

Е.М. Занимонский, А.Е. Олейник, Е.Е. Занимонский, Я. Крыньский

## МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ЦИФРОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ

*На основании анализа квантовых измерительных экспериментов формулируется вариант метода размножения выборок для интерполяции при цифровом спектральном анализе. Конкретным примером иллюстрируется возможность конвергенции погрешности и неопределенности в представлении результата измерения.*

*соотношения неопределенности, преобразование Фурье, обратная задача, спектр*

**Постановка проблемы.** Одной из важнейших задач современной метрологии является повышение разрешающей способности и точности применяемых методов и аппаратуры. В настоящей работе по аналогии с квантово-механическими измерительными экспериментами рассматриваются возможности «приготовления» однородных объектов для обеспечения условий, при которых возможно уменьшение неопределенности в классических измерениях.

**Анализ современного состояния вопроса.** Любой результат измерительного эксперимента, от выполняемого на колоссальном ускорителе, до взвешивания в магазине, используется для решения обратной задачи – определения характерных свойств квантовых частиц или покупаемого товара. Решение обратной задачи встраивается в процесс общественного производства, понимаемый в обобщенном смысле. Результат, полученный сегодня, здесь и на этом конкретном образце, будет служить основанием для выводов о том, какими будут свойства другого однородного образца, в другое время и в другом месте. Ошибки или неопределенности при такой экстраполяции могут быть существенно больше, чем при измерении. Неопределенности экстраполяции могут быть именно тем естественным масштабом, формирующим требования по точности в процессе планирования измерений, так как метрология и измерительная техника не имеют собственных критериев необходимой точности прикладных измерений [1]. И только в работах по созданию эталонов самоцелью становится минимальная неопределенность.

Решение обратной задачи, вообще говоря, опирается на использование моделей, описывающих совокупность свойств прибора и измеряемого объекта. При этом должны быть сведены к минимуму принципиальные эффекты неадекватности моделей и некорректности математического аппарата обратных задач.

Внедрение концепции неопределенности, прежде всего в мировую, а, с некоторых пор и в отечественную практику измерений [2] может быть интерпретировано, в частности, как попытка уйти от решения обратной задачи, в традиционной трактовке пони-

маемой как получение оценки истинного значения измеряемой величины, т.е. свойства объекта. Отбрасывая концепцию истинного значения и соответствующее понятие ошибки измерения, новый подход удовлетворяется утверждением о том, что этот же образец завтра и там вызовет предсказуемое, с некоторой неопределенностью, показание измерительного прибора. Расхождения между двумя подходами количественно пренебрежимо малы на всех уровнях иерархии измерительных средств, вплоть до первичных эталонов, притом, что логическая обоснованность использования неопределенности вместо погрешности, в настоящее время не подвергается сомнению [2]. Таким образом, вне метрологии и измерительной техники оказываются не только критерии необходимой точности, но и суждения о свойствах объектов. Осознание такого ограничения предмета науки позволяет сосредоточиться на исследовании специфических проблем измерений, актуальных в настоящее время.

**Цель статьи.** В настоящей публикации на конкретном примере показаны возможности сближения двух концепций в метрологии. Это может быть, например, при измерительных экспериментах с уникальными объектами. Таким образом, снимается необходимость экстраполяции, а проблема истинного значения, относительно которого определяется погрешность, решается с привлечением независимых данных. Для получения возможности статистических оценок единственный уникальный массив данных разделяется на сегменты различными модификациями метода размножения выборок [3]. Погрешности и неопределенности результата измерений используются совместно для формирования качественных характеристик измерительной процедуры. Для демонстрации эффективности метода приведены результаты решения прикладной задачи о спектре вариаций уровня Балтийского моря [4].

**Изложение основного материала.** Метрологические характеристики спектральных измерений могут быть улучшены путем использования разнообразных методических приемов, в особенности это касается цифрового спектрального анализа с ком-

пьютерной реализацией. При этом выполняется преобразование исходных данных из временной области в частотную с последующей оценкой параметров спектра. Фундаментальный предел неопределенности  $\Delta f$  оценки частот отдельных спектральных компонент в зависимости от  $\Delta T$  – длительности выборки данных, определяется соотношением

$$\Delta f \cdot \Delta T \approx 1. \quad (1)$$

Это универсальное по форме соотношение может иметь различную количественную меру в зависимости от структуры исследуемых исходных данных, а также от уровня и свойств шума.

Для того, чтобы сформулировать метод уменьшения неопределенности измерения спектральных параметров обратимся к аналогиям в квантовых измерениях.

Соотношения неопределенности появляются в самом начале последовательного изложения математических основ квантовой механики [5] как следствие применения преобразования Фурье для решения уравнения Шредингера. Это преобразование используется таким же образом, как, например, при решении классической обратной задачи восстановления входного сигнала по измеренному выходу линейного прибора [6].

Измерения в реальных квантовых экспериментах (в отличие от широко обсуждаемых мысленных экспериментов, в том числе с квантовыми компьютерами) имеют своей задачей сбор количественных сведений о параметрах квантовых объектов для восстановления свойств объектов макроскопических [5]. При этом исследуемым макроскопическим объектом является система, создающая или поглощающая ансамбль объектов квантовых, так как экспериментатору не нужны координаты и скорость одной частицы, независимо от достижимой неопределенности. Накопление больших объемов результатов измерений свойств многих частиц, единообразно взаимодействующих с макроскопическим объектом, дает возможность принципиально неограниченного уменьшения неопределенности сведений о нем. Разумеется, речь идет только об одной, квантовой составляющей бюджета неопределенностей.

Аналогичным образом, создание однородного ансамбля из одной генеральной совокупности путем размножения выборок позволяет решать задачи оценивания характеристик и параметров с помощью статистических вычислений. Конкретные методы сегментирования данных, определения выборочных параметров и оценивания агрегированных (глобальных) параметров зависят от специфики решаемой задачи.

Характерные примеры уникальных данных дают геофизические исследования. Например, измерения вариаций уровня воды в портах, на переломе XVIII-XIX веков, начинались как сугубо прикладные, для обслуживания судоходства. И, как таковые, были обеспечены метрологическим контролем на уровне лучших возможностей того времени. В дальнейшем,

благодаря совершенствованию технических средств и увеличению количества мареографических пунктов, наблюдательные данные стали предметом научного интереса геофизиков.

Наиболее длительные и качественные временные ряды накоплены для вариаций уровня Балтийского моря. Анализ данных с нескольких десятков мареографов выявил интересную особенность изменений уровня моря как целого [7]. В дальнейшем была [4] предложена единая модель вариаций уровня Балтийского моря в виде временного ряда, длительностью свыше 190 лет, полученная усреднением ежемесячных данных со всех балтийских мареографов.

На рис. 1 показаны фрагменты периодограмм вариаций уровня Балтийского моря в диапазоне периодов около одного года. Рис. 1, а получен традиционным методом дискретного преобразования Фурье генеральной совокупности – модельного ряда данных. Физически очевидная годовая компонента представлена размытым пиком с шириной  $\pm 2$  суток, соответствующей классическому соотношению неопределенности (1).

Геофизики высказывают мнение, что вариации уровня Балтийского моря, как уникального водоема, связанного с океаном через систему узких проливов, должны отражать движение полюсов Земли с периодом Чендлера, примерно 1,2 года [7].

Предполагается, что в окрестности этого периода может быть сложная структура спектра, относительно которой нет единого мнения среди исследователей.

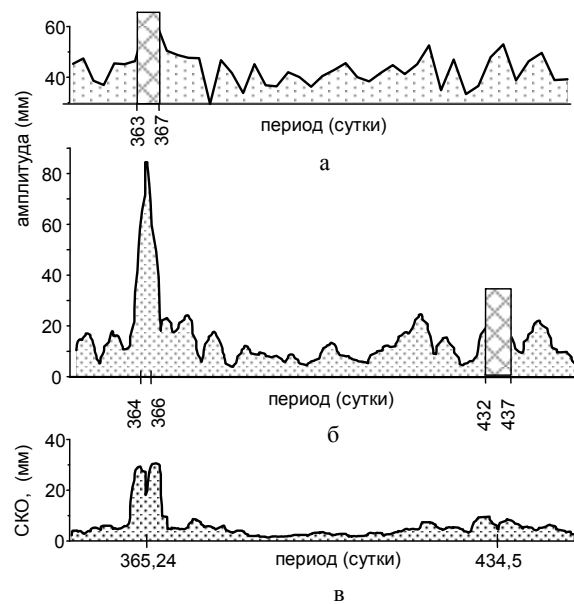


Рис. 1. Периодограммы вариаций уровня Балтийского моря для периодов около одного года

В периодограмме (рис. 1, а) в окрестности периода Чендлера могут быть отмечены спектральные особенности, которые мало отличаются от шумовых компонент, к каковым и были отнесены в работе [7].

Для более надежной оценки параметров и формы спектра в этой области необходимо применение компромиссного метода спектрального анализа, обеспечивающего как интерполяцию спектра, так и повышение разрешающей способности. Таковым, в данном случае, оказался метод размножения выборок, который был реализован путем пошагового исключения десятилетних фрагментов от начала временного ряда. Минимальная длительность выборки составляла 80 лет.

Объединение всех выборочных периодограмм позволило получить интерполированную периодограмму (рис. 1, б) и оценки СКО ее компонент (рис. 1, в). Улучшение спектрального разрешения на рис. 1, б сопровождается очевидным выделением трех пиков около периода Чандлера. Дальнейшее, почти четырехкратное, уменьшение неопределенности оценки периодов отдельных спектральных компонент иллюстрируется рис. 1, в. Уменьшение СКО спектральной оценки при «точной настройке» на период доминирующей компоненты объясняется ее детерминированным характером в отличие от окружения, формируемого шумом. Период годовой компоненты оценен величиной  $365,2 \pm 0,1$  суток, что на 0,01% отличается от истинной величины. Период доминирующей компоненты Чандлеровской группы оценивается в  $434,5 \pm 0,2$  суток. С аналогичной точностью и неопределенностью оценивается также период полугодовой компоненты  $182,5 \pm 0,1$  суток.

**Выводы.** Размножение выборок по аналогии с «приготовлением» однородных объектов при квантовых измерениях может быть эффективным методом для уменьшения неопределенности результатов цифрового спектрального анализа. Описанный методический прием применяется авторами при анализе геодезических временных рядов, особенностью которых является наличие спектральных компонент с известными периодами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Занимонский Е.М., Прусихин О.В., Алгоритм решения измерительных задач // Измерение параметров формы и спектра радиотехнических сигналов: Сб. научн. тр.; под ред. Ю.Ф. Павленко. – Л., 1988. – С. 94-100.
2. Захаров И.П., Кукуш В.Д. Теория неопределенности в измерениях: Учебн. Пособие. – Х.: Консум, 2002 – 256 с.
3. Efron, B. The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans. – Philadelphia: SIAM, 1982.
4. Krynski J., Zanimonskiy Y.M. Tide gauge records-derived variations of Baltic Sea level in terms of geodynamics // Geodezja i Kartografia. – 2004. – Vol. 53, No 2, P. 85-98.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Наука, 1974. – 752 с.
6. Слепян Д. О ширине полосы // ТИИЭР. – 1976. – Т. 64, № 3. – С. 4-14.
7. Vermeer M., Kakkuri J., Mälkki P., Boman H., Kahma K.K., Leppäranta M., Land uplift and sea level varia-

bility spectrum using fully measured monthly means of tide gauge readings, Finnish Marine Research 256. – P. 3-75.

*Поступила 9.03.2006*

**Рецензент:** канд. техн. наук Ю.П. Мачехин, ННЦ «Институт метрологии», Харьков.