УДК 53.072:681.3

О.О. Писарчук, к.т.н.
Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова

МЕТОДИКА РЕКУРЕНТНОГО ЗГЛАДЖУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ДИСКРЕТНИХ ПРОЦЕСІВ

У статті запропонована методика рекурентного згладжування нелінійних дискретних процесів, яка заснована на використанні методу диференціальних перетворень при розрахунку поточних і екстрапольованих оцінок параметрів досліджуваного процесу відповідно до апріорно заданої нелінійної моделі. На прикладі використання $\alpha\beta\gamma$ фільтра для згладжування періодичних сигналів показана ефективність розробленої методики.

Постановка проблеми. Розв’язання задач розробки, оцінки якості функціонування, прогнозування стану і своєчасної модернізації складних технічних систем вимагає проведення досліджень шляхом одержання та обробки вимірів, що характеризують їхній поточний стан. Оскільки будь-якому процесу виміру властива поява похибок, неминуче приходиться розв’язувати задачу згладжування виміряної дискретної послідовності.

У сучасних задачах (дослідження технологічних процесів в хімічних виробництвах, автоматизованих конвеєрних виробничих ліній, систем керування польотом літальних апаратів тощо) споживачі кінцевої інформації висувають жорсткі вимоги щодо достовірного та своєчасного одержання даних про досліджувані процеси. Задовольнити вимоги споживачів кінцевої інформації можливо при якісній обробці (згладжуванні) вимірюваних даних. Однак процес згладжування значно ускладнюється нелінійним характером і швидкоплинністю досліджуваних процесів. Слід також зазначити, що в ряді задач практики адекватна аналітична нелінійна модель досліджуваного процесу в загальному вигляді є апріорно відомою, а урахування цієї інформації при згладжуванні дозволяє значно підвищити точність кінцевого результату, принаймні за методичною складовою похибки. Тому актуальною є задача отримання точних кінцевих оцінок досліджуваних нелінійних процесів у реальному масштабі часу з урахуванням апріорних даних про нелінійну модель.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Реальний часовий масштаб отримання кінцевих оцінок забезпечується використанням різного роду рекурентних алгоритмів згладжування [1], [2]. Для обробки ж нелінійних процесів з використанням рекурентних алгоритмів відомо ряд підходів [1–8].

У [1], [2] розглядається рекурентне згладжування нелінійних дискретних процесів, засноване на використанні поліноміальних моделей. У цьому випадку нелінійність вихідних даних враховується шляхом включення до згладжуючого полінома високостепеневих компонент. При цьому в [1] високостепеневий поліном використовується для всього інтервалу спостереження досліджуваного процесу, а в [2] ускладнення поліноміальної моделі реалізується адаптивно до динаміки зміни вихідної інформації. В обох випадках не враховуються апріорні відомості про вигляд моделі досліджуваного процесу.

В [3–5] враховується апріорна інформація про вигляд нелінійних моделей досліджуваних процесів, однак для спрощення алгоритмів згладжування пропонується проводити лінеаризацію нелінійних моделей шляхом подання їх обмеженим рядом Тейлора.

Істотним недоліком підходів, заснованих на поданні нелінійних функцій у вигляді полінома або ряду, є досить малий інтервал точного відтворення нелінійностей, що обумовлює низькі прогностичні властивості таких моделей. Наслідком цього є "розбіжність" фільтрів, коли спостерігається зниження точності згладжування при збільшенні об’єму аналізованої інформації.

У [6], [7] пропонується реалізувати визначення параметрів апріорно заданих нелінійних моделей за коефіцієнтами апроксимуючих поліномів шляхом порівняння їхніх подань рядом Тейлора. Однак запропонований підхід базується на апостеріорному згладжуванні накопичених експериментальних вибірок. Крім того, не вирішене питання вибору центра розкладу апроксимуючого полінома і нелінійної моделі в ряд, що не дозволяє отримати високих точнісних характеристик кінцевого результату.

У [8] запропонована методика синтезу фільтрів для згладжування нелінійних аналогових сигналів з урахуванням апріорно заданої адекватної нелінійної моделі досліджуваного процесу. Наведені дані показують ефективність запропонованої методики, однак такий підхід неможливо застосувати для згладжування дискретних нелінійних процесів.

Мета статті. Таким чином, метою статті є розробка підходу щодо рекурентного згладжування нелінійних дискретних процесів з урахуванням апріорно заданих нелінійних моделей.

Виклад основного матеріалу.

Постановка задачі.

Нехай у результаті дослідження технічної системи через рівні проміжки часу надходить рівноточна послідовність вимірів $x_1,\ x_2,\ x_3,\ ...,\ x_n$, що характеризує нелінійний процес. Відомо, що досліджуваний процес досить точно описується узагальненою нелінійною аналітичною моделлю $q(t,c)$ з параметрами $c=\{c_0,\ c_1,\ c_2,\ ...\}$. Необхідно реалізувати згладжування досліджуваного нелінійного процесу в реальному масштабі часу з урахуванням відомої нелінійної моделі $q(t,c)$, що забезпечить підвищення точності кінцевих оцінок вимірюваного параметра.

Розв'язок задачі.

Для розв'язку поставленої задачі будемо використовувати метод диференціальних перетворень (ДП) [9], що дозволяє визначати аналітичні і численно-аналітичні розв'язки в ряді практичних задач аналізу нелінійних процесів. Математичний апарат диференціальних перетворень відноситься до класу операторних методів і заснований на алгебраїзації вихідної нелінійної задачі в області зображень шляхом диференціювання оригіналу, що значно спрощує аналіз нелінійних процесів на відміну від інтегральних перетворень Лапласа і Фур'є.

Основою ДП є пряме (1) і зворотне (2) перетворення:

$$Z\left(K\right)=P\quad\left\{z\left(t\right)\right\}_{t^*}=\frac{H^K}{K\,!}\left[\frac{d^K z\left(t\right)}{dt^K}\right]_{t^*},\tag{1}$$

$$z\left(t\right)=P^{-1}\left\{Z\left(k\right)\right\}=q\left(t,c\right),\tag{2}$$

де t^* – значення аргументу, при якому здійснюється перетворення, у найпростішому випадку $t^*=0$; $Z(k)$ – дискретна функція цілочислового аргументу $k=0,\ 1,\ 2,\ ...$; H – відрізок аргументу, на якому розглядається функція $z(t)$; $q(t,c)$ – відновлююча або апроксимуюча функція; позначення $P\{...\}$, $P^{-1}\{...\}$ – характеризують відповідно пряме і зворотне ДП функцій.

Пряме ДП (1) забезпечує одержання зображення вихідної функції – оригіналу у вигляді набору дискрет, що складають диференціальний спектр (на честь автора ДП Р-спектр). Зворотне перетворення (2) дозволяє перейти від зображення до обраного відновлюючого оригіналу. Якщо відновлююча функція має вид багаточлена, то одержання оригіналу зводиться до підсумовування дискрет її Р-спектра у вигляді відрізка ряду Тейлора, а ДП називають диференціально-тейлорівськими. Якщо ж відновлююча функція має довільний вид, то ДП називають диференціально-нетейлорівськими, а параметри функції $q(t,c)$ визначаються із системи рівнянь, утвореної або шляхом прирівнювання однойменних дискрет Р-спектрів функцій $z(t)$ і $q(t,c)$ (метод балансу диференціальних спектрів (БДС)) [9], або шляхом мінімізації нев'язки між визначеними функціями [10]. При наявності апріорних даних про адекватну аналітичну модель досліджуваних процесів диференціально-нетейлорівські перетворення дають більш точні результати, ніж диференціально-тейлорівські, що обумовлено обмеженістю радіуса збіжності ряду Тейлора [9], [10].

З урахуванням заданих вихідних даних і базових положень методу диференціальних перетворень ідею розв'язку задачі рекурентного згладжування нелінійних дискретних процесів можна сформулювати в такий спосіб.

Згідно з обраним базовим рекурентним алгоритмом згладжування одержуємо компоненти поліноміальної моделі, що на обмеженому інтервалі часу апроксимує обмірюваний дискретний нелінійний процес. Застосовуючи диференціально-нетейлорівські перетворення з використанням БДС, реалізуємо перехід до параметрів апріорно заданої нелінійної моделі досліджуваного процесу. Надалі отриману нелінійну модель будемо використовувати в рекурентному згладжуючому алгоритмі для розрахунку екстрапольованих параметрів і кінцевих оцінок досліджуваного процесу.

Застосовуючи у викладеному підході в якості рекурентного згладжуючого алгоритму відомий фільтр Калмана (ФК) [1], отримаємо модифіковану обчислювальну схему (модифікований ФК) у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
&\hat{\hat{B}}_{ne} = \hat{\hat{Q}}_{ne},\\
&R_{ne} = FR_{n-1}F^T,\\
&R_n = R_{ne} - R_{ne}H^T\left(HR_{ne}H^T + \Xi\right)^{-1}HR_{ne},\\
&\hat{\hat{Z}}_n = \hat{\hat{B}}_{ne} + R_nH^T\Xi^{-1}\left(\bar{X}_n - H\hat{\hat{B}}_{ne}\right),\\
&\hat{\hat{B}}_n = \hat{\hat{Q}}_n.
\end{aligned} \tag{3}$$

В алгоритмі (3) позначено: R_{ne} – кореляційна матриця похибок екстраполяції виміряних параметрів досліджуваного процесу; F – оператор перерахування похибок, який формується відповідно до поліноміальної моделі $z(t)$ досліджуваного процесу; R_n – кореляційна матриця похибок оцінки параметрів досліджуваного процесу; H – лінійний оператор відповідності оцінюваних параметрів і вимірюваних координат; Ξ – кореляційна матриця похибок виміру параметрів; $\hat{\hat{Z}}_n$ – вектор оцінених параметрів, розрахований у припущенні поліноміальної моделі на етапі згладжування і нелінійної моделі на етапі екстраполяції. Розглянуті компоненти алгоритму (3) формуються згідно з правилами, зазначеними у [1]. Вектор $\hat{\hat{B}}_{ne}$ – включає оцінки екстрапольованих параметрів, отриманих з використанням відомої нелінійної аналітичної моделі $q(t,c)$; $\hat{\hat{B}}_n$ – вектор згладжених координат, отриманий з урахуванням нелінійної моделі; $\hat{\hat{Q}}_{ne}$, $\hat{\hat{Q}}_n$ – вектори відповідності оцінок параметрів поліноміальної і нелінійної моделі досліджуваного процесу на екстрапольований і поточний моменти часу.

Розглянемо порядок формування останніх із зазначених компонентів алгоритму (3).

Вектор $\hat{\hat{Q}}_n$ формується згідно зі схемою диференціально-нетейлорівських перетворень з використанням методу БДС:

$$P\left\{\hat{q}_n(t,c)\right\} = \hat{Q}_n(k,c) = \hat{Z}_n(k) = P\left\{\hat{z}_n(t)\right\}, \tag{4}$$

причому функція $\hat{z}_n(t)$ – має вигляд полінома, складеного з компонентів вектора $\hat{\hat{Z}}_n$:

$$\hat{\hat{Z}}_n = \left|\hat{z}_n\ \hat{\dot{z}}_n\ \hat{\ddot{z}}_n\ \ldots\right|^T \Rightarrow \hat{z}_n(t) = \hat{z}_n + \hat{\dot{z}}_n t + \hat{\ddot{z}}_n \frac{t^2}{2} + \ldots, \tag{5}$$

а функція $\hat{q}_n(t,c)$ – є нелінійною моделлю з оцінками невідомих параметрів $c = \{c_0,\ c_1,\ c_2,\ \ldots\}$. У прийнятих позначеннях індекс n вказує на момент спостереження функцій $\hat{z}(t)$ і $\hat{q}(t,c)$ (номер виміру в експериментальній вибірці).

Застосування обчислювальної схеми диференціально-нетейлорівських перетворень (4) дозволяє виразити невідомі параметри нелінійної апроксимуючої функції $q_n(t,c)$ через розраховані компоненти поліноміальної моделі (5) для моменту часу n:

$$c_n = f\left(\hat{z}_n,\ \hat{\dot{z}}_n,\ \hat{\ddot{z}}_n,\ \ldots\right). \tag{6}$$

Тоді компоненти вектора $\hat{\hat{Q}}_n$, суть яких – координата і її похідні, визначаються згідно з виразом:

$$\hat{q}_{n(i+1)} = \frac{d^i\hat{q}_n\left(t,\ f\left(\hat{z}_n,\ \hat{\dot{z}}_n,\ \hat{\ddot{z}}_n,\ \ldots\right)\right)}{dt^i}, \quad i = 0,\ 1,\ \ldots,\ m, \tag{7}$$

де m – кількість компонентів вектора $\hat{\hat{Z}}_n$. Використовуючи для реалізації схеми (4) як вихідні параметри компоненти вектора $\hat{\hat{Q}}_{(n-1)}$ аналогічним чином можна отримати вирази для розрахунку компонентів вектора $\hat{\hat{Q}}_{ne}$:

$$\hat{q}_{n(i+1)e} = \frac{d^i\hat{q}_{ne}\left(t_e\ ,\ f\left(\hat{z}_{(n-1)},\ \hat{\dot{z}}_{(n-1)},\ \hat{\ddot{z}}_{(n-1)},\ \ldots\right)\right)}{dt^i}, \quad i = 0,\ 1,\ \ldots,\ m. \tag{8}$$

де t_e – інтервал екстраполяції параметрів досліджуваного процесу (найчастіше на момент одержання наступного виміру).

З урахуванням розглянутого, *методика рекурентного згладжування нелінійних дискретних процесів* буде складатися з послідовності етапів.

1. У відповідності до схеми диференціально-нетейлорівських перетворень (4) визначається зв'язок (6) параметрів нелінійної моделі з параметрами апроксимуючої поліноміальної функції.
2. За дискретними значеннями вимірюваного нелінійного процесу, згідно з обраним алгоритмом згладжування, визначаються оцінки параметрів поліноміальної моделі вигляду (5) на n-й момент часу.
3. З використанням виразів (7) та (8), а також результатів п.1 визначаються оцінені і екстрапольовані значення параметрів досліджуваного процесу з урахуванням відомої нелінійної моделі.
4. Надалі організується повторення етапів 2, 3 для наступного обмірюваного значення.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє реалізувати рекурентне згладжування нелінійних дискретних послідовностей з урахуванням апріорно заданої нелінійної моделі при розрахунку поточних і екстрапольованих оцінок у згладжуючому фільтрі.

Реалізацію запропонованого підходу розглянемо на прикладі.

Задача.

Нехай у результаті дослідження динаміки зміни періодичного сигналу вихідної напруги синусно-косинусного обертового трансформатора (СКВТ) [11] на інтервалі спостереження отримане 21 виміряне значення з дискретністю t_0. Відомо, що досліджуваний процес досить точно описується моделлю вигляду [12]:

$$U(t) = U_c \cdot \cos\omega t + U_s \cdot \sin\omega t\,, \tag{9}$$

де U_c, U_s, (В) – амплітуди косинусної та синусної складових вихідного сигналу; ω, (1/рад) – кругова частота косинусної і синусної складових.

Необхідно реалізувати рекурентне згладжування дискретної нелінійної послідовності, що характеризує досліджуваний періодичний сигнал з виходу СКВТ.

Розв'язок.

Розв'язок поставленої задачі будемо проводити відповідно до пунктів запропонованої методики.

1. Нехай на обмеженій ділянці спостереження дискретна послідовність значень нелінійної функції (9) з деякою адекватністю апроксимується поліноміальною моделлю, наприклад другого порядку:

$$\hat{z}(t) = \hat{z} + \hat{\dot{z}}\,t + \hat{\ddot{z}}\,\frac{t^2}{2}\,. \tag{10}$$

Тоді для формування зв'язку між параметрами моделей (9) і (10) необхідно застосувати схему (4), для чого знайдемо диференціальні спектри обох моделей.

Згідно з прямим ДП (1) Р-спектр нелінійної функції (9), обмежуючись трьома дискретами за кількістю невідомих параметрів, має вигляд:

$$U(0) = U_c,\quad U(1) = U_s\,\omega\,H\,,\quad U(2) = -U_c\omega^2\,\frac{H^2}{2}\,. \tag{11}$$

Аналогічним чином, диференціальний спектр поліноміальної функції (10) прийме вигляд:

$$\hat{Z}(0) = \hat{z},\quad \hat{Z}(1) = \hat{\dot{z}}\,H\,,\quad \hat{Z}(2) = \hat{\ddot{z}}\,\frac{H^2}{2}\,. \tag{12}$$

Відповідно до методу БДС, застосованому в схемі (4), з урахуванням однакової фізичної сутності моделей (9) і (10) можна сформувати систему рівнянь (13):

$$\begin{cases} \hat{z} = U_c, \\ \hat{\dot{z}} = U_s\omega, \\ \hat{\ddot{z}} = -U_c\omega^2. \end{cases} \tag{13}$$

Розв'язуючи сформовану в такий спосіб систему рівнянь відносно невідомих параметрів нелінійної моделі (9), отримаємо їхні оцінки у вигляді:

$$\hat{U}_c = \hat{z},\qquad \hat{U} = \hat{\dot{z}}\sqrt{\frac{\hat{z}}{\hat{\ddot{z}}}},\qquad \hat{\omega} = \sqrt{\frac{\hat{\ddot{z}}}{\hat{z}}}\,, \tag{14}$$

або для n-го виміру (на n-й момент часу) маємо:

$$\hat{U}_{cn} = \hat{z}_n,\qquad \hat{U}_n = \hat{\dot{z}}_n\sqrt{\frac{\hat{z}_n}{\hat{\ddot{z}}_n}},\qquad \hat{\omega}_n = \sqrt{\frac{\hat{\ddot{z}}_n}{\hat{z}_n}}\,. \tag{15}$$

Таким чином, вирази (14), (15) дозволяють визначити оцінки параметрів нелінійної моделі (9) за коефіцієнтами поліноміальної функції (10).

2. Для визначення оцінок параметрів поліноміальної функції (10) на n-й момент часу, скористаємося класичним алгоритмом ФК, що для полінома другого порядку має вигляд скалярного дискретного згладжуючого фільтра ($\alpha\beta\gamma$ фільтра) [1]:

$$\begin{aligned} \hat{z}_n &= \hat{z}_{ne} + \alpha_n \left(z_n - \hat{z}_{ne} \right); \\ \hat{\dot{z}}_n &= \hat{\dot{z}}_{ne} + \frac{\beta_n}{t_0} \left(z_n - \hat{z}_{ne} \right); \\ \hat{\ddot{z}}_n &= \hat{\ddot{z}}_{n-1} + \frac{\gamma_n}{t_0^2} \left(z_n - \hat{z}_{ne} \right), \end{aligned} \tag{16}$$

де α_n, β_n, γ_n – коефіцієнти згладжування для координати, швидкості і прискорення, які розраховуються відповідно до виразів:

$$\alpha_n = \frac{3\left(3n^2 - 3n + 2\right)}{n\left(n+1\right)\left(n+2\right)}, \quad \beta_n = -\frac{18\left(2n-1\right)}{t_0\left(n+1\right)\left(n+2\right)n}, \quad \gamma_n = \frac{60}{t_0^2\left(n+1\right)\left(n+2\right)n}. \tag{17}$$

3. Для урахування при розрахунку згладжених і екстрапольованих оцінок нелінійної моделі (9), відповідно до алгоритму (3) доповнимо $\alpha\beta\gamma$ фільтр (16) декількома виразами.

Для розрахунку оцінок параметрів досліджуваного нелінійного процесу на момент часу $t = n$, використовуючи вирази (7) і (9), матимемо:

$$\begin{aligned} \hat{U}_n &= \hat{U}_{cn} \cdot \cos\hat{\omega}_n n + \hat{U}_{sn} \cdot \sin\hat{\omega}_n n; \\ \hat{\dot{U}}_n &= -\hat{U}_{cn} \cdot \hat{\omega}_n \cdot \sin\hat{\omega}_n n + \hat{U}_{sn} \cdot \hat{\omega}_n \cdot \cos\hat{\omega}_n n; \\ \hat{\ddot{U}}_n &= -\hat{U}_{cn} \cdot \hat{\omega}_n^2 \cdot \cos\hat{\omega}_n n - \hat{U}_{sn} \cdot \hat{\omega}_n^2 \cdot \sin\hat{\omega}_n n, \end{aligned} \tag{18}$$

де оцінки параметрів $\hat{U}_{cn}$, $\hat{U}_n$, $\hat{\omega}_n$ визначаються згідно з (15).

Використовуючи вираз (8), приймаючи $t = n_e$, отримаємо залежності для розрахунку екстрапольованих оцінок параметрів досліджуваного процесу:

$$\begin{aligned} \hat{U}_{ne} &= \hat{U}_{cne} \cdot \cos\hat{\omega}_{ne} n_e + \hat{U}_{sne} \cdot \sin\hat{\omega}_{ne} n_e; \\ \hat{\dot{U}}_{ne} &= -\hat{U}_{cne} \cdot \hat{\omega}_n \cdot \sin\hat{\omega}_{ne} n_e + \hat{U}_{sne} \cdot \hat{\omega}_{ne} \cdot \cos\hat{\omega}_{ne} n_e; \\ \hat{\ddot{U}}_{ne} &= -\hat{U}_{cne} \cdot \hat{\omega}_n^2 \cdot \cos\hat{\omega}_{ne} n_e - \hat{U}_{sne} \cdot \hat{\omega}_{ne}^2 \cdot \sin\hat{\omega}_{ne} n_e, \end{aligned} \tag{19}$$

де параметри моделей визначаються відповідно до виразів:

$$\hat{U}_{cne} = \hat{U}_{c(n-1)}, \quad \hat{U}_{sne} = \hat{U}_{s(n-1)}, \quad \hat{\omega}_{ne} = \hat{\omega}_{(n-1)}. \tag{20}$$

4. Застосовуючи вирази (16)–(20) послідовно для кожного n-го виміру, отримаємо рекурентну процедуру згладжування нелінійних процесів.

Таким чином, вирази (16)–(20) являють собою в скалярній формі модифікований ФК (3) (модифікований $\alpha\beta\gamma$ фільтр), який дозволяє реалізувати рекурентне згладжування нелінійного процесу з урахуванням нелінійної математичної моделі (9) при розрахунку оцінених та екстрапольованих значень.

Оцінювання ефективності використання запропонованої методики проводилось шляхом математичного моделювання в порівнянні із традиційним рекурентним $\alpha\beta\gamma$ фільтром, тобто з фільтром, у якому використовується поліноміальна модель другого порядку. При моделюванні випадкова похибка вимірювання вважалась відсутня, що забезпечує визначення значень методичної похибки досліджуваних підходів. З метою оцінки якості кінцевих результатів точні значення параметрів досліджуваного нелінійного процесу покладалися відомими і рівними:

$$U_c = U_s = 5 \text{ (В)}, \quad \omega = 1,5 \text{ (1/рад)}.$$

Результати моделювання подані в таблиці.

Таблиця

t_0	n	4	8	12	16	20
$t_0 = 0,2\ c$	U_{em}	7,0246	1,7918	-5,7261	-5,9416	1,4201
	U_{NL}	7,0272	2,1037	-56551	-6,0972	1,4271
	$U_{\alpha\beta\gamma}$	7,0277	2,1682	-5,9113	-0,7474	48,4904

	$em-NL$	0,0025	0,3119	0,0070	0,1555	0,0070
	$em-\alpha\beta\gamma$	0,0031	0,3764	0,1852	5,1941	47,0702
$t_0=0,5\ c$	U_{em}	0,7494	-1,7342	2,6842	-3,5805	4,4052
	U_{NL}	0,7436	-1,6248	2,2050	-2,8763	4,1466
	$U_{\alpha\beta\gamma}$	0,7032	-14,5108	-38,0805	19,8744	401,946
	$em-NL$	0,0058	0,1093	0,4791	0,7042	0,2586
	$em-\alpha\beta\gamma$	0,0462	12,7766	40,7648	23,4550	397,5408
$t_0=1,0\ c$	U_{em}	-5,9416	-6,7761	-7,0709	-6,8023	-5,9920
	U_{NL}	-5,7100	-6,5326	-6,6588	-6,4721	-5,9114
	$U_{\alpha\beta\gamma}$	-6,8323	-55,0696	-205,005	-426,692	-635,043
	$em-NL$	0,2316	0,2435	0,4120	0,3302	0,0805
	$em-\alpha\beta\gamma$	0,8907	48,2934	197,934	419,890	629,051

В таблиці представлені еталонні U_{em} і згладжені значення вимірюваної вихідної напруги СКВТ для вимірів з номерами n, при різному темпі оновлення інформації t_0. Дані, отримані при використанні запропонованої методики, поміщені в рядки з позначенням U_{NL}, а результати використання відомого рекурентного $\alpha\beta\gamma$ фільтра – у рядки з позначенням $U_{\alpha\beta\gamma}$. Позначення $em-NL$ і $em-\alpha\beta\gamma$ характеризують методичну похибку, що виникає при використанні запропонованого і традиційного підходів відповідно.

Аналіз даних таблиці показує, що результати використання модифікованого $\alpha\beta\gamma$ фільтра відрізняються більш високою методичною точністю, ніж традиційний підхід. Зі збільшенням об'єму обробленої інформації (зі збільшенням параметра n) методична похибка вихідних значень модифікованого фільтра є відносно малою і практично не змінюється, хоча спостерігається її незначне збільшення зі збільшенням значення t_0. Використання традиційного $\alpha\beta\gamma$ фільтра для згладжування нелінійного сигналу призводить до значного збільшення методичної похибки кінцевих результатів з ростом параметрів n і t_0. Дане явище називається розбіжністю фільтра [1] і обумовлене воно невідповідністю характеру зміни згладжуваних даних, прийнятій у фільтрі моделі. З іншого боку, урахування в модифікованому $\alpha\beta\gamma$ фільтрі відомої нелінійної моделі при розрахунку оцінених і екстрапольованих даних дозволяє в значній мірі зменшити розбіжність фільтра і підвищити якість кінцевих оцінок.

Висновки. Таким чином, запропонована методика *рекурентного згладжування нелінійних дискретних послідовностей,* заснована на урахуванні апріорних даних про нелінійну модель досліджуваного процесу, дозволяє підвищити якість кінцевих результатів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Кузьмин С.З.* Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации.– М.: Сов. радио, 1978. – 432 с.
2. *Іщенко В.І., Зімчук І.В.* Синтез адаптивних алгоритмів оцінювання параметрів руху маневруючих літальних об'єктів // Вісник ЖІТІ / Технічні науки. – 1999. – № 9. – С. 120–124.
3. *Калачев М.Г., Никонов В.Г.* Применение методов нелинейной фильтрации в задачах оценивания фазовых координат динамических объектов // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 12. – С.71–79.
4. *Браммер К., Зиффлинг Г.* Фильтр Калмана – Бьюси: Пер. с нем. – М.: Наука, 1982. – 199 с.
5. *Логинов В.П.* Приближенные алгоритмы нелинейной фильтрации // Зарубежная радиоэлектроника. – 1975. – № 2. – С. 28–47.
6. *Варыгин В.Н., Казарян С.А., Рафаэлян Р.С.* Выбор начального вектора при адаптивных методах построения моделей, нелинейных по параметрам // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 3. – С. 55–59.
7. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления / Под. ред. Р.А. Нелепина.– М.: Сов. радио, 1975. – 448 с.
8. *Водоп'ян С.В., П'ясковський Д.В., Умінський В.В.* Моделювання фільтра Калмана на основі диференціальних перетворень // Вісник ЖІТІ / Технічні науки. – 2001. – № 18. – С. 86–89.

9. *Пухов Г.Е.* Дифференциальные спектры и модели. – К.: Наук. думка, 1990. – 184 с.
10. *Ковбасюк С.В., Писарчук А.А.* Методика определения параметров нелинейных систем на основе дифференциально-нетейлоровских преобразований // Двойные технологии. – 2004. – № 1. – С. 30–34.
11. 11.Основы автоматического управления / Г.И. Ванюхин, А.Н. Герасимов, С.В. Лучко и др. – М.: Воениздат, 1972. – 328 с.
12. *Харкевич А.А.* Спектры и сигналы. – М.: Гос. издательство Физ.-Мат. лит., 1962. – 236 с.

ПИСАРЧУК Олексій Олександрович – кандидат технічних наук, заступник начальника науково-дослідного управління Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– розробка дослідження та удосконалення математичного забезпечення складних інформаційних систем.

Подано 14.03.2006