



УДК 621.371:621.039

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ АВТОРЕГРЕССИИ ДЛЯ ВЕДЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ УКРАИНЫ UTC(UA)

Э.А. Корецкий, кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



Рассмотрены возможности применения модели авторегрессии для ведения национальной шкалы времени Украины. Сделана оценка эффективности применения адаптивных авторегрессионных и решетчатых фильтров.

The possibility of using the autoregressive model for conducting of the national time scale of Ukraine is considered. The effectiveness of the adaptive autoregressive and lattice filters was evaluated.

Одна из функций, которая возложена на Украинский метрологический центр Государственной службы единого времени и эталонных частот Украины, – ведение национальной шкалы координированного времени UTC(UA). По требованиям Международного бюро мер и весов национальные шкалы координированного времени стран, лаборатории которых участвуют в формировании Всемирного координированного времени UTC, не должны отличаться от шкалы UTC более чем на ± 100 нс. Украинский метрологический центр на протяжении многих лет успешно справляется с этой задачей. Например, за 2013 г. национальная шкала координированного времени Украины UTC(UA) находилась в пределах $-34...+37$ нс, а за 6 месяцев 2014 г. в пределах $-15...+22$ нс. Улучшения в ведении шкалы времени были достигнуты за счет применения более совершенного алгоритма обработки данных внутренних и внешних сличений. Начиная со второй половины 2013 г., были сделаны следующие изменения в алгоритме ведения шкалы:

- стандартам времени и частоты, входящим в состав группового эталона, начали назначаться переменные веса, исходя из статистических характеристик каждой меры на временном интервале 60 суток. До этого все меры имели один и тот же вес, равный 1;

- при вычислении предсказаний положения временной шкалы через сутки начали учитывать систематический ход по частоте каждой меры с ис-

пользованием полиномов 2-го порядка. До этого использовались полиномы 1-го порядка, исходя из классического принципа, который заключался в том, что цезиевые стандарты частоты не имеют систематического хода, а водородные стандарты имеют линейный систематический ход [1];

- при вычислении групповой шкалы начали учитывать тренд групповой частоты эталона, который определяется, исходя из результатов внутренних и внешних сличений. Это позволило более точно предсказывать положение временной шкалы эталона, а значит, и вести ее более близко к шкале UTC.

Но полученные результаты не являются предельными и могут быть улучшены с применением еще более совершенных алгоритмов обработки результатов измерений. Ведущие западные страны, а также Россия ведут свои национальные шкалы времени в полосе ± 10 нс. Это объясняется, прежде всего, тем, что в составе своих эталонов они имеют большее количество стандартов и поэтому групповые частоты их эталонов и шкалы более устойчивы и предсказуемы. Это обстоятельство позволяет вести национальную шкалу времени более точно.

Но таких же результатов можно достичь, имея многочисленную группу стандартов в составе эталона, а применяя более совершенные алгоритмы обработки данных измерений и ведения шкалы.

Классическим подходом при ведении шкалы времени являются следующие положения [2]. Если мы имеем N атомных стандартов времени и частоты, то временная шкала TA может быть определена следующим уравнением:

$$TA(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(t), \quad (1)$$

где h_i – значение часов i на момент времени t .

Согласно соотношению (1), всем стандартам приписаны одинаковые веса, равные единице. На практике стандартам обычно присваивают разные веса в зависимости от их статистических свойств:

$$TA(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i h_{i(t)}, \quad (2)$$

где w_i – веса стандартов.

К сожалению, уравнение (2) не может быть реализовано на практике, потому что значения h_i недоступны для измерений. Но мы можем преобразовать выражение (2) к виду временных разниц шкал между отдельными стандартами, входящими в группу, путем вычитания из уравнения (2) значений h_i :

$$TA(t) - h_k(t) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i [h_i(t) - h_k(t)]}{\sum_{i=1}^N w_i}. \quad (3)$$

Если мы определим $x_k(t)$ как временную разницу между шкалой k -го стандарта и шкалой ТА на момент времени t , а x_{ki} – как разницу между шкалами стандартов k и i , то выражение (3) может быть представлено в виде

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^N w_i x_{ki}(t). \quad (4)$$

Как только известны значения x_{ki} , возможно вычислить значение шкалы ТА, используя уравнение (4). Но следует заметить, что это значение шкалы будет получено в режиме постобработки. На практике необходимо генерировать временную шкалу в реальном времени. Для реализации этой схемы нужно задействовать алгоритмы предсказания для временных разниц стандартов, входящих в эталон, и для временной шкалы ТА в целом.

Одна из классических моделей предсказания временных разниц стандартов по отношению к шкале ТА может быть представлена в виде следующего уравнения:

$$\hat{x}_k(t + \tau) = x_k(t) + \left[y_k(t) + \frac{D_k \tau}{2} \right] \tau + \dots,$$

где $x_k(t + \tau)$ – предсказание временной разницы стандарта k по отношению к ТА на будущее время $t + \tau$; $y_k(t)$ – отклонение частоты k -го стандарта относительно групповой частоты на время t ; D_k – константа, определяющая систематический ход по частоте k -го стандарта.

Применяя данный алгоритм, временную шкалу на момент $t + \tau$ можно скорректировать согласно выражению

$$x_k(t + \tau) = \sum_{j=1}^N w_j [x_j(t + \tau) - x_{jk}(t + \tau)].$$

Предсказание сдвига частоты k -го стандарта относительно группы на момент времени $t + \tau$ может быть выполнено согласно уравнению

$$y_k(t + \tau) = \frac{x_k(t + \tau) - x_k(t)}{\tau}.$$

Математические выкладки, приведенные выше, показывают, что точность ведения временной шкалы напрямую зависит от точности предсказания шкалы на определенный промежуток времени. Ключевым моментом здесь является модель поведения стандартов времени и частоты, входящих в группу. Основой предсказания является тот факт, что при классическом подходе считается, что водородные стандарты имеют линейный систематический ход. Однако анализ внутренних и внешних сличений стандартов эталона на протяжении нескольких лет свидетельствует о том, что поведение стандартов подчиняется более сложным законам и описывается полиномами более высоких порядков. В этой связи для ведения временной шкалы представляется целесообразным применение авторегрессионной модели, на базе которой могут быть построены адаптивные авторегрессионные или решетчатые фильтры предсказания [3].

Модель авторегрессии основана на существовании корреляционной зависимости отсчета случайного сигнала в текущий момент времени с некоторым конечным числом отсчетов в предшествующие моменты времени. Корреляция выражается в наличии регрессии текущего отсчета случайного процесса на предыдущие. Такой вид регрессии называется авторегрессией (АР). Уравнение АР может быть записано в следующем виде:

$$x_t = \sum_{i=1}^p A_i x_{t-i} + a_t,$$

где A_i – коэффициенты АР; a_t – некоррелированные отсчеты типа белого шума; p – порядок АР-модели.

Величина

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^p A_i x_{t-i}$$

называется предсказанием случайной величины. Разность между текущим значением отсчета и его предсказанием носит название ошибки предсказания.

Для проверки эффективности применения адаптивных авторегрессионных фильтров предсказания при ведении национальной шкалы времени Украины UTC(UA) были проведены экспериментальные исследования на реальных данных. На рис. 1 представлена групповая временная шкала эталона Украины с конца 2012 г. и за весь 2013 г., на рис. 2 – групповая временная шкала эталона, полученная с применением адаптивного АР-фильтра 10-го порядка.

Анализ полученных данных показывает, что применение АР-фильтров позволяет удерживать национальную временную шкалу в пределах ± 10 нс, что соизмеримо с временными шкалами ведущих

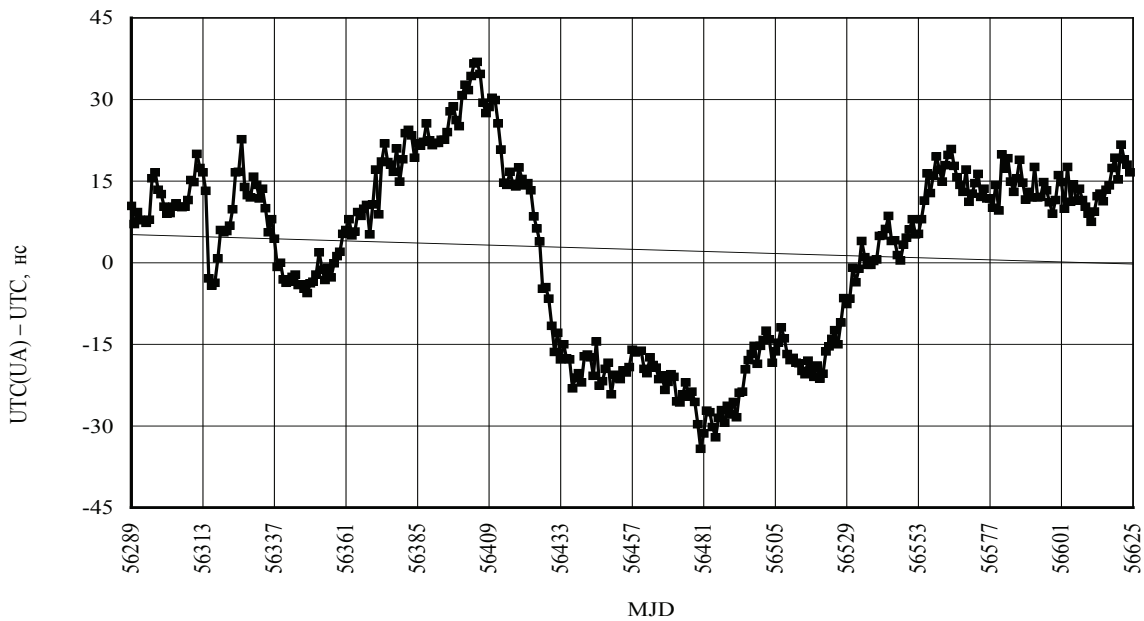


Рис. 1. Сравнение шкалы координированного времени государственного эталона Украины со шкалой Международного координированного времени

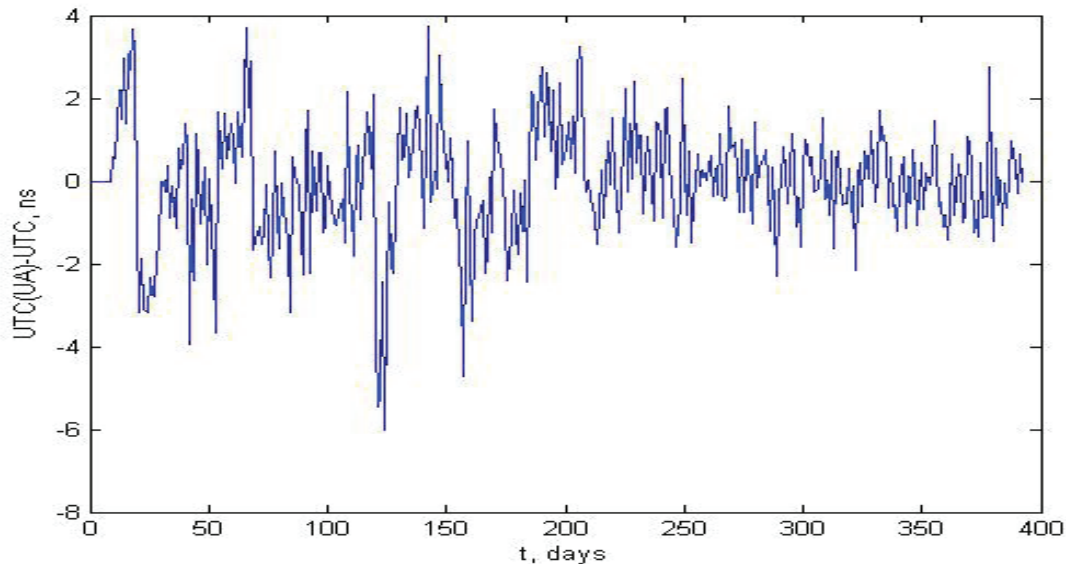


Рис. 2. Сравнение шкалы координированного времени государственного эталона Украины со шкалой Международного координированного времени после применения АР-фильтра

стран мира, имеющих в составе своих первичных эталонов единиц времени и частоты около 10 и более водородных и цезиевых стандартов, а также цезиевые фонтаны и генераторы на холодных атомах стронция.

Список литературы

1. Чирков А.Г. Современная теория стабильности прецизионных генераторов / А.Г. Чирков,

Б.Г. Матисов. – СПб.: Изд-во политех. ун-та. – 2005. – 355 с.
 2. Lopez-Romero J.M. Establishment of the SIM time scale / J.M. Lopez-Romero, N. Diaz-Munoz, M.A. Lombardi // Symposium of metrology. – 2008. – P. 34–41.
 3. Адаптивные фильтры: пер. с англ. / П.М. Грант, К.Ф. Коуэн [и др.]. – М.: Мир, 1990. – 584 с.