

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.391

Т. В. Воробкало, канд. техн. наук, доц.;

О. С. Гавриш, канд. фіз.-мат. наук, доц.

## ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ ГАРМОНІЧНОГО СИГНАЛУ В УМОВАХ ВПЛИВУ НЕГАУССІВСЬКИХ ЗАВАД

*Синтезовано алгоритми оцінювання частоти Допплера на тлі негауссівських завад, на основі яких можна будувати пристрої вимірювання радіальної швидкості руху джерела гармонічного сигналу. Показано, що отримані оцінки відрізняються підвищеною точністю, завдяки врахуванню негауссівського характеру завади.*

### Вступ

Радіолокаційні системи вимірюють не тільки різні геометричні величини, які характеризують розташування об'єкта (відстань до об'єкта, напрям на об'єкт), але й параметри руху об'єкта [1]. Одним з важливих параметрів руху, що підлягає визначенню в радіосистемах, є швидкість.

У статті ставиться задача визначення радіальної швидкості руху джерела випромінювання сигналу. Через те, що корисний сигнал завжди приймається на фоні завад, то поставлена в роботі задача має статистичний характер і зводиться до оцінювання частоти доплерівського зсуву сигналу.

В більшості робіт для оцінювання параметрів сигналів, що приймаються на фоні завад, використовуються класичні методи [2, 3]. Відомо, що класичні методи оцінювання параметрів є оптимальними для знаходження оцінок параметрів сигналів, що приймаються в умовах впливу гауссівських завад. Але на практиці часто характер розподілу завад відрізняється від гауссівського, тобто завади є негауссівськими. Тому необхідно використовувати інші методи. Одним з таких методів є метод знаходження оцінок, запропонований професором Ю. П. Кунченком, — метод максимізації поліному, який базується на використанні степеневих стохастичних поліномів [4].

*Метою роботи є вимірювання радіальної швидкості руху джерела випромінювання сигналу шляхом знаходження оцінки доплерівського зсуву частоти на фоні негауссівських завад методом максимізації полінома.*

### Постановка задачі

Радіальна швидкість є проекцією вектора швидкості руху джерела на напрям «приймач-випромінювач». У РЛС для визначення радіальної швидкості використовується ефект Допплера — зміна частоти електромагнітних коливань, що приймаються під час зміни відстані між приймачем і випромінювачем радіохвиль [1].

Нехай джерело знаходиться на відстані  $R$  від приймача та випромінює гармонічний сигнал

$$S(t) = a_0 \cos \phi(t), \quad (1)$$

де  $a_0$  — амплітуда коливання;  $\phi(t)$  — миттєве значення фази коливання на вході приймача, що визначається таким чином:

$$\phi(t) = 2\pi f_0 (t - (R/c)) + \phi_0,$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — швидкість розповсюдження радіохвилі в середовищі;  $f_0$  — частота випромінювання коливання;  $\phi_0$  — початкова фаза.

Якщо випромінювач рухається відносно приймача з радіальною швидкістю  $V_R = dR/dt = \dot{R}(t)$ , то миттєве значення фази закономірно змінюється. В результаті цього частота коливання, що приймається, знаходиться як похідна від миттєвого значення фази за часом:

$$f = (d\phi/dt)/2\pi = f_0 \left(1 - (\dot{R}/c)\right) + \phi_0,$$

і відрізняється від частоти випромінювання на деяке значення

$$f_D = -f_0 V_R/c,$$

яке називається частотою Доплера [1].

Таким чином задача вимірювання радіальної швидкості зводиться до визначення частоти Доплера:

$$V_R = -cf_D/f_0. \quad (2)$$

Гармонічний сигнал (1) приймається на фоні завад. Будемо вважати, що взаємодія корисного сигналу й завади є адитивною, тоді випадкова величина сигналу має вигляд

$$\xi_v = S_v + n_v; \quad v = \overline{1, n}, \quad (3)$$

де  $n_v$  — завада, яку будемо вважати негауссівською випадковою величиною з нульовим математичним сподіванням  $E\{n_v\} = 0$ , дисперсією  $\chi_2$ , та кумулянтними коефіцієнтами вищих порядків  $\gamma_3, \gamma_4, \dots$ ;  $S_v$  — модель гармонічного сигналу, що приймається, в момент часу  $v$  і має вигляд

$$S_v = a_0 \cos[2\pi(f_0 + f_D)v\Delta + \phi_0], \quad (4)$$

де  $\Delta$  — крок дискретизації.

Припустимо, що значення параметрів сигналу  $a_0, f_0, \phi_0$  точно відомі спостерігачеві, а в якості невідомого параметра виступає інформативний параметр сигналу  $f_D$  — доплерівський зсув частоти. Статистичні характеристики завади  $\chi_2, \gamma_3, \gamma_4, \dots$  будемо також вважати відомими. Тоді для знаходження оцінки параметра  $f_D$ , з випадкової величини  $\xi_v$  (3) необхідно взяти вибірку  $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  обсягом  $n$ , обробляючи яку можна знайти оцінку шуканого параметра.

### Результати роботи

Як уже зазначалося раніше, у випадку негауссівського характеру завади ефективним є використання методу максимізації полінома. Тому в цій роботі, відповідно до методу максимізації полінома [4], синтезовані алгоритми оцінювання доплерівського зсуву частоти для степенів стохастичного полінома  $s = 1, 2, 3$ .

Легко показати, що для першого степеня полінома рівняння для знаходження оцінки доплерівського зсуву частоти  $f_D$  має такий вигляд:

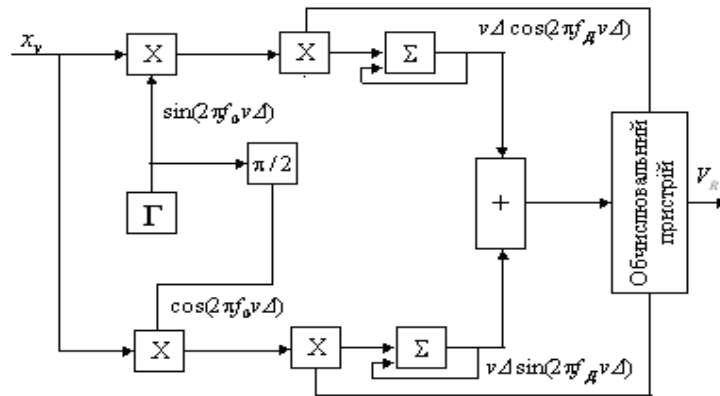
$$\sum_{v=1}^n v\Delta \sin[2\pi(f_0 + f_D)v\Delta + \phi_0] x_v \Big|_{f_D = \hat{f}_D} = 0. \quad (5)$$

Для зручності реалізації алгоритму вираз (5) можна записати в такому вигляді:

$$\sum_{v=1}^n v\Delta \sin(2\pi f_0 v\Delta + \phi_0) \cos(2\pi f_D v\Delta) x_v + \sum_{v=1}^n v\Delta \cos(2\pi f_0 v\Delta + \phi_0) \sin(2\pi f_D v\Delta) x_v \Big|_{f_D = \hat{f}_D} = 0. \quad (6)$$

Алгоритм для першого степеня полінома є оптимальним у випадку, коли завада є гауссівською. Перевагою цієї оцінки є простота її технічної і алгоритмічної реалізації і те, що для знаходження цієї оцінки не потрібно знати значення інших параметрів, як сигналу ( $a_0$ ), так і завади ( $\chi_2, \gamma_3$  і т. д.).

На рис. 1 наведена блок-схема реалізації цього алгоритму.

Рис. 1. Блок-схема вимірювання радіальної швидкості руху джерела сигналу для  $s = 1$ 

Як видно з рисунка, для знаходження оцінки необхідний задавальний генератор  $\Gamma$ , який генерує дискретні значення синусоїдного гармонічного коливання  $\sin(2\pi f_0 v\Delta)$  (для спрощення схеми будемо вважати, що початкова фаза гармонічного сигналу  $\phi_0$  дорівнює нулю). З цього сигналу формується гармонічне коливання, яке зсунуте по фазі на  $\frac{\pi}{2}$ , тобто формується коливання  $\cos(2\pi f_0 v\Delta)$ . Далі, кожне вибіркове значення  $x_v$  помножується на, відповідно, згенероване  $v$ -те синусоїдне  $\sin(2\pi f_0 v\Delta)$  і  $v$ -те косинусоїдне  $\cos(2\pi f_0 v\Delta)$  значення та на значення зі зворотного зв'язку з обчислювального пристрою  $v\Delta \cos(2\pi f_D v\Delta)$ ,  $v\Delta \sin(2\pi f_D v\Delta)$ . Отримані результати циклічно підсумовуються для значень  $v$  від 1 до  $n$  та додаються і подаються на обчислювальний пристрій. Таким чином формується ліва частина рівняння максимізації полінома (6).

В обчислювальному пристрої фактично здійснюється виконання ітеративного алгоритму розв'язання рівняння, відповідно до якого відбувається розв'язання лівої частини рівняння максимізації полінома для різних значень  $f_D$ , на блок-схемі це показано у вигляді зворотного зв'язку. Також в цьому пристрої обчислюється радіальна швидкість руху джерела випромінювання гармонічного сигналу за формулою (2).

Для другого степеня полінома рівняння для знаходження оцінки параметра  $f_D$  має такий вигляд:

$$\begin{aligned} & \chi_2^{0,5} (\gamma_4 + 2) \sum_{v=1}^n x_v \sin[2\pi f_0 v\Delta + \phi_0] \cos(2\pi f_D v\Delta) + \chi_2^{0,5} (\gamma_4 + 2) \sum_{v=1}^n x_v \cos[2\pi f_0 v\Delta + \phi_0] \sin(2\pi f_D v\Delta) + \\ & + \gamma_3 a_0 \sum_{v=1}^n x_v \sin 2[2\pi f_0 v\Delta + \phi_0] \cos 2(2\pi f_D v\Delta) + \gamma_3 a_0 \sum_{v=1}^n x_v \cos 2[2\pi f_0 v\Delta + \phi_0] \sin 2(2\pi f_D v\Delta) - \\ & - \gamma_3 \sum_{v=1}^n x_v^2 \sin[2\pi f_0 v\Delta + \phi_0] \cos(2\pi f_D v\Delta) - \gamma_3 \sum_{v=1}^n x_v^2 \cos[2\pi f_0 v\Delta + \phi_0] \sin(2\pi f_D v\Delta) \Big|_{f_D = \hat{f}_D} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Отримане для  $s = 2$  рівняння максимізації полінома для знаходження оцінки доплерівського зсуву частоти залежить як від амплітуди сигналу  $a_0$ , так і від параметрів негауссівської завади — дисперсії  $\chi_2$ , коефіцієнта асиметрії  $\gamma_3$  і коефіцієнта ексцесу  $\gamma_4$ . Вважається, що ці параметри апріорно відомі.

На рис. 2 зображена блок-схема алгоритму обчислення оцінки доплерівського зсуву частоти для  $s = 2$ . Алгоритм розв'язання можна розбити на 3 блоки. У блоці I, що будемо називати блоком гетеродинів, є задавальний дискретний генератор  $\Gamma$ , який формує дискретні значення гармонічних коливаний  $\sin(2\pi f_0 v\Delta)$ ,  $\cos(2\pi f_0 v\Delta)$ . На підставі цих сигналів формуються синусоїдні і косинусоїдні коливання з подвоєною частотою відповідно до відомих тригонометричних перетворень  $\sin 2(2\pi f_0 v\Delta)$  і  $\cos 2(2\pi f_0 v\Delta)$ .

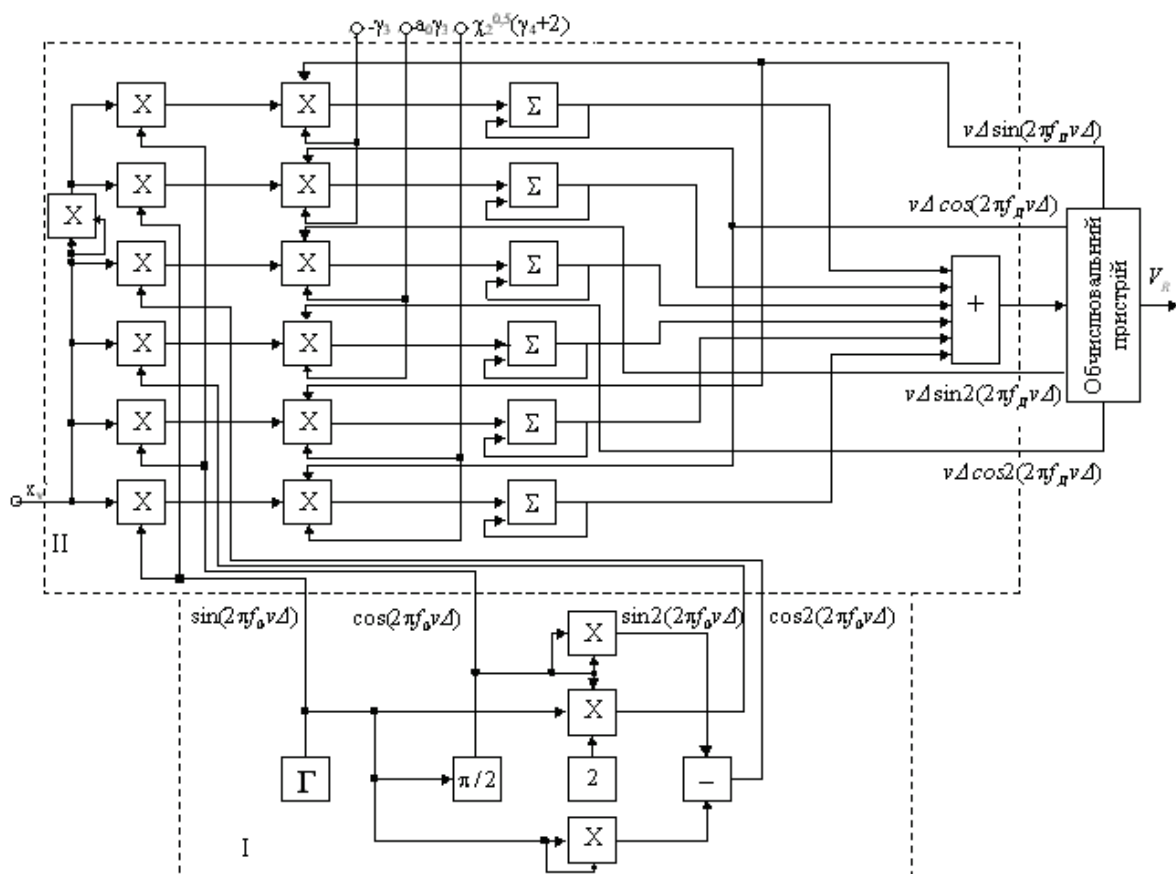


Рис. 2. Блок-схема вимірювання радіальної швидкості руху джерела сигналу для  $s = 2$

Отримані сигнали надходять у блок II, що називається блоком формування рівняння максимізації полінома. На вхід цього блока надходять вибірккові значення  $x_v$  з виходу приймального пристрою. На підставі цих сигналів у блоці II, насамперед, у результаті математичної операції добутку, формуються складові рівняння максимізації полінома, які помножуються на коефіцієнти, що залежать від кумулянтних коефіцієнтів  $\gamma_3, \gamma_4$ . Далі отримані складові циклічно підсумовуються для значень  $v$  від 1 до  $n$  та додаються. Таким чином сформована ліва частина рівняння, що надходить у обчислювальний пристрій (блок III). У обчислювальному пристрої здійснюється виконання ітеративного алгоритму розв'язання рівняння (7).

Також у роботі отримано рівняння максимізації полінома оцінювання параметра  $f_D$  для третього степеня. Дане рівняння за формою подібне рівнянню для  $s = 2$ . Тому блок-схема алгоритму буде аналогічною блок-схемі, наведеній на рис. 2. Однак відмінність буде полягати в тому, що в блоці гетеродинів додатково повинні формуватися дискретні гармонічні коливання потроєної частоти, та вибірккові значення  $x_v$  крім піднесення до квадрату підносяться до кубу.

Також у роботі досліджено точність отриманих оцінок доплерівської частоти.

Якщо  $s = 1$ , то дисперсія оцінки дорівнює

$$\sigma_1^2 = \frac{3\chi_2}{a_0^2 (\pi\Delta)^2 n(n+1)(2n+1)}. \tag{8}$$

Якщо  $s = 2, 3$ , то, відповідно

$$\sigma_{\phi 2}^2 = \frac{3\chi_2 q_{21}}{a_0^2 (\pi\Delta)^2 n(n+1)(2n+1)}; \quad q_{21} = 1 - \frac{\gamma_3^2}{\gamma_4 + 2}; \tag{9}$$

$$\sigma_{\phi 3}^2 = \frac{3\chi_2 q_{31}}{a_0^2 (\pi\Delta)^2 n(n+1)(2n+1)}; \quad q_{31} = 1 - \frac{\gamma_4^3 + 2\gamma_4^2 - 3\gamma_4\gamma_3^2 + 9\gamma_3^4 + 6\gamma_3^2}{9\gamma_4^2 + 24\gamma_4 + 9\gamma_4\gamma_3^2 - 18\gamma_3^2 + 12}. \tag{10}$$

Як видно з отриманих виразів (8—10), дисперсії оцінок для  $s = 2, 3$  відрізняється від дисперсій з  $s = 1$  (8) на деякий коефіцієнт  $q_{s1}$ , який називається коефіцієнтом ефективності [4] і показує наскільки зменшується дисперсія оцінки з використанням нелінійної обробки вибіркового значення випадкової величини, що спостерігається, по відношенню до лінійної.

Коефіцієнти ефективності  $q_{21}$ ,  $q_{31}$  залежать від кумулянтних коефіцієнтів випадкової величини: коефіцієнта асиметрії  $\gamma_3$  та ексцесу  $\gamma_4$ . Якщо  $\gamma_3 = 0$ , то зменшення дисперсії не спостерігається. За умови прямування кумулянтних коефіцієнтів до границь області визначення [4] дисперсії оцінок прямують до нуля. Зі збільшенням степеня стохастичного полінома дисперсія також зменшується.

### Висновки

Синтезовані в роботі алгоритми оцінювання частоти Допплера точніші у порівнянні з лінійними алгоритмами оцінювання, отриманими в припущенні про гауссівський характер розподілу випадкової величини, що спостерігається, завдяки врахуванню коефіцієнтів асиметрії та ексцесу, (які для гауссівської випадкової величини дорівнюють нулю). А на основі отриманих в цій роботі алгоритмів можна будувати точніші пристрої для вимірювання радіальної швидкості джерела гармонічного сигналу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю. Г. Сосулин. — М. : Радио и связь, 1992. — 303 с.
2. Ширман Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. — М. : Радио и связь, 1981. — 416 с.
3. Радио технические системы / под ред. проф. Ю. М. Казаринова. — М. : Высшая школа, 1990. — 496 с.
4. Кунченко Ю. П. Оценка параметров методом максимизации полинома / Ю. П. Кунченко, Ю. Г. Лега. — К. : Наукова думка, 1992. — 180 с.

Рекомендована кафедрою захисту інформації

Стаття надійшла до редакції 5.10.10

Рекомендована до друку 14.10.10

**Воробкало Тетяна Василівна** — доцент, **Гавриш Олександр Степанович** — доцент.

Кафедра радіотехніки, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси