

ПРОБЛЕМЫ ДОСТОВЕРНОСТИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ФАНТОМОВ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М. С. ХЛЫСТУНОВ*, **В. В. ПОДУВАЛЬЦЕВ****, **Ж. Г. МОГИЛЮК***

**Московский государственный строительный университет,
Москва, Россия, e-mail: mctmgsu@mail.ru*

***Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва,
Россия, e-mail: vvpoduval@mail.ru*

Рассмотрены проблемы метрологической достоверности применения цифровых технологий в системах многоканального мониторинга полей нагрузок и технического состояния пространственных конструкций трехмерных объектов, а также аналогичные закономерности проявления фантомных амплитудных и фазовых искажений при проектном и научном моделировании с использованием широко распространенных программных комплексов.

Ключевые слова: *многоканальный мониторинг, моделирование, многомерные процессы и объекты, поля нагрузок, решетчатые и оконные функции, дискретное преобразование Фурье, искажения амплитуды и фазы, фантомная модуляция частоты.*

The metrological reliability problems of the digital technologies use in fields loads and technical condition multi-channel monitoring systems of three-dimensional objects spatial constructions are considered, as well as similar regularities of the amplitude and phase distortions phantom manifestation in project and scientific modeling with the use of widely used software complexes.

Key words: *multi-channel monitoring, simulation, multi-dimensional processes and objects, loads fields, lattice and window functions, discrete Fourier transform, amplitude and phase distortions, frequency phantom modulation.*

За последние полвека цифровые технологии обработки физической информации и виртуального моделирования заняли доминирующие позиции в аналитическом инструментарии в самых различных областях науки и техники. Тем не менее, самым ответственным, с точки зрения метрологии, направлением внедрения цифровых технологий являются многоканальные системы измерений полей распределения динамических

нагрузок и перемещений, а также инструменты проектирования в механике твердого тела и компьютерного моделирования в научных исследованиях. Это объясняется тем, что высока цена последствий в результате метрологического «сбоя» применяемого инструмента. В многоканальных измерениях он проявляется в виде амплитудных и фазовых искажений, в строительном проектировании – снижения проектных и реальных параметров надежности, прочности, устойчивости и безопасности зданий и сооружений [1] или конструкций машин, механизмов и другого оборудования (в машиностроении). В научных исследованиях [2] такие сбои обуславливают формирование цифровых фантомов виртуального моделирования и открытия несуществующих фантомных теоретических закономерностей.

Следует отдать должное основоположникам цифровых методов, которые рассматривали не только достоинства своих инноваций, но и со всей тщательностью анализировали сопутствующие метрологические проблемы цифровых технологий [3], чего, к сожалению, не наблюдается на новом, современном витке широкого внедрения таких технологий. В настоящей статье рассмотрим ряд проблем, связанных с рождением спектральных фантомов на этапе дискретизации непрерывных функций, которые присутствуют как при дискретизации сигналов во времени, так и при построении сеток контрольных точек пространственного контроля параметров природных и технологических процессов, а также узлов в конечно-элементных и конечно-разностных методах проектного моделирования [4].

В амплитудно-временном представлении решетчатых отображений оригиналов аналоговых функций явных проблем не обнаруживается, но уже в спектральных фурье-образах этих функций проявляется существенное отличие спектров оригинала и его решетчатого представления. Строгие математические выкладки, обосновывающие появление зеркального отражения спектра непрерывной функции после дискретизации, можно найти в классической литературе по цифровой обработке сигналов [например, 3]. Работы по аналогичным проблемам регулярно возобновлялись на каждом очередном этапе внедрения цифровых технологий в смежные отрасли науки и техники. В связи с этим создавалась иллюзия окончательного решения этой проблемы. Рассмотрим причины формирования в процессе дискретизации фантомных компонентов непрерывных функций при построении цифровых моделей физических процессов, полей или распределения нагрузок.

В общем виде распределенные во времени или пространстве параметры непрерывного процесса или поля в функции времени или координат можно представить в спектральной области в виде дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Спектр $\hat{A}(f)$ периодической функции координат или времени, например $A(x)$, после дискретизации также будет дискретным (решетчатым) $\hat{A}(f_n)$, а спектр решетчатой функции $A(x_n)$ – периодическим:

$$\hat{A}(\omega_n) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \hat{A}(x_n) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - n/f_d) e^{-j\omega x} dx = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \hat{A}(x_n) e^{-jk\omega/f_d},$$

где f_d – частота дискретизации.

В этом случае возможны следующие спектральные проявления дискретизации непрерывной функции:

верхняя граница частоты f_b распределения функции $A(x)$ на рис. 1, *a* в пространстве (времени), находится, как показано на рис. 1, *в*, ниже частоты Найквиста–Котельникова $f_{НК} = 0,5 f_d$;

верхняя граница частоты f_b находится, как показано на рис. 1, *з*, выше частоты Найквиста–Котельникова.

На кривых спектров функций после дискретизации (см. рис. 1) показано, что кроме исходного спектра непрерывной функции (1) после дискретизации наблюдается появление зеркальных спектров (2), симметричных относительно частоты Найквиста–Котельникова и повторяющихся на частотах, кратных частоте дискретизации. Исходный спектр 1 по форме идентичен зеркальным, но расположен в истинной полосе частот исходного сигнала, часть зеркального спектра 3 проникает в полосу частот исходного сигнала, когда f_b непрерывной функции превышает $f_{НК}$ (см. рис. 1, *з*).

К числу других важных метрологических проблем следует отнести возникновение спектральных фантомов, связанных с кратностью числа выборок за период функции, подвергнутой ДПФ; введением сглаживающих окон; нерегулярностью размещения во времени или пространстве точек дискретизации или узлов сетки конечно-элементных или конечно-разностных моделей в проектных расчетах или виртуальных научных исследованиях. Вклад таких фантомных эффектов в искажение физической информации имеет более серьезные метроло-

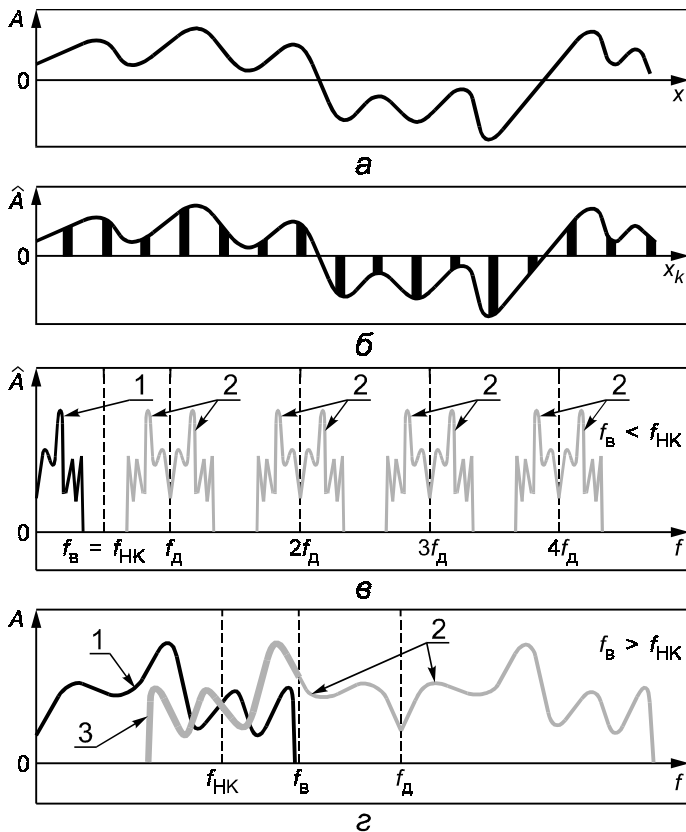


Рис. 1. Графики:

непрерывная функция до (а) и после (б) дискретизации;
 спектры исходный (1), зеркальный (2) и результирующий (3)
 при выполнении (в) и нарушении (г) критерия
 Найквиста–Котельникова

гические последствия, чем рассмотренный выше зеркальный эффект.

К сожалению, даже в случае соблюдения критерия Найквиста–Котельникова для гармонической функции $A(x) = \sin(2\pi f_\phi x)$, где период функции $X_\phi = 1/f_\phi$, может появиться множество малых по амплитуде спектральных компонентов. Например, если при целочисленном отношении $K = N/N_\phi = M$ подвергаемого фурье-анализу массива

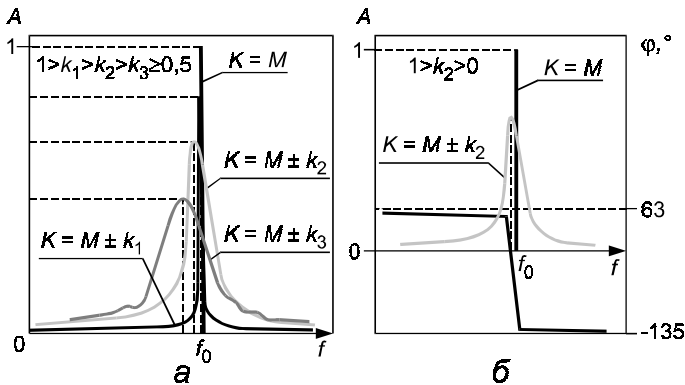


Рис. 2. Рассеяние амплитуды (а) и фазовые искажения (б) спектра функции с единичной амплитудой

выборок решетчатого представления функции $A(x)$ длиной N к числу выборки N_Φ за ее период, можно наблюдать в фурье-спектре единственную спектральную линию, то при нецелом $K=M\pm k$, где $0 < k < 1$, эта линия уменьшается по амплитуде и, расширяясь, превращается в подобие резонансного пика с затуханием, как показано на рис. 2.

Помимо рассеяния амплитуды в спектре в результате нарушения кратности этот эффект наблюдается при нарушении регулярности или модуляции частоты выборки при дискретизации, а также при нарушении равномерности сетки узлов при проектном (научном) моделировании или точек наблюдения при мониторинге пространственных конструкций (тремблинг-эффект), как показано на рис. 3, а. В случае нерегулярности дискретизации дополнительно вносятся фазовые искажения, которые также наблюдаются при плавном спадании (см. рис. 3, б) или нарастании (см. рис. 3, в) амплитуды гармонической функции.

Практически все виды перечисленных искажений амплитудного и фазового спектров гармонической функции присутствуют при наложении сглаживающих окон на фрагмент функции, подвергаемый ДПФ. Рассмотрим две функции: $A(x)$ и $H(x)$ со спектральными плотностями $A(\omega)$, $H(\Omega)$. Пусть функция $\hat{A}(x)$ определяется произведением функций $A(x)$ и $H(x)$:

$$\hat{A}(x) = A(x)H(x).$$

Выразим спектральную плотность $\hat{A}(\omega)$ через преобразование Фурье как

$$\hat{A}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{A}(x)e^{-j\omega x} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} A(x)H(x)e^{-j\omega x} dx$$

и получим

$$\hat{A}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\Omega)A(\omega - \Omega)d\Omega. \quad (1)$$

Таким образом, спектр произведения двух функций равен свертке их спектров с дополнительным коэффициентом $1/(2\pi)$.

В случае прямоугольного окна, т. е. при тривиальном извлечении фрагмента решетчатой функции для спектральной обработки, этот фрагмент можно записать в виде произведения

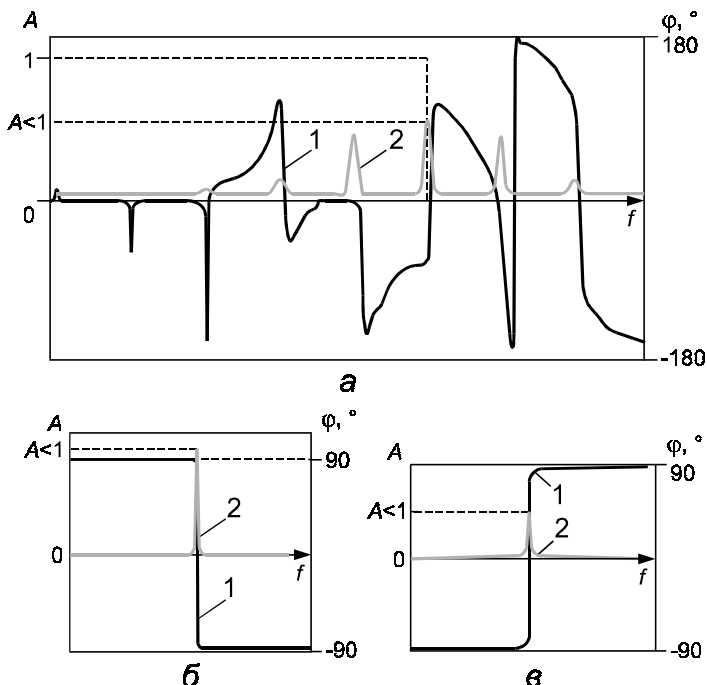


Рис. 3. Рассеяние амплитуды (1) и фазовые искажения (2) при гармонической модуляции частоты дискретизации – тремблинг-эффекте (а), спадания (б) или нарастания (в) амплитуды

$$\hat{A}[x(n)] = H(n)A[x(n)],$$

где прямоугольное окно

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{для } x < 0; \\ 1 & \text{для } 0 < x < x(N); \\ 0 & \text{для } x > x(N) \end{cases}$$

имеет очень сложный амплитудный и фазовый спектры с появлением большого числа сопоставимых с амплитудой анализируемой функции боковых спектральных составляющих. Тогда согласно (1) при наложении прямоугольного окна будут наблюдаться неприемлемые искажения спектров функции. В связи с этим используют различные сглаживающие оконные функции, существенно снижающие фантомный спектральный эффект вертикальных границ прямоугольного окна. Например, при наложении сглаживающего окна Хемминга (рис. 4, а):

$$H(n) = 0,54 - 0,46\cos(2\pi n/N), \text{ где } N \geq n \geq 0,$$

ближайшие ложные боковые составляющие спектра ДПФ фрагмента функции подавляются на 20 дБ (в 10 раз), как показано на рис. 4, б.

Однако если при цифровой обработке сигнальной информации эти проблемы и их решения отражены в нормативных документах, то, к сожалению, для многоканальных систем контроля (мониторинга) параметров пространственных процессов и объектов, медицинских и геоинформационных систем, а также программных комплексов проектирования, обработки информации и научного моделирования нормативных документов нет, поэтому решения связаны с уровнем компетентности или математической эрудиции пользователя. Также следует отметить, что в данной статье для построения амплитудно- и фазочастотных характеристик применяли программы Mathcad и Matlab, детальное описание алгоритмов которых пользователям неизвестно.

В настоящее время правила общей оценки качества программных средств представлены стандартами [5 – 7], при этом метрологические критерии качества в этих документах не предусматриваются. В стандарте [8] содержатся рекомендации по оценке точности результата решения измерительных задач с использованием вычисли-

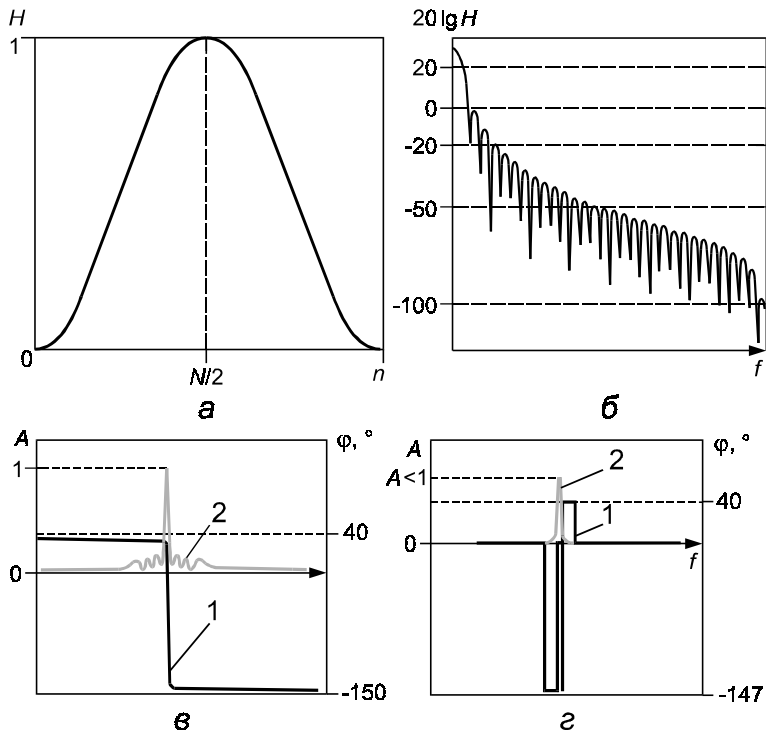


Рис. 4. Вид функции (а), амплитудно-частотная характеристика (б) окна Хемминга; рассеяние нормированной амплитуды (1) и фазовые искажения (2) спектра гармонической функции при использовании ДПФ с прямоугольным окном (в) и при наложении окна Хемминга (г)

тельных процедур, вместе с тем, оценка погрешностей, вносимых рассмотренными выше спектральными фантомами, не предусматривается. В связи с этим аттестация информационно-вычислительных систем и программных комплексов моделирования фактически подменяется обычным тестированием согласно [7], когда, несмотря на наличие фантомов, положительный результат заведомо обеспечен заложенными в программы закономерностями и алгоритмами тестирования.

На основании изложенного можно сделать выводы, что современное состояние оценки достоверности пространственных многоканальных измерений, а также трудоемких и дорогих расчетов и

модельных исследований с применением цифровых технологий, особенно в условиях вступления в ВТО [9, 10], требует оперативного надзорного и нормативного вмешательства служб метрологического контроля закупаемых и эксплуатируемых в России и за рубежом программных комплексов, цифровых технологий и проектных услуг с применением таких комплексов и технологий. Необходимо разработать порядок организации и проведения метрологической экспертизы договорной документации, а также оформления и реализации результатов метрологической экспертизы договоров, контрактов и различных соглашений. При этом метрологическая экспертиза должна включать метрологический контроль [9 – 11].

Наиболее эффективным первым шагом на пути создания такой системы контроля должны быть требования по обязательному указанию всех возможных неопределенностей (погрешностей и искажений), которые могут быть внесены в результаты пространственного мониторинга или проектного компьютерного моделирования за счет фантомных эффектов, а также по количественной оценке этих искажений или ограничений в технических паспортах, руководствах по эксплуатации и оператора. Это вполне соответствует российским и международным требованиям по защите прав потребителей на получение от поставщика официальной информации и предостережений о всех возможных искажениях и границах метрологической достоверности использования наукоемкой продукции.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Хлыстунов М. С., Могилюк Ж. Г.** Проектная оценка, мониторинг и прогноз эволюции геодформационных рисков неравномерных осадок зданий и сооружений методами динамической теории упругости с использованием программно-алгоритмического комплекса «Композит-7» // Повышение безопасности зданий и сооружений в процессе строительства и эксплуатации: Труды междунар. конф. 2009. С. 36–40.

2. **Теличенко В. И., Хлыстунов М. С.** Теория модального анализа микросейсмических процессов и моделирование геодформационных процессов в основаниях // Вестник отделения строительных наук РААСН. 2010. Т. 1. С. 178–182.

3. **Nyquist H.** Certain topics in telegraph transmission theory // Trans. AIEE. 1928. V. 47. P. 617–644.

4. **Подувальцев В. В., Хлыстунов М. С., Могилюк Ж. Г.** Метрологические характеристики численного моделирования и расчета резонансных частот методом конечных элементов // Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2011. Вып. 11 [Электрон. ресурс]. <http://technomag.edu.ru/doc/252202.html> (дата обращения 03.05.2013 г.).

5. **ГОСТ 28195–89.** Оценка качества программных средств. Общие положения.

6. **ГОСТ 28806–90.** Качество программных средств. Термины и определения.

7. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119–2000.** Информационная технология. Пакеты программ. Требования к качеству и тестирование.

8. **ИСО/МЭК 9126–93.** Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению.

9. **Подувальцев В. В.** О метрологической экспертизе и наиболее насущных проблемах метрологического обеспечения // Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2012. Вып. 2 [Электрон. ресурс]. <http://technomag.edu.ru/doc/327076.html> (дата обращения 03.05.2013 г.).

10. **Подувальцев В. В.** Законодательная метрология: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

11. **Киселев М. И., Подувальцев В. В., Хлыстунов М. С.** Проблемы метрологического обеспечения объектов техносферы, строительной науки и практики // Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2011. Вып. 11 [Электрон. ресурс]. <http://technomag.edu.ru/doc/252086.html> (дата обращения 03.05.2013 г.).

Дата принятия 20.05.2013 г.