

могут быть использованы в качестве блоков детектирования волноводных оптических дозиметров с высокой чувствительностью.

Наиболее перспективными с точки зрения достижения высокой чувствительности являются оптические датчики поглощенной дозы ионизирующего излучения на базе кольцевых волноводных резонаторов с полимерным покрытием. При этом для увеличения чувствительности в кольцевых резонаторах можно использовать волноводы с горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными полимером, показатель преломления которого изменяется под воздействием ионизирующего излучения.

#### Литература

1. Van Lint, V. A. J. The physics of radiation damage in particle detectors / V. A. J. Van Lint // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 1987. – Vol. 253, № 3. – P. 453–459.
2. Johnston, A. H. Radiation effects in optoelectronic device / A. H. Johnston // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2013. – Vol. 60, № 3. – P. 2054–2073.
3. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations / G. P. Summers [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1993. – Vol. 40, № 6. – P. 1372–1379.
4. West, R. H. Effects related to dose deposition profiles in integrated optics structures / R. H. West, S. Dowling // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1996. – Vol. 43, № 3. – P. 1044–1049.
5. Girard, S. 14-MeV neutron, gamma-ray, and pulsed X-ray radiation-induced effects on multimode silica-based optical fibers / S. Girard, J. Baggio, J. Bisutti // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – Vol. 53, № 6. – P. 3750–3757.
6. An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors / F. Berghmans [et al.] // Optical Waveguide Sensing and Imaging. 1 ed. – Netherlands: Springer, 2008. – P. 127–165.
7. Total ionizing dose effects on silicon ring resonators / S. Bhandaru [et al.] // IEEE Transactions on nuclear science. – 2015. – Vol. 62, № 1. – P. 323–328.
8. Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides / S. Grillanda [et al.] // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41, № 13. – P. 3053–3056.
9. Gamma radiation effects in amorphous silicon and silicon nitride photonic devices / Q. Du [et al.] // Optics Letters. – 2017. – Vol. 42, № 3. – P. 587–590.
10. Piao, F. The mechanism of radiation-induced compaction in vitreous silica / F. Piao, W.G. Oldham, E.E. Haller // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2000. – Vol. 276, № 1–3. – P. 61–71.

УДК 621.391.63;535.361

### МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ МЕЖЭЛЕМЕНТНОГО КОНТРАСТА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИНУЛЕВЫМ ОПТИЧЕСКИМ КОНТРАСТОМ ДЛЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрен новый метод повышения лазерно-локационного распознавания объектов с квазинулевым оптическим контрастом поверхности. Получены зависимости разрешающей способности распознавания по глубине рельефа поверхности объектов с квазинулевым оптическим контрастом. Показаны преимущества метода по сравнению с методами распознавания по оптическому контрасту.

**Ключевые слова:** обнаружение, распознавание объектов с квазинулевым оптическим контрастом.

### METHOD OF INCREASING THE INTERELEMENT CONTRAST OF THE SURFACE OF OBJECTS WITH QUASI-ZERO OPTICAL CONTRAST FOR THEIR EFFECTIVE LASER-LOCATION RECOGNITION

Ivanov V., Ivanov N.

Institute for nuclear problems of BSU  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** A new method of increasing laser-location recognition of objects with quasi-zero optical surface contrast is considered. The dependences of the recognition resolution on the depth of the surface relief of objects with quasi-zero optical contrast are obtained. The advantages of the method in comparison with optical contrast recognition methods are shown.

**Key words:** detection, recognition of objects with quasi-zero optical contrast.

Адрес для переписки: Иванов В.И., ул. Бобруйская, 11, Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: ivanov.inp@gmail.com

Обнаружение и распознавание объектов локационными лазерными системами видения (ЛЛСВ) резко ухудшается с уменьшением оптического контраста объекта  $k_0$  [1, 2] и становится невозможным при

$$k_0 < k_N, \quad (1)$$

где  $k_N = 0,02$  – пороговый контраст визуального зрения (контраст на экране видеорегистратора или на входе ЛЛСВ) [2]

Нормированный межэлементный (дифференциальный) оптический контраст поверхности объекта  $k_0$  можно представить уравнением

$$k_0 = \frac{K_1 - K_2}{K_2}, \quad (2)$$

где  $K_1$  – коэффициент отражения одного элемента поверхности объекта;  $K_2$  – коэффициент отражения некоторого другого элемента поверхности, по отношению к которому осуществляется распознавание (детализация) объекта.

Отраженное поле импульсного лазерного излучения  $E(S) = \sum_k E_k(S)$  в плоскости изображения ЛЛСВ представляет собой совокупность  $k$  элементарных волн (парциальных пучков), отраженных от  $k$  точек поверхности  $S$ , каждый из которых характеризуется интенсивностью  $E_k$  и временем запаздывания прихода  $\tau_k$  парциальных пучков сигнала на многоэлементный фотодетектор ЛСВ

$$\tau_k = 2\xi_k/C, \quad (3)$$

где  $\xi_k$  – глубина рельефа поверхности в  $k$ -той точке относительно точки поверхности, наиболее близкой к ЛЛСВ (точка  $\xi = 0$ ).

На основе уравнений (2), (7)–(9) и принимая во внимание, что  $k_0 = \frac{K_1 - K_2}{K_2}$ , а  $\frac{K_1}{K_2} = k_0 + 1$ , уравнение межэлементного результирующего контраста получено в виде

$$k_1 = \frac{\Delta B}{B_{k2}} = k_0 + \frac{\Delta\tau_k(k_0+1)}{\tau_p - \tau_{k2}} = k_0 + \frac{\Delta\xi_k(k_0+1)}{0,5\tau_p C - \xi_{k2}}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что контраст  $k_1 > k_0$  и увеличивается, как с увеличением ширины интервала  $\Delta\xi_k = (\xi_{k2} - \xi_{k1})$ , так и с увеличением координаты его расположения по глубине  $\xi_k = \xi_{k2}$ , т. е. при постоянной величине  $\Delta\xi_k$  контраст  $k_1$  возрастает пропорционально значению  $\xi_k = \xi_{k2}$ . Из уравнения (4) имеем:

$$\Delta\xi_k = \frac{(k_1 - k_0)(0,5\tau_p C - \xi_k)}{1 + k_0}. \quad (5)$$

Интервал  $\Delta\xi_k$  в (5) характеризует минимальный интервал глубин рельефа поверхности объекта с квазиуловым оптическим контрастом  $k_0$ , на котором еще возможно раздельное наблюдение двух соседних элементов поверхности с контрастом  $k_1 > k_0$ , т. е. определяет разрешающую способность детализации наблюдения поверхности объекта по глубине рельефа. Для обеспечения необходимого межэлементного контраста равного пороговому значению  $k_N$  разрешающая способность  $\Delta\xi_k$  по глубине рельефа  $\xi_k$  определяется из (5) при  $k_1 = k_N$ , т. е.

$$\Delta\xi_k = \frac{(k_N - k_0)(0,5\tau_p C - \xi_k)}{1 + k_0}. \quad (6)$$

Значение  $\Delta\xi_k$  при  $k_0 = 0$  определяется из уравнения (6) в виде:

$$\Delta\xi_k = k_N(0,5\tau_p C - \xi_k). \quad (7)$$

При регистрации задней части поля для некоторых двух элементов поверхности объекта  $\Delta S_{k1}$  и  $\Delta S_{k2}$ , расположенных на глубинах  $\xi_{k1}$  и  $\xi_{k2}$

( $\xi_{k2} > \xi_{k1}$ ) с коэффициентами отражения  $K_1$  и  $K_2$  соответственно, на основании уравнения для определения аналогичных параметров получены в виде:

$$B_{k1} = P_1 K_1 F_p \tau_{k2}; \quad (8)$$

$$B_{k2} = P_1 K_2 F_p \tau_{k1}; \quad (9)$$

$$\Delta B = B_{k1} - B_{k2} = P_1 F_p [\tau_2(K_1 - K_2) + K_2 \Delta\tau_k]. \quad (10)$$

Уравнение результирующего контраста имеет вид:

$$k_2 = \frac{\Delta B}{B_{k2}} = \frac{k_0 \xi_{k2} + \Delta\xi_k}{\xi_{k2} - \Delta\xi_k}. \quad (11)$$

Уравнение разрешающей способности по глубине рельефа получено из (11):

$$\Delta\xi_k = \frac{\xi_{k2}(k_2 - k_0)}{1 + k_2}, \quad (12)$$

которое при  $k_2 = k_N$ :

$$\Delta\xi_k = \frac{\xi_{k2}(k_N - k_0)}{1 + k_N}, \quad (13)$$

а при  $k_0 = 0$ :

$$\Delta\xi_k = \frac{\xi_{k2} k_N}{1 + k_N}. \quad (14)$$

На рис. 1 приведены графики зависимостей разрешающей способности  $\Delta\xi_k$  по глубине рельефа  $\xi_k$ : а) для передней части отраженного поля (уравнение (6)); б) для задней части поля (уравнение 19) при  $k_0 < k_N = 0,02$ ,  $\tau_p = 20$  нс,  $C$  – скорость света.

Длительность излучаемого импульса

$$\tau_p > 2\xi_{k\max}/C, \quad (15)$$

где  $\xi_{k\max}$  – максимальная глубина рельефа поверхности объекта

Двумерные распределения энергии отраженного светового поля  $B(S)$  получают путем накопления интенсивности отраженного поля  $E(S, t)$  в пространственно – временных строках с длительностью, равной длительности лазерных импульсов  $\tau_{s1} = \tau_{s2} = \tau_p$ , на интервале  $(t_1, t_1 + \tau_p)$ , который включает передний фронт отраженного поля, или на интервале  $(t_1 + \tau_p, t_1 + 2\tau_p)$  – включающего задний фронт поля. В первом случае

$$B_1(S) = |E_k(S)|^2 (\tau_p - \tau_k), \quad (16)$$

где  $t_1$  – момент начала прихода отраженного сигнала по отношению к моменту излучения лазерного импульса  $t_0$ .

Во втором случае:

$$B_2(S) = |E_k(S)|^2 \tau_k. \quad (17)$$

При регистрации передней части поля для некоторых двух элементов поверхности объекта  $\Delta S_{k1}$  и  $\Delta S_{k2}$ , расположенных на глубинах  $\xi_{k1}$  и  $\xi_{k2}$  ( $\xi_{k2} > \xi_{k1}$ ) с коэффициентами отражения  $K_1$  и  $K_2$  соответственно, имеем:

$$B_{k1} = P_1 K_1 F_p (\tau_p - \tau_{k1}); \quad (18)$$

$$B_{k2} = P_1 K_2 F_p (\tau_p - \tau_{k2}); \quad (19)$$

$$\Delta B = B_{k1} - B_{k2} = P_1 F_p [\tau_p (K_1 - K_2) - \tau_{k2} (K_1 - K_2) + K_1 \Delta \tau_k], \quad (20)$$

где  $\Delta \tau_k = \tau_{k2} - \tau_{k1}$ ;  $\tau_{k1} = \tau_{k2} - \Delta \tau_k$ .

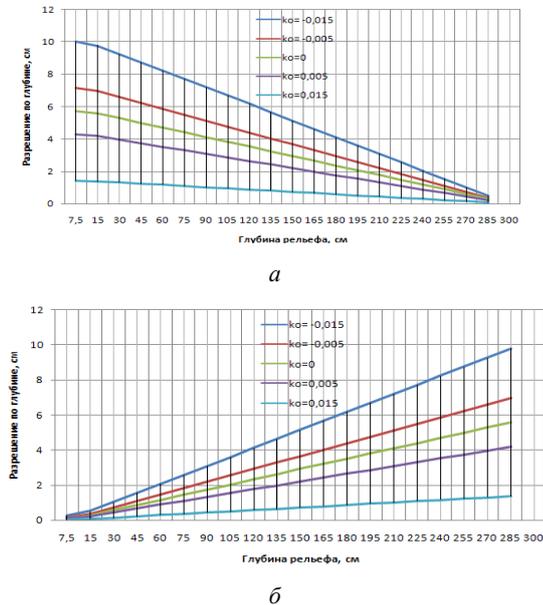


Рисунок 1 – Зависимости разрешающей способности  $\Delta \xi_k$ : по глубине рельефа поверхности  $\xi_k$

Согласно графикам, для обеспечения более высокой разрешающей способности  $\Delta \xi_k$  на переднем плане объекта  $\xi_k \approx 0 \div \tau_p C/4$  оценку разрешающей способности целесообразно получать по

сигналам с задним фронтом, а разрешающую способность на заднем плане объекта для  $\xi_k \approx \tau_p C/4 \div \tau_p C/2$  – по сигналам с передним фронтом. Из графиков следует, что при  $\tau_p = 20$  нс и вариации  $k_0$  в пределах  $k_0 = 0 \pm 0,015$  и  $k_N = 0,02$  разрешающая способность в диапазоне глубины рельефа поверхности объекта  $\xi_k \approx 0 \div 3$  м не хуже  $\Delta \xi_k \leq 6 \mp 4$  см. При уменьшении длительности лазерного импульса  $\tau_p$  разрешающая способность также улучшается (т. е.  $\Delta \xi_k$  уменьшается с уменьшением длительности). Так при  $\tau_p = 10$  нс разрешающая способность в диапазоне  $\xi_k \approx 0 \div 1,5$  м не более  $\Delta \xi_k \leq 2,8 \mp 1,7$  см.

Следует отметить, что достигаемая при этом более высокая разрешающая способность переднего плана рельефа поверхности объектов  $\Delta \xi_k$  (по задней части сигнала, рис. 1, б), которая, например, для  $k_0 = 0 \pm 0,015 < k_N$  в диапазоне  $\xi_k \approx 0 \div 0,75$  м не превосходит величины  $\Delta \xi_k \leq 1,47 \mp 1,1$  см, позволяет обнаруживать и различать существенно более мелкие детали переднего плана различных замаскированных малогабаритных объектов с нулевым и квазиулевым контрастом: вооруженных и невооруженных людей, боеприпасы, малогабаритную робототехнику и др. с более высоким разрешением  $\Delta \xi_k$ .

#### Литература

1. Карасик, В. Е. Локационные лазерные системы видения / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2013. – 478 с.
2. Зега, Э. П. Перенос изображений в рассеивающей среде / Э. П. Зега, А. П. Иванов, И. Л. Кацев. – Минск: Наука и техника. – 1985. – 327 с.

УДК 621.373.826

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО СПЕКЛ-АНАЛИЗА МИКРОВИБРАЦИЙ И СМЕЩЕНИЙ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на повышение чувствительности лазерного спекл-анализа для дистанционной диагностики микровибраций и смещений поверхностей объектов на основе анализа флуктуаций интегральной интенсивности лазерных спекл-полей.

**Ключевые слова:** лазерная диагностика микровибраций и перемещений по спекл-полям.

### THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF LASER SPECKLE ANALYSIS OF MICROVIBRATIONS AND DISPLACEMENTS

Ivanov V., Ivanov N.

Institute for nuclear problems of BSU  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** Theoretical and experimental studies aimed at increasing the sensitivity of laser speckle analysis for remote diagnostics of micro-vibrations and displacements of object surfaces based on the analysis of fluctuations in the integral intensity of laser speckle fields have been carried out.

**Key words:** laser diagnostics of micro-vibrations and movements in speckle fields.

Адрес для переписки: Иванов В.И., ул. Бобруйская, 11, Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: ivanov.inp@gmail.com