амплитуд гармоник различных порядков уменьшается, хотя форма спектра сохраняет монотонный спадающий характер. Если $\gamma \lesssim 1$, то смещение спекл-структуры поля оказывается меньше характерного размера спеклов, поэтому интенсивность в данной точке модулируется пропорционально угловым колебаниям поверхности, а глубина модуляции зависит от градиента спекл-поля в точке наблюдения и амплитуды колебаний. При увеличении амплитуды угловых колебаний поверхности возрастают и периодические смещения спекл-структуры поля. В результате при $\gamma \gg 1$ в процессе перемещения спекл-картины за половину периода колебания точку наблюдения пересечет большое число отдельных спеклов, причем, чем больше амплитуда колебаний, тем больше это число. Здесь модуляция интенсивности носит характер периодически повторяющихся пачек импульсов, где число импульсов в пачке растет с увеличением амплитуды поверхностных колебаний.

Совершенно очевидно, что это эквивалентно возрастанию вклада в спектр модулирующего сигнала высших гармоник. Данные результаты относятся к случаю, когда разрешение приемной оптической системы (ОС) меньше длины волны колебания на поверхности объекта. Ситуация является типичной, так как при различного рода механических воздействиях в них возбуждаются в основном собственные колебательные моды низших порядков, которые имеют длину волны порядка размеров самой поверхности. В то же время линейное разрешение приемной ОС может быть достаточно высоким для выполнения указанного условия вплоть до расстояний порядка десятков километров. Если размер апертуры фотодетектора ОС меньше характерных размеров спеклов, то все результаты полученные выше можно отнести к выходному сигналу этого фотодетектора, помещенного в данную точку изображения, с точностью до постоянного коэффициента, который описывает параметры фотодетектора. Ситуация существенно меняется, когда апертура фотодетектора превышает характерные размеры спеклов, так как начинает сказываться усредняющее влияние апертуры детектора. Данная ситуация является типичной для дистанционной вибродиагностики.

Если в случае точечного детектора относительная мощность компоненты спектра G_m не зависит от расфокусировки оптической системы, то в случае конечных размеров ОС до апертуры детектора эта зависимость появляется. Когда система сфокусирована точно на поверхность объекта, т. е. $\Psi_1 = 0$, величины G_m в случае конечных размеров фотодетектора отличаются от соответствующих величин для точечного детектора только коэффициентом $1/(\alpha^2+1)$. Параметр α^2 можно интерпретировать, как среднее число спеклов,

укладывающихся в площадь апертуры фотодетектора. При значениях $\alpha^2 \gg 1$ величина G_m убывает обратно пропорционально этому числу. В то же время, абсолютное значение квадрата амплитуды m -ой компоненты спектра флуктуаций мощности излучения растет пропорционально площади фотодетектора. Увеличение параметра расфокусировки Ψ_1 довольно резко уменьшает величины G_m , причем эта зависимость сильнее проявляется для компонент с большим m . Увеличение диаметра апертуры фотодетектора (увеличение параметра α) практически не сказывается на характере и степени этой зависимости. Аналогичный вывод можно сделать и в отношении влияния на эту зависимость параметра γ , который определяет амплитуду акустических колебаний поверхности объекта. Таким образом, для получения большего уровня сигнала на выходе фотодетектора необходимо стремиться к точной фокусировке изображения поверхности объекта, по крайней мере так, чтобы параметр Ψ_1 был меньше единицы.

Увеличение параметра α , которое соответствует увеличению размеров апертуры фотодетектора приводит к уменьшению величин G_m вследствие интегрирующего влияния апертуры. При этом, чем больше расфокусировка системы, тем сильнее проявляется эта зависимость, т. е. подтверждается отрицательное влияние расфокусировки на свойства выходного сигнала детектора. Такое влияние расфокусировки на зависимость G_m от α сказывается тем сильнее, чем выше номер гармоники m . Следует подчеркнуть, что уменьшение нормированного квадрата гармоники не означает, как отмечалось выше, уменьшения ее абсолютного значения, так последнее пропорционально средней мощности излучения, падающего на фотодетектор.

Для оптимизации и оценки потенциальной чувствительности нами получено уравнение отношения сигнал/шум виде:

$$\delta_1 = \frac{2e\eta_0^2 G_0 \tau^2 \pi^2 d^4 E_0^4 q^2 \ell_1^2 A_0^2}{\epsilon_\phi \epsilon_\phi B_n \ell_2^4 \left[\frac{e\eta_0 G_0 \tau \pi d^2 E_0^2 q^2}{\epsilon_\phi} + j\tau \right] \left(1 + \frac{d^2 q^2 K^2}{2\ell_2^2} \right)}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона; η_0 – квантовый выход фотодетектора; G_0 – коэффициент отражения поверхности объекта; d – радиус апертуры фотодетектора; E_0 – освещенность на поверхности объекта; A_0 – амплитуда вибраций; ϵ_ϕ – энергия кванта излучения; B_n – полоса частот сигнала, обусловленная частотой вибраций; q – радиус апертуры приемной оптической системы; k – волновое число; $j\tau$ – темновой ток фотодетектора; ℓ_1 – расстояние от поверхности объекта до ОС; ℓ_2 – расстояние от ОС до плоскости изображения в которой установлен фотодетектор.

Из формулы (2) следует, что отношение сигнал/шум (чувствительность) является монотонно

возрастающей функцией радиуса апертуры фотодетектора d и достигает максимума, когда величина d равна радиусу изображения освещенного участка поверхности объекта. С другой стороны, δ_1 растет с увеличением освещенности E_0^2 на поверхности объекта, которая при фиксированной мощности лазерного излучения обратно пропорциональна площади освещенного участка. Следовательно, для увеличения δ_1 следует стремиться как можно лучше сфокусировать лазерный пучок на поверхности объекта. Минимальный размер светового пятна на поверхности определяется дифракционным пределом. В случае равенства размеров изображения светового пятна на поверхности и размеров апертуры фотодетектора справедливо следующее соотношение между излучаемой мощностью лазерного излучения P_λ и освещенностью на поверхности E_0 :

$$P_\lambda = \pi d^2 E_0 \frac{\ell_1^2}{\ell_2^2}, \quad (3)$$

В результате, максимально возможное отношение сигнал/шум определяется величиной:

$$\delta_1 = \frac{e \eta_0^2 G_{от} P_\lambda q^2 A_0^2}{\varepsilon_\phi \varepsilon_\phi^2 V_\pi \ell_1^2 \left[\frac{e \eta_0 G_{от} P_\lambda q^2}{\varepsilon_\phi} + j_T \right]} \quad (4)$$

Если расстояние ℓ_1 не слишком велико, то постоянная составляющая сигнального тока

существенно больше j_T . В этом случае формула (4) упрощается:

$$\delta_1 = \frac{\eta_0 G_{от} P_\lambda A_0^2}{\varepsilon_\phi V_\pi} \quad (5)$$

и отношение сигнал/шум не зависит от расстояния до объекта, а определяется только параметрами поверхности объекта и приемно – детектирующей системы.

В случае применения фотодетектора с квантовой эффективностью $\eta_0 = 0,5$, мощности лазерного излучения $P_\lambda = 10^{-2}$ Вт ($\lambda = 0,694$ нм.), $G_{от} = 0,3$ и $V_\pi = 10^3$ Гц; $\delta_1 = 3$; из формулы (5) имеем, что $A_{0 \min} = 3,6 \cdot 10^{-7}$ рад.

Высокая чувствительность $A_{0 \min} = 3,6 \cdot 10^{-7}$ рад позволяет дистанционно определять микровибрации поверхностей различных объектов, например, в задачах распознавания и идентификации наземных и воздушных целей на основе лазерно-оптической дистанционной диагностики микровибраций корпуса целей [3].

Литература

1. Франсон М. Оптика спеклов. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
2. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл – интерферометрия. – М.: Мир, 1986. – 327 с.
3. Лазер научится идентифицировать цели. Эл. ресурс: <https://nplus1.ru/news/2015/11/23/laser/>.

УДК 681

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПОЖАРНЫМ ИЗВЕЩАТЕЛЯМ ДЛЯ ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ Антошин А.А., Волков С.А., Мацапура А.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

В основе принципов совершенствования пожарных извещателей применяемых в зданиях где могут находиться люди, лежит концепция, требующая от таких извещателей обеспечить условия для безопасной эвакуации людей из горящего здания. Чтобы обеспечить безопасную эвакуацию людей из горящего здания пожарный извещатель должен обнаружить пожар на такой его стадии развития, чтобы время, которым будут располагать люди, находящиеся в здании позволило им эвакуироваться до момента возникновения опасности.

В настоящее время опасность, возникающая для людей во время пожара в помещении может быть вызвана несколькими причинами, термическим воздействием пожара, потерей видимости, воздействием токсичных продуктов горения. Однако, параметры, характеризующие эти воздействия в большинстве случаев не контролируются пожарными извещателями, применяемыми в жилых помещениях. Именно поэтому важным является изучение связи параметров окружающей

среды, значение которых должно измеряться пожарными извещателями с параметрами, которые характеризуют опасные факторы пожара. Связь между ними должна определять требования к чувствительности пожарного извещателя.

Таким образом, чтобы определить требования к пожарным извещателям для жилых помещений необходимо, прежде всего, определить опасный фактор или факторы пожара, которые критичны в таких помещениях. Затем из полномасштабных экспериментов оценить время, за которое опасные факторы достигают предельно допустимого значения. После этого из полученных в полномасштабных экспериментах зависимостей, устанавливающих связь между значениями опасных факторов пожара и параметрами окружающей среды, необходимо определить значения параметров окружающей среды, которые должны достоверно измеряться пожарными извещателями. Это позволит установить требования к характеристикам извещателей для жилых помещений.