

УДОСКОНАЛЕННЯ БАГАТОЧАСТОТНОГО ФАЗОВОГО МЕТОДУ ДАЛЬНОМЕТРІЇ

Запропонована математична модель багаточастотного фазового методу дальнометрії, що дозволяє проводити зондування гармонійними сигналами в діапазоні частот від початкової до кінцевої. Сутність моделі полягає у вимірюванні значень векторів сумарних відбитих сигналів, записі системи лінійних рівнянь, знаходженні коефіцієнтів степеневого рівняння розв'язки якого дають значення векторів сигналів відбитих від кожного об'єкту на початковій частоті та вектори сигналів по приросту частоти. Отримані значення векторів застосовуються для розділення сигналів відбитих від кожного об'єкту та уточнення результатів, що дозволяє підвищувати точність вимірювання дальності об'єктів.

Ключові слова: фазовий метод, частота, дальнометрія, гармонічний сигнал.

Y. SENCHYSHYNA

Khmelnitsky National University

IMPROVED MULTI-PHASE METHOD OF RANGE MEASURING

The mathematical model of multi-frequency phase method of range measuring, which allows use of harmonic sensing signals in the frequency range from initial to the final. The essence of the model is to measure the significance of the vectors of total reflected signal recording system of linear equations, finding the equation coefficients of power solutions which provide value vector signal reflected from each object on the initial frequency and vector signal to increase the frequency. The values of the vectors used to separate the signals reflected from each object and refine the results that can increase the accuracy of the measurement range of objects.

Keywords: phase method, frequency, range measuring, harmonious signal.

Вступ

Постановка проблеми. Відомо декілька основних методів дальнометрії: імпульсна, частотна, фазова та складними сигналами [1, 2].

Найбільш поширеним є використання імпульсних методів. Їх точність та роздільна здатність залежить від тривалості зонduючого імпульсу і носійної частоти. Застосування частотних методів вимірювання дозволяє підвищити точність щодо дальності, але вимагає використання ширококутових зонduючих сигналів та складного математичного апарату [1-3].

З іншого боку, відомі фазові методи вимірювання дальності, які дозволяють з високою точністю визначати відстані до одного об'єкту в обмеженому частотному діапазоні. Причому точність вимірювання пов'язана із частотою зонduючого сигналу. Вагомий внесок в розвиток теорії фазових вимірювань внесли вітчизняні та закордонні вчені: М. К. Чмих, С. І. Пятін, С. М. Мевський, Ю. В. Куц, П. П. Орнатський, І. В. Троцишин та інші [4-10].

Проте, фазові вимірювання дальності є працездатними лише за наявності одного об'єкту, в окремих випадках двох. Це суттєво знижує область використання цих методів у практиці.

Розроблені багаточастотні фазові методи дальнометрії дозволяють вимірювати відстані до багатьох об'єктів. Сутність багаточастотного підходу до вимірювання дальності полягає у зондуванні гармонічними сигналами частоти яких збільшуються з рівномірним кроком. Причому крок зміни частоти дорівнює першій частоті [11-14].

У випадку ультразвукового або радіолокаційного зондування виникає необхідність перенесення спектру зондувальних сигналів в область високих частот. Носійна частота визначається фізичною природою сигналів. За ультразвукового дослідження, застосовуються сигнали у діапазоні частот від 1 до 10 МГц. За радіолокаційного дослідження застосовуються сигнали в області НВЧ. Для перенесення спектру використовується амплітудна (АМ) чи балансна (БМ) модуляція. В цьому випадку роздільна здатність визначається кроком зміни частоти []. За умови застосування АМ чи БМ ширина спектру збільшується в два рази за ширину спектру зондувального сигналу. Для звуження частотного діапазону доцільним є застосування однокутової модуляції. У цьому випадку початкова частота визначається носійною частотою. Кроком зміни частоти можна задавати відповідно до заданої роздільної здатності. В такому разі необхідно удосконалити математичний апарат багаточастотного фазового методу вимірювання дальності об'єктів за умови застосування зондувального сигналу в області високих частот без застосування амплітудної чи балансної модуляції.

Основна частина. Формування сітки гармонічних зондувальних сигналів в області високих частот передбачає наступні значення частот: $f_0, f_0 + \Delta f, f_0 + 2\Delta f, \dots, f_0 + n\Delta f$. Після прямого та зворотного поширення сигналів від випромінювача до об'єкта та назад до приймального сенсору чи антени, сигнали відбиті від об'єктів додаються в результаті отримуємо один гармонічний сигнал який можна описати виразом:

$$a_{\Sigma r} \cdot e^{-j\varphi_{\Sigma r}} = a_{1r} \cdot e^{-j\varphi_{1r}} + a_{2r} \cdot e^{-j\varphi_{2r}} \dots a_{nr} \cdot e^{-j\varphi_{nr}}, \quad (1)$$

де n – кількість об'єктів; r – початкова частота.

Фазовий зсув який набуває зондувальний сигнал після поширення до об'єкту і назад до приймального сенсору пропорційний дальності l_i та поточній частоті:

$$\varphi_i = \frac{4\pi d_i}{\lambda_r} = \frac{4\pi d_i}{v_n} f_r, \quad (2)$$

де v_n - швидкість поширення сигналів у середовищі.

Після збільшення частоти на Δf фазовий зсув відбитого від одного об'єкту набуває значення:

$$\varphi_{i+1} = \frac{4\pi d_i}{\lambda_r} = \frac{4\pi d_i}{v_n} (f_r + \Delta f), \quad (3)$$

Після збільшення на k кроків по частоті Δf , фазовий зсув буде мати значення:

$$\varphi_{i+k} = \frac{4\pi d_i}{\lambda_r} = \frac{4\pi d_i}{v_n} (f_r + k\Delta f), \quad (4)$$

Враховуючи вирази (2) – (4), сигнали в заданому діапазоні частот будуть описуватись системою рівнянь:

$$\begin{cases} a_{\Sigma r} \cdot e^{-j\varphi_{\Sigma r}} = \sum_{i=1}^N a_i \cdot e^{-j \frac{4\pi d_i}{v_n} f_r}; \\ a_{\Sigma(r+1)} \cdot e^{-j\varphi_{\Sigma(r+1)}} = \sum_{i=1}^N a_i \cdot e^{-j \frac{4\pi d_i}{v_n} (f_r + \Delta f)}; \\ \dots \\ a_{\Sigma(r+k)} \cdot e^{-j\varphi_{\Sigma(r+k)}} = \sum_{i=1}^N a_i \cdot e^{-j \frac{4\pi d_i}{v_n} (f_r + k\Delta f)}. \end{cases} \quad (5)$$

Для спрощення математичних перетворень системи (5) введемо позначення:

$$\dot{b}_r = a_{\Sigma r} \cdot e^{-j\varphi_{\Sigma r}}, \dots, \dot{b}_{r+k} = a_{\Sigma(r+k)} \cdot e^{-j\varphi_{\Sigma(r+k)}}, \quad (6)$$

$$\dot{c}_{ir} = e^{-j\varphi_{ir}}, \Delta \dot{c}_i = e^{-j\Delta \varphi_i}. \quad (7)$$

За таких позначень, систему рівнянь (5) можна записати:

$$\begin{cases} \dot{b}_{r+1} = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \dot{c}_{ir} \cdot \Delta \dot{c}_i; \\ \dot{b}_{r+2} = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \dot{c}_{ir} \cdot \Delta \dot{c}_i^2; \\ \dots \\ \dot{b}_{r+k} = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \dot{c}_{ir} \cdot \Delta \dot{c}_i^k. \end{cases} \quad (8)$$

Скориставшись підходом, що було запропоновано під час розробки багаточастотного фазового методу [12], знайдемо значення $a_i \cdot \dot{c}_{ir}$. Для знаходження основних залежностей запишемо систему рівняння для трьох об'єктів, після чого зробимо узагальнення. В такому разі система рівнянь (8) набуде спрощеного вигляду:

$$\begin{cases} \dot{b}_{r+1} = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \dot{c}_{ir} \cdot \Delta \dot{c}_i; \\ \dot{b}_{r+2} = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \dot{c}_{ir} \cdot \Delta \dot{c}_i^2; \\ \dot{b}_{r+3} = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \dot{c}_{ir} \cdot \Delta \dot{c}_i^3. \end{cases} \quad (9)$$

Розв'язок даної системи відносно значень $a_i \cdot \dot{c}_{ir}$ буде наступним:

$$\begin{cases} a_1 \cdot \dot{c}_{1r} = \frac{\Delta \dot{c}_2 \cdot \Delta \dot{c}_3 \cdot \dot{b}_{r+1} - (\Delta \dot{c}_2 + \Delta \dot{c}_3) \cdot \dot{b}_{r+2} + \dot{b}_{r+3}}{(-\Delta \dot{c}_2 \cdot \Delta \dot{c}_1 + \Delta \dot{c}_2 \cdot \Delta \dot{c}_3 + \Delta \dot{c}_1^2 - \Delta \dot{c}_1 \cdot \Delta \dot{c}_3) \Delta \dot{c}_1}; \\ a_2 \cdot \dot{c}_{2r} = \frac{-\Delta \dot{c}_1 \cdot \Delta \dot{c}_3 \cdot \dot{b}_{r+1} + (\Delta \dot{c}_1 + \Delta \dot{c}_3) \cdot \dot{b}_{r+2} - \dot{b}_{r+3}}{(-\Delta \dot{c}_3 \cdot \Delta \dot{c}_1 + \Delta \dot{c}_2 \cdot \Delta \dot{c}_1 + \Delta \dot{c}_2^2 - \Delta \dot{c}_2 \cdot \Delta \dot{c}_3) \Delta \dot{c}_2}; \\ a_3 \cdot \dot{c}_{3r} = \frac{\Delta \dot{c}_2 \cdot \Delta \dot{c}_1 \cdot \dot{b}_{r+1} - (\Delta \dot{c}_2 + \Delta \dot{c}_1) \cdot \dot{b}_{r+2} + \dot{b}_{r+3}}{(-\Delta \dot{c}_3 \cdot \Delta \dot{c}_1 + \Delta \dot{c}_2 \cdot \Delta \dot{c}_1 + \Delta \dot{c}_3^2 - \Delta \dot{c}_2 \cdot \Delta \dot{c}_3) \Delta \dot{c}_3}. \end{cases} \quad (10)$$

Продовжуючи математичні перетворення аналогічні до проведених під час розробки багаточастотного фазового методу отримуємо систему рівнянь для знаходження коефіцієнтів степеневого рівняння:

$$\begin{cases} \dot{b}_{r+1}i_1 - \dot{b}_{r+2}i_2 + \dot{b}_{r+3}i_3 = \dot{b}_{r+4}; \\ \dot{b}_{r+2}i_1 - \dot{b}_{r+3}i_2 + \dot{b}_{r+4}i_3 = -\dot{b}_{r+5}; \\ \dot{b}_{r+3}i_1 - \dot{b}_{r+4}i_2 + \dot{b}_{r+5}i_3 = -\dot{b}_{r+6}. \end{cases} \quad (11)$$

де

$$i_1 = \Delta\dot{c}_1 \cdot \Delta\dot{c}_2 \cdot \Delta\dot{c}_3, \quad i_2 = \Delta\dot{c}_1 \cdot \Delta\dot{c}_2 + \Delta\dot{c}_1 \cdot \Delta\dot{c}_3 + \Delta\dot{c}_2 \cdot \Delta\dot{c}_3, \quad i_3 = \Delta\dot{c}_1 + \Delta\dot{c}_2 + \Delta\dot{c}_3. \quad (12)$$

Знайшовши коефіцієнти степеневого рівняння з системи (11) та розв'язавши степеневе рівняння можна знайти значення $\Delta\dot{c}_1, \Delta\dot{c}_2, \Delta\dot{c}_3$. Наступним кроком є те що у відповідності до виразів (3) та (7) можна знайти дальності кожного об'єкту.

Якщо підставити отримані значення у початкову систему рівнянь (9) можна знайти значення векторів $a_i \cdot \dot{c}_{ir}$. Вони представляють собою вектори сигналів відбиті від об'єктів на початкові частоті. Враховуючи те, що початкова частота знаходиться в області високих частот, повний фазовий зсув буде набувати великих значень. Але використовуючи значення дальності отримані у попередньому кроці, можна уточнити дальності об'єктів.

Вирази (12) становлять собою коефіцієнти степеневого рівняння:

$$\Delta c^3 - Y_3 \Delta c^2 + Y_2 \Delta c + Y_1 = 0. \quad (13)$$

Розв'язок рівняння (10) дасть змогу отримати значення φ_1, φ_2 і φ_3 :

$$\varphi_{r+1} = \arctan \frac{\text{Im}(\Delta\dot{c}_1)}{\text{Im}(\Delta\dot{c}_1)}, \quad \varphi_{r+2} = \arctan \frac{\text{Im}(\Delta\dot{c}_2)}{\text{Im}(\Delta\dot{c}_2)}, \quad \varphi_{r+3} = \arctan \frac{\text{Im}(\Delta\dot{c}_3)}{\text{Im}(\Delta\dot{c}_3)}. \quad (14)$$

Значення фазових зсувів φ_1, φ_2 і φ_3 , дозволяють знайти дальності до кожного об'єкту:

$$l_1 = \frac{\varphi_{r+1} v_n}{4\pi(f_r + \Delta f)}, \quad l_2 = \frac{\varphi_{r+2} v_n}{4\pi(f_r + 2\Delta f)}, \quad l_3 = \frac{\varphi_{r+3} v_n}{4\pi(f_r + 3\Delta f)}. \quad (15)$$

Підставивши значення $\Delta\dot{c}$ в систему рівнянь (5) можна знайти значення $a_i \cdot \dot{c}_{ir}$, модуль цих значень є амплітудами сигналів відбитих від об'єктів.

За наявності більшої кількості об'єктів, розмір системи рівнянь (6) збільшується.

Амплітуда і фаза сумарних відбитих сигналів вимірюється вольтметром та фазометром. Унаслідок наявності похибок вимірювання, а також того, що для знаходження дальності необхідно проводити математичні перетворення, похибки вимірювання фазового зсуву та амплітуди гармонійних сигналів перетворюються в похибки знаходження фазових зсувів та амплітуд сигналів відбитих від кожного об'єкту, які впливають на кінцевий результат вимірювань дальності. Через нестабільності роботи генератора сигналів відбувається неточне задавання частоти зондуючого сигналу або частота буде плавно чи стрибкоподібно змінюватись. Тому, довжина хвилі теж не буде відповідати заданому значенню. Це призводить до того, що сумарний фазовий зсув та амплітуда відбитого сигналу на цій частоті буде відрізнятись від істинних значень. Розподіл похибки вимірювання цифрових методів вимірювання є рівномірними. Також необхідно зауважити, що вимірювання фази і амплітуди сигналу проводиться незалежно. Тому, результати вимірювання є незалежними одне від одного.

Систему рівнянь (8) можна записати у матричному вираженні:

$$\dot{B} = \dot{H} \cdot \dot{Y} \quad (17)$$

де
$$\dot{B} = \begin{bmatrix} \dot{b}_{r+4} \\ \dot{b}_{r+5} \\ \dot{b}_{r+6} \end{bmatrix}, \quad \dot{H} = \begin{bmatrix} \dot{b}_{r+1} & -\dot{b}_{r+2} & \dot{b}_{r+3} \\ -\dot{b}_{r+2} & \dot{b}_{r+3} & -\dot{b}_{r+4} \\ \dot{b}_{r+3} & -\dot{b}_{r+4} & \dot{b}_{r+5} \end{bmatrix}, \quad \dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix}.$$

Значення вектору стовпчику \dot{B} та \dot{H} визначається із похибкою $\delta\dot{B}$ і $\delta\dot{H}$. Після розв'язання системи рівнянь (17) відносно \dot{Y} , ці значення також знаходяться із похибками $\delta\dot{Y}$. Після відповідних перетворень похибки $\delta\dot{Y}$ будуть мати значення:

$$\delta\dot{Y} = \dot{H}^{-1}(\delta\dot{B} - \delta\dot{H} \cdot \dot{Y}) \quad (18)$$

Відповідно ці значення похибок є похибками коефіцієнтів степеневого рівняння, що призводить до похибки розв'язання рівняння. Тому як степеневі рівняння розв'язуються чисельними методами для степені рівняння 5 і вище, отже у вплив похибки коефіцієнтів відповідний чисельному методу розв'язання.

Аналіз виразу (18) показує, що найменша похибка визначення відстані буде спостерігатись, коли будуть найменшими похибки сумарного відбитого сигналу та число обумовленості матриці \dot{H} .

Розглянуті похибки аналітичного багаточастотного фазового методу вимірювання дальності об'єктів перетворення похибки вимірювання значень векторів сумарних сигналів відбитих від кожного об'єкту в похибку вимірювання дальності об'єктів. Перетворення похибок відбувається внаслідок запису системи лінійних рівнянь, її розв'язання, що дає значення коефіцієнтів степеневого рівняння із відповідними похибками. Також при розв'язанні степеневого рівняння похибки коефіцієнтів перетворюються в похибки значень векторів сигналів відбитих від кожного об'єкту.

Висновки

Проведено удосконалення аналітичного багаточастотного фазового методу вимірювання дальності та

параметрів об'єктів, які полягають у розв'язанні системи нелінійних рівнянь, яка описує залежності сумарного відбитого гармонічного сигналу та сигналів, відбитих від кожного об'єкту на частотах з кратністю $1:2:3:\dots:2N$. Для запису системи рівнянь проводиться зондування N об'єктів $2N$ сигналами в діапазоні частот від початкової до кінцевої у відеодіапазоні, що дозволяє звужити діапазон зондувальних сигналів в два рази. Результатом розв'язання системи рівнянь є значення векторів гармонічних сигналів, відбитих від кожного об'єкту на приростах частоти зондувального сигналу, вектори відбитих сигналів на початковій частоті та амплітуди відбитих сигналів. Отримані значення дозволяють знаходити дальності об'єктів та уточнювати дальності, а також знаходити коефіцієнти відбиття об'єктів.

Література

1. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации : учебник для вузов / Финкельштейн М.И. – [2-е изд., доп. и перераб.]. – М. : Радио и связь, 1983. – 536 с.
2. Радиолокационные и радионавигационные системы : [учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов] / П.А. Бакулев, А.А. Сосновский. – М. : Радио и связь, 1994. – 296 с.
3. Теоретические основы радиолокации : учебн. пособие для вузов / [А.А. Коростылев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник и др.]; под ред. В.Е. Дулевича. – М. : Сов. радио, 1978. – 608 с.
4. Чмых М.К. Цифровая фазометрия / М.К. Чмых. – М. : Радио и связь, 1993. – 184 с.
5. П'ятін С.І. Методи та засоби вимірювання фазових зсувів / С.І. П'ятін, І.В. Троцишин. – Хмельницький : Поділля, 1996. – 156 с.
6. Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний / [С.М. Маевский, В.Г. Баженов, Е.К. Багуревич, Ю.В. Куц]. – К. : Вища школа. Изд-во при Киев. ун-те, 1983. – 84 с.
7. Куц Ю.В. Статистична фазометрія : наукова монографія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. – Тернопіль : Тернопільський державний технічний університет, 2009. – 383 с.
8. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые) / П.П. Орнатский. – [5-е изд., перераб. и доп.]. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 504 с.
9. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1983. – 455 с.
10. Троцишин І.В. Вимірювання та перетворення фазочастотних параметрів радіосигналів / І.В. Троцишин. – Хмельницький : ПП Ковальський В.В., 2002. – 382 с.
11. Liubchik Vitalii, Kylimnik Alexandr, Horyashchenko Serhiy. Application of the Multi-frequency Phase Method of Ranging to Many Objects for Construction of Ground Penetrating Radar. International Radar Symposium (IRS-2013), Dresden, Germany, 19–21 June, 2013. pp. 835–840.
12. Любчик В.Р. Теоретичні основи фазових вимірювань відстаней до декількох об'єктів / Г.Б. Параска, О.М. Шинкарук, В.Р. Любчик // *Електроника и связь, Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии»*. – 2010. – № 2. – С. 82–86.
13. Любчик В.Р. Аналітичний багаточастотний фазовий метод вимірювання дальностей / О.М. Шинкарук, В.Р. Любчик, М.О. Лантвойт // *Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Радіотехніка. Радиоапаратобудування"*. – 2013. – № 52. – С. 72–78.
14. Shinkaruk O., Lantvoyt M., Liubchik V., Kylymnyk O. The research of the application of signals with the rectangular enveloping of the amplitude spectrum in the radar. International Radar Symposium (IRS-2014), Gdansk, Poland, 16–18 June, 2014. pp. 250–253.

References

1. Fynkelshtein M.Y. Osnovy radyolokatsyy : uchebnyk dlia vuzov / Fynkelshtein M.Y. – [2-e yzd., dop. y pererab.]. – M. : Radyo y sviaz, 1983. – 536 s.
2. Radyolokatsyonnye y radyonavyhatsyonnye systemy : [ucheb. posobyie dlia radyotekhn. spets. vuzov] / P.A. Bakulev, A.A. Sosnovskiy. – M. : Radyo y sviaz, 1994. – 296 s.
3. Teoretycheskye osnovy radyolokatsyy : uchebn. posobyie dlia vuzov / [A.A. Korostylev, N.F. Kliuev, Yu.A. Melnyk y dr.]; pod red. V.E. Dulevycha. – M. : Sov. radyo, 1978. – 608 s.
4. Chmykh M.K. Tsyfrovaia fazometriya / M.K. Chmykh. – M. : Radyo y sviaz, 1993. – 184 s.
5. Piatin S.I. Metody ta zasoby vymiriuvannia fazovykh zsuviv / S.I. Piatin, I.V. Trotsyshyn. – Khmelnytskyi : Podillia, 1996. – 156 s.
6. Prymenenye metodov fazometryi dlia pretsyzyonnoho yzmerenya rasstoianiy / [S.M. Maevskiy, V.H. Bazhenov, E.K. Baturevych, Yu.V. Kuts]. – K. : Vyshcha shkola. Yzd-vo pry Kyev. un-te, 1983. – 84 s.
7. Kuts Yu.V. Statystychna fazometriia : naukova monohrafiia / Yu.V. Kuts, L.M. Shcherbak. – Ternopil : Ternopilskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet, 2009. – 383 s.
8. Ornatskiy P.P. Avtomaticheskye yzmereniya y prybory (analohovye y tsyfrovye) / P.P. Ornatskiy. – [5-e yzd., pererab. y dop.]. – K. : Vyshcha shk. Holovnoe yzd-vo, 1986. – 504 s.
9. Ornatskiy P.P. Teoretycheskye osnovy ynfomatsyonno-ymerytelnoi tekhniky / P.P. Ornatskiy. – K. : Vyshcha shkola, 1983. – 455 s.
10. Trotsyshyn I.V. Vymiriuvannia ta peretvorennia fazochastotnykh parametriv radiosyhnaliv / I.V. Trotsyshyn. – Khmelnytskyi : PP Kovalskiy V.V., 2002. – 382 s.
11. Liubchik Vitalii, Kylimnik Alexandr, Horyashchenko Serhiy. Application of the Multi-frequency Phase Method of Ranging to Many Objects for Construction of Ground Penetrating Radar. International Radar Symposium (IRS-2013), Dresden, Germany, 19–21 June, 2013. pp. 835–840.
12. Liubchik V.R. Teoretychni osnovy fazovykh vymiriuvan vidstanei do dekilokh ob'ektiv / H.B. Paraska, O.M. Shynkaruk, V.R. Liubchik // *Електроника и связь, Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии»*. – 2010. – # 2. – С. 82–86.
13. Liubchik V.R. Analitychniy bahatochastotnyi fazoviy metod vymiriuvannia dalnostei / O.M. Shynkaruk, V.R. Liubchik, M.O. Lantvoit // *Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Радіотехніка. Радиоапаратобудування"*. – 2013. – # 52. – С. 72–78.
14. Shinkaruk O., Lantvoyt M., Liubchik V., Kylymnyk O. The research of the application of signals with the rectangular enveloping of the amplitude spectrum in the radar. International Radar Symposium (IRS-2014), Gdansk, Poland, 16–18 June, 2014. pp. 250–253.