

7. Tkachenko O.S. Doslidzhennia vplyvu dodatkovoho oporu na amplitudno-chastotni kharakterystyky piezoelektrychnykh peretvoriuvachiv, *Visnyk Khmelnytskogo Natsionalnogo Universytetu, Technical sciences*, Khmelnytsky 2012, No. 1, pp. 108–112. [in Ukrainian]
8. Pat. 56932 Ukraina, MPK H04R 17/00. Elektroakustychnyi peretvoriuvach / V.M. Sharapov, Zh.V. Sotula, I.V. Chornoshyi, L.H. Kunytska, K.V. Bazilo. – No. 201012464 ; zaiavl. 22.10.10 ; opubl. 25.01.11, biul. No. 2. [in Ukrainian]
9. Pat. 59818 Ukraina, MPK H01F 30/00. Piezoelektrychnyi transformator / V.M. Sharapov, V.H. Savin, K.V. Bazilo, I.O. Morhun, O.S. Tkachenko. – No. 201100397 ; zaiavl. 13.01.11 ; opubl. 25.05.11, biul. No. 10. [in Ukrainian]
10. Pat. 59819 Ukraina, MPK H01F 30/00. Piezoelektrychnyi transformator / V.M. Sharapov, V.H. Savin, K.V. Bazilo, I.O. Morhun, O.S. Tkachenko. – No. 201100398 ; zaiavl. 13.01.11 ; opubl. 25.05.11, biul. No. 10. [in Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 1.10.2013 р. Надрукована/Printed :24.11.2013 р.  
Рецензент: Шарапов В.М., д.т.н., професор, завідувач кафедри КІТП, ЧДТУ, Черкаси

УДК 621.396.96

Л.В. КАРПОВА, Д.А. МАКАРИШКІН  
Хмельницький національний університет

## МЕТОД ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЕХО-СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ДОДАТКОВОГО АЛГОРИТМУ АВТОКОРЕЛЯЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ

*В статті розроблено метод обробки радіолокаційних ехо-сигналів на основі додаткового алгоритму автокореляційного оцінювання комплексної обвідної ехо-суміші, що дає змогу реалізувати наявну амплітудну та кутову модуляцію в радіолокаційних сигналах навіть без попередньої їх оцінки. Отримано ряд аналітичних виразів функцій невизначеності радіолокаційних сигналів при їх амплітудній та кутовій модуляції випадковими процесами з різними законами розподілу.*

*Ключові слова: кореляція, функція невизначеності, закон розподілу, комплексна обвідна сигналу.*

L.V. KARPOVA, D.A. MAKARISHKIN  
Khmelnytsky National University

## RADAR ECHO PROCESSING METHOD, SIGNAL BASED ON ADDITIONAL EVALUATION ALGORITHM AUTOCORRELATION

*Abstract – In this article a method for processing radar echo signals from additional autocorrelation estimation algorithm integrated bypass echo mixture, allowing to implement existing amplitude and angle modulation in radar signal even without prior evaluation.*

*The method is based on the use of the autocorrelation properties of the signal, the evaluation of which are equally considered as deterministic and nondeterministic components. The basic idea of the method is based on the fact that the active and semi-active radar echo signals all in one sensing period correlated with each other both deterministic and for nondeterministic components.*

*A number of functions analytic expressions of uncertainty radar signals in their amplitude and angular modulation of random processes with different laws of distribution.*

*Keywords: correlation function of the uncertainty distribution law, complex envelope signal.*

Із теорії радіотехнічних систем та сигналів відомо, що потенційна роздільна здатність активних радіолокаційних засобів визначається виключно детермінованими характеристиками зондуючих сигналів (роздільна здатність по дальності) та спрямовуючими характеристиками випромінюючих і прийомних антенних систем (роздільна здатність по кутових координатах) [2, 3]. При цьому, в міру детерміністичних підходів аксіомою є правило, відповідно якого ступінь розрізнення віддзеркалених від цілей сигналів (ехо-сигналів) не може перевищувати ступінь розрізнення зондуючих [1]. Це пояснюється тим, що оптимальне виявлення та розрізнення сигналів можливе лише при застосуванні узгоджених алгоритмів, які і реалізують їх потенційні можливості, а узгодження по не детермінованих складових в принципі не можливе.

Дослідження математичної моделі імпульсного зондуючого радіосигналу з урахуванням статистичних моделей амплітудних та кутових спотворень в його комплексній обвідній показали наявність потенційної можливості щодо покращення характеристик активних та напівактивних радіолокаційних засобів, що обумовлено наявністю додаткової амплітудної та кутової модуляції. Проте, недетермінованість самих модулюючих складових через їх флуктуаційну природу не дає змоги застосувати оптимальний (узгоджений) алгоритм, а отже вони носять паразитний характер і єдиним можливим виходом, що застосовується на сьогоднішній день, є максимальна їх компенсація.

В статті пропонується дещо альтернативний підхід, а саме метод, що базується на використанні автокореляційних властивостей сигналу, при оцінці яких однаково враховуються як детерміновані, так і недетерміновані складові. Основна ідея методу базується на тому, що при активній та напівактивній радіолокації всі ехо-сигнали в одному періоді зондування корельовані між собою як за детермінованими, так і за недетермінованими складовими.

Математична модель групового ехо-сигналу – суміші ехо-сигналів від  $M$  – цілей, без урахування шумів та завад, може бути представлена у такому вигляді:

$$\dot{u}_{zp}(t) = \sum_{n=1}^M A_n U(t - \tau_n) \xi_u(t - \tau_n) \exp j(\omega_0 t + \omega_n(t - \tau_n) + \varphi_0 + \varphi_n + \xi_\varphi(t - \tau_n)) \quad (1)$$

де  $\omega_n = \frac{4\pi\mathcal{G}_{rn}}{\lambda}$  – доплерівське зміщення частоти;  $\varphi_n = \frac{2\omega_0 D_n}{c}$  – фазовий зсув ехо-сигналу;  $\mathcal{G}_{rn}$  – радіальна швидкість  $n$ -ї цілі (елементу цілі);  $D_n$  – відстань до  $n$ -ї цілі (елементу цілі).

Цей вираз містить сигнали з певними амплітудними і кутовими відмінностями, що вносяться при відбитті від різних цілей (елементів), проте всі вони мають ідентичні флуктуаційні амплітудні і кутові модуляційні складові, внесені ще при формуванні зондуючого сигналу. Через флуктуаційну природу цих складових, синтезувати оптимальну їм структуру алгоритму обробки неможливо, а можливо реалізувати лише оптимальний алгоритм по усереднених значеннях, який в реальних умовах є більше раціональним, ніж оптимальним.

Для оцінки потенційних можливостей розрізнення ехо-сигналів в такій суміші, необхідно проаналізувати її кореляційну функцію, яку зручніше виразити через комплексну обвідну.

Комплексна обвідна суміші ехо-сигналів (1) має вигляд:

$$\dot{U}_{cp}(t) = \sum_{n=1}^M A_n U(t - \tau_n) \xi_u(t - \tau_n) \exp j[\omega_n(t - \tau_n) + \xi_\varphi(t - \tau_n)] \exp j\varphi_n \quad (2)$$

Як відомо із теорії кореляційного аналізу, кореляційна функція адитивної суміші комплексних обвідних (2) може бути представлена у вигляді суми взаємкореляційних функцій комплексних обвідних окремих ехо-сигналів:

$$B(\tau) = \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M B_{n,m}(\tau) \quad (3)$$

або в матричному вигляді:

$$B_{n,m}(\tau) = \begin{pmatrix} B_{1,1}(\tau) & \cdots & B_{1,M}(\tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{M,1}(\tau) & \cdots & B_{M,M}(\tau) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Простий логічний аналіз матриці (4) показує, що елементи на головній діагоналі приймають максимальні значення при  $\tau = 0$ , а враховуючи ширину кореляційної функції прямокутного імпульсу можуть приймати ненульові значення тільки в межах ширини ( $|\tau_{0.5}|$ ) основної пелюстки кореляційної функції кожного з ехо-сигналів в суміші, тобто

$$\text{при } n = m, \begin{cases} B_{n,m}(\tau) = \max, & \tau = 0, \\ B_{n,m}(\tau) \neq 0, & \tau \geq |\tau_{0.5}|, \\ B_{n,m}(\tau) = 0, & \tau > |\tau_{0.5}|. \end{cases} \quad (5)$$

Властивості кореляційної функції при  $n \neq m$  мають наслідком такі твердження:

$$B_{n,m}(\tau) = B_{m,n}(\tau),$$

$$\sum_{n,m} B_{n,m}(0) \geq 2 \sum_{n=1}^M \sum_{m=n+1}^M B_{n,m}(\tau), \quad (6)$$

З (6) можна зробити такі висновки:

- на автокореляційній функції суміші ехо-сигналів завжди буде присутня складова  $B(0)$  не залежно від значення  $M$ , при чому для  $M = 0$  значення  $B(0)$  буде визначатися енергією шумів;
- на автокореляційній функції суміші ехо-сигналів буде присутня тільки одна складова  $B(0)$  як за  $M = 0$  так і за  $M = 1$ , що фактично означає неспроможність автокореляційного алгоритму виявляти ехо-сигнали, а тільки їх розрізняти;
- максимальне значення взаємкореляційних членів  $B_{n,m}(\tau)$ , для  $n \neq m$  не може перевищувати

$$\frac{1}{2} \sum_{n,m} B_{n,m}(0);$$

- автокореляційне оцінювання має сенс лише за умови, що тривалість імпульсу значно більша за ширину основної пелюстки автокореляційної функції  $\tau_i \gg |\tau_{0.5}|$ .

Таким чином, алгоритм автокореляційного оцінювання має сенс тільки у вигляді додаткового каналу обробки ехо-сигналів, а не основного і є ефективним лише за наявності значної додаткової модуляції не залежно від її детермінізму (природного або штучного походження).

Модель приймача, що реалізує метод підвищення ступеня розрізнення радіолокаційних ехо-сигналів на основі алгоритму авто кореляційного оцінювання приведено на рис. 1.

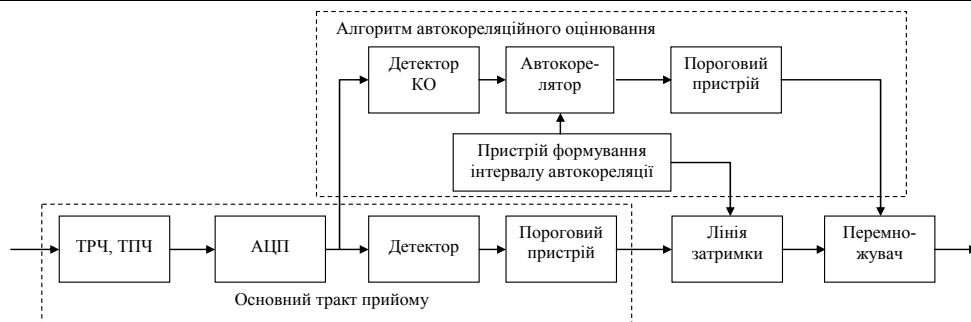


Рис. 1. Структурна схема приймача РЛС, що реалізує запропонований метод

Відповідно даної моделі, обробка ехо-сигналів з використанням недетермінованих кореляційних властивостей здійснюється в два етапи:

- на першому здійснюється виявлення в основному каналі прийому (встановлення факту наявності корисного сигналу);
- на другому оцінюється кількість ехо-сигналів в суміші за її кореляційними властивостями.

На першому етапі, за класичним алгоритмом проводиться виявлення ехо-сигналів. При цьому, алгоритм є оптимальним для прямокутної форми комплексної обвідної і забезпечує розділення ехо-сигналів тільки за умови їх рознесення в часі. На другому етапі, коли встановлено факт наявності ехо-сигналу і враховуючи, те що всі ехо-сигнали в межах періоду зондування корелюють між собою як за детермінованими так і за недетермінованими складовими, для розрізнення окремих сигналів в суміші оцінюється її автокореляційна функція. При цьому ступінь розрізнення окремих сигналів у суміші визначається шириною основної пелюстки зондуючого сигналу з урахуванням недетермінованих модуляційних складових, яка за певних умов, може бути значно вужчою, як це було показано в першому науковому результаті.

Відповідно отриманих результатів, було проведене імітаційне моделювання. Як видно із його результатів урахування автокореляційних властивостей комплексної обвідної зондуючих сигналів призводить до значного підвищення ступеня їх розрізнення. На рисунках 2,а та 2,б показана форма автокореляційної функції двох ехо-сигналів з прямокутною обвідною та лінійною частотною модуляцією при різних девіаціях частоти, що фактично відповідає різній ширині смуги пропускання приймача, та при різному відношенні сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної.

На рис. 3 приведено графіки комплексних обвідний зондуючого сигналу, суміші двох ехо-сигналів та шуму. На рис. 4 приведено ті ж графіки але для іншого розмаху частотної нестабільності зондуючого сигналу.

На рис. 5 приведено графіки, що ілюструють ефективність авто кореляційного оцінювання суміші ехо-сигналів при значно вищому рівні шумів. Як видно з цих графіків, чітко прослідковується тенденція до різкого зменшення ефективності пропонуємого методу залежно від рівня шумів.

На рис. 6 приведено залежність рівня автокореляційних складових суміші двох ехо-сигналів при різних значеннях частотної нестабільності генератора НВЧ.

Як видно з графіків, не залежно від детермінованості комплексної обвідної її кореляційні властивості достатньо ефективно можуть бути застосовані. Проте, при дії шумів, за рахунок різкого спаду рівня взаємкореляції ехо-сигналів, картина погіршується, хоча при певному рівні взаємкореляційні відгуки все ще чітко проглядаються. Таким чином, стає очевидним обмеження застосування методу, яке полягає в наступному: підвищення розрізнення ехо-сигналів можливе лише за умови стійкого їх прийому при якому забезпечується детектування їх комплексної обвідної з відношенням сигнал/шум не гірше 0 дБ. Це саме підтверджується графіками залежності рівня взаємкореляційних складових по відношенню до сумарної енергії в залежності від співвідношення сигнал/шум комплексної обвідної, що показані на рис. 6.

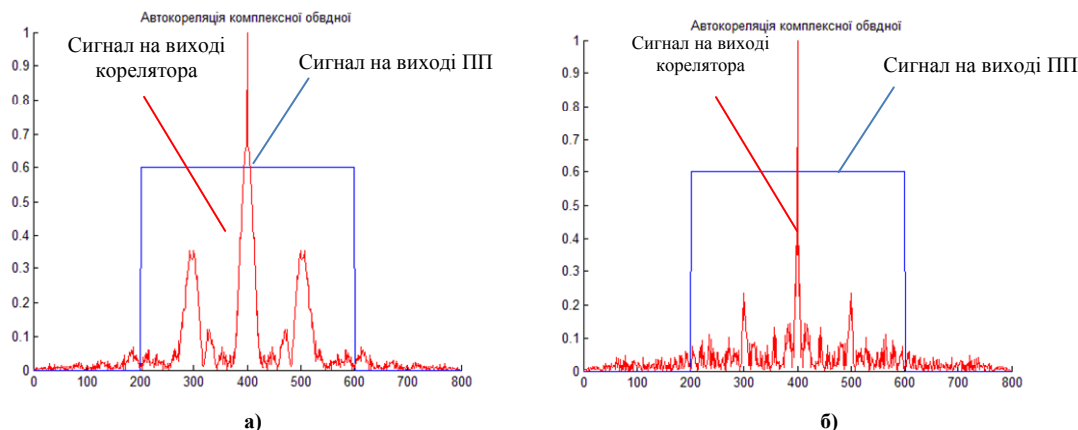


Рис. 2. Автокореляція комплексної обвідної суміші ехо-сигналів: а) при відношенні сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної +10 дБ; б) при відношенні сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної 0 дБ

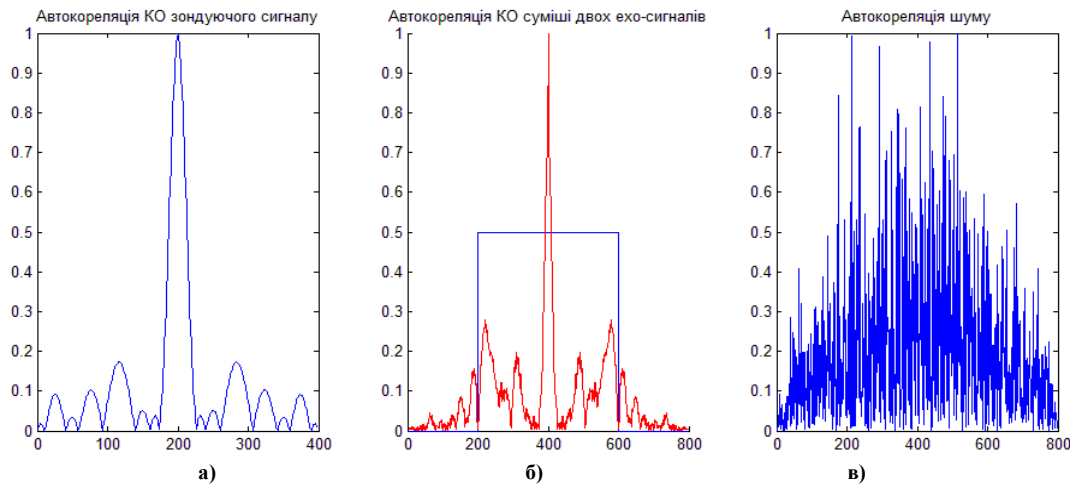


Рис. 3. Автокореляція комплексної обвідної а) зонduючого сигналу; б) суміші двох ехо-сигналів при відношенні сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної +5 дБ; в) шуму

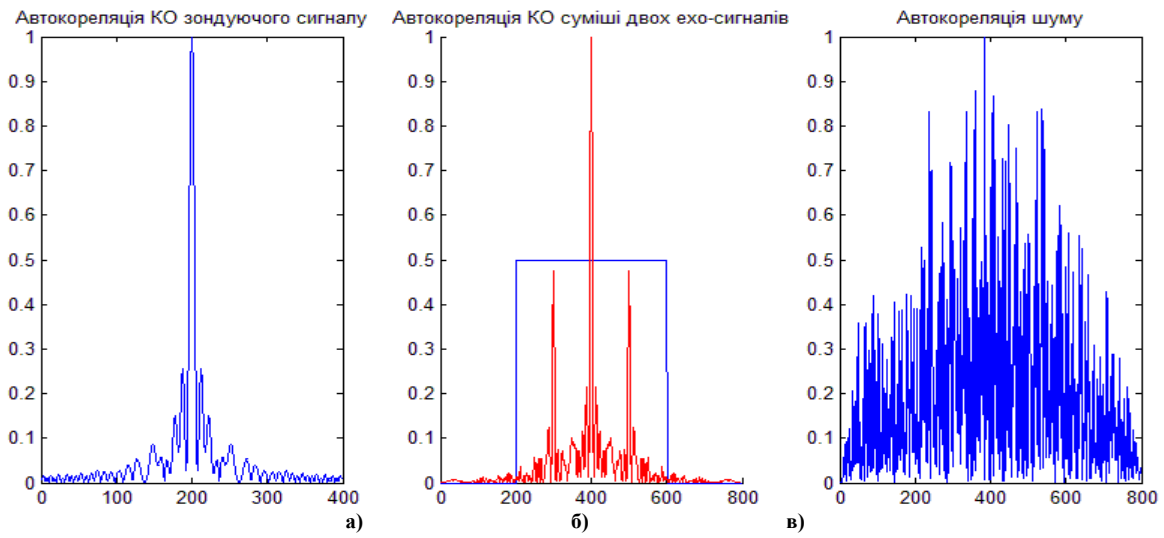


Рис. 4. Автокореляція комплексної обвідної а) зонduючого сигналу; б) суміші двох ехо-сигналів при відношенні сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної +5 дБ; в) шуму

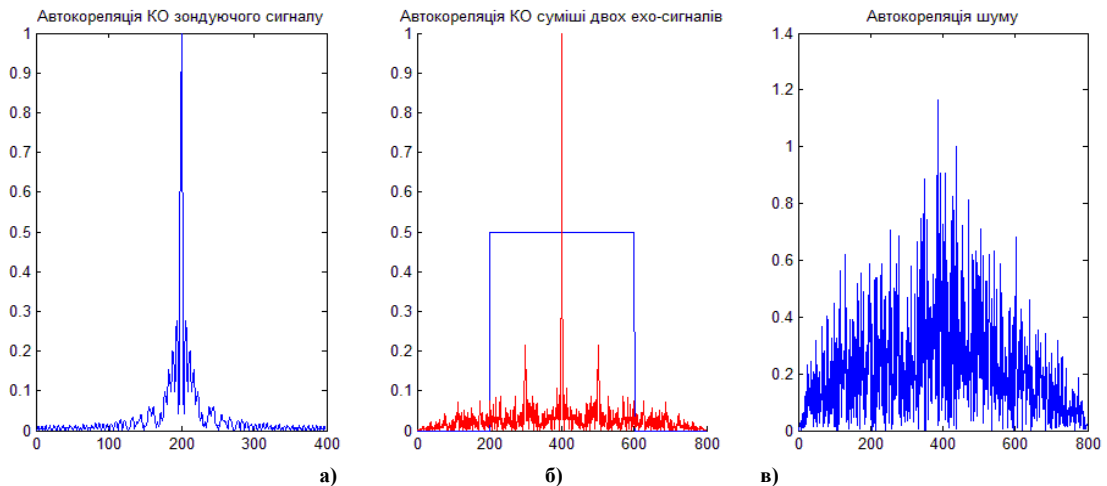


Рис. 5. Автокореляція комплексної обвідної а) зонduючого сигналу; б) суміші двох ехо-сигналів при відношенні сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної 0 дБ; в) шуму

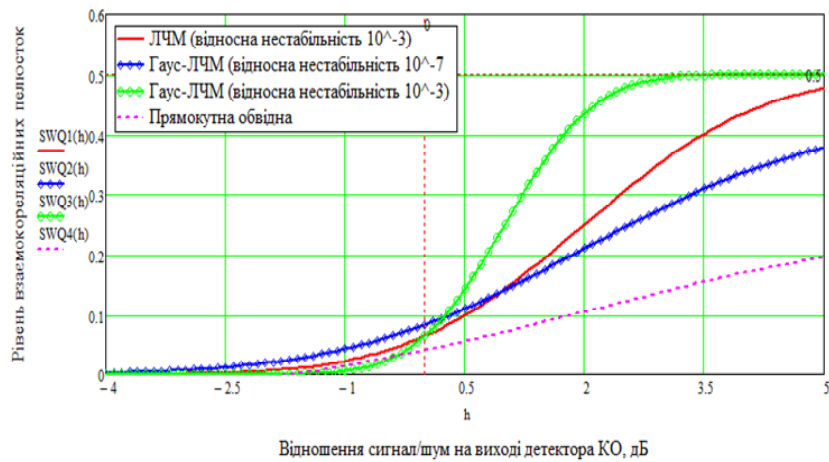


Рис. 6. Залежність нормованого рівня взаємкореляційних членів від відношення сигнал/шум на виході детектора комплексної обвідної

Як видно з графіків, тільки на рівні +0,5 дБ спостерігається різкий сплеск у всіх випадках, незалежно від корельованості комплексної обвідної самого зонduючого сигналу. Проте, при відношенні сигнал/шум вище 1 дБ вииграш від застосування методу в значній мірі залежить від форми комплексної обвідної зонduючого сигналу, при чому, на що слід наголосити – незалежно від її детермінованості.

Експериментальні дослідження та імітаційне моделювання показали (рис. 7), що в залежності від форми комплексної обвідної (яка визначається типом генератора НВЧ, способом побудови модулятора та його режимом роботи), скорочення тривалості зонduючого сигналу при постійній ширині смуги пропускання приймача дає змогу отримати вииграш в роздільній здатності в межах декількох разів при збереженні відношення сигнал/шум, або підвищити відношення сигнал/шум за рахунок звуження смуги пропускання приймача при збереженні тривалості імпульсу а відповідно і роздільної здатності.

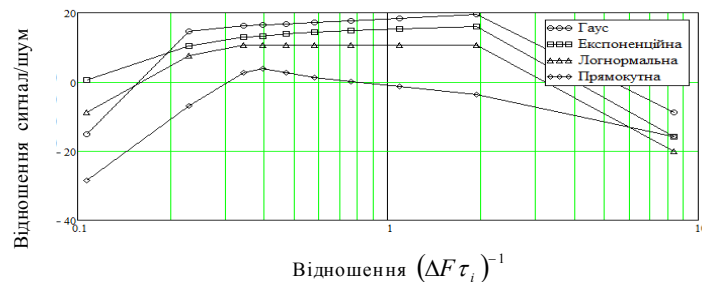


Рис. 7. Зміна відношення сигнал/шум при різному співвідношенні смуги пропускання та тривалості імпульсу

### Висновки

Розроблений метод дає змогу реалізувати потенційні можливості сигналів навіть з урахуванням їх не детермінованих властивостей, що мають місце при впливі різних флуктуаційних процесів в передавачі, антенно-фідерному тракті та при віддзеркаленні сигналів від цілей.

Експериментальні дослідження та імітаційне моделювання показали, що в залежності від типу генератора НВЧ, способу побудови модулятора, його режиму роботи та смуги пропускання приймача, вииграш в роздільній здатності може сягати декількох разів при збереженні відношення сигнал/шум, або навпаки.

За результатами імітаційного моделювання встановлено, що застосування додаткового алгоритму кореляційного оцінювання суміші ехо-сигналів в приймачі дає змогу підвищити роздільну здатність РЛЗ по дальності в 2–3 рази, при 2-х кратному резервуванні смуги частот приймача і більш ніж в 8 разів, при 5-кратному. При цьому застосування псевдокогерентної внутрішньоперіодної обробки радіолокаційних сигналів в некогерентних РЛЗ дає змогу отримати вииграш в відношенні сигнал/шум до 12 дБ при гаусівській амплітудній обвідній і близько 8 дБ при прямокутній з експоненційними фронтами.

### Література

1. Воробьев С.Н. Эффективное обнаружение детерминированных сигналов: Монография. - СПб.: СПбГУАП, 2003. – 139 с. – ISBN 5-8088-0088-9.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / Гоноровский И.С.: Учебник для вузов.– 4-е изд., перер. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
3. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Ширман Я.Д., Манжос В.Н.– М.: Радио и связь, 1981.– 416 с.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник. – М.: Высш. школа., 1983. – 536 с.

1. Vorob'ev S.N. Jеfektivnoe obnaruzhenie determinirovannyh signalov: Monografija. - SPb.: SPbGUAP, 2003. – 139 s. – ISBN 5-8088-0088-9.
2. Gonorovskij I.S. Radiotekhnicheskie cepи i signaly / Gonorovskij I.S.: Uchebnik dlja vuzov.– 4-e izd., perer.i dop. – M.: Radio i svjaz', 1986. – 512 s.
3. Shirman Ja.D. Teorija i tehnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomeh / Shirman Ja.D., Manzhos V.N.– M.:Radio i svjaz', 1981.– 416 s.
4. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie cepи i signaly: Uchebnik. – M.: Vyssh. shkola., 1983. – 536 s.

Рецензія/Peer review : 9.10.2013 р. Надрукована/Printed :24.11.2013 р.  
Рецензент: Шинкарук О.М., д.т.н., проф.

УДК 389.001(075.8)

**В.Т. КОНДРАТОВ**

Институт кибернетики им. В.М.Глушкова НАН Украины

**ТЕОРИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ И СВЕРХИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ:  
СУЩНОСТЬ СВЕРХИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
СООБЩЕНИЕ 3**

*В настоящем сообщении рассматриваются философские аспекты сверхизбыточных измерений, приводятся новые понятия и определения, излагается сущность сверхизбыточных измерений, фундамент теории, предмет исследований, развиваемые научные направления, фундаментальные особенности сверхизбыточных измерений, правила решения метрологических задач, правила подбора рядов физических величин и т.д.*

*Работа представляет интерес для ученых-метрологов, специалистов, магистров и аспирантов.*

*Ключевые слова: теория избыточных и сверхизбыточных измерений, структура теории.*

V.T.KONDRATOV

V.M.Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

**THE THEORY OF REDUNDANT AND SUPERREDUNDANT MEASUREMENTS:  
ESSENCE OF SUPER-REDUNDANT MEASUREMENTS  
THE MESSAGE 3**

*Abstract – The theory of super-redundant measurements is a new branch of development of the theory of the redundant measurements, the new scientific direction having the specific features.*

*The further development was received by philosophical aspects of the theory such concepts and definitions, as quasi-true and true values of physical quantity, iterative and is probabilistic-iterative methods of redundant measurements and others, in particular, are formulated.*

*The essence of super-redundant measurements is opened.*

*It is established, that super-redundant measurements are repeating the limited number of times measuring transformations of the expanded number of the physical quantities naturally connected among themselves in the sizes and including some of exemplary quantities of the accepted size, with the subsequent averaging or with not averaging of the transformed quantities with the same name, their processing agree a priori deduced statistically authentic set n the equations of redundant and-or super-redundant measurements and definitive averaging of ensemble of the received results of measurements of required physical quantities, parameters of transformation function of the measuring channel, and also estimations of a current condition (metrological characteristics and metrological serviceability) used of redundant measurements means during all time of its operation.*

*Feature of super-redundant measurements is that only in them ensembles of the redundant measurements equations or ensembles of the numerical values equations are formed and used.*

*Affirms, that unlike redundant, super-redundant measurements for one cycle of implementing several methods of redundant measurements, as used by a number of advanced transformed physical quantities can be represented as a combination of (a set of) physical quantities, representing together with the equations of redundant measurements of a particular method of redundant measurements.*

*Strategy of super-redundant measurements — definition strategy of kvazi-true and true values of object researches properties, current values of transformation function parameters of the measuring channel, and also parameters or indicators of metrological reliability of intellectual measuring system «Object of measurement — Means of redundant measurements», directed on achievement of new quality of measurements.*

*It is ascertained, that at realization super-redundant measurements hardware-software and hardware expenses for parallel processing of ensemble of the data received on final set of the redundant measurements equations essentially increase.*

*The subject of researches of the super-redundant measurements theory is established, rules of formation of numbers of measured physical quantities, etc. are formulated.*

*The concept of alternative measurements, as multiple and multi-purpose redundant and super-redundant measurements providing the decision of metrological problems and reception of high quality of end results in comparison with direct measurements is entered.*

*For the first time in the world classification of alternative measurements which gives representation about all their variety and an interconnection is developed.*

*Eight fundamental features of the super-redundant measurements distinguishing them from other measurements are formulated.*

*Set research subject of super-redundant measurements theory which comprises: the cognition of their own laws of the structure, functioning and development, cognition of the properties of ergodic dynamical measurement systems, cognition of the super-redundant measurement methods and their features aimed at identifying patterns and features definition of quasi-true and the true values of physical quantities and parameters of transformation function of the measuring channel (one or several); the development of strategy of reception*