

# СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ БЕЗПЕКИ ТА ОБОРОНИ

ISSN 2311-7249 (Print)

ISSN 2410-7336 (Online)

№ 1(28)  
2017

Науковий журнал

## Засновник і видавець

Національний університет оборони України  
імені Івана Черняхівського  
Журнал заснований у 2008 році

## Адреса редакції

Національний університет оборони України  
імені Івана Черняхівського  
Інститут інформаційних технологій

Повітрофлотський проспект, 28,  
Київ, 03049

sitnuou@ukr.net

http://www.sit.nuou.org.ua

телефон: (044)-271-07-31, (098)-273-48-62

факс: (044)-271-07-31

Журнал зареєстровано в Державній реєстраційній  
службі України  
(свідоцтво КВ №20490-10290ПР)

Журнал видається  
українською, російською та англійською мовами

Журнал виходить 3 рази на рік

Наказом Міністерства освіти і науки України  
від 29 грудня 2014 р. №1528 журнал включено до  
Переліку наукових фахових видань України  
в галузях “технічні науки” та “військові науки”

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного університету оборони України  
імені Івана Черняхівського  
(протокол № 7 від 29 травня 2017 р.)

При використанні матеріалів посилання на журнал  
“Сучасні інформаційні технології  
у сфері безпеки та оборони” обов’язкове

Редакція може не поділяти точку зору авторів  
Відповідальність за зміст поданих матеріалів  
несуть автори

Журнал індексується у наукометричних базах:  
Citefactor, Google Academy, Index Copernicus,  
The Journal Impact Factor.  
Directory of Research Journals Indexing (DRJI)

Журнал представлений у базах даних:  
Bielefeld Academic Search Engine (BASE),  
Directory of Open Access Journals (DOAJ),  
Research Bible, WorldCat.

Журнал внесений до каталогів бібліотек:  
Vernadsky National Library of Ukraine.

## В номері:

### Теоретичні основи створення і використання інформаційних технологій

Андреев Ф.М., Статкус А.В., Ковбасюк С.В. Вибір варіанту побудови алгоритму уточнення вищих похідних дальності до балістичних і космічних об’єктів .....	5
Бабій Ю.О., Клепиковський А.В., Ковальов В.О. Комплекс оптико-телевізійного наведення з використанням машинного стереозору і адаптивних алгоритмів супроводу .....	13
Биченок М.М., Войтко О.В., Чернега В.М., Нестеров О.М. Експертна процедура оцінювання ризиків негативних інформаційних впливів .....	19
Богданович В.Ю., Павловський О.В., Прима А.М. Спосіб визначення завдань складовим інтегрованим потенціалом деескалації загроз воєнного характеру з використанням методу експертно-значущих проміжних сценаріїв .....	23
Зотов С.В. Методика оптимального розподілу сил системи топогеодезичного забезпечення по завданнях з максимізацією оперативності .....	28
Левченко О.В., Косогов О.М., Сірик А.О. Методика оцінювання кількісних показників негативного інформаційного впливу .....	31
Никулин Н.Б., Ромашико І.В., Корж І.Ю. Прогнозування узкополосного випадкового процесу після лінійного детектування .....	36
Savchenko V., Kononenko S., Bobylov V., Drok L. Coordination model for the national cyber security system of Ukraine .....	41
Сакович Л.М., Гиренко І.М. Моделювання роботи апаратної технічного забезпечення .....	47
Стеля О.Б., Потапенко Л.І., Сіренко І.П. Чисельне моделювання протидіагностичних процесів на основі комп’ютерної моделі внутрішньої балістики	53
Стрельбицький М.А. Метод узгодження матриць доступу систем дискреційного розмежування доступу інформаційно-телекомунікаційних систем на стадії модернізації .....	58
Шефер О.В. Використання сигнальної і параметричної ідентифікації для підвищення керованості радіонавігаційних систем .....	63

### Сучасні військово-теоретичні проблеми

Волощенко О.І., Черних І.В. Спосіб визначення величини впливу фортифікаційного обладнання на живучість точкових військових об’єктів .....	67
Гришук Р.В., Оришук І.О., Савчук В.С. Аналіз ролі й місця сил та технічних засобів психологічних операцій в локальних війнах та збройних конфліктах .....	73
Катеринчук І.С., Мисик А.Б. Науково-методичний апарат обґрунтування застосування частин та підрозділів державної прикордонної служби України у територіальній обороні .....	81
Коріненко В.І. Методика визначення режимів роботи багатофункціональної радіостанції з урахуванням умов розповсюдження радіохвиль декаметрового діапазону .....	86
Макодеба Т.С., Дужий Р.В., Белов М.А. Трансформація системи інформаційно-пропагандистського забезпечення Збройних Сил України на прикладі внутрішніх комунікацій НАТО .....	92
Мірюченко В.І., Полторак М.Ф., Дуленко Д.І. Методика математичного моделювання прогнозування стану жорстких аеродромних покриттів .....	96
Мусянко В.А., Ткач В.О., Куцаєв В.В., Івченко М.М. Обґрунтування необхідності створення сучасного прихованого пункту спостереження міжвидового угруповання збройних сил .....	101
Опенько П.В., Дранник П.А., Смольков О.Ю., Сторожук О.В. Обґрунтування підходів щодо оцінювання ефективності ведення радіоелектронної боротьби з системами управління об’єднань протиповітряної оборони .....	107
Приймєв Ю.Б. Удосконалена комплексна автоматизована експертна система контролю технічного стану та діагностики ракетного озброєння .....	114
Пушда Ю.В., Антоненко С.І. Проблеми відповідності системи управління Збройними Силами України умовам гібридної війни .....	120
Романов О.М. Сучасний стан та перспективи розвитку супутникових систем зв’язку Російської Федерації .....	126
Сергієнко В.Д., Попов А.О., Зібір С.Д., Бичков А.М., Підгородецький М.М. Аналіз сучасного стану розвитку багатофункціональних засобів та комплексів радіоелектронної боротьби .....	135
Туровець Ю.С. Метод чисельного моделювання процесу розповсюдження рідких забруднень у ґрунтах районів ведення бойових дій .....	144
Черненко А.Д. Оцінювання ефективності витрат на утримання та розвиток збройних сил в інтересах забезпечення обороноздатності України з урахуванням складових оперативних (бойових) можливостей .....	151

---

## **Редакційна колегія**

### ***Головний редактор***

*Пермяков Олександр Юрійович,*  
доктор технічних наук, професор

### ***Заступник головного редактора***

полковник *Савченко Віталій Анатолійович,*  
доктор технічних наук, старший науковий співробітник

### ***Члени редколегії:***

*Бутвін Борис Леонідович,*  
доктор технічних наук, професор

генерал-майор *Даник Юрій Григорович*  
доктор технічних наук, професор

*Гавлічек Пьотр,* доцент

*Дробаха Григорій Андрійович,*  
доктор військових наук, професор

*Жук Сергій Якович,*  
доктор технічних наук, професор

*Загорка Олексій Миколайович,*  
доктор військових наук, професор

полковник *Катеринчук Іван Степанович,*  
доктор технічних наук, професор

*Компанцева Лариса Феліксівна,*  
доктор філологічних наук, професор

*Косевцов Вячеслав Олександрович,*  
доктор військових наук, професор

*Кравченко Юрій Васильович,*  
доктор технічних наук, професор

полковник *Лобанов Анатолій Анатолійович,*  
доктор військових наук, професор

*Потій Олександр Володимирович,*  
доктор технічних наук, професор

*Пресналл Аарон,* доктор філософії

*Репіло Юрій Євгенович,*  
доктор військових наук, професор

генерал-майор *Риспаев Асхат Науризбайович,*  
кандидат військових наук

*Романченко Ігор Сергійович,*  
доктор військових наук, професор

*Рубан Ігор Вікторович,*  
доктор технічних наук, професор

*Рябцев Вячеслав Віталійович,*  
кандидат технічних наук, доцент

*Сбітнев Анатолій Іванович,*  
доктор технічних наук, професор

*Семон Богдан Йосипович,*  
доктор технічних наук, професор

*Серватюк Василь Миколайович,*  
доктор військових наук, професор

*Солонніков Владислав Григорович,*  
доктор технічних наук, професор

*Телелим Василь Максимович,*  
доктор військових наук, професор

*Флурі Філіпп,*  
доктор філософії

*Шевченко Віктор Леонідович,*  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

*Шемаєв Володимир Миколайович,*  
доктор військових наук, професор

*Шиміч Горан,*  
доктор філософії

### ***Відповідальний секретар***

полковник *Войтко Олександр Володимирович*  
кандидат військових наук

# MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE SPHERE OF SECURITY AND DEFENCE

ISSN 2311-7249 (Print)

ISSN 2410-7336 (Online)

№ 1(28)  
2017

Scientific journal

## Founder and Publisher

National Defence University of Ukraine  
named after Ivan Cherniakhovsky  
The journal was founded in 2008

## Address:

National Defence University of Ukraine  
named after Ivan Cherniakhovsky,  
Information Technology Institute

Povitroflotskiy ave. 28, Kyiv, 03049  
sitnuou@ukr.net  
<http://www.sit.nuou.org.ua>

Telephone: (044)-271-07-31, (098)-273-48-62  
Fax: (044)-271-07-31

The journal is registered  
in the State Registration Service of Ukraine  
(certificate KB №20490-10290PIP)

The journal is published  
in Russian, Ukrainian and English

The journal is published thrice a year

According to the Document of the Ministry of  
Education and Science of Ukraine  
issued on December 29, 2014 (№ 1528) the journal  
was included into the Ukrainian list of specialized  
scientific publications in engineering sciences and  
military sciences

*Recommended to publication  
by the Scientific Council of the National  
Defence University of Ukraine  
named after Ivan Cherniakhovsky  
(Protocol No. 7, 29 May 2017)*

When using the materials, the reference to the journal  
"Modern Information Technologies  
in the Sphere of Security and Defence" is mandatory

The editorial board can have a different viewpoint  
than that of the authors

The content of the materials is the authors' responsibility

The journal is indexed in the scientometric bases:  
*Citefactor, Google Academy, Index Copernicus,  
The Journal Impact Factor,  
Directory of Research Journals Indexing (DRJI)*

The journal is presented in the databases:  
*Bielefeld Academic Search Engine (BASE),  
Directory of Open Access Journals (DOAJ),  
Research Bible, WorldCat.*

The journal is added to the libraries:  
*Vernadsky National Library of Ukraine.*

## Contents:

### *Theoretical Foundations of Information Technologies Creation and Use*

<i>Andreev F.M., Statkus A.V., Kovbasjuk S.V.</i> design substantiation for the algorithm of increasing the accuracy of range higher order derivatives for ballistic and space targets .....	5
<i>Babiy J.A., Klepikovskiy A.V., Kovalev V.A.</i> Complex of optical-television guidelines with using machine steri-operation and adaptive algorithms of support.....	13
<i>Bychenok M.M., Voytko O.V., Cherneha V.M., Nesterov O.M.</i> Expert risk assessment procedure of negative information impacts .....	19
<i>Bohdanovych V.Y., Pavlovskiy O.V., Prima A.N.</i> The method of defining of tasks by integrated potential component for the deescalation of military threats with the use of method of expertly-meaningful intermediate scenarios .....	23
<i>Zotov S.V.</i> Methods of optimal distribution of forces system survey support job process operation to maximize efficiency .....	28
<i>Levchenko O.V., Kosogov O.M., Siryk A.O.</i> Assessment method quantitative indicators of negative information influence its implementation in form.....	31
<i>Nikulin N.B., Romashko I.V., Korzh I.Y.</i> Prediction of a narrowband random process after linear detection.....	36
<i>Savchenko V.A., Kononenko S.M., Bobylov V.E., Drok L.V.</i> Coordination model for the national cyber security system of Ukraine .....	41
<i>Sakovich L.N., Girenko I.N.</i> Modeling the operation of technical support hardware... ..	47
<i>Stela O.B., Potapenko L.L., Sirenko I.P.</i> Numerical simulation of pyrodynamic processes based on the computer model of internal ballistics.....	53
<i>Strelibicikyj M.A.</i> Method of the reconciliation of the access matrices of the discretionary access control systems of the information and telecommunication systems at the stage modernization.....	58
<i>Shefer O.V.</i> The approach to teaching intelligent decision support system of military solutions using a simulation model of combat operations .....	63

### *Modern Military Theoretical Problems*

<i>Voloshchenko O.I., Chernykh I.V.</i> Method for determination of fortification magnitude of impact on the survivability of point military objects .....	167
<i>Hryshchuk R.V., Oryshchuk I.O., Savchuk V.S.</i> Analysis of the role and place of the forces and means of psychological operations in local wars and armed conflicts.....	73
<i>Katerynchuk I.S., Mysyk A.B.</i> Scientific and methodical apparatus for substantiating unit engagement of state border guard service of Ukraine in territorial defense .....	81
<i>Korinenko V.I.</i> Method of definition of multipurpose radio station operating mode taking into account conditions of propagation of high frequency radio-waves.....	86
<i>Makodzeba T.S., Dujij R.V., Belov M.A.</i> The transformation of information and psychological support system of the armed forces of Ukraine based on nato internal communications.....	92
<i>Mirnenko V.I., Poltorak M.F., Dulenko D.I.</i> Mathematical simulation methodology for prediction of the airfield hard surface condition .....	96
<i>Musienko V.A., Tkach V.V., Kutsayev V.V., Ivchenko N.V.</i> The rationale for creating a modern hidden vantage point of the interdepartmental group of armed forces .....	101
<i>Openko P.V., Drannyk P.A., Smolkov A.Y., Storozhuk A.V.</i> Explanation of approaches to effective conduct radio electronic fight with the command and control system of air defense unifications.....	107
<i>Prilyubiy Y.B.</i> The improved complex automated expert system of monitoring of technical condition and diagnostics missile weapons .....	114
<i>Punda Y.V., Antonenko S.I.</i> Problems of adequacy governance system armed forces of Ukraine to hybrid warfare conditions.....	120
<i>Romanov O.M.</i> Current state and development prospects of russian federation satellite communication systems.....	126
<i>Serhiienko V.D., Popov A.A., Zibin S.D., Bychkov A.N., Pidhorodetskiy M.M.</i> Analysis of the state of the art of multifunctional electronic warfare means and complexes.....	135
<i>Turovets Y.S.</i> Calculable experiment method of liquid contaminations distribution in soils of military operations conduct zone .....	144
<i>Chernenko A.D.</i> Justification of a scoring system for evaluation of the efficiency of maintenance and development expenses for armed forces of Ukraine for the sake of short terms sufficiency of the state defense .....	151

---

## Editorial Board

### **Chief Editor**

*Permiakov Oleksandr Yuriiiovych*  
doctor of technical sciences, professor

### **Deputy Chief Editor**

colonel *Savchenko Vitalii Anatoliiovych*,  
doctor of technical sciences, senior research fellow

### **Editorial Board members:**

*Butvin Borys Leonidovych*,  
doctor of technical sciences, professor

major general, *Danyk Yurii Hryhorovych*,  
doctor of technical sciences, professor

*Gawliczek Piotr*,  
associate professor

*Drobakha Hryhorii Andriiovych*,  
doctor of military sciences, professor

*Zhuk Serhii Yakovych*,  
doctor of technical sciences, professor

*Zahorka Oleksii Mykolaiovych*,  
doctor of military sciences, professor

colonel *Katerynychuk Ivan Stepanovych*,  
doctor of technical sciences, professor

*Kompantseva Larysa Feliksivna*,  
doctor of philological sciences, professor

*Kosevtsov Viacheslav Oleksandrovyeh*,  
doctor of military sciences, professor

*Kravchenko Yurii Vasylovych*,  
doctor of technical sciences, professor

colonel *Lobanov Anatolii Anatoliiovych*,  
doctor of military sciences, professor

*Potii Oleksandr Volodymyrovych*,  
doctor of technical sciences, professor

*Presnall Aaron*,  
doctor of philosophy

*Repilo Yurii Yevhenovych*,  
doctor of military sciences, professor

major general *Ryspaiev Askhat Nauryzbaiovych*,  
candidate of military sciences

*Romanchenko Ihor Serhiiiovych*,  
doctor of military sciences, professor

*Ruban Ihor Viktorovych*,  
doctor of technical sciences, professor

*Riabtsev Viacheslav Vitaliiiovych*,  
candidate of technical sciences,  
associate professor

*Sbitniev Anatolii Ivanovych*,  
doctor of technical sciences, professor

*Semon Bohdan Yosypovych*,  
doctor of technical sciences, professor

*Servatiuk Vasyl Mykolaiovych*,  
doctor of military sciences, professor

*Solonnikov Vladyslav Hryhorovych*,  
doctor of technical sciences, professor

*Telelym Vasyl Maksymovych*,  
doctor of military sciences, professor

*Fluri Philip*,  
doctor of philosophy

*Shevchenko Viktor Leonidovych*,  
doctor of technical sciences,  
senior research fellow

*Shemaiev Volodymyr Mykolaiovych*,  
doctor of military sciences, professor

*Shimic Goran*,  
doctor of philosophy

### **Executive Secretary**

colonel *Vojtko Oleksandr Volodymyrovych*  
candidate of military sciences

**Николай Борисович Никулин** (канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерной инженерии)  
**Игорь Владимирович Ромашко** (старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии)  
**Игорь Юрьевич Корж** (студент Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка)

**Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,  
Украина**

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УЗКОПОЛОСНОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ПОСЛЕ ЛИНЕЙНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

В статье оценена эффективность цифровых фильтров предсказания по критерию минимума среднеквадратичной ошибки при использовании статистической взаимосвязи отсчётов мгновенных значений и огибающей узкополосного случайного процесса. Показано, что при использовании корреляционных связей огибающей относительная точность оценки не улучшается, начиная с определённого порядка фильтра и, ухудшается с увеличением дисперсии процесса.

**Ключевые слова:** Цифровой фильтр, ошибка предсказания, огибающая случайного коррелированного процесса

### Введение

Задача прогнозирования случайных процессов (СП) в настоящее время является актуальной и находит широкое применение в различных исследованиях как технического, так и математического направления [1 – 3].

Оценивание параметров коррелированного СП проводится с помощью фильтров предсказания [1, 3] которые, используя статистическую связь отсчётов, позволяют посредством весового суммирования получить с приемлемой точностью оценку требуемого параметра.

Сегодня такие фильтры – это неотъемлемая составляющая оборудования радиоэлектронных систем различного назначения: адаптивных антенных и акустических решеток; компенсаторов сигналов электрического эха в системах проводной связи; компенсаторов сигналов акустического эха в системах голосовой связи; эквалайзеров каналов связи в модемах; компенсаторов шумов.

Важнейший показатель качества фильтра предсказания – среднеквадратичная ошибка предсказания  $\sigma_e$ .

Линейный предиктор дает оптимальное по критерию минимума  $\sigma_e$  предсказание только для стационарных случайных процессов (ССП). Если характеристики ССП (математическое ожидание, дисперсия и пр.) удалось, с заданной степенью точности найти, то задача прогноза становится достаточно простой.

Реализация фильтра с использованием корреляционных связей мгновенных значений узкополосного СП возможна либо на высокой частоте, что требует применения быстродействующего АЦП, либо на видеочастоте в квадратурах, для чего необходим высококачественный и стабильный фазовый детектор. Гораздо меньшие аппаратные затраты необходимы при амплитудном детектировании.

Линейный амплитудный детектор воспроизводит огибающую узкополосного колебания, независимо от особенностей структуры его спектра. В свою очередь, огибающая каждой реализации СП на выходе детектора, обладает спектром более широким, чем частотная полоса самой реализации. Таким образом, после линейного детектирования, степень статистической зависимости от-

счётов уменьшается, и точность оценки будет очевидно ухудшаться.

Поэтому, представляет интерес оценить степень потери качества предсказания при переходе на синтез прогнозирующего фильтра по отсчётам огибающей в отличие от расчёта весовых коэффициентов по мгновенным значениям.

### Особенности узкополосного ССП

В дальнейшем будем рассматривать стационарные СП с непрерывными состояниями и дискретным временем.

Случайный процесс с дискретным временем называют стационарным, если распределение величин  $Y_{t_1}, Y_{t_2}, \dots, Y_{t_n}$  совпадает с распределением  $Y_{t_1+\tau}, Y_{t_2+\tau}, \dots, Y_{t_n+\tau}$  для любого конечного множества целых чисел  $\{t_1, \dots, t_n\}$  и любого целого  $\tau$  [5]. Случайная функция  $X(t)$  называется *стационарной в широком смысле*, если ее математическое ожидание постоянно, а корреляционная функция зависит только от разности аргументов  $t_1$  и  $t_2$ :  $R[x(t_1, t_2)] = R[x(\tau)]$ , где  $\tau = t_2 - t_1$ . Случайная функция  $X(t)$  называется *стационарной в узком смысле*, если ее  $n$ -мерный закон распределения при любом  $n$  зависит только от интервалов  $t_2 - t_1$ , и совсем не зависит от положения этих интервалов в области изменения аргумента  $t$ . В практических задачах обычно применяют понятие стационарной функции в широком смысле. Итак, для ССП характерна неизменность во времени его основных вероятностных характеристик, таких, как математическое ожидание и дисперсия.

Одним из важнейших свойств ССП является эргодичность, состоящая в том, что каждая отдельная реализация СП является как бы полномочным представителем всей совокупности возможных реализаций, что позволяет по одной реализации находить все необходимые характеристики СП. Понятно, что оценки этих величин с увеличением размера выборки будут только улучшаться и приближаться к их истинным значениям.

В большинстве практических случаев плотность распределения вероятности флуктуационного случайного процесса является гауссовой. Это связано с тем, что та-

кие случайные процессы являются результатом совместного действия большого количества различных факторов, каждый из которых вносит примерно одинаковый вклад. При этом оказываются выполненными условия центральной предельной теоремы теории вероятностей, что и определяет неограниченное приближение плотности распределения вероятности к гауссово.

Таким образом, при синтезе узкополосного СП методом имитационного моделирования, можно использовать ограниченное количество случайных величин в области окна формирующего фильтра.

Пример быстрой нормализации СП при увеличении количества случайных величин показаны на рис. 1.

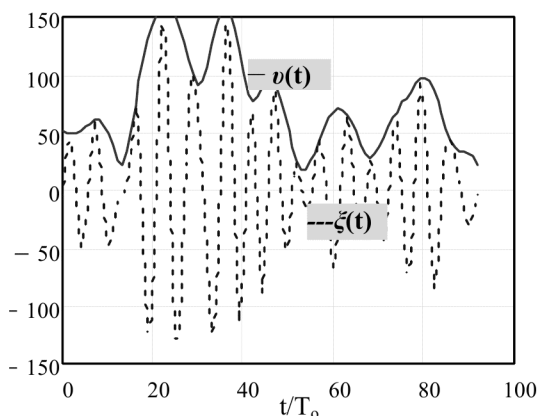


Рис. 1. Плотности вероятности суперпозиции одной, двух и трёх равномерно распределённых величин.

Узкополосным называется СП  $\zeta(t)$ , ширина спектра мощности  $\Delta\omega$ , которого гораздо меньше центральной частоты спектра  $\omega_0$ , т.е.  $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \ll 1$  [2, 5]. Такой процесс

описывается выражением

$$\xi(t) = \nu(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \theta(t)], \quad (1)$$

где  $\nu(t) \geq 0$  – огибающая с распределением Релея,  $\varphi(t) + \theta(t)$  – мгновенная фаза, функция  $\theta(t)$  равномерно распределена на интервале  $-\pi \leq \theta(t) \leq \pi$ .

Пример реализации узкополосного дискретного СП показан на рис. 2

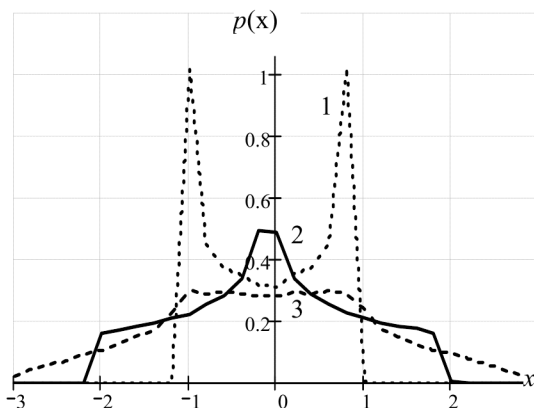


Рис. 2. Реализация узкополосного ССП

( $T_0$  - период дискретизации). Выражение (1) преобразуется к виду суммы синфазной  $X(t)$  и квадратурной  $Y(t)$  составляющих

$$\xi(t) = X(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] - Y(t) \sin[\omega_0 t + \varphi(t)], \quad (2)$$

где  $X(t) = \cos[\theta(t)]$ ;  $Y(t) = \sin[\theta(t)]$ .

Если  $\zeta(t)$  является стационарным гауссовым СП, то квадратурные составляющие также стационарны и имеют плотность вероятности, распределённую по нормальному закону. Доказывается также [5], что процессы  $X(t)$  и  $Y(t)$  некоррелированы, а в силу их гауссовости и независимы.

### Формирование оценки в фильтре предсказания

В задаче предсказания необходимо оценить текущее значение процесса  $y(n)$  по его известным предыдущим отсчетам. Таким образом, можно сделать вывод, что линейное предсказание – это вычислительная процедура, позволяющая по линейной комбинации предшествующих взвешенных отсчетов предсказать (с определенной точностью) будущее значение отсчета.

Проанализируем выражения для расчёта нормированной по спектральной плотности собственных шумов или дисперсии ССП минимальной ошибки предсказания для различных уровней мощности и ширины спектра СП.

Рассмотрим устройство оценки в виде нерекурсивного фильтра порядка  $L$ , структура которого приведена на рис. 3 [1]. Оценка  $n$ -го отсчёта  $\hat{y}(n)$  комплексной амплитуды процесса или его огибающей формируется после линейного весового суммирования его предыдущих  $L$  значений.

$$\text{Тогда } \hat{y}(n) = \sum_{k=1}^L y(n-k) w_k, \quad (3)$$

где:  $w_k$  - весовые коэффициенты фильтра.

В матрично-векторной форме выражение (3) можно записать в виде

$$\hat{y}(n) = \dot{Y}^T(n) \dot{W}, \quad (4)$$

где:  $\dot{Y}^T(n) = \|y[(n-1)], y[(n-2)], \dots, y[(n-L)]\|$ ;

$$\dot{W}^T = \|w_1, w_2, \dots, w_L\|.$$

В свою очередь, ошибка оценивания определяется как

$$e(n) = \dot{y}(n) - \dot{Y}^T(n) \dot{W}. \quad (5)$$

Для ССП дисперсия ошибки оценивания [4]

$$\sigma_e^2 = \sigma_{\text{шш}}^2 - 2 \dot{W}^T \dot{P} + \dot{W}^T \Phi_{\text{шш}} \dot{W}, \quad (6)$$

где:  $\sigma_{\text{шш}}^2 = \langle \dot{y}(n) \dot{y}(n)^* \rangle = \sigma_n^2 + \sigma_{\text{ш}}^2$  - дисперсия статистически независимых отсчётов процесса и собственного шума;  $\dot{P}^T = \langle \dot{y}(n) \dot{U}^T(n) \rangle$  - вектор-столбец взаимных ковариаций между оцениваемым отсчётом и отсчётами, которые подвергаются весовому суммированию;  $\Phi_{\text{шш}} = \langle \dot{Y}^* \dot{Y}^T \rangle$  - автоковариационная матрица СП и шума с элементами

$$\varphi_{\text{шш}}^{i,k} = \langle \dot{y}_{\text{шш}}^i \dot{y}_{\text{шш}}^{k*} \rangle = \sigma_n^2 \rho_{ik} + \sigma_{\text{ш}}^2 \delta_{ik}, \quad i, k = 1, L,$$

где  $\rho_{ik}$  - коэффициент корреляции СП между  $i$  и  $k$  отсчётами,  $\delta_{ik}$  - символ Кронекера.

Здесь:  $\langle \cdot \rangle$ ,  $*$ ,  $^T$  - операции статистического усреднения, комплексного сопряжения, транспонирования.

Дифференцируя (6) по  $\mathbf{W}^T$  и приравнявая к нулю, получаем известное соотношение Винера-Хопфа для оптимального весового вектора, который обеспечивает

минимальную дисперсию ошибки дисперсию ошибки оценивания  $\sigma_{e \text{ мин}}^2$

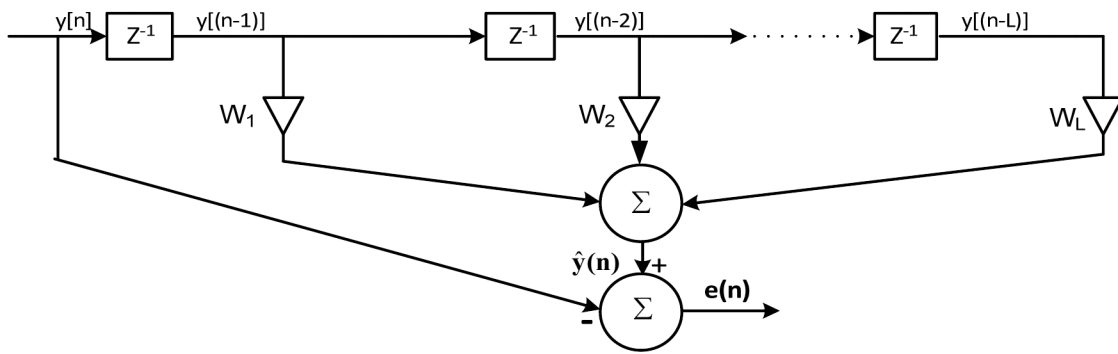


Рис. 3. Структурная схема не рекурсивного фильтра предсказания

$$\dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}^T = \Phi_{\text{пш}}^{-1} \dot{\mathbf{P}} \quad (7)$$

или, в другой форме записи

$$\Phi_{\text{пш}} \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}^T = \dot{\mathbf{P}}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6) получаем выражения для минимальной дисперсии ошибки оценивания

$$\sigma_{e \text{ мин}}^2 = \sigma_{\text{пш}}^2 - \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}^T \dot{\mathbf{P}} = \dot{\mathbf{P}}^T \Phi_{\text{пш}}^{-1} \dot{\mathbf{P}}, \quad (9)$$

$$\sigma_{e \text{ мин}}^2 = \sigma_{\text{пш}}^2 - \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}^T \Phi_{\text{пш}} \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}(r)}. \quad (10)$$

Нормированные, относительно дисперсий собственных шумов и СП, значения  $\sigma_{e \text{ мин}}^2$  представляются в виде

$$\frac{\sigma_{e \text{ мин}}^2}{\sigma_{\text{ш}}^2} = 1 + b - \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}^T \Phi'_{\text{пш}} \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}, \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_{e \text{ мин}}^2}{\sigma_{\Pi}^2} = 1 + 1/b - \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}^T \Phi''_{\text{пш}} \dot{\mathbf{W}}_{\text{опт}}, \quad (12)$$

где:  $b = \sigma_{\Pi}^2 / \sigma_{\text{ш}}^2$ ,  $\Phi'_{\text{пш}} = b\rho_{\text{ик}} + \delta_{\text{ик}}$ ,  $\Phi''_{\text{пш}} = \rho_{\text{ик}} + \delta_{\text{ик}}/b$ .

Таким образом, потенциальная точность оценки ССП зависит от степени статистической взаимосвязи отсчётов и уровня мощности процесса, а также от порядка предсказывающего фильтра.

### Результаты исследований

Для формирования квадратурных компонент коррелированных отсчётов СП  $y(n)$  применялась имитационная модель дискретного случайного процесса скользящего среднего порядка  $q$ . Соответственно косинусные (верхний индекс  $C$ ) и синусные (верхний индекс  $S$ ) компоненты – мгновенные значения СП вычисляются в выражении

$$y_n^{C(S)} = \sum_{k=0}^q d_k Z_{k+vn}^{C(S)}, \quad (13)$$

где  $d_k = e^{-2\pi(k-\frac{q}{2})^2}$  – весовые коэффициенты равные значению формирующего фильтра в соответствующих точках отсчета  $k = 0..q$ ;  $Z_i$  – независимые случайные гауссовские величины с нулевым математическим ожиданием. Таким образом, процесс  $y(n)$  является ССП с нормальной плотностью распределения вероятности. Значение  $v$  определяет степень статистической взаимосвязи

отсчётов процесса, т.е. нормированную корреляционную функцию

$$\rho(\tau) = e^{-\frac{\tau^2}{\tau_k^2}}, \quad (14)$$

где  $\tau_k$  – интервал корреляции и спектральную плотность

$$S(F) = S(0)e^{-\pi(\frac{F}{\Pi})^2}, \quad (15)$$

где  $\Pi$  энергетическая ширина спектра процесса связанная с  $\tau_k$  соотношением  $\tau_k \Pi = 1$ .

Соответственно коэффициент корреляции огибающей для известной зависимости  $\rho(\tau)$  рассчитывается из выражения (16) [5]

$$r[\rho(\tau)] = \frac{[(1+\rho(\tau)) \times E(\rho(\tau)) - 0.5 \times \pi]}{2 - 0.5\pi}, \quad (16)$$

где  $E(\rho(\tau)) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k(\rho(\tau))^2 \sin^2 \Psi} d\Psi$  – полный

эллиптический интеграл;  $k(\rho(\tau)) = \frac{2\sqrt{\rho(\tau)}}{1 + \rho(\tau)}$ .

На рис. 4 приведены несколько реализаций централизованного дискретного ССП, нормированного по спектральной плотности собственных шумов. В данном случае для имитационного моделирования дискретного СП скользящего среднего использовались параметры  $q = 200, v = 8$ .

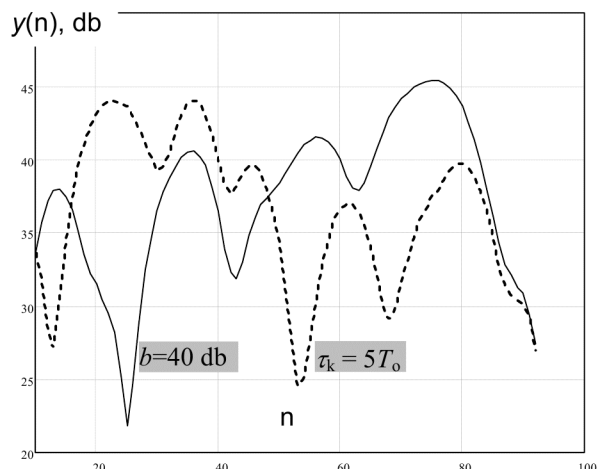


Рис. 4. Реализации огибающих дискретного ССП

Расчётные (для статистического усреднения использовалось  $10^4$  реализаций) и теоретические по формуле

(15) зависимости нормированной корреляционной функции огибающей СП приведены на рис. 5.

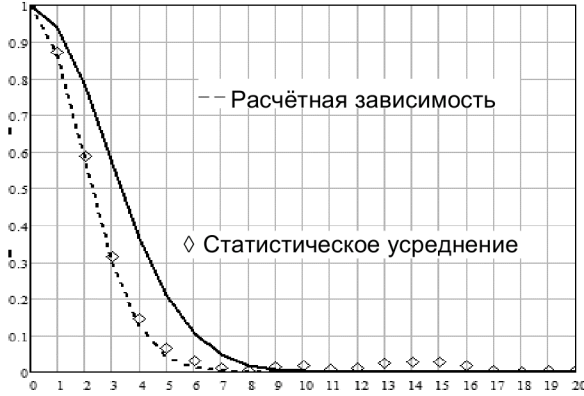


Рис. 5. Расчётная и эмпирическая нормированные корреляционные функции огибающей ССП

Можно отметить хорошее совпадение эмпирической зависимости и расчётных значений коэффициентов корреляции, что позволяет далее применять для исследований СП с известными статистическими и энергетическими характеристиками.

Значения оценок отсчётов рассчитанных по корреляционной функции для огибающей приведены на рис. 6.

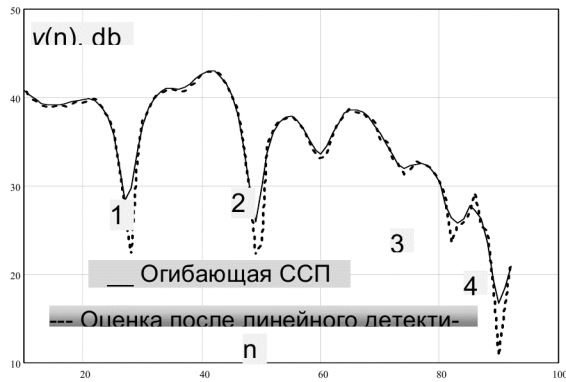


Рис. 6. Пример обработки реализации ССП в фильтре предсказания восьмого порядка

Можно отметить, что ошибка предсказания, рассчитанная по  $r(\tau)$  существенно увеличивается на участках резкого изменения тренда СП – участки 1, 2, 3, 4 графика.

Зависимости ошибок предсказания, нормированных по уровню собственных шумов, от размерности фильтра, приведённые на рис. 7 показывают, что желательно использовать фильтр, порядок которого удовлетворяет соотношению  $L \leq \lfloor \tau_k / T_0 \rfloor$ , так как точность оценивания с использованием статистической зависимости отсчётов огибающей для фильтра большего порядка практически не меняется.

На графике 7 и на графиках 9, 10 нумерация:

- 1 – Оценка по корреляции огибающей;
- 2 – Оценка по корреляции мгновенных значений;
- 3 – Разность ошибок предсказания.

Отсутствие повышения точности оценки для данных характеристик СП и параметров фильтра, поясняется пренебрежимо малым влиянием весовых коэффициентов фильтра с номером большим чем  $\lfloor \tau_k / T_0 \rfloor$ .

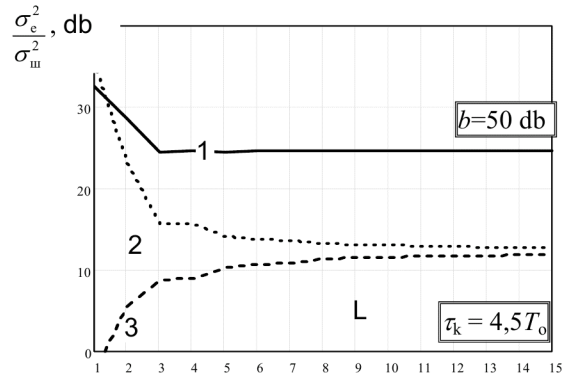


Рис. 7. Зависимость относительной ошибки предсказания от порядка весового вектора

Это иллюстрируется графиками рис. 8 на которых показаны значения весовых коэффициентов фильтра в зависимости от номера (по сути это импульсные характеристики обеслаивающих нерекурсивных фильтров), рассчитанные по мгновенным значениям и по огибающей.

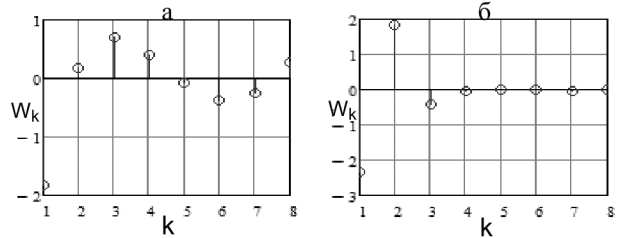


Рис. 8. Весовые коэффициента фильтра предсказания: а – расчёт по  $\rho(\tau)$ ; б – расчёт по  $r(\tau)$

Графики рис. 9, 10 иллюстрируют зависимость нормированной по уровню собственных шумов дисперсии ошибки предсказания от статистических и энергетических характеристик случайного процесса.

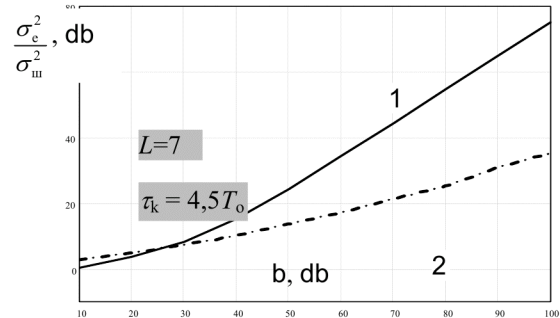


Рис. 9. Зависимость относительной ошибки предсказания от дисперсии СП

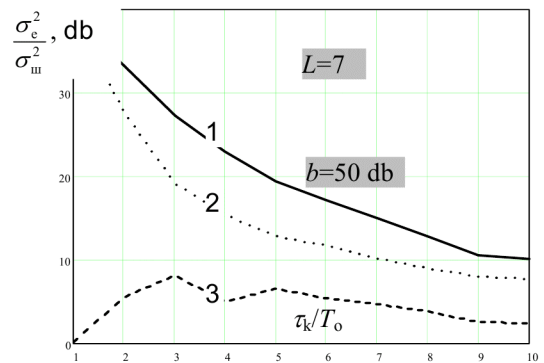


Рис. 10. Зависимость нормированной ошибки предсказания от интервала корреляции



### Выводы

По результатам имитационного моделирования СП и его обработки в фильтре предсказания можно сделать следующие выводы:

1. Уменьшение точности прогнозирования по огибающей узкополосного СП в основном определяется уменьшением интервала корреляции.
2. Приращение эффективности фильтра предсказания, рассчитанного по статистике огибающей, становится пренебрежимо малым, начиная с порядка фильтра

### Литература

1. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. /Под ред. проф. Я.Д. Ширмана. М.: ЗАО «МАКВИС», 1998, с.828

более  $\lfloor \tau_k / T_0 \rfloor$ .

3. Существенное влияние на относительное увеличение  $\sigma_e$  (в сравнении с расчётом по статистике мгновенных значений) оказывает рост мощности СП.
4. Упрощение реализации системы прогнозирования при амплитудном детектировании может компенсировать потери точности по критерию эффективность/стоимость.

3. *The Theory of Linear Prediction Vaidyanathan P. P. Copyright © by Morgan & Claypool, 2008. – 198 p.*

4. *Diniz P. S. R. Adaptive filtering algorithms and practical implementation. Third edition. – New York, Springer Science + Business Media, 2008. – 627 p.*

5. *Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.*

## ПРОГНОЗУВАННЯ ВУЗЬКОСМУГОВОГО ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ ПІСЛЯ ЛІНІЙНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ

*Микола Борисович Нікулін (канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії)*

*Ігор Володимирович Ромашко (старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії)*

*Ігор Юрійович Корж (студент Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка)*

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна*

У статті оцінено ефективність цифрових фільтрів передбачення за критерієм мінімуму середньо-квадратичної помилки при використанні статистичного взаємозв'язку відліків миттєвих значень і обвідної вузькосмугового випадкового процесу. Показано, що при використанні кореляційних зв'язків обвідної відносна точність оцінки не поліпшується, починаючи з певного порядку фільтра і, погіршується зі збільшенням дисперсії процесу.

**Ключові слова:** Цифровий фільтр, похибка передбачення, огибающая випадкового корельованого процесу.

## PREDICTION OF A NARROWBAND RANDOM PROCESS AFTER LINEAR DETECTION

*Nikolay B. Nikulin (Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the computer engineering department)*

*Igor V. Romashko (Senior Lecturer of the computer engineering department)*

*Igor Y. Korzh (student Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University)*

*Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine*

In the article, the effectiveness of digital prediction filters based on the criterion of the minimum of the mean-square error is estimated using the statistical interrelation between the instantaneous values and the envelope of the narrowband random process. It is shown that when correlation envelopes are used, the relative accuracy of the estimation does not improve, beginning with a certain order of the filter, and worsens with increasing dispersion of the process.

**Keywords:** Digital filter, prediction error, envelope of a random correlated process