Проведена адаптація моментного критерію якості перевірки статистичних гіпотез для синтезу нових нелінійних алгоритмів виявлення радіосигналів на тлі адитивно–мультиплікативних негаусівських завад при використанні поліноміальних стохастичних вирішальних правил та моментно-кумулянтного опису випадкових величин. Проведений аналіз ефективності отриманих результатів

Ключові слова: виявлення радіосигналів, моментний критерій якості, адитивно–мультиплікативні негаусівські завади

Проведена адаптация моментного критерия качества проверки статистических гипотез для синтеза новых нелинейных алгоритмов обнаружения радиосигналов на фоне аддитивно-мультипликативных негаусовских помех при использовании полиномиальных стохастических решающих правил и моментно-кумулянтного описания случайных величин. Проведен анализ эффективности полученных результатов

Ключевые слова: выявление радиосигналов, моментный критерий качества, аддитивно-мультипликативные негаусовские помехи

УДК 621.37:621.391

НЕЛІНІЙНІ АЛГОРИТМИ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ НА ТЛІ АДИТИВНО–МУЛЬТИПЛІКАТИВНИХ НЕГАУСІВСЬКИХ ЗАВАД

В.В. Палагін
Кандидат технічних наук, доцент
Декан факультету електронних технологій
Черкаський державний технологічний університет
бул. Шевченка, 460, м. Черкаси, Україна, 18006
Контактний тел.: (0472) 73-02-61, 067-741-10-43
E-mail: palahin@yahoo.com

1. Вступ

Вирішення задач обробки сигналів, зокрема виявлення, розпізнавання, фільтрація та оцінка параметрів на тлі різноманітних завад характеризується застосуванням широкого кола методів та алгоритмів. Найбільш повною моделлю взаємодії сигналів та завад є адитивно–мультиплікативна модель, яка характерна для багатьох практичних випадків проходження сигналів по каналах зв'язку. Адитивно–мультиплікативні завади виникають у випадках, коли параметри системи передачі або властивості середовища, в якому поширюються сигнали, зазнають випадкових змін в часі [1].

Одним з прикладів адитивно – мультиплікативної завади є завмирання сигналу при прийомі коротких хвиль, так звані федінги. Інтерференційний механізм цього явища надзвичайно чутливий до незначних змін умов поширення радіосигналу. Так, наприклад, використовувані в стільниковому зв'язку дециметрові радіохвилі слабо огинають перешкоди, зазнаючи при цьому численних відбиттів від навколишніх об'єктів та поверхонь. Наслідками такого багатопроменевого поширення є швидке спадання інтенсивності прийнятого сигналу з відстанню, завмирання та викривлення результуючого сигналу. Основну неприємність становлять саме завмирання, оскільки вони бувають досить глибокими, і при цьому відношення сигнал/шум падає настільки сильно, що корисна інформація може суттєво спотворюватися шумами, навіть до повної її втрати [2].

Поставлена задача обробки сигналів суттєво ускладнюється при розгляді негаусівської завади, причому як адитивного, так і мультиплікативного характеру. Тому актуальною задачею залишається розробка методів та засобів статистичної обробки сигналів на тлі адитивно – мультиплікативних негаусівських завад в радіолокації, гідролокації, геофізиці, системах стільникового зв'язку.

Для розв'язання поставленої задачі існує добре розроблена теорія перевірки статистичних гіпотез, яка базується на застосуванні ймовірнісних критеріїв якості [3]. На практиці широкого поширення набули гаусівські моделі випадкових процесів, які, з одного боку, є зручною математичною ідеалізацією, а з іншого боку, не відображають тонкої структури реальних природних процесів [4]. Тому для підвищення точності виявлення, необхідно використовувати саме негаусівські моделі сигналів та завад. Однак, використання класичних критеріїв якості для обробки негаусівських сигналів та процесів, викликає ряд труднощів, пов'язаних з побудовою складних алгоритмів та їх практичною реалізацією. В якості вирішення даної проблеми можливе використання альтернативного підходу до опису випадкових величин, зокрема моментно – кумулянтного опису [5].

На основі такого опису розроблені моментні критерії якості, які дозволяють успішно розв'язувати задачі по виявленню сигналів на тлі адитивної взаємодії негаусівських завад [6 - 9].

Пропонується адаптація моментного критерію мінімуму верхньої границі ймовірностей помилок [7], що базується на використанні степеневих стохастичних поліномів [10].

Метою роботи є підвищення ефективності систем виявлення радіосигналів на основі застосування стохастичних поліноміальних вирішальних правил, моментного критерію якості перевірки статистичних гіпотез та моментно–кумулянтного опису випадкових величин для адитивно-мультиплікативних моделей негаусівських завад.

2. Постановка задачі

Нехай на вході системи спостерігається випадковий сигнал $\xi(t)$. Обробці підлягає вибірка $E=\{E_1, E_2, \ldots E_n\}$ розмірністю n із послідовності незалежних і неоднаково розподілених випадкових величин, по результатам якої необхідно винести рішення про реалізацію однієї з двох гіпотез: H_1 – прийнято сигнал $\xi(t)=(a_0+\Delta(t))S(t)+\eta(t)$ або H_0 – прийнято заваду $\xi(t)=\eta(t)$, де $S(t)=a\cdot r(t)\cdot\cos(\omega_0 t+\varphi_0)$ – корисний радіосигнал з амплітудою a, огинаючою радіосигналу $r(t)$ та частотою і фазою ω_0, ϕ_0 відповідно, який адитивно зв'язаний зі стаціонарною негаусівською завадою $\eta(t)$, що має нульове математичне сподівання, характеризується дисперсією χ_2 та кумулянтними коефіцієнтами $\gamma_3,\gamma_4,\ldots,\gamma_{2s}$ та мультиплікативно зв'язаний з негаусівською стаціонарною завадою $\Delta(t)$, що має відмінне від нуля математичне сподівання a_0 та характеризується дисперсією μ_2 та кумулянтними коефіцієнтами $\beta_3,\beta_4,\ldots,\beta_{2s}$.

При заміні безперервного часу спостереження t на дискретні відліки v, здійсненні з сигналу та врахуванні стаціонарності адитивної та мультиплікативної складової завад, отримаємо їх дискретні значення для відповідних гіпотез:

$$H_1:\ \xi_v=(a_0+\Delta)S_v+\eta,\ S_v=a\cdot r_v\cdot\cos(\omega_0 v+\varphi_0),$$

$$H_0:\ \xi_v=\eta.$$

Вирішальне правило (ВП) виявлення радіосигналів на тлі адитивно– мультиплікативних негаусівських завад, побудоване за моментним критерієм мінімуму верхньої границі ймовірностей помилок, являє собою стохастичний степеневий поліном кінцевого порядку s [6, 7]:

$$\Lambda(\vec{x})_{ns}=\sum_{i=1}^{s}\sum_{v=1}^{n}k_{iv}x_v^i+k_0 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} 0, \tag{1}$$

де x_v - вибіркові значення розмірністю n, невідомі коефіцієнти k_0 задаються у вигляді:

$$k_0=-\frac{1}{2}\left(E_{1(sn)}+E_{0(sn)}\right), \tag{2}$$

а коефіцієнти k_{iv} знаходяться з умови мінімуму критерію верхньої границі ймовірностей помилок:

$$Ku_{sn}[G,E]=\frac{G_{1(sn)}+G_{0(sn)}}{\left(E_{1(sn)}-E_{0(sn)}\right)^2}, \tag{3}$$

де $E_{i(sn)}, G_{i(sn)}$ – математичне сподівання й дисперсія ВП (1) при гіпотезі H_i, $i=\overline{0,1}$, які залежать від кількості вибіркових значень n, степені полінома s і мають вигляд:

$$E_{0(sn)}=\sum_{i=1}^{s}\sum_{v=1}^{n}k_{iv}u_{iv},\ \ E_{1(sn)}=\sum_{i=1}^{s}\sum_{v=1}^{n}k_{iv}m_{iv}, \tag{4}$$

$$\begin{aligned} G_{0(sn)}&=\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{s}\sum_{v=1}^{n}k_{iv}k_{jv}F_{(i,j)v}(H_0),\\ G_{1(sn)}&=\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{s}\sum_{v=1}^{n}k_{iv}k_{jv}F_{(i,j)v}(H_1), \end{aligned} \tag{5}$$

де $F_{(i,j)v}(H_0)$, $F_{(i,j)v}(H_1)$ – кореляnти розмірністю (i,j) при гіпотезі H_0 й H_1 відповідно для v -го вибіркового значення, m_{iv}, u_{iv} – початкові моменти при гіпотезах H_1 та H_0 відповідно.

Система рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів k_{iv} ВП (1) знаходиться з мінімуму функціонала (3) і має вигляд:

$$\sum_{j=1}^{s}k_{jv}\left[F_{(i,j)v}(H_0)+F_{(i,j)v}(H_1)\right]=m_{iv}-u_{iv},\ i,j=\overline{1,s},\ v=\overline{1,n}. \tag{6}$$

Адаптація моментного критерію якості (3) полягає в знаходженні оптимальних коефіцієнтів ВП (1) згідно представленої моделі сигналу та завади.

Для оцінки ефективності синтезованих ВП використовується значення критерію $Ku_{sn}[G,E]$. Чим менше його значення, тим менші ймовірності верхніх границь помилок першого й другого роду ВП (1) і відповідно, ефективніші алгоритм обробки вибіркових значень.

Використовуючи поліноміальні ВП та моментно-кумулянтний опис випадкових величин, проведена побудова поліноміальних алгоритмів виявлення радіосигналівнабазістохастичнихполіномівстепені $s=1\ldots3$ та здійснений аналіз їхньої ефективності.

3. Отримання основних результатів

Розглянемо задачу побудови поліноміальних ВП для виявлення радіосигналів на тлі негаусівських завад.

Апріорна інформація про радіосигнал $S(t)$, адитивну заваду η та мультиплікативну заваду Δ базується на використанні моментно–кумулянтного опису сигналів, що приймаються на тлі негаусівських завад.

Моментно–кумулянтний опис випадкових величин до шостого порядку при реалізації гіпотези H_0 має вигляд:

$$u_1=0,\ \ u_2=\chi_2,\ \ u_3=\gamma_3\chi_2^{3/2},\ \ u_4=\chi_2^2(3+\gamma_4),$$

$$u_5=\chi_2^{5/2}(\mathbf{10}\gamma_3+\gamma_5),\ \ u_6=\chi_2^3(\mathbf{10}\gamma_3^2+\mathbf{15}\gamma_4+\gamma_6+\mathbf{15}),$$

де γ_3, γ_4 – кумулянтні коефіцієнти адитивної негаусової завади η, які характеризують її асиметрію та ексцес.

Початкові моменти випадкової величини при реалізації гіпотези H_1 матимуть вигляд:

$$m_{1v}=\mathbf{a_0 e_v}\sqrt{\mathbf{q}}\sqrt{\chi_2},$$

$$m_{2v}=\chi_2\left(\mathbf{1}+\mathbf{q a_0^2 e_v^2}+\mathbf{q e_v^2}\mu_2\right),$$

$$m_{3v}=\chi_2^{3/2}\left(q^{3/2}a_0^3e_v^3+\gamma_3+q^{3/2}e_v^3\beta_3\mu_2^{3/2}+3\sqrt{q}a_0e_v\left(1+qe_v^2\mu_2\right)\right),$$

$$m_{4v}=\chi_2^2\left(3+6qa_0^2e_v^2+q^2a_0^4e_v^4+4\sqrt{q}a_0e_v\gamma_3+\mu_4+\right.$$
$$\left.6qe_v^2\mu_2+6q^2a_0^2e_v^4\mu_2+4q^2a_0e_v^4\beta_3\mu_2^{3/2}+q^2e_v^4\mu_2^2\left(3+\beta_4\right)\right),$$

$$m_{5v}=\chi_2^{5/2}\left(q^{5/2}a_0^5e_v^5+\gamma_5+10q^{3/2}e_v^3\beta_3\mu_2^{3/2}+10q^{5/2}e_v^5\beta_3\mu_2^{5/2}+\right.$$
$$+q^{5/2}e_v^5\beta_5\mu_2^{5/2}+10q^{3/2}a_0^3e_v^3\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+10\gamma_3\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+$$
$$+10qa_0^2e_v^2\left(\gamma_3+q^{3/2}e_v^3\beta_3\mu_2^{3/2}\right)+$$
$$\left.+5\sqrt{q}a_0e_v\left(3+\gamma_4+6qe_v^2\mu_2+q^2e_v^4\mu_2^2\left(3+\beta_4\right)\right)\right),$$

$$m_{6v}=\chi_2^3\left(15+15q^2a_0^4e_v^4+q^3a_0^6e_v^6+20q^{3/2}a_0^3e_v^3\gamma_3+\right.$$
$$+10\gamma_3^2+15\gamma_4+15qa_0^2e_v^2\times\left(3+\gamma_4\right)+6\sqrt{q}a_0e_v\left(10\gamma_3+\gamma_5\right)+$$
$$+\gamma_6+90q^2a_0^2e_v^4\mu_2+15q^3a_0^4e_v^6\mu_2+60q^{3/2}\times$$
$$\times a_0e_v^3\gamma_3\mu_2+15qe_v^2\mu_2\left(3+\gamma_4\right)+60q^2a_0e_v^4\beta_3\mu_2^{3/2}+$$
$$+20q^3a_0^3e_v^6\beta_3\mu_2^{3/2}+q^{3/2}\times 20e_v^3\beta_3\gamma_3\mu_2^{3/2}+$$
$$+15q^2e_v^4\mu_2^2\left(3+\beta_4\right)+15q^3a_0^2e_v^6\mu_2^2\left(3+\beta_4\right)+6q^3a_0e_v^6\mu_2^{5/2}\times$$
$$\left.\times\left(10\beta_3+\beta_5\right)+q^3e_v^6\mu_2^3\left(15+10\beta_3^2+15\beta_4+\beta_6\right)\right),$$

де $e_v=r_v\cdot\cos(\omega_0v+\varphi_0)$, $q=\dfrac{a^2}{\chi_2}$ – відношення сигнал/шум по потужності, a_0 – математичне сподівання мультиплікативної завади Δ, μ_2 – дисперсія мультиплікативної завади, β_3, β_4 – кумулянтні коефіцієнти мультиплікативної негаусової завади Δ, які характеризують її асиметрію та ексцес.

Центровані корелянти $F_{(i,j)v}\left(H_0\right)$, $F_{(i,j)v}\left(H_1\right)$ визначаються згідно виразів:

$$F_{(i,j)v}\left(H_0\right)=u_{i+j}-u_iu_j,\quad F_{(i,j)v}\left(H_1\right)=m_{(i+j)v}-m_{(i)v}m_{(j)v},$$
$$i,j=\overline{1,n},\quad v=\overline{1,n}$$

і для гіпотези H_0 мають вигляд:

$$F_{(1,1)_v}\left(H_0\right)=\chi_2,\quad F_{(1,2)_v}\left(H_0\right)=F_{(2,1)v}\left(H_0\right)=\gamma_3\chi_2^{3/2},$$
$$F_{(1,3)_v}\left(H_0\right)=F_{(3,1)_v}\left(H_0\right)=\chi_2^2\left(3+\gamma_4\right),\ F_{(2,2)_v}\left(H_0\right)=\chi_2^2\left(2+\gamma_4\right),$$
$$F_{(2,3)_v}\left(H_0\right)=F_{(3,2)v}\left(H_0\right)=\chi_2^{5/2}\left(9\gamma_3+\gamma_5\right),$$
$$F_{(3,3)_v}\left(H_0\right)=\chi_2^3\left(15+9\gamma_3^2+15\gamma_4+\gamma_6\right),$$

а для гіпотези H_1 запишуться як:

$$F_{(1,1)v}\left(H_1\right)=\chi_2\left(1+qe_v^2\mu_2\right),$$
$$F_{(1,2)v}\left(H_1\right)=F_{(2,1)v}\left(H_1\right)=$$
$$=\chi_2^{3/2}\left(i\gamma_3+q^{3/2}e_v^3\beta_3\mu_2^{3/2}+2\sqrt{q}a_0e_v\left(1+qe_v^2\mu_2\right)\right),$$

$$F_{(1,3)v}\left(H_1\right)=F_{(3,1)v}\left(H_1\right)=$$
$$=\chi_2^2\left(3+\gamma_4+6qe_v^2\mu_2+3q^2e_v^4\mu_2^2+q^2e_v^4\beta_4\mu_2^2+3qa_0^2e_v^2\times\right.$$
$$\left.\times\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+3a_0\left(\sqrt{q}e_v\gamma_3+q^2e_v^4\beta_3\mu_2^{3/2}\right)\right),$$

$$F_{(2,2)v}\left(H_1\right)=\chi_2^2\left(2+\gamma_4+4qe_v^2\mu_2+2q^2e_v^4\mu_2^2+q^2e_v^4\beta_4\mu_2^2+\right.$$
$$\left.4qa_0^2e_v^2\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+4a_0\left(\sqrt{q}e_v\gamma_3+q^2e_v^4\beta_3\mu_2^{3/2}\right)\right),$$

$$F_{(2,3)v}\left(H_1\right)=F_{(3,2)v}\left(H_1\right)=\chi_2^{5/2}\left(\gamma_5+9q^{3/2}e_v^3\beta_3\mu_2^{3/2}+\right.$$
$$+9q^{5/2}e_v^5\beta_3\mu_2^{5/2}+q^{5/2}e_v^5\beta_5\mu_2^{5/2}+6q^{3/2}a_0^3e_v^3\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+$$
$$+9\gamma_3\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+9qa_0^2e_v^2\left(\gamma_3+q^{3/2}e_v^3\beta_3\mu_2^{3/2}\right)+$$
$$\left.+\sqrt{q}a_0e_v\left(12+5\gamma_4+24qe_v^2\mu_2+q^2e_v^4\mu_2^2\left(12+5\beta_4\right)\right)\right),$$

$$F_{(3,3)v}\left(H_1\right)=\chi_2^3\left(15+9\gamma_3^2+15\gamma_4+\gamma_6+45qe_v^2\mu_2+\right.$$
$$+15qe_v^2\gamma_4\mu_2+18q^{3/2}e_v^3\beta_3\gamma_3\mu_2^{3/2}+45q^2e_v^4\mu_2^2+15q^2e_v^4\beta_4\mu_2^2+$$
$$+15q^3e_v^6\mu_2^3+9q^3e_v^6\beta_3^2\mu_2^3+15q^3e_v^6\beta_4\mu_2^3+q^3e_v^6\beta_6\mu_2^3+$$
$$+9q^2a_0^4e_v^4\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+18a_0^3\left(q^{3/2}e_v^3\gamma_3+q^3e_v^6\beta_3\mu_2^{3/2}\right)+$$
$$+3qa_0^2e_v^2\left(12+5\gamma_4+24qe_v^2\mu_2+q^2e_v^4\mu_2^2\left(12+5\beta_4\right)\right)+$$
$$+6\sqrt{q}a_0e_v\left(\gamma_5+9\gamma_3\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+\right.$$
$$\left.\left.+q^{3/2}e_v^3\mu_2^{3/2}\left(qe_v^2\beta_5\mu_2+9\beta_3\left(1+qe_v^2\mu_2\right)\right)\right)\right).$$

Розглянемо побудову ВП виявлення радіосигналів при різних значеннях степеня s стохастичного поліному (1).

Наведемо алгоритм синтезу ВП при степені стохастичного полінома $s=1$. В загальному випадку таке ВП матиме вигляд:

$$\Lambda\left(\vec{x}_v\right)_{1n}=\sum_{v=1}^{n}k_{(1)v}x_v+k_0\underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}}0.$$

Показано, що k_{1v} знаходиться з системи рівнянь (6) та має вид:

$$k_{(1)v}=\frac{a_0e_v\sqrt{q}}{\left(2+qe_v^2\mu_2\right)\sqrt{\chi_2}}$$

Математичні сподівання та дисперсії ВП при гіпотезах H_0 та H_1, знаходяться з виразів (4), (5) відповідно, та мають вигляд:

$$E_{0(1n)}=0,\quad E_{1(1n)}=\sum_{v=1}^{n}\frac{qa_0^2e_v^2}{2+qe_v^2\mu_2},$$

$$G_{0(1n)}=\sum_{v=1}^{n}\frac{qa_0^2e_v^2}{\left(2+qe_v^2\mu_2\right)^2},\quad G_{1(1n)}=\sum_{v=1}^{n}\frac{qa_0^2e_v^2\left(1+qe_v^2\mu_2\right)}{\left(2+qe_v^2\mu_2\right)^2}.$$

Таким чином, ВП при $s=1$, використовуючи (2), має вигляд:

$$\Lambda\left(\vec{x}_v\right)_{1n}=\sum_{v=1}^{n}\frac{a_0 e_v\sqrt{q}}{\left(2+qe_v^2\mu_2\right)\sqrt{\chi_2}}x_v-\frac{qa_0^2e_v^2}{4+2qe_v^2\mu_2}\underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}}0. \qquad (7)$$

Показано, що верхня границя ймовірностей помилок першого й другого роду ВП, або значення критерію Ku_{1n}, знаходиться з виразу (3) та має вигляд:

$$Ku_{1n}=\frac{\sum\limits_{v=1}^{n}\dfrac{qa_0^2e_v^2\left(2+qe_v^2\mu_2\right)}{\left(2+qe_v^2\mu_2\right)^2}}{\left(\sum\limits_{v=1}^{n}\dfrac{qa_0^2e_v^2}{2+qe_v^2\mu_2}\right)^2}. \qquad (8)$$

Отримане лінійне ВП (7) не враховує негаусовість завад, що впливають на корисний сигнал, тому збільшимо степінь полінома до $s=2$ та синтезуємо ВП, яке буде враховувати кумулянтні коефіцієнти асиметрії γ_3 і ексцесу γ_4 адитивної завади та кумулянтні коефіцієнти асиметрії β_3 і ексцесу β_4 мультиплікативної завади.

При степені стохастичного полінома $s=2$, отримаємо ВП, що в загальному випадку буде мати вигляд:

$$\Lambda\left(\vec{x}_v\right)_{2n}=\sum_{v=1}^{n}k_{(1)v}x_v+\sum_{v=1}^{n}k_{(2)v}x_v^2+k_0\underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}}0. \qquad (9)$$

Невідомі коефіцієнти $k_{(1)v}$ та $k_{(2)v}$ знаходяться з системи рівнянь (6) та після алгебраїчних перетворень приймуть вид:

$$k_{(1)v}=\Big[\sqrt{q}e_v\Big(-2\sqrt{q}e_v\gamma_3\mu_2-q^2e_v^4\beta_3\mu_2^{5/2}+2qa_0^3e_v^2\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+a_0^2\times$$
$$\times\left(2\sqrt{q}e_v\gamma_3+3q^2e_v^4\beta_3\mu_2^{3/2}\right)+a_0\left(4+2\gamma_4+qe_v^2\mu_2\left(2+qe_v^2\beta_4\mu_2\right)\right)\Big)\Big]\times$$
$$\times1\Big/\Big[\sqrt{\chi_2}\Big(8-4\gamma_3^2+4\gamma_4+qe_v^2\Big(4a_0^2+2\left(6+2qa_0^2e_v^2-2\sqrt{q}a_0e_v\gamma_3+\gamma_4\right)\mu_2+$$
$$+4\sqrt{q}e_v\beta_3\left(\sqrt{q}a_0e_v-\gamma_3\right)\mu_2^{3/2}+2qe_v^2\left(4+\beta_4\right)\mu_2^2+q^2e_v^4\left(2-\beta_3^2+\beta_4\right)\mu_2^3\Big)\Big)\Big],$$

$$k_{(2)v}=\left[q^2a_0^2e_v^4\mu_2-qe_v^2\mu_2\left(2+qe_v^2\mu_2\right)+a_0\left(2\sqrt{q}e_v\gamma_3+q^2e_v^4\beta_3\mu_2^{3/2}\right)\right]\times$$
$$\times1\Big/\Big[\Big(4\left(-2+\gamma_3^2-\gamma_4\right)+qe_v^2\Big(-4a_0^2-2\left(6+2qa_0^2e_v^2-2\sqrt{q}a_0e_v\gamma_3+\gamma_4\right)j_2+$$
$$+4\sqrt{q}e_v\beta_3\left(-\sqrt{q}a_0e_v+\gamma_3\right)\mu_2^{3/2}-2qe_v^2\left(4+\beta_4\right)\mu_2^2+q^2e_v^4\left(-2+\beta_3^2-\beta_4\right)\times\mu_2^3\Big)\Big)\chi_2\Big].$$

Математичні сподівання та дисперсії ВП при гіпотезах H_0 та H_1, знаходяться з виразів (4), (5) відповідно, та мають вигляд:

$$E_{0(2n)}=\sum_{v=1}^{n}k_{(2)v}\chi_2,$$

$$E_{1(2n)}=\sum_{v=1}^{n}k_{(1)v}a_0e_v\sqrt{q}\sqrt{\chi_2}+\sum_{v=1}^{n}k_{(2)v}\chi_2\left(1+qa_0^2e_v^2+qe_v^2\mu_2\right).$$

$$G_{0(2n)}=\sum_{v=1}^{n}\left[k_{(1)v}^2\chi_2+2k_{(1)v}k_{(2)v}\gamma_3\chi_2^{3/2}+k_{(2)v}^2\chi_2^2\left(2+\gamma_4\right)\right],$$

$$G_{1(2n)}=\sum_{v=1}^{n}\Big[k_{(1)v}^2\chi_2\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+2k_{(1)v}k_{(2)v}\chi_2^{3/2}\Big(\gamma_3+q^{3/2}e_v^3\beta_3\times$$
$$\times\mu_2^{3/2}+2\sqrt{q}a_0e_v\left(1+qe_v^2\mu_2\right)\Big)+$$
$$+k_{(2)v}^2\chi_2^2\Big(2+\gamma_4+4qe_v^2\mu_2+2q^2e_v^4\mu_2^2+q^2\times$$
$$\times e_v^4\beta_4\mu_2^2+4qa_0^2e_v^2\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+4a_0\left(\sqrt{q}e_v\gamma_3+q^2e_v^4\beta_3\mu_2^{3/2}\right)\Big)\Big].$$

Значення критерію Ku_{2n} знаходиться з виразу (3) та має вигляд:

$$Ku_{2n}=\sum_{v=1}^{n}\Big[\chi_2\Big(k_{(1)v}^2\left(2+qe_v^2\mu_2\right)+$$
$$+2k_{(1)v}k_{(2)v}\sqrt{\chi_2}\Big(2\gamma_3+q^{3/2}e_v^3\beta_3\mu_2^{3/2}+2\sqrt{q}a_0\times$$
$$\times e_v\left(1+qe_v^2\mu_2\right)\Big)+k_{(2)v}^2\chi_2\Big(4+2\gamma_4+4qe_v^2\mu_2+$$
$$+2q^2e_v^4\mu_2^2+q^2e_v^4\beta_4\mu_2^2+4q\times$$
$$\times a_0^2e_v^2\left(1+qe_v^2\mu_2\right)+4a_0\left(\sqrt{q}e_v\gamma_3+q^2e_v^4\beta_3\mu_2^{3/2}\right)\Big)\Big)\Big]\times$$
$$\times1\Big/\Big(\sum_{v=1}^{n}k_{(1)v}a_0e_v\sqrt{q}\times$$
$$\times\sqrt{\chi_2}+k_{(2)v}\chi_2\left(1+qa_0^2e_v^2+qe_v^2\mu_2\right)-\sum_{v=1}^{n}k_{(2)v}\chi_2\Big)^2 \qquad (10)$$

Аналізуючи вираз (10), можемо сказати, що значення критерію Ku_{2n} залежить не лише від відношення сигнал/шум q та дисперсії мультиплікативної завади μ_2, але й від значень кумулянтних коефіцієнтів адитивної та мультиплікативної складової завад.

Аналогічно отримано ВП та його характеристики при степені поліному ВП $s=3$.

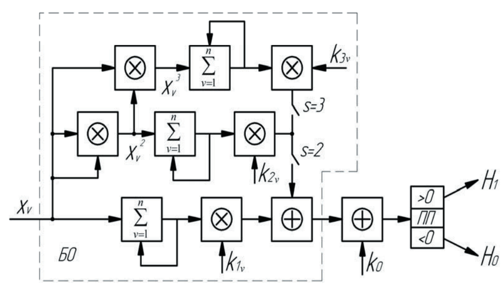
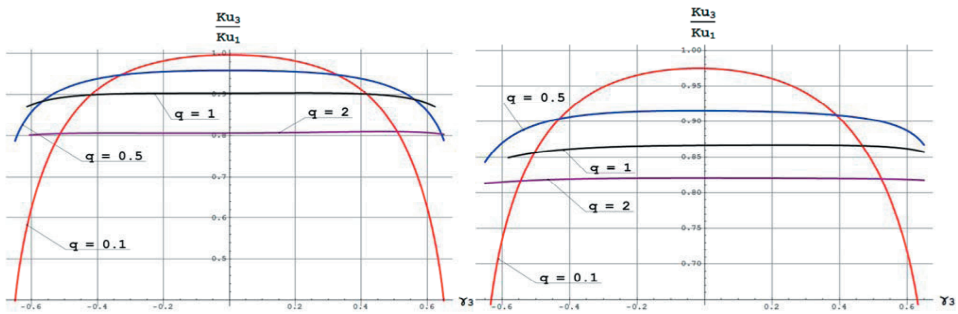


Рис. 1. Структурна схема алгоритму виявлення постійного сигналу з застосуванням поліноміальних ВП при степені стохастичного полінома $s=1...3$

На рис. 1 приведена структурна схема реалізації ВП при степені стохастичного полінома $s=1...3$. Схема складається з блоку обробки вибіркових значень сигналу (БО), простих структурних одиниць, які реалізують виконання операцій множення і додавання, та пристрою порівняння (ПП). В БО відбувається накопичення та перемноження вибірки на відповідні коефіцієнти $k_{(i)v}$, $i=\overline{1,3}$. Далі результати проведених операцій в БО додаються до значення порогового коефіцієнту k_0 та надходять на ПП. Алгоритм роботи ПП полягає в винесенні рішення про реалізацію відповідної гіпотези.

4. Аналіз результатів



а) б)

Рис. 3. Залежність ефективності нелінійного ВП (при $s=3$) виявлення радіосигналу по відношенню до лінійного ВП ($s=1$) від коефіцієнта асиметрії γ_3 при $a_0=2$ та: а) $\mu_2=0{,}1$; б) $\mu_2=2$

Ефективність отриманих ВП виявлення радіосигналів оцінюється відношенням значень критеріїв Ku_s / Ku_1.

Аналіз ефективності проводився для багатьох можливих комбінацій типів і видів адитивної і мультиплікативної завад. На рисунках нижче наведені результати порівняння ефективності лінійних та нелінійних ВП для негаусівської асиметричної адитивної складової завади першого типу першого виду, яка характеризується лише коефіцієнтом асиметрії γ_3. При аналізі ефективності побудованих ВП видно, що з врахуванням коефіцієнта асиметрії γ_3 та збільшенням степеня полінома ВП до $s=2...3$ отримуються принципово нові результати. Отримані результати показують, що побудовані нелінійні ВП (9) виявлення характеризуються меншими значеннями верхньої границі ймовірностей помилок в порівнянні з лінійними ВП (7), які отримані для гаусівської моделі завади.

На рис. 2 та рис. 3 приведені результати порівняння ефективності нелінійних ВП виявлення $(s=2...3)$ щодо лінійного ВП $(s=1)$ при конкретних значеннях параметру q, μ_2 та змінного коефіцієнта асиметрії γ_3.

З графіків видно, що значення критеріїв Ku_{2n} та Ku_{3n} менші за Ku_{1n} в залежності від параметрів сигналу та завади. Особливо, така тенденція проявляється при врахуванні тонкої структури негаусівської завади, тобто при відмінному від нуля коефіцієнті асиметрії γ_3.

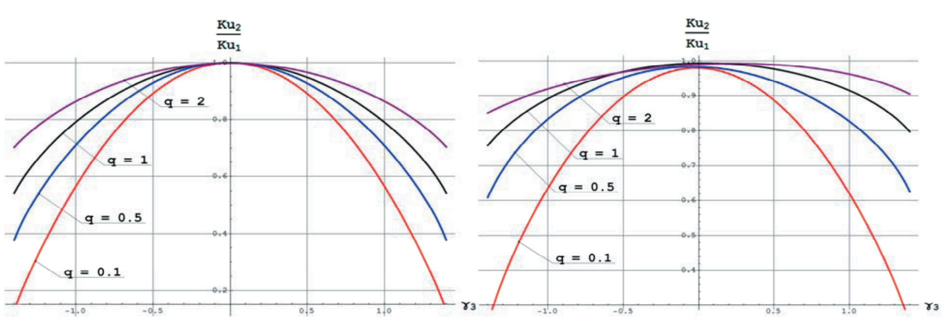
Аналогічні тенденції щодо збільшення ефективності виявлення радіосигналів нелінійними ВП в порівнянні з лінійним ВП проявляються при врахуванні інших кумулянтних коефіцієнтів вищих порядків.

5. Висновок

Розгляд адекватних моделей завадових ситуацій потребують вдосконалення існуючих методів обробки сигналів, зокрема в задачах виявлення. Складність опису негаусівських випадкових величин, розгляд складних адитивно–мультиплікативних моделей завад та збільшення вимог щодо практичної реалізація синтезованих алгоритмів обробки сигналів на основі застосування сучасних сигнальних процесорів (DSP) потребують нових підходів для вирішення даних задач. Основою для їх вирішення може стати застосування моментно–кумулянтного опису випадкових величин та поліноміальних стохастичних ВП, оптимальні коефіцієнти яких знаходяться згідно адаптованого моментного критерію мінімуму верхньої границі ймовірностей помилок.

В роботі синтезовані ВП виявлення радіосигналу на тлі адитивно-мультиплікативних негаусівських завад до степеня стохастичного полінома $s=3$. Аналіз отриманих результатів показав, що з підвищенням степеня стохастичного полінома та з врахуванням негаусовського характеру завад значення критерію верхньої границі ймовірностей помилок першого та другого роду або критерію Ku_{sn} зменшується в порівнянні з відомими результатами для гаусівських моделей завад, що свідчить про зменшення ймовірностей помилок синтезованих нелінійних ВП та збільшенні їх ефективності.

Отримані результати можуть знайти своє застосування в програмних реалізаціях алгоритмів ефективних високоточних пристроїв обробки сигналів, що здійснюють прийом та обробку сигналів на тлі складних завадових ситуацій в сучасних системах стільникового зв'язку, телекомунікаційних системах, системах радіолокації та ін.



а) б)

Рис. 2. Залежність ефективності нелінійного ВП (при $s=2$) виявлення радіосигналу по відношенню до лінійного ВП ($s=1$) від коефіцієнта асиметрії γ_3 при $a_0=2$ та: а) $\mu_2=0{,}1$; б) $\mu_2=2$

Література

1. Tuzlukov V. P. Signal Processing Noise. – USA, Florida: CRC Press LLC, 2002. – 688 p.
2. Ратынский, М.В. Основы сотовой святи [Текст] / М.В. Ратынский. – М.: Радио и связь, 1998. – 248 с.
3. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] / Б.Р. Левин // 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
4. Шелухин, О.И. Негауссовские процессы в радиотехнике [Текст] / О.И. Шелухин. – М.: Радио и связь, 1999. – 310 с.
5. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ негауссовых процессов и их преобразований [Текст] / А.Н. Малахов. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.
6. Кунченко, Ю.П. Проверка статистических гіпотез при использовании полиномиальных решающих правил, оптимальних по моментному критерию суммы асимптотических вероятностей ошибок [Текст] / Кунченко Ю.П., Палагин В.В. // Радиоэлектроника и автоматика. – 2006. – № 3(34). – С. 4 – 11.
7. Кунченко, Ю.П. Разработка нелинейных обнаружителей сигналов при негауссовых помехах, оптимальных по дисперсионных критериям [Текст] / Кунченко Ю.П., Палагин В.В., Мартыненко С.С. // Тр. 2-й междунар. конф. по радиосвязи, звуковому и телевиз. вещанию (УкрТелеком-95). – Одесса, 1995. – С. 440 – 443.
8. Палагін, В.В. Синтез поліноміальних алгоритмів розпізнавання сигналів на тлі асиметричних негауссівських завад [Текст] / Палагін В.В., Жила О.М. // Труды Одесского политехнического университета. – 2007. – № 2(28). – С. 171 – 176.
9. Палагин, В.В. Адаптация моментного критерия качества для многоальтернативной проверки гипотез при использовании полиномиальных решающих правил [Текст] / В.В. Палагин // Электронное моделирование – 2010. – Т.32. №4. – С. 17 – 33.
10. Kunchenko Y. Polynomial Parameter Estimations of Close to Gaussian Random variables. - Germany, Aachen: Shaker Verlag, 2002. - 396 p.

Abstract

The problem of signal detection on the background noise is one of the most important and actual in many applications. The most complete model of the interaction of signals and noise is additive-multiplicative model, which is typical for many practical cases.

The task signal processing is more difficult when considering Non-Gaussian noise, both additive and multiplicative character. Therefore, the actual task is the development of methods and algorithms for statistical signal processing on the background additive-multiplicative Non-Gaussian noise in radar, sonar, geophysics, systems of mobile communications.

This paper illustrates the use of an alternative approach to the description of random variables - moment–cumulant description.

In this work the additional question of efficient algorithms for signal detection on a background additive-multiplicative Non-Gaussian noise are consider.

Purpose of work is improve the efficiency of systems Signal Detection on a background additive-multiplicative Non-Gaussian noise on the basis of polynomial decision rules, that are optimal for the moment criterion.

Presented synthesis of decision rules radiosignal detection on the background additive-multiplicative Non-Gaussian noise to the degree stochastic polynomial $s=3$ *. It is shown that with increasing degree stochastic polynomial and considering Non-Gaussian noise, value of the criterion of the upper limit of probability of errors of the first and second kind decreases, indicating a decrease in the probability of errors synthesized nonlinear decision rules and increase their effectiveness in comparison with linear decision rules*

Keywords: *radio signals detection, moment quality criterion, additive-multiplicative Non-Gaussian noise*