

## ВИЯВЛЕННЯ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ З НЕВІДОМИМИ ПАРАМЕТРАМИ У РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯХ

© Яворський Богдан, 2004

Встановлено новий базис подання складного радіосигналу (СРС) з невідомими параметрами розсіювання спектра для цифрової системи його виявлення. Подано модель шуму аналого-цифрового перетворення (АЦП), метод адаптації АЦП та Фур'є-процесорів (ФП), її критерій. Розглянуто метод виявлення у базисах подання періодично корельованих випадкових послідовностей (ПКВП). Дано порівняльний аналіз сімей графіків імовірність виявлення – відношення сигнал/шум, отриманих за різних імовірностей марної тривоги, для локально-оптимального та запропонованого методів.

A new basis for representation a low probability of interception (LPI) signal under digital electronic supported measures (ESM) of their detection considered. An analog to digital conversation (ADC) noise model and adaptation of ADC and Fourier processors and its criteria established. A way of detection of the LPI signal with unknown parameters presented. The bases of periodically correlated stochastic consequence representation used. Comparative analysis of obtained probability of detection vs. signal-to-noise ratio at different fault probabilities graphic families for locally- optimal and presented methods given.

### Вступ

СРС синтезовано евристичним методом [1, 2] при вирішенні проблем: а) високоточного визначення малих розмірів об'єкта на великій віддалі за допомогою радіолокації [2]; б) завадостійкості багатоканального радіозв'язку [1, 3]. Оскільки виходить так, що їх енергія в спеціальний спосіб розсіяна у широкій смузі частот, то відношення сигнал/шум (SNR) для них загалом є  $\leq 0$  дБ, тому імовірність  $P_d$  їх безпосереднього виявлення мала і вони є скритими. Біологічним, гідро- та геофізичним, космічним та іншим природним об'єктам також властиві складні сигнали, подібні до СРС [4]. Для попередження стихійних явищ, охорони безпеки життєдіяльності людини, вивчення довкілля, у військовій справі тощо необхідно вміти виявляти у радіовипромінюваннях СРС (щоб потім навчитися їх розпізнавати, контролювати, керувати відповідною ситуацією). Проте в умовах несанкціонованого прийому СРС (розвідки, пошукових досліджень) незнання їх параметрів унеможливило їх виявлення.

### 1. Проблема безпосереднього виявлення складних сигналів

Виявлення СРС з відомими параметрами їх формування є класичною задачею [1–3]. При апріорно відомих розподілах відповідних ймовірностей вона розв'язана на байесовій концепції статистичної теорії рішень. Конструктивна та ефективна тестова статистика виявлення при цьому визначається побудовою функціонала відношення правдоподібності в рамках спектрально-кореляційної теорії. За невідомих параметрів гауссових розподілів, а також марківської випадкової структурованості, полігауссовості і розкладів негауссових розподілів розроблено оптимальні та адаптивні методи виявлення [5]. Водночас критерії оптимальності та адаптації також є функціоналами спектрально-кореляційної теорії. У відомих системах типу "Светозар-РК", "Луч М", "Барвинок" – [6] чи Thales Altesse DR 3000, Avitronics Shrike ESM receiver, C. Plath DFP-7107,

Applied Signal Elvira Signal-processing workstation, EADS Advanced Mobile ELINT System – [7] тощо для підвищення  $P_d$  оптимізують вибір локальних ділянок аналізу, адаптуючи параметри алгоритмів й апаратури на базі стаціонарної моделі радіосигналу та завад, застосовуючи: а) паралельну у кожний момент часу вузькосмугову фільтрацію та статистику (кумулянти) вищих порядків [8]; б) компресію частотного діапазону аналізу та статистику другого порядку [9]. Для цього застосовують також циклостаціонарну модель СРС, що приводить до спеціальної комутації АЦП [8]. У радіосистемах із штучним інтелектом (типу AMRF-C) шляхом логічних виводів ці методи комбінують. Крім того, зменшують шуми приймальних систем для збільшення відповідного відношення сигнал/шум [10].

Аналіз стану та тенденцій розвитку відповідних радіосистем показує, що: а) методи зведення до кореляційного чи узгодженого прийому зменшують показники їх ефективності, виявляючи СРС з невідомими параметрами; б) спеціальні методи виявлення СРС ґрунтуються на його евристичній модифікації задля використання класичних статистик виявлення; в) ефективність є нижчою не тільки за потенційну, але і за оптимальну, – коли АЦП та аналіз СРС (багаточастотною вузькосмуговою фільтрацією, перетворенням Фур'є – ПФ) узгоджені з часовою структурою спектра; г) для підвищення ефективності систем виявлення СРС не використовувалися оптимізація його моделі і адаптація пристроїв АЦП та аналізу ПФ за критерієм, який побудовано на її базі; д) нова модель СРС повинна узгоджуватися з класичними статистиками виявлення сигналу; е) залишається недослідженим вплив шуму від АЦП радіовипромінювань у широкій смузі частот на виявлення СРС. Отже, потрібно на науково обґрунтованих положеннях розширити номенклатуру спектральних розкладів, побудувати критерій оптимальності подання ними СРС та адаптувати за ним параметри АЦП та ПФ алгоритмами адаптивно-екстремальних [11] систем. Це приведе до побудови ефективніших за функціонально-технічними й техніко-економічними показниками систем виявлення СРС.

## **2. Спектральне подання аналого-цифрового перетворення складного сигналу з невідомими параметрами**

Визначення спектра АЦП радіовипромінювань, що містять СРС з невідомими параметрами, можливе за умови такого його означення, яке врахує формування неперервного СРС та його АЦП як операторів, що мають спільну із спорідненим для ПФ оператором систему власних функцій [12]. Тоді некогерентність аналізу врахується вираженням за допомогою означених через неї індикаторів певних компонент спектра, у загальному випадку на множині яких відсутнє відношення порядку [13], а базис подання СРС визначається з деякої множини підмножин експоненціальних функцій (таким чином, еквідистантні базиси є частинним випадком). Це відповідає відомим науково обґрунтованим положенням теорії гармонізованості (Є. Гладишев, Л. Гудзенко, Є. Слуцький, А. Яглом, W.A. Gardner, H.L. Hurd та ін.), у певному сенсі завершеної для сигналів скінченної енергії чи потужності Я.П. Драганом (енергетична теорія сигналів та систем – ЕТСС), а також В.О. Омельченком (спектральна теорія розпізнавання сигналів) та І.М. Яворським (статистичний аналіз ритміки сигналів) і поширює її на випадок АЦП СРС [14]. Водночас поняття скінченності (фінітності) та впорядкованості спектральних складових розвиваються до поняття їх зліченності множини його компонентів, як у теорії квазі та майже періодичних функцій, введених для розв'язування деяких класів диференціальних рівнянь П. Болем. З'являються умови для розвитку методів та алгоритмів цифрового аналізу спектральних компонент, їх оптимізації, визначення функціонала відношення правдоподібності та обчислення тестової статистики виявлення СРС з невідомими параметрами [15, 16].

Базиси слабкоперіодичних функцій в гільбертових просторах уможливають побудову методів спектрального аналізу слабкоперіодичних сигналів – фільтровий, когерентний (синфазний), компонентний. Ці числові методи аналогічні до фізичних методів – інтерферометричного, радіометричного, панорамного, але значно їх переважають у технологічній та технічній ефективності. Зокрема, на їх базі розв'язується задача ефективного визначення спектра у цілому діапазоні розсіювання частот. Наприклад, відомий вираз оцінки кореляційної функції

$$\hat{C}(t, \tau) = \int_0^{t-\tau} \xi(t-u)\xi(t-u, \tau)h(u)du, \quad (1)$$

де  $h(t)$  позначено імпульсну функцію когерентного, коли

$$h(t) \triangleq \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - nT_0), \quad (2)$$

чи компонентного, коли

$$h(u) \triangleq \frac{\sin[(N_1 + \frac{1}{2})\lambda_0 u]}{(t - t_0)\sin(\lambda_0 u/2)}, \quad (3)$$

де  $N_1$  – кількість компонент, фільтрів використовується для отримання виразів відповідних спектральних компонент. Для звичайних сигналів функцію  $h(t)$  синтезують як оптимальну, розв'язуючи екстремальну задачу. Для СРС її виражено через узагальнені функції, які залежать від виразу оператора розсіювання енергії сигналу по частотах.

Оцінка математичного сподівання сигналу визначається виразом

$$\hat{m}(t) = \int_0^{t-t_0} \xi(t-u)h(u)du. \quad (4)$$

Тоді оцінки кореляційної функції та математичного сподівання отримуються за допомогою фільтрів з вузькою смугою пропускання:

$$\hat{r}_{\xi}^{(T)}(l, k) = \sum_{n,m} \hat{D}_{nm}(l-k)e^{-i\lambda_0(nl-mk)}, \quad \hat{m}_{\xi}^{(T)}(\theta) = \sum_{k=1, N_1} \hat{m}_k e^{-ik\lambda_0\theta}, \quad (5)$$

де  $k, l, \theta \in Z$ ;

$$\hat{m}_k = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \sum_{\theta} \left\{ \hat{\Phi}_k^{\lambda_0} \xi(\theta) \right\} e^{-ik\lambda_0\theta}, \quad (6)$$

де  $\hat{\Phi}_k^{\lambda_0}$  – вузькосмугові фільтри (дельта-фільтри). Оцінки симетричних кореляційних компонент:

$$\hat{D}_{nm}(u) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \sum_k \left\{ e^{i\lambda_0 n(u+k)} \left( \hat{\Phi}_n^{\lambda_0} \xi \right)(u+k) \overline{\left( \hat{\Phi}_m^{\lambda_0} \xi \right)(k)} e^{-i\lambda_0 mk} \right\}, \quad (7)$$

де  $u = l - k$ .

У загальному випадку такі фільтри розподілені по усій смузі частот, яку займає сигнал, і використовуються для визначення відповідних спектральних компонент за допомогою ПФ.

### 3. Практичні результати

На рис. 1 показано спектрограми звичайного радіосигналу (а) та відповідного йому СРС (б) за некогерентного цифрового аналізу методом ПФ (з врахуванням шуму АЦП та без шуму каналу; вісь абсцис – час, с, вісь ординат – частота, Гц, вісь аплікат – амплітуда у псевдокольоровій шкалі). На рис. 2 показано стандартні характеристики виявлення, побудовані з використанням спектрограм рис. 1 (а – АЦП суміші вузькосмугового радіосигналу з гауссовим шумом, б – АЦП суміші СРС з гауссовим шумом; дисперсія шуму – 0.16; вісь абсцис – відношення сигнал/шум, дБ; вісь ординат – імовірність виявлення при ймовірності марної тривоги відповідно позначених: + – 0.1, o – 0.01, x – 0.001). На рис. 3 зображено графіки спектральних компонент (абсциса – номери компонент, ордината – зсув у коваріації), а на рис. 4 – характеристики виявлення, побудовані за їх даними (дисперсія шуму каналу для (а) – 0.09, для (б) – 0.16; значення марної тривоги відповідають значенням рис. 2).

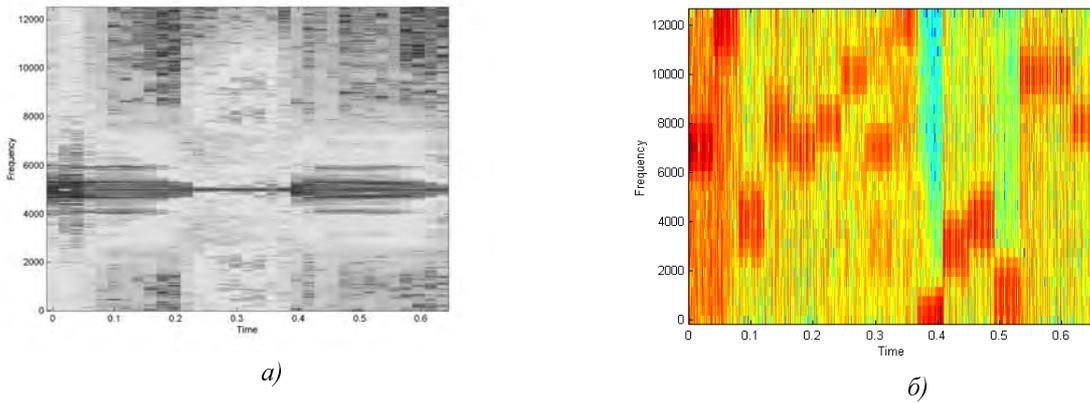


Рис. 1. Некогерентні спектрограми радіосигналу (а) та СРС (б)

Програми комп'ютерного моделювання СРС, АЦП та ФП, впливу каналу тощо опубліковано в [17].

Спектральні компоненти на рис. 3, а–в отримано за неоптимальних параметрів аналізу (кількість компонент – 25, зсув коваріації –50), а компоненти (г–е) – за знайдених адаптацією оптимальних параметрів (кількість компонент – 50, зсув коваріації –100). Результати автоматичної екстремальної адаптації за критерієм максимуму варіації спектральних компонент при апріорно відомих початкових значеннях цих параметрів збіглись з результатами інтерактивної адаптації.

Спектральні компоненти рис. 3, а–г отримано для сигналу без скачків несучої частоти, а спектральні компоненти (б, в) та (д, е) – із скачками, причому компоненти (в, е) – з врахуванням шуму АЦП. Порівнюючи спектрограми на рис. 1, а, б та спектральні компоненти рис. 3 д, е видно, що використання спектральних компонент цифрового СРС уможливило отримання кращих характеристик виявлення СРС з невідомими параметрами, оскільки при цьому спектри шуму та СРС зосереджені на різних компонентах, які визначаються часовою структурою його спектра після адаптації АЦП та ФП.

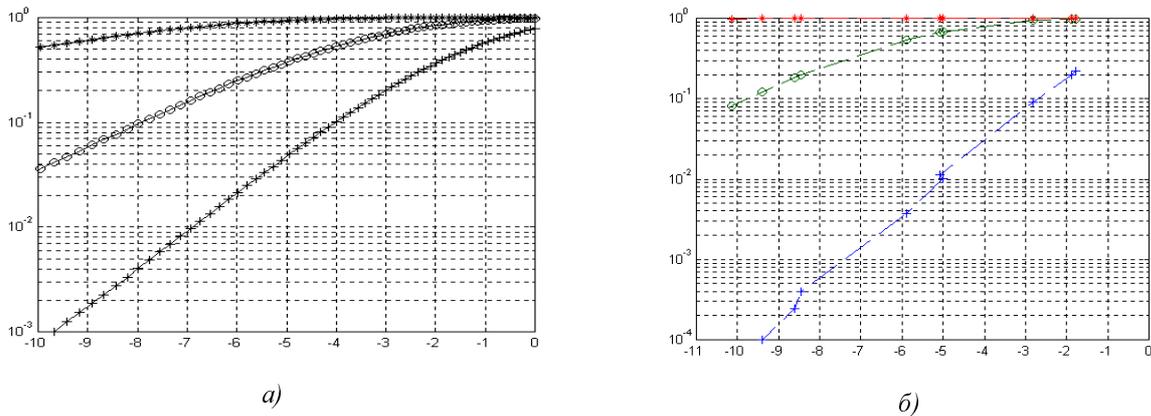
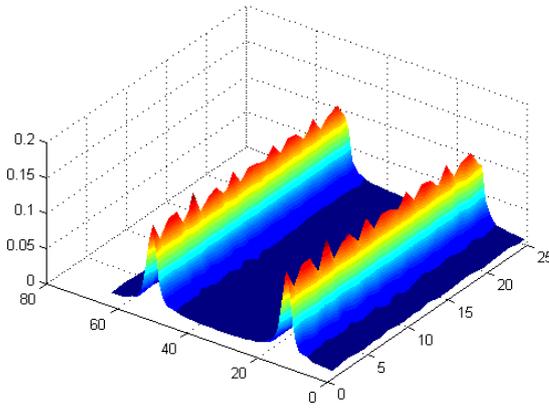


Рис. 2. Типові характеристики виявлення за некогерентними спектрограмами

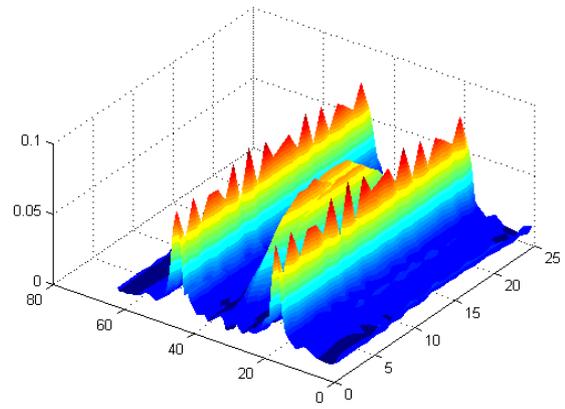
Для ПКВП спектр зосереджується на частотних "діагоналях" квадрата  $\Lambda \times \Lambda$ , які задаються виразом  $\Lambda_2 = \Lambda_1 \pm k \frac{\Lambda}{M}$ ,  $k = \overline{0, M}$ , де  $M$  – кількість спектральних компонент, а значення  $\Lambda$  визначається частотними параметрами радіосигналу – смугою розсіювання, частотою несучої та типом її модуляції тощо. Вирази  $M_\gamma$  відношення сигнал/шум та дисперсії  $V_\gamma$  байєсової тестової статистики визначаються за розподілом  $\alpha_k$  енергії по частотних діагоналях ( $\alpha_0$  визначає розподіл за частотою енергії сигналу) за результатами спектрального аналізу після адаптації АЦП та ФП:

$$M_{\gamma} = \left[ \sum_{k=1}^{M-1} \left(1 - \frac{k}{M}\right)^2 \left(\frac{\alpha_k}{\alpha_0}\right)^2 \right]^{-1}; \quad (8)$$

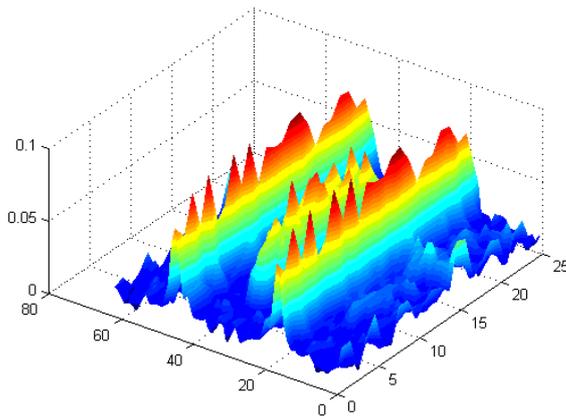
$$V_{\gamma} = \sqrt{2}\Lambda \sum_{k=1}^{M-1} \left(1 - \frac{k}{M}\right) \alpha_k. \quad (9)$$



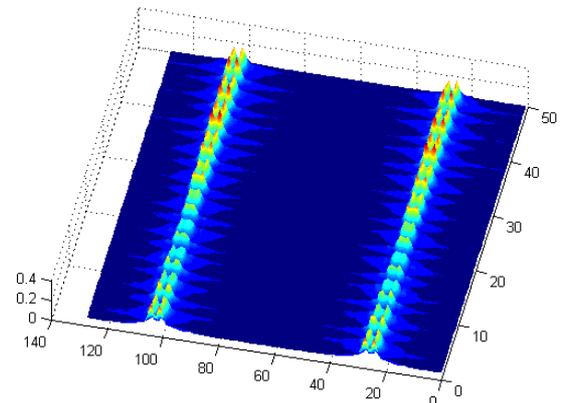
a)



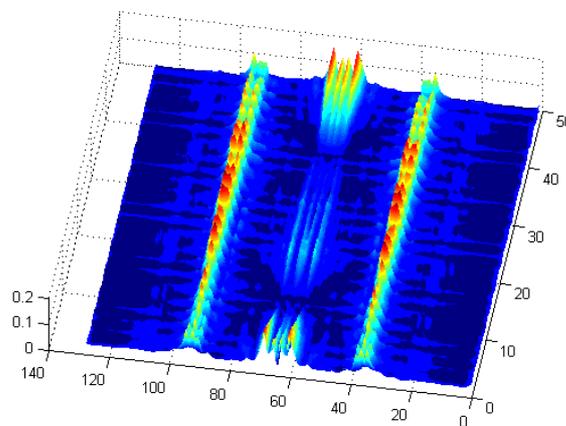
б)



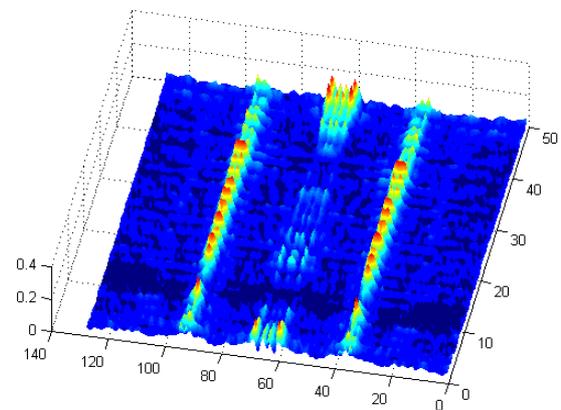
в)



г)



д)



е)

Рис. 3. Спектральні компоненти CPC

На рис. 4 показані типові характеристики виявлення

$$P_d = 1 - \Phi\left(\frac{v - M_\gamma}{V_\gamma}\right), \quad (10)$$

де  $V$  – поріг; визначається за енергією шуму каналу за значеннями  $\alpha_k$ ,  $k = \overline{1, M-1}$ , коли сигнал відсутній за виразом

$$v = \sqrt{V_0} \Phi^{-1}(P_f) + M_0, \quad (11)$$

де  $\Phi(\bullet)$  – інтеграл імовірності;  $P_f$  – задана імовірність марної тривоги.

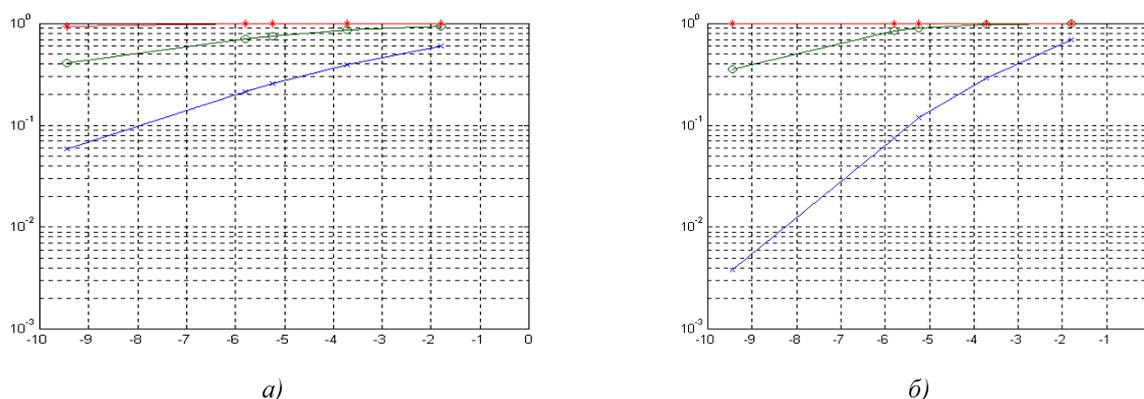


Рис. 4. Типові характеристики виявлення СРС за його спектральними компонентами

Для визначення спектральних компонент бралася та функціональна структура ФП чи програма її комп'ютерного моделювання, для якої їх варіація також набирала максимального значення.

Загалом встановлено, що характеристики виявлення СРС з невідомими параметрами у радіовипромінюванні безпосередньо за результатом його аналізу у базисах слабкоперіодичних функцій кращі за такі самі характеристики локально оптимальних методів (які на 1–2 дБ гірші від потенційних), а обчислювальна складність аналізу (так само поліноміального типу) має порядок щонайменше у два рази нижчий, за рахунок властивого йому часового паралелізму, що позитивно впливає на тактико-технічну ефективність виявлення.

1. Окунев Ю.Б., Яковлев Л.А. Широкополосные системы связи с составными сигналами. – М., 1968.
2. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. – М., 1971.
3. Поляков П.Ф. Широкополосные аналоговые системы связи со сложными сигналами. – М., 1981.
4. Информационные связи био- гелио- и геофизических явлений и элементы их прогноза / К.С. Войчишин, Я.П. Драган, В.И. Куксенко, В.Н. Михайловский. – К., 1974.
5. Поляков П.Ф. Прием та обробка складних сигналів в умовах апріорної невизначеності. Ретроспектива, стан проблеми та нові дослідження // 1-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ–2002: Сб. науч. тр. Часть 1. – Харьков, 2002. – С. 505–509.
6. Калугин В.В., Чеботов А.В. К вопросу производства средств радиомониторинга в Украине // 1-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ–2002: Сб. науч. тр. Часть 1.– Харьков, 2002. – С. 561–564.
7. Putre' M., Rivers R.B. Batterfield Communications. Protections vs. Exploitation// The Journal of electronic Defense. – 2001. – № 6. – P. 6–13.
8. Taboada F., Lima A., Gau J., Jarpa P., Pace P.C. "Intercept receiver signal processing techniques to detect low probability of intercept radar signals", Center for Joint Services Electronic Warfare Naval Postgraduate School, Monterey, Canada.
9. Snelling W.E., Geraniotis E. "Analysis of compressive receivers for the optimal interception of frequency-hopped waveforms", Tech Report of Institute for Systems Research, number TR 91–28, 1991,

40 p. 10. Adamy D. *Low Probability of Intercept Signals – Some Real World Consideration*// *The Journal of electronic Defense*. – 1998. – № 9. – P. 9–22. 11. Александров А.Г. *Оптимальные и адаптивные системы*. – М., 1989. 12. Яворський Б.І. *Однорідність та регулярність при моделюванні випадкових процесів*// *Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів*. – Т.2. – Ч.1. – Львів–Харків–Тернопіль. – 1993. – С. 59–65. 13. Драган Я.П., Яворський Б.І. *Векторний простір над булевим полем, індикатори і раціоналізація моделі стохастичності*// *Вісник Державного університету Львівська політехніка. Сер. прикладна математика*. – 1998. – № 337. – С. 169–172. 14. Рафа Т., Яворський Б. *Модель похибки оцифрування складних сигналів та зображень* // *Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя*. – 2000. – Т.5. – №4. – С. 41–46. 15. Яворський Б.І. *Визначення метрологічних характеристик сигналів з розсіяним спектром: Сборник научных трудов (“Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” МРФ – 2002)*. – Часть 1. – Харьков: ХНУРЕ. – 2002. – С. 97–100. 16. Yavorskyu B. *Preliminary Signal Processing of Event and Non-stationary Signals for Their Spectral Representations*// *МКІМ–2002. Міжнародна конференція з індуктивного моделювання*. – Т.1. – Ч. 2. – Львів, 2002. – С. 118–124. 17. *Система еколого-медичного моніторингу довкілля: Звіт про НДР (заключний)*/ *ТДТУ імені Івана Пулюя*. – ДІ–72–97; Інв. № 0200U001720. – Тернопіль, 2000.