

// Proceedings of International Conference "Automatic Target Recognition XIII"; Ed. Firooz A. Sadjadi; Orlando (USA), April 2003, SPIE Vol. 5094. P. 301-312. **3.** Sasaki K., Sato T, Nakamura Y. Holographic Passive Sonar // IEEE Trans. Sonic Ultrasonic, SU-24, May 1997. P. 193-200. **4.** Bartelt H., Lohmann A.W., Wirtzner B. Phase and amplitude recovery from bispectra // Applied Optic, 1984. Vol. 23. P. 3121-3129. **5.** A. Totzky, V. Lukin, J. Astola, I. Kurbatov, K. Egiazarian, Bispectrum based reconstruction technique by tapering pre-distortion of image rows // Proceedings of the Seventh All-Ukrainian Conference on Signal/Image Processing and Pattern Recognition, Kiev, Ukraine, Oct. 2004. P. 229-232. **6.** Nakamura M. Waveform estimation from noisy signal with variable signal delay using bispectrum averaging // IEEE Trans. On Biomedical Engineering, 1993. 40, No 4. P. 769-782. **7.** Totzky A., Krylov O., Kurbatov I., Lukin V., Astola J., Egiazarian K. Statistical investigations of bispectral and image restoration for Gaussian and non-Gaussian noise environments // Proc. International TICSP, Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing SMMSP'2001, Pula, Croatia, June 2001. P. 231-241. **8.** Totzky A.V., Roenko A.A., Lukin V.V., Zelensky A.A., Astola J.T., Egiazarian K.O. Combined bispectrum-median reconstruction of 1-D signal waveform // Proceedings of the 2004 International TICSP Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing, SMMSP'2004, Vienna (Austria), September 2004. P. 87-93. **9.** Totzky A.V., Kurbatov I.V., Lukin V.V., Zelensky A.A. Use of 2-D Filtering of Bispectrum Estimations for 1-D Signal Reconstruction in Mixed Noise Environment // Proc. of Intern. TICSP Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing, SMMSP'2002, TICSP Series #17, Toulouse, France, Sept 2002. P. 171-178. **10.** Lukin V., Totzky A., Kurekin A., Kurbatov I., Astola J., Egiazarian K., Signal Waveform reconstruction from noisy bispectrum estimations pre-processed by vector filters // Proceedings of the Seventh International Symp. On Signal Processing and Applications, Paris (France), 2003, July. 1-4. Vol. 2. P. 169-172. **11.** Totzky A.V., Kurbatov I.V., Lukin V.V., Zelensky A.A., Astola J., Egiazarian K. Estimation of Unknown Signal Shape by Bispectrum-Filtering Techniques for Gaussian and non-Gaussian Noise Environments // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника, вып. 1), Москва, 2005. № 4. С. 43-54. **12.** Fevralev D.V., Lukin V.V., Totzky A.V., Egiazarian K., Astola J. Signal shape reconstruction by DCT-based filtering of fourier spectrum recovered from bispectrum data //

SMMSP'2005, Riga (Latvia), June 2005. P. 87-93. **13.** Roenko A.A., Lukin V.B., Тоцкий А.В. Применение робастных оценок при восстановлении формы сигнала на основе биспектральной обработки // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. Харьков: Национальний аерокосмічний університет. 2004. Вып. 4 (8). С. 5-13. **14.** Donoho D.L., Johnstone I.M., Adapting to unknown smoothness by wavelet shrinkage // Journal of American Statistical Association, 1995. No 11. Vol. 90. P. 1200-1224. **15.** Oktem R. Transform Domain Algorithms for Image Compression and Denoising // Thesis for the degree of Doctor of Technology, Tampere University of Technology (Tampere, Finland), 2000. 142 p. **16.** Gotchev A. Spline and Wavelet Based Techniques for Signal and Image Processing // Thesis for the degree of Doctor of Technology, Tampere University of Technology (Tampere, Finland), 2003. 171 p. **17.** Astola J., Kuosmanen P. Fundamentals of nonlinear digital filtering // CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 1997.

Поступила в редколлегию 04.11.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Кулёмин Г.П.

**Зеленский Александр Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. ППОС НАКУ им. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: цифровая обработка сигналов и изображений. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. (057) 707-48-41 E-mail: lukin@ai.kharkov.com; факс (057) 744-11-86.

**Лукін Владимир Васильевич**, д-р техн. наук, проф., зам. зав. каф. по НИР каф. ППОС НАКУ им. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: цифровая обработка сигналов и изображений. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. (057) 707-48-41 E-mail: lukin@ai.kharkov.com; факс (057) 744-11-86.

**Тоцкий Александр Владимирович**, канд. техн. наук, доцент каф. ППОС НАКУ им. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: цифровая обработка сигналов и изображений. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. (057) 707-48-41 E-mail: lukin@ai.kharkov.com; факс (057) 744-11-86.

**Февралеv Дмитрий Владимирович**, аспирант каф. ППОС НАКУ им. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: цифровая обработка сигналов и изображений. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. (057) 707-48-41 E-mail: lukin@ai.kharkov.com; факс (057) 744-11-86.

УДК 620.179.17

## О ПОВЫШЕНИИ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ

РУЖЕНЦЕВ И.В., МАРЧЕНКО А.В.

Обосновывается применение спектральной обработки автокорреляционной функции при измерении толщины металлических изделий ЭМА-методом. Показывается, что данный способ обработки позволяет получить существенный выигрыш в чувствительности ЭМА приборов при измерении малой толщины в условиях значительных акустических помех.

### Введение

Высокие технологии предполагают как развитие новых, так и повышение точности известных методов измерения геометрических параметров.

Электромагнитно-акустические (ЭМА) методы принадлежат к числу одних из наиболее популярных среди методов неразрушающего контроля [1-3]. Однако на наш взгляд предельно достижимая точность измерения толщины ЭМА-методом в условиях значительных акустических помех может быть существенно повышена при использовании спектральной обработки измерительной информации.

В ряде работ сделаны успешные попытки повышения чувствительности ЭМА-приборов. В частности, в работе [4] обосновано применение корреляционного метода обработки информации, основанного на вычислении корреляционного интеграла:

$$q(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \xi(t)s(t-\tau)dt, \quad (1)$$

где  $N_0$  – односторонняя спектральная плотность белого шума;  $\xi(t)$  – колебание, принятое на конечном интервале  $T$ ;  $s(t-\tau)$  – полезный сигнал, принимаемый на фоне аддитивного гауссовского белого шума.

Расположение максимума параметра  $\lambda$  на временной оси однозначно связано с толщиной изделия и равно времени прохождения радиоимпульсом расстояния, соответствующего удвоенной толщине изделия.

При малых отношениях сигнал/шум данный способ имеет значительную погрешность и требует применения специальных процедур для определения локальных максимумов корреляционной (взаимокорреляционной или автокорреляционной) функции.

Устранить указанные недостатки можно путем определения спектра корреляционной функции.

Количество переотражений в материалах из-за незначительных потерь акустической энергии может достигать нескольких десятков и даже сотен, поэтому на практике в большинстве случаев корреляционная функция носит периодический характер.

Спектр периодической автокорреляционной функции дискретен, а интервал между соседними спектральными составляющими соответствует частоте следования радиоимпульсов автокорреляционной функции.

Результаты моделирования процесса прохождения ультразвуковых колебаний в объекте контроля показали, что использование спектральной обработки автокорреляционной функции при измерении малых толщин изделий с небольшим затуханием ультразвуковых колебаний в условиях значительных акустических помех является наиболее приемлемым.

*Цель работы* – теоретически обосновать эффективность применения спектральной обработки автокорреляционной функции при измерении толщины металлических изделий ЭМА-методом.

*Задача исследования* – сделать количественные оценки и сравнения отношений сигнал/шум для четырех вариантов обработки донных сигналов при использовании ЭМА-метода: при определении взаимо- и автокорреляционной функций, а также при их спектральной обработке.

### Отношение сигнал/шум при использовании ЭМА-метода измерения толщины

Отношение максимального значения сигнальной функции к среднему квадратическому значению шумовой функции (отношение сигнал/шум) при взаимокорреляционном приеме согласно [5]:

$$\text{SNVT} = \frac{q_{s\max}}{\sigma_n} = \sqrt{\frac{2E}{N_0}}, \quad (2)$$

где  $E = \frac{A^2 \tau_n}{2}$ ,  $A$  – амплитуда зондирующего радиоимпульса;  $\tau_n$  – длительность зондирующего радиоимпульса.

Автокорреляционная функция описывается формулой [5]:

$$q(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \xi(t)\xi(t-\tau)dt. \quad (3)$$

Сигнал, принятый на конечном интервале  $T$ :

$$\xi(t) = s(t) + n(t), \quad (4)$$

здесь  $n(t)$  – гауссовский белый шум.

Интеграл (3) представим так:

$$q(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^T (s(t) + n(t))(s(t-\tau) + n(t-\tau))dt. \quad (5)$$

Перепишем (5) в виде:

$$q(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^T [s(t)s(t-\tau) + s(t)n(t-\tau) + n(t)s(t-\tau) + n(t)n(t-\tau)]dt, \quad (6)$$

сигнальная функция при этом

$$A = \frac{2}{N_0} \int_0^T s(t)s(t-\tau)dt. \quad (7)$$

Шумовая функция:

$$B = \frac{2}{N_0} \int_0^T [s(t)n(t-\tau) + n(t)s(t-\tau) + n(t)n(t-\tau)]dt; \quad (8)$$

$$B = \frac{2}{N_0} \left[ \int_0^T 2s(t)n(t-\tau)dt + \int_0^T n(t)n(t-\tau)dt \right]. \quad (9)$$

Таким образом, шумовая функция состоит из двух компонент:

$$B_1 = \frac{4}{N_0} \int_0^T s(t)n(t-\tau)dt, \quad (10)$$

$$B_2 = \frac{2}{N_0} \int_0^T n(t)n(t-\tau)dt. \quad (11)$$

Суммарная дисперсия шумового сигнала:

$$\sigma_n^2 = \sigma_{B_1}^2 + \sigma_{B_2}^2, \quad (12)$$

$B_1$  – функция взаимной корреляции между шумом и полезным сигналом. Она в два раза больше подобной составляющей шумовой функции при взаимокорреляционном приеме, поскольку и опорное, и принятое колебание содержит шум и определяется как:

$$\sigma_{B_1}^2 = n \frac{4E}{N_0}. \quad (13)$$

Компонента  $B_2$  – корреляционная функция шумового сигнала.

Согласно [6] корреляционная функция ограниченного по частоте белого шума равна:

$$\begin{aligned} R_{nn}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T n(t)n(t-\tau)dt = \\ &= N_0 P \left( \frac{\sin \pi P \tau}{\pi P \tau} \right) \cos 2\pi f_0 \tau, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $P$  – ширина полосы частот белого шума;  $f_0$  – центральная частота полосы частот  $P$ .

Итак: 
$$B_2 = \frac{2}{N_0} R_{nn}(\tau)T. \quad (15)$$

Подставляя в (15) максимум функции (14), получаем выражение для дисперсии шумовой компоненты  $B_2$ :

$$\sigma_{B_2}^2 = 2PT. \quad (16)$$

Суммарная дисперсия шумовой функции (12):

$$\sigma_n^2 = n \frac{4E}{N_0} + 2PT. \quad (17)$$

Отношение сигнальной функции к шумовой при автокорреляционном приеме:

$$\frac{q_s(\tau)}{\sigma_n} = n \frac{2E}{N_0} / \sqrt{n \frac{4E}{N_0} + 2PT}. \quad (18)$$

Оценим отношение сигнал/шум в частотной области, для чего определим максимумы спектров сигнальной и шумовой функций при взаимно- и автокорреляционном приеме.

Величина максимума спектра автокорреляционной функции.

Максимум спектра последовательности  $n$  радиоимпульсов равен [7]:

$$\max[S_p(\omega)] = \frac{A\tau_n}{2} n. \quad (19)$$

Спектр свертки двух сигналов равен произведению спектров этих сигналов [7]. Максимум спектра автокорреляционной функции (7):

$$\max[S_A] = \frac{A^2\tau^2}{2N_0} n^2 = \frac{E\tau_n}{N_0} n^2. \quad (20)$$

Максимум спектра взаимокорреляционной функции:

$$\max[S_{v\Sigma}] = \frac{E\tau_n}{N_0} n. \quad (21)$$

Рассмотрим спектральную плотность составляющих шумовой функции при авто- и взаимокорреляционном приеме.

Перейдем от функции спектральной плотности мощности ограниченного по частоте белого шума к финитному преобразованию Фурье  $X_T(f)$  белого шума, заданного на интервале времени длиной  $T$ .

По определению функцию спектральной плотности для частот  $f$  в интервале от  $f=0$  до  $f=\infty$  представляем в виде

$$N_0 = \frac{2}{T} |X_T(f)|^2. \quad (22)$$

Модуль  $X_T(f)$ :

$$|X_T(f)| = \sqrt{\frac{N_0 T}{2}}. \quad (23)$$

В соответствии с теоремой о свертке получим максимум спектра шумовой компоненты  $B_1$ :

$$\max|S_{NB1}| = 2An\tau_n \sqrt{\frac{T}{2N_0}}. \quad (24)$$

Анализируя характер спектра шумовой компоненты  $B_1$  для автокорреляционной функции, видим, что в спектральной области она суммируется с полезным сигналом, увеличивая общий полезный эффект.

Максимум спектра аналогичной шумовой компоненты при взаимокорреляционном приеме:

$$\max|S_N| = A\tau_n \sqrt{\frac{T}{2N_0}}. \quad (25)$$

Спектр шумовой компоненты  $B_2$ :

$$|S_{NB2}| = T. \quad (26)$$

Определим максимум флуктуаций шумовой компоненты  $B_2$  в частотной области. Спектр свертки гауссова случайного процесса  $x(t)$  равен квадрату модуля спектра этого случайного процесса:

$$|S_{NB2}| = |X(f, T)|^2. \quad (27)$$

Преобразование Фурье  $X(f, T)$  есть комплексная величина, действительная  $X_R(f, T)$  и мнимая  $X_I(f, T)$  части которой представляют собой некоррелированные случайные величины с нулевыми средними значениями и одинаковыми дисперсиями [6]. Так как преобразование Фурье есть линейная операция, то, очевидно, что в том случае, когда процесс  $x(t)$  подчиняется нормальному распределению, функции  $X_R(f, T)$  и  $X_I(f, T)$  будут нормальными случайными величинами. Согласно [6], величина

$$|X(f, T)|^2 = X_R^2(f, T) + X_I^2(f, T) \quad (28)$$

есть сумма квадратов двух независимых величин. Следовательно, каждая частотная составляющая оценки  $|S_{NB2}|$  подчиняется  $\chi^2$ -распределению с  $k=2$  степенями свободы. При этом среднее значение и дисперсия величины, подчиняющейся  $\chi^2$ -распределению, равны 1 и 2 соответственно. С учетом того, что реальная оценка  $|S_{NB2}|$  равна  $T$ , а среднее квадратическое отклонение  $\sigma[|S_{NB2}|] = \sqrt{2T}$ , найдем интервал разброса величины  $|S_{NB2}|$  с доверительной вероятностью  $q=0,8$ . По таблице [8], содержащей плотность распределения для  $\chi^2$ , находим  $\chi_{0,1}^2 = 4,6$ ,  $\chi_{0,9}^2 = 0,211$ . Таким образом, максимум флуктуаций оценки  $|S_{NB2}|$  с доверительной вероятностью  $q=0,8$  будет:

$$\max\{|S_{NB2}|\} \approx 4T. \quad (29)$$

Компонента  $B_2$  во взаимокорреляционной функции (2) отсутствует.

Запишем окончательные выражения для отношения сигнал/шум во временной и частотной областях при взаимно- и автокорреляционном приеме.

Во временной области:

– при взаимокорреляционном приеме

$$SNVT = \sqrt{\frac{2E}{N_0}}; \quad (30)$$

– при автокорреляционном приеме

$$SNAT = n \frac{2E}{N_0} / \sqrt{n \frac{4E}{N_0} + 2PT}. \quad (31)$$

В частотной области:

– при взаимокорреляционном приеме

$$SNV = \frac{\sqrt{2}En}{A\sqrt{N_0T}}; \quad (32)$$

– при автокорреляционном приеме

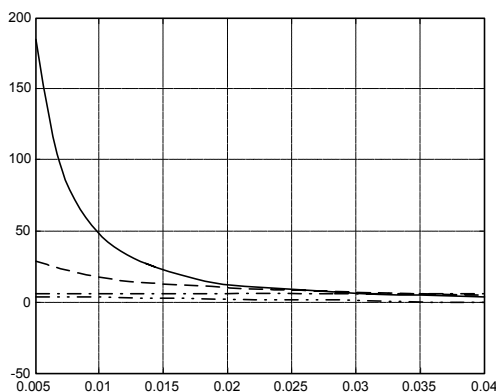
$$SNA = \left[ \frac{E\tau_i}{N_0} n^2 + An\tau_i \sqrt{\frac{2T}{N_0}} \right] / 4T. \quad (33)$$

Пусть среднее квадратическое отклонение шума  $\sigma = 1$  В, амплитуда полезного сигнала  $A=2$ В, скорость распространения упругих колебаний в материале  $c = 3515$  м/с, время наблюдения  $T = 150$  мкс, частота заполнения радиоимпульса  $f=2,5$  МГц, длительность импульсов  $\tau = 1,6$  мкс.

Зависимости отношения сигнал/шум от толщины объекта контроля при использовании взаимокорреляционной функции, а также при их спектральной обработке показаны на рисунке.

сигнал

шум



Зависимость отношения сигнал / шум от толщины:

— при спектральной обработке автокорреляционной функции; ---- при использовании автокорреляционной функции; -.- при использовании взаимокорреляционной функции; -.-.- при спектральной обработке взаимокорреляционной функции

Из рисунка видно, что использование автокорреляционной функции само по себе дает существенный выигрыш в чувствительности при толщине материала <30 мм. Однако применение на практике такого способа требует использования специальных процедур определения периода донных импульсов. Спектральная обработка автокорреляционной функции в указанном диапазоне позволяет получить максимальное отношение

сигнал/шум при прочих равных условиях за счет преобразования шумовой компоненты во временной области  $V_1$  в полезную составляющую в частотной области. Вместе с тем определение толщины материала по дискретному спектру автокорреляционной функции не представляет технологических сложностей.

## Выводы

Теоретически обосновано применение спектральной обработки автокорреляционной функции при толщинометрии ЭМА-методом, что составляет научную новизну исследования.

Полученные соотношения для оценки отношения сигнал/шум при разных способах обработки отраженных от дна изделия сигналов полностью соответствуют результатам моделирования процесса измерения на ЭВМ. Анализ приведенных результатов подтверждает получение многократного повышения чувствительности ЭМА-метода при спектральной обработке автокорреляционной функции при измерении малых толщин изделий с небольшим затуханием ультразвуковых колебаний в условиях значительных акустических помех.

*Практическая значимость* результатов исследования заключается в том, что данный способ обработки может лечь в основу построения высокоточных ЭМА толщиномеров, предназначенных как для ручного, так и для автоматического измерения толщины металлических изделий.

**Литература:** 1. *Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник* / Под. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488с. 2. *Сучков Г.М.* О главном преимуществе ЭМА способа// Дефектоскопия. 2000. №10. С.67-70. 3. *Сучков Г.М.* Разработка и внедрение технологии сплошного автоматического обнаружения дефектов макроструктуры объемно-закаленных рельсов бесконтактным ультразвуковым методом // Автореф. дисс. канд. техн. наук. Харьков: ХАДИ. 1988. 4. *Сучков Г.М.* Обработка информации. Возможности корреляционного анализа при толщинометрии ЭМА-методом// Контроль. Диагностика. 2002. №8. С.37-40. 5. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966. 678 с. 6. *Бендат Дж., Пирсон А.* Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с. 7. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. шк., 1988. 488 с. 8. *Кузнецов В.А., Ялунина Г.В.* Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы): Учеб. пособие. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 336 с.

Поступила в редколлегию 05.09.2005

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Чурюмов Г.И.

**Руженцев Игорь Викторович**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Метрология и измерительная техника» ХНУ-РЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, ул. Ленина, 29, кв.28, тел.: 30-45-75.

**Марченко Артем Владимирович**, заместитель начальника отдела Харьковского регионального научно-производственного центра стандартизации, метрологии и сертификации (ГП «Харьковстандартметрологи»). Научные интересы: метрологическое обеспечение средств измерительной техники неразрушающего контроля. Адрес: Украина, 61145, Харьков, ул. Клочковская, 193А, к.230, тел.: 54-97-93, e-mail: 150@mtl.kharkov.ua.