УДК 621.396.628

В. В. Кузавков, І. В. Стоцький, О. С. Пуштарик

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ІНВАРІАНТНИХ СТАТИСТИЧНИХ ОЗНАК ДЛЯ СЛІПОГО ВИЯВЛЕННЯ СТРУКТУРОВАНИХ РАДІОВИПРОМІНЮВАНЬ

Анотація. *Обґрунтовано склад компактних інваріантних статистичних ознак для сліпого виявлення структурованих радіовипромінювань в умовах повної апріорної невизначеності параметрів сигналу та наявності загороджувальної завади невідомого рівня. Показано, що для виявлення достатньо статистики другого порядку, а набір ознак доцільно формувати як дві проекції: частотну (спектральна ентропія та коефіцієнт варіації спектральної щільності потужності) і часову (максимум модуля нормованої автокореляційної функції). Обраний набір є інваріантним відносно виду модуляції та несучої частоти й не потребує знання дисперсії шуму.*

Ключові слова: *сліпе виявлення, структуровані радіовипромінювання, інваріантні статистичні ознаки, спектральна ентропія, автокореляційна функція.*

Annotation. *The composition of compact invariant statistical features for blind detection of structured radio emissions is substantiated under complete a priori uncertainty of signal parameters and barrage jamming of unknown level. It is shown that second-order statistics are sufficient for detection, and the feature set is formed as two projections: a frequency one (spectral entropy and the coefficient of variation of the power spectral density) and a time one (the maximum of the normalized autocorrelation function modulus). The selected set is invariant to the modulation type and carrier frequency and does not require knowledge of the noise variance.*

Keywords: *blind detection, structured radio emissions, invariant statistical features, spectral entropy, autocorrelation function.*

Актуальність. У щільному радіоелектронному середовищі тактичної ланки задача виявлення структурованих радіовипромінювань вирішується за умови повної апріорної невизначеності параметрів сигналу (вид модуляції, несуча частота, кількість джерел) та наявності загороджувальної завади невідомого рівня. Класичні підходи (енергетичний детектор, циклостаціонарний аналіз, методи на власних значеннях) або потребують часткового знання параметрів, або втрачають працездатність при невідомій дисперсії шуму. Тому актуальним є формування набору інваріантних статистичних ознак, які не вимагають апріорної інформації про сигнал і дозволяють побудувати вирішальну статистику з гарантією ймовірності хибної тривоги.

Постановка задачі. Необхідно обґрунтувати склад компактних інваріантних ознак, що відображають принципові відмінності структурованого радіовипромінювання від теплового шуму і є стійкими до загороджувальної завади в межах заданого класу умов.

Теоретичні засади вибору ознак. Структуроване радіовипромінювання та шум розглядаються як випадкові процеси. Для задач сліпого виявлення достатньо статистики другого порядку. Згідно з теоремою Вінера–Хінчина [1] спектральна щільність потужності $S(f)$ і автокореляційна функція $R(\tau)$ пов'язані перетворенням Фур'є:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j2\pi f\tau}\, d\tau.$$

Отже, повний опис статистики другого порядку міститься або в $S(f)$, або в $R(\tau)$. Для побудови детектора доцільно використати не повні функції, а їхні компактні скалярні проекції, що характеризують різні прояви структурованості.

Частотна проєкція. Форма $S(f)$ відображає розподіл потужності по частоті. Як глобальну міру нерівномірності обрано спектральну ентропію [2, 3]:

$$H = -\sum_k p_k \log_2 p_k, \text{ де } p_k = \frac{S(f_k)}{\sum_i S(f_i)}.$$

Як локальну міру нерівномірності (чутливість до виражених спектральних піків) – нормований коефіцієнт варіації спектральної щільності потужності:

$$P = \frac{\sigma_S}{\mu_S}.$$

Часова проєкція. Форма $R(\tau)$ відображає наявність часової регулярності. Як компактну ознаку обрано максимум модуля нормованої автокореляційної функції при ненульовому зсуві:

$$A = \frac{max\,|R(\tau)|}{R(0)}, \quad \tau \neq 0$$

Для білого шуму значення A близьке до нуля; наявність символьної періодичності, циклічного префіксу або іншої регулярної структури збільшує значення A.

Взаємна доповнюваність. Ознаки H і P характеризують нерівномірність спектру (глобальну та локальну). Ознака A характеризує часову повторюваність. Емпірична кореляція між спектральними ознаками та A є помірною (порядка 0,35–0,40), що підтверджує їхню інформаційну доповнюваність. Обраний набір є інваріантним відносно виду модуляції та значення несучої частоти і не потребує знання дисперсії шуму.

Висновок. Обґрунтовано вибір інваріантних ознак сліпого виявлення як двох взаємно доповнюваних проекцій статистики другого порядку: частотної (спектральна ентропія та коефіцієнт варіації спектральної щільності потужності) і часової (максимум нормованої автокореляційної функції). Такий склад ознак створює основу для побудови вирішальної статистики, здатної працювати в умовах повної апріорної невизначеності параметрів сигналу та загороджувальної завади невідомого рівня.

Список використаних джерел:

1. Wiener N. Generalized Harmonic Analysis // Acta Mathematica. - 1930. - Vol. 55. - P. 117–258; Khintchine A. Korrelationstheorie der stationären stochastischen Prozesse // Mathematische Annalen. - 1934. - Vol. 109. - P. 604–615.

2. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. - 1948. - Vol. 27. - P. 379–423, 623–656.

3. Powell G. E., Percival I. C. A spectral entropy method for distinguishing regular and irregular motion of Hamiltonian systems // J. Phys. A: Math. Gen. - 1979. - Vol. 12, No. 11. - P. 2053–2071.

Кузавков Василь Вікторович *– доктор технічних наук, професор, начальник кафедри електроніки та схемотехніки, Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, вул. Князів Острозьких, буд. 45/1, 01011, e-mail: nevse@ukr.net, ORCID https://orcid.org/0000-0002-0655-9759.*

Стоцький Іван Володимирович *– старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інтелектуальних технологій Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, вул. Князів Острозьких, буд. 45/1, 01011, e-mail: ivan.stotskyi@viti.edu.ua, ORCID https://orcid.org/0000-0002-5898-3228.*

Пуштарик Олексій Сергійович *– викладач кафедри бойового застосування підрозділів зв'язку, Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, вул. Князів Острозьких, буд. 45/1, інд. 01011, e-mail: oleksii.pushtaryk@viti.edu.ua, ORCID https://orcid.org/0009-0000-9825-0726.*

Vasyl Kuzavkov *— Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronics and Circuit Engineering, Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Kruty, Kyiv, Ukraine; e-mail: nevse@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0655-9759*

Ivan Stotskyi *— Senior Lecturer at the Department of Computer Science and Intelligent Technologies, Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Kruty, Kyiv, Ukraine; e-mail: ivan.stotskyi@viti.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5898-3228*

Pushtaryk Serhiiovych *– Lecturer, Department of Combat Use of Units connection Military Institute of Telecommunications and Information Technologies named after Heroes of*

Kruty, 45/1 Knyaziv Ostrozkykh St., Kyiv, 01011, Ukraine, e-mail: oleksii.pushtaryk@viti.edu.ua ORCID https://orcid.org/0009-0000-9825-0726