

УДК 621.317

ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО-ФАЗОВОГО МЕТОДУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ  
ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ

**І.О. Брагинець**, канд.техн.наук, **О.Г.Кононенко**, канд.техн.наук, **Ю.О.Масюренко\***, канд.техн.наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
 e-mail: [masjuriv@ied.org.ua](mailto:masjuriv@ied.org.ua)

*Розглянуто можливість використання лазерних частотно-фазових далекомірних систем у радарному режимі для оцінки якості та форми контрольованих дифузно-відбиваючих поверхонь. Проведено аналітичні дослідження вихідної величини частотно-фазових систем при нерівномірності контрольованих поверхонь. Оцінено спектр вихідного сигналу системи у даному випадку та визначено амплітуди окремих складових спектру, значення яких характеризують стан поверхні або її профіль. Бібл. 10, рис. 2.*

**Ключові слова:** лазер, лінійна частотна модуляція, радар, ряди Фур'є, спектр сигналу.

Для оцінки геометричних параметрів об'єктів з дифузно-відбиваючою поверхнею, у тому числі об'єктів, що обертаються або мають високу температуру (вище 1000<sup>0</sup>С), застосовуються оптичні методи безконтактного вимірювання відстані до відповідних об'єктів. Найбільш перспективними в цьому плані є вимірювальні системи на основі лазерних далекомірів, які є результатом подальшого розвитку технологій у сфері створення високоточних безконтактних систем для контролю геометрії та налагодження великогабаритних виробів. Вказана особливість, а також стан сучасної електронної елементної бази уможливають практичну реалізацію відомих методів вимірювання відстані та розробку нових типів лазерних далекомірів.

Останнім часом, крім фазових лазерних вимірювачів відстані з модуляцією інтенсивності світлового випромінювання, які завдяки своїм відомим властивостям знаходять застосування при моніторингу багатьох об'єктів, використовується частотний метод вимірювання відстані. Суть методу полягає в частотній модуляції (ЧМ) лазерного випромінювання і зводиться до вимірювання приросту частоти за час розповсюдження ЧМ сигналу до відбивача (контрольованої поверхні), який знаходиться на відстані  $L_x$ , та в зворотному напрямку [2]. Якщо частота  $f$  випромінюваних коливань змінюється за лінійним законом, тобто збільшується або зменшується з постійною швидкістю  $\nu = df/dt$ , то зміна частоти за час  $\tau_{2L_x} = 2L_x/c$ , де  $c$  – швидкість світла, складає

$$\Delta f = \nu \tau_{2L_x} = \nu 2L_x/c.$$

Вимірявши  $\Delta f$ , можна за формулою  $L_x = c \cdot \Delta f / 2\nu$  обчислити значення  $L_x$ .

Практичні реалізації частотних оптичних вимірювальних систем на основі лазерних далекомірів наведено, наприклад, у [1, 5]. Слід відзначити, що точність частотних систем залежить, в основному, від похибки вимірювання  $\Delta f$  та стабільності значення  $\nu$ . Тому для отримання високої точності визначення відстані (не більше 0,1 мм) дуже жорсткі вимоги пред'являються до точності вимірювання  $\Delta f$  та стабільності  $\nu$ . В оптичній вимірювальній системі [1], яка створена на базі лазерного радара серії MV300 фірмою Metris (Бельгія), відстань визначається з точністю (10 мкм+2,5 мкм/м). Вказана точність досягається за допомогою лазерного далекоміра, при створенні якого використана запатентована технологія з частотною модуляцією лазерного когерентного радара. Така система є надзвичайно дорогою.

Представляє інтерес комбінований (частотно-фазовий) метод вимірювання відстані, коли частота модуляції випромінюваних електромагнітних коливань  $F_m$ , що направляються на контрольований об'єкт, не є постійною, як в фазових системах, а періодично змінюється за лінійним законом від початкового значення  $F_0$  до максимального  $(F_0 + \Delta F_m)$ , де  $\Delta F_m$  – приріст частоти модуляції за вибра-

ний час її зміни  $T_{\Pi}$ . Тоді кумулятивний фазовий зсув  $\varphi_{\text{кум}}$  (набіг фази) огинаючих електромагнітного сигналу, що направляється на об'єкт, та відбитого від нього сигналу за час  $T_{\Pi}$  визначається формулою [3]  $\varphi_{\text{кум}} = 2\pi \cdot 2L_x \cdot \Delta F_m / c$ .

Звідси кутова частота вихідного сигналу частотно-фазової системи дорівнює [3]

$$\omega_0 = \frac{\varphi_{\text{кум}}}{T_{\Pi}} = \frac{4\pi \cdot L_x \cdot \Delta F_m}{c \cdot T_{\Pi}} = kL_x, \quad (1)$$

де  $k$  – постійний коефіцієнт,  $k = 4\pi \cdot \Delta F_m / cT_{\Pi}$ . Як бачимо із останнього виразу,  $\omega_0$  прямо пропорційна відстані до об'єкту, що визначає її як інформативний параметр.

За принципом своєї дії частотно-фазові далекоміри можуть використовуватися в радарному режимі, тобто при наявності декількох поверхонь, що відбивають. У [6–8, 10] проаналізовано перетворювальні процеси в частотно-фазових далекомірах, де використовуються частоти НВЧ-діапазону. В таких системах, основний напрямок яких є радіолокація, похибка вимірювання в кращому випадку складає 0,6...1,0 см. Більш високу точність забезпечують частотно-фазові далекоміри оптичного діапазону. В [3] розглянуто особливості практичної реалізації частотно-фазового методу в лазерній далекометрії з використанням цифрової обробки досліджуваних сигналів, описано алгоритм функціонування далекоміра та його структурна схема, а також проаналізовано похибки вимірювання відстані. В попередніх дослідженнях, проведених авторами за цією тематикою, встановлено, що похибка вимірювання відстані в залежності від обраних параметрів перетворювальних процесів може складати 0,1...1,0 мм.

Нами раніше була розглянута можливість застосування частотно-фазового методу для вимірювання переміщень із більш високою точністю за рахунок зменшення випадкових похибок, що виникають у фазових лазерних далекомірах. Частотно-фазові далекомірні системи, що працюють у радарному режимі, можуть бути також використані при вимірюванні форми дифузійно-відбиваючих поверхонь з оцінкою характеру дефекту, кута нахилу поверхонь, наявності опуклостей або западин і т.п. Тому нами була поставлена задача проведення досліджень, спрямованих на аналіз роботи лазерного далекоміра у вказаному режимі.

**Метою даної роботи** є оцінка спектру вихідної величини лазерного частотно-фазового далекоміра при нахилі контрольованої поверхні або при її нерівномірності та можливості по складових спектру визначити стан дифузійно-відбиваючої поверхні.

Для досягнення вказаної мети спочатку визначимо та проаналізуємо вихідну величину частотно-фазового далекоміру при наявності двох контрольованих поверхонь. Проілюструємо це на конкретному прикладі.

Нехай контрольована поверхня знаходиться від приладу на відстані  $L_x = 4$  м, а відповідне значення кутової частоти вихідної величини далекоміра позначимо як  $\omega_0$ . При  $\Delta F_m = 75$  МГц згідно з (1)  $\omega_0 = 4\pi/T_{\Pi}$ . Позначимо вихідну величину пристрою

$$u_1 = U_m \sin \omega_0 t. \quad (2)$$

Вважаємо, що є ще одна дифузійно-відбиваюча поверхня, яка розташована на невеликій відстані від першої і має такий самий коефіцієнт відбиття. Тоді вихідна величина системи, обумовлена відбиттям оптичного випромінювання від другої поверхні, може бути подана у вигляді

$$u_2 = U_m \sin(\omega_0 t + \Delta\omega t), \quad (3)$$

де  $\Delta\omega$  – приріст частоти вихідного сигналу системи у порівнянні із сигналом (2),  $\Delta\omega \ll \omega_0$ .

Приймемо нормуючий сигнал по амплітуді  $U_m = 1$ . Результуюча величина, обумовлена відбиттям оптичного випромінювання одразу від двох поверхонь,

$$u_{\Sigma} = u_1 + u_2 = 2 \sin(\omega_0 t + 0,5\Delta\omega t) \cdot \cos 0,5\Delta\omega t. \quad (4)$$

Визначимо складову у виразі (4), яка відповідає приросту частоти вихідної величини частотно-фазової системи через наявність додаткової дифузійно-відбиваючої поверхні. З цією метою використаємо алгоритм обробки сигналів, який має місце в системах оптимальної оцінки частоти [9]. Для цього знайдемо величину

$$\Delta u = 1/2 \cdot u_{\Sigma} - u_1. \quad (5)$$

Після підстановки у (5) значень  $u_{\Sigma}$  і  $u_1$  відповідно із (4) та (2) та проведення математичних перетворень з урахуванням того, що  $\Delta\omega \ll \omega_0$  і  $\Delta\omega T_0 \ll 1$ , маємо

$$\Delta u \approx 0,5 \Delta \omega t \cdot \cos \omega_0 t . \quad (6)$$

Далі знаходимо добуток

$$\Delta u' = \Delta u \cdot \cos \omega_0 t = 0,5 \frac{1 + \cos 2\omega_0 t}{2} \Delta \omega t = \Delta u_1 + \Delta u_2 ,$$

де  $\Delta u_1 = 0,25 \cdot \Delta \omega t$ ;  $\Delta u_2 = 0,25 \cdot \cos 2\omega_0 t \cdot \Delta \omega t$ .

Розкладемо в ряд Фур'є на часовому відрізку  $0 \dots T_0$  складову  $\Delta u_1$  із останнього виразу, оскільки складова  $\Delta u_2$  має подвійну частоту і може бути відфільтрована. При цьому коефіцієнти ряду визначаються за формулами

$$a_0 = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \Delta \omega t \cdot dt ; \quad a_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \Delta \omega t \cos n\omega_0 \cdot dt ; \quad b_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \Delta \omega t \sin n\omega_0 \cdot dt ,$$

де  $n$  – номер гармоніки.

Після визначення коефіцієнтів ряду відзначимо, що в даному ряду відсутні косинусоїдальні складові, а сам ряд має вигляд

$$\Delta u_1 = 0,25 \left( \frac{\pi \Delta \omega}{\omega_0} - \frac{2 \Delta \omega}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \sin 2\omega_0 t - \frac{2}{3} \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \sin 3\omega_0 t + \dots \right) . \quad (7)$$

Після проведених перетворень отримуємо спектр  $\Delta u_1$  з домінуючою (інформативною) складовою  $(2\Delta\omega/\omega_0) \cdot \sin \omega_0 t$ . Визначивши амплітуду цієї складової (індекс частотної модуляції), можна оцінити лінійне зміщення другої контрольованої поверхні відносно першої. При контролі однієї нерівномірної поверхні це дає можливість по знайденому спектру визначити характер її стану (наявність западин чи опуклостей).

Розглянемо випадок, коли контрольована поверхня розташована нормально по відношенню до випромінювання або нахилена під кутом. У такому випадку може мати місце нерівномірність поверхні.

При проведенні досліджень було обрано оптичну схему вимірювання відстані до дифузної відбиваючої поверхні (ДВП), показану на рис. 1, а. При реалізації схеми світловий потік на виході лазерного напівпровідникового випромінювача (ЛНВ) спрямовується на дзеркало (Дз) і потім через об'єктив (Об) попадає на ДВП. Вважаємо, що відбите світлове випромінювання підкоряється закону Ламберта, а світлова пляма на досліджуваній поверхні має квадратну форму зі стороною квадрата  $L_0$  (рис. 1, б). Відбите світлове випромінювання за допомогою Об фокусується на площадку фотоприймача (ФП).

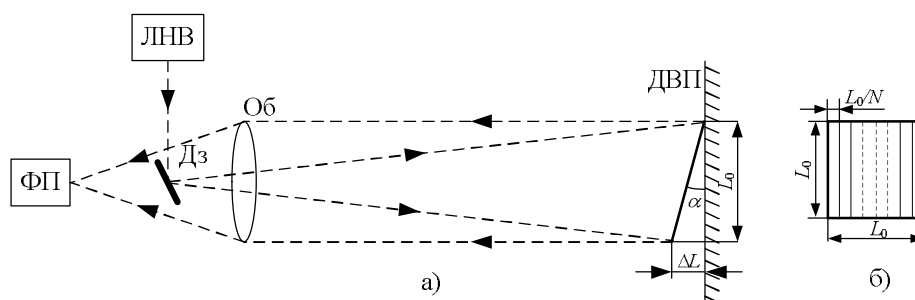


Рис. 1

Методика дослідження полягає у наступному. Розбиваємо умовно поверхню, на яку попадає світлова пляма, на  $N$  ділянок (рис. 1, б), що представляють собою прямокутники зі сторонами  $L_0$  та  $L_0/N$ . При цьому вважаємо, що приріст частоти вихідної величини частотно-фазової далекомірної системи, обумовлений просторовим положенням кожної такої ділянки, має постійне значення і може бути представлений у вигляді

$$\Delta \omega_i = \omega_0 \cdot \frac{\gamma}{N} i , \quad (8)$$

де  $\gamma$  – безрозмірний коефіцієнт, який визначається кутом нахилу поверхні  $\alpha$ ;  $i = 1 \dots N$ . З урахуванням того, що  $\Delta \omega_i \ll \omega_0$ , коефіцієнт  $\gamma = \Delta L/L_0$  (рис. 1, а). Частоту  $\omega_0$  у виразі (8) для спрощення подальшого аналізу будемо представляти у відносних одиницях, тобто  $\omega_0' = \varphi_{\text{кум}}/T_0$ , де  $T_0$  – період вихідного сигналу системи в радіанах,  $T_0 = 2\pi$ . Відповідно у відносних одиницях далі буде представлено і

приріст частоти як  $\Delta\omega'_i$ . Якщо вибрати параметри перетворення в частотно-фазовій системі такими, що вказані в наведеному вище прикладі, то  $\omega'_0 = 2$ . Це ілюструє рис. 2, на якому  $u_{\text{вих}}$  – вихідна величина частотно-фазової системи в загальному вигляді.

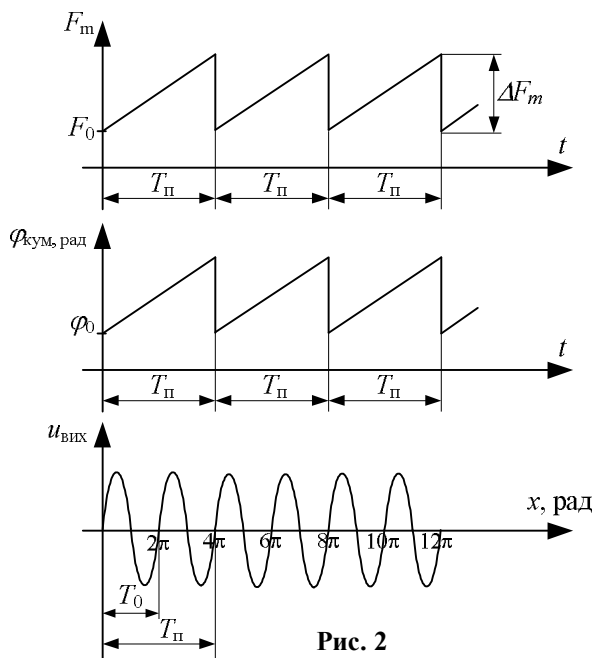


Рис. 2

що початковий фазовий зсув вихідної величини системи, який виникає внаслідок принципу її роботи, визначається в одному із тактів роботи системи [3]. У подальшому його значення при обробці сигналів враховується.

Результуючу величину, обумовлену нахилом поверхні ДВП, можна представити у вигляді

$$u_{\Sigma}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos \omega'_0 x \cdot \sin \omega'_0 \frac{\gamma}{N} i \cdot x. \quad (11)$$

Виходячи із виразу (11), маємо, що нахил досліджуваної поверхні викликає появу додаткових спектральних складових. Для оцінки останніх вихідну величину (11) представимо в інтегральному

вигляді

$$u'_{\Sigma}(x) = \frac{1}{L_0} \int_0^{L_0} \cos \omega'_0 x \cdot \sin \left( \omega'_0 \gamma \frac{L}{L_0} x \right) dL = -\frac{\cos \omega'_0 x}{\gamma \cdot \omega'_0 x} \cdot \cos \left( \omega'_0 \gamma \frac{L}{L_0} x \right) \Big|_0^{L_0}. \quad (12)$$

Представимо другий співмножник виразу (12) у вигляді ряду

$$\cos \left( \omega'_0 \gamma \frac{L}{L_0} x \right) = 1 - 0,5 \cdot \left( \omega'_0 \gamma \frac{L}{L_0} x \right)^2 + \dots \quad (13)$$

Оскільки  $\gamma \ll 1$ , то з достатньою для практики точністю можна обмежитися двома першими складовими ряду. З урахуванням цього, а також того, що при наведених вище чисельних параметрах частотно-фазової системи  $\omega'_0$  дорівнює двом, із (12) отримаємо

$$u'_{\Sigma}(x) = \gamma \cdot x \cdot \cos 2x. \quad (14)$$

Далі, як це відповідає обчислювальній обробці з використанням оптимального алгоритму для оцінки приросту частоти, складова (14) перемножується з квадратурною складовою вихідної величини системи, яка в даному випадку  $u_{\text{кв}} = \cos 2x$ . У результаті вихідна величина після перемноження може бути представлена у вигляді

$$u_{\Pi}(x) = \gamma \cdot x \cdot (\cos 2x)^2 = 0,5 \cdot \gamma \cdot x \cdot (1 + \cos 4x). \quad (15)$$

У нашому випадку, виходячи з виразу (15), домінуючі (інформативні) складові спектру визначаються його членом

$$u'_n(x) = 0,5\gamma x. \quad (16)$$

Якщо функцію (16) розкласти в тригонометричний ряд Фур'є на часовому відрізку  $0 \dots T_0$ , то значення амплітуд складових спектру будуть відповідати коефіцієнтам ряду

$$A(k) = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} u'_n(x) \cos kx \cdot dx; \quad B(k) = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} u'_n(x) \sin kx \cdot dx, \quad (17)$$

де  $k$  – номер спектральної складової.

Неважко показати, що згідно з (17) косинусоїдальні складові спектру дуже малі і тому ними можна знехтувати. У зв'язку з цим амплітуди спектральних складових з урахуванням (16) та (17) дорівнюють

$$B(1) = \gamma; \quad B(2) = \gamma/2; \quad B(3) = \gamma/3; \quad B(4) = \gamma/4; \dots; \quad B(k) = \gamma/k. \quad (18)$$

Значення  $k = 2$  відповідає основній частоті досліджуваного сигналу. Слід відзначити, що за відсутністю нахилу площини поверхні складові спектру  $B(1)$ ,  $B(3)$ ,  $B(4)$  та інші практично відсутні.

Нами розглянуто тільки випадок нахилу дифузно-відбиваючої поверхні, коли його значення може бути оцінено по амплітуді складової  $B(1) = \gamma$ , як найбільш інтенсивної. Використовуючи вираз (12), можна визначити характер нерівномірності поверхні (наявність опуклостей, западин та ін.) при вимірюванні відстані до неї. Знак приросту відстані (западина чи опуклість) може бути оцінено згідно з розробленими авторами методиками та алгоритмами [3, 4]. Застосування останніх дозволяє досить точно визначити середнє значення відстані до відбиваючої поверхні, а згодом і складові вихідного сигналу частотно-фазової вимірювальної системи при її роботі у радарному режимі.

Практичне застосування розглянутий підхід може знайти при розробці безконтактних вимірювальних систем для контролю геометрії та налагодженні великогабаритних виробів, зокрема, в енергомашинобудуванні, космічній промисловості, авіа- та суднобудуванні та ін. Найважливіше це, коли для оцінки профілю об'єктів проводиться сканування контрольованої поверхні. В розглянутому випадку зменшується число точок, які скануються системою. Ця особливість дає можливість скоротити час проведення вимірювальних операцій.

**Висновки.** Результати проведених аналітичних досліджень вихідного сигналу частотно-фазового лазерного далекоміра, який функціонує у радарному режимі, показали, що при наявності нерівномірності контрольованої поверхні спектр сигналу має відповідні додаткові складові. По значенню амплітуд цих спектральних складових із використанням відомих методик та обчислювальних алгоритмів можна оцінити стан або профіль контрольованої дифузно-відбиваючої поверхні об'єкту. Вказана обставина значно розширює сферу застосування частотно-фазових лазерних далекомірних систем.

1. *Бесконтактная измерительная система на базе лазерного радара серии MV 300* от 02.2017 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://nevatec.ru/wp-content/uploads/2016/10/mv300.pdf>

2. *Большаков В.Д., Деймлик Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П.* Радиогодезические и электрооптические измерения. – М.: Недра, 1985. – 303 с.

3. *Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Латенко В.И., Орнатский И.А.* Особенности применения фазово-частотного метода в лазерной дальнометрии // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 65-70.

4. *Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Латенко В.И., Орнатский И.А.* Специфические погрешности фазово-частотных лазерных измерителей расстояния // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 3. – С. 50-54.

5. *Куликов Д.В., Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Меледин В.Г., Наумов И.В., Кротов С.В., Главный В.Г., Рахманов В.В., Бакакин Г.В., Павлов В.А., Шпольвинд К.В., Кабардин И.К., Чубов А.С.* Лазерное устройство для измерения воздушного зазора электрической машины Патент РФ № 2469264, МПК (2006.01) G 01 B 11/14, Н 02 К 15/00.

6. *Downey J.M.* A Stepped Frequency Continuous Wave Ranging Sensor for Aiding Pedestrian Inertial Navigation [Електронна версія]. – 2012. – Режим доступу: <http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1110&context=dissertations>

7. *Joongsuk P.* Development of microwave and millimeter-wave integrated-circuit stepped-frequency radar sensors for surface and subsurface profiling [Електронна версія]. – 2003. – Режим доступу: <http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/1588/etd-tamu-2003C-ELEN-Park-1.pdf?sequence=1>

8. *Nguen C., Joongsuk P.* Stepped-frequency radar sensors: Theory, Analysis and Design [Електронна версія] – Режим доступу: [https://books.google.com.ua/books?id=I1XeCwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Stepped-frequency+radar+sensors&hl=ru&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Stepped-frequency%20radar%20sensors&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=I1XeCwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Stepped-frequency+radar+sensors&hl=ru&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Stepped-frequency%20radar%20sensors&f=false)

9. *Van Trees Harry L.* Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part 1: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory. – USA, John Wiley and Inc, 2001. – 690 p.

10. *Weiss J.M.* Continuous-Wave Stepped-Frequency Radar for Target Ranging and Motion Detection. – Режим доступу: [http://micsymposium.org/mics\\_2009\\_proceedings/mics2009\\_submission\\_64.pdf](http://micsymposium.org/mics_2009_proceedings/mics2009_submission_64.pdf)

УДК 621.317

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНО-ФАЗОВОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА**

**И.А. Брагинец**, канд.техн.наук, **А.Г. Кононенко**, канд.техн.наук, **Ю.А. Масюренко**, канд.техн.наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,  
e-mail: [masjuriy@ied.org.ua](mailto:masjuriy@ied.org.ua)

*Рассмотрена возможность использования лазерных частотно-фазовых дальномерных систем в радарном режиме для оценки качества и формы контролируемых диффузно-отражающих поверхностей. Проведены аналитические исследования выходной величины частотно-фазовых систем при неравномерности контролируемых поверхностей. Оценен спектр выходного сигнала системы в этом случае и определены амплитуды отдельных составляющих спектра, значения которых характеризуют состояние поверхности или ее профиль. Библ. 10, рис. 2.*

**Ключевые слова:** лазер, линейная частотная модуляция, радар, ряды Фурье, спектр сигнала.

## **APPLICATION OF FREQUENCY PHASE METHOD FOR CONTROL OF OBJECT GEOMETRIC PARAMETERS**

**I.O. Bragynets**, **O.G. Kononenko**, **Yu.A. Masjurenko**  
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,  
e-mail: [masjuriy@ied.org.ua](mailto:masjuriy@ied.org.ua)

*Authors considered the possibility of using laser frequency-phase ranging systems in the radar mode for evaluating the quality and shape of the controlled diffuse-reflecting surfaces. We carried out analytical studies of the output value of frequency-phase systems for non-uniformity of controlled surfaces. The spectrum of the system output signal is estimated in this case and the amplitudes of the individual components of the spectrum are determined, the values of which characterize surface state or its profile. References 10, figures 2.*

**Key words:** laser, linear frequency modulation, radar, Fourier series, signal spectrum.

1. *Non-contact measuring system based on laser radar MV-300* from 02.2017. – Available at: <http://nevatec.ru/wp-content/uploads/2016/10/mv300.pdf> (Rus)

2. *Bolshakov V.D., Deumlich F., Golubev A.N., Vasilev V.P.* Radio-geodesic and electro-optical measurements. – Moskva: Nedra, 1985. – 303 p. (Rus)

3. *Zaitsev E.A., Kononenko A.G., Masjurenko Yu.A., Nizhenskyi A.D., Latenko V.I., Ornatskyi I.A.* Special features of a phase-frequency method application in a laser ranging // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2008. – No 6. – Pp. 65-70. (Rus)

4. *Zaitsev E.A., Kononenko A.G., Masjurenko Yu.A., Nizhenskyi A.D., Latenko V.I., Ornatskyi I.A.* Specific errors of phase-frequency laser distance meters // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2009. – No 3. – Pp. 50-54. (Rus)

5. *Kulikov D.V., Dvojnishnikov S.V., Anikin Yu.A., Meledin V.G., Naumov I.V., Krotov S.V., Glavnyi V.G., Rakhmanov V.V., Bakakin G.V., Pavlov V.A., Shpolvind K.V., Kabardin I.K., Chubov A.S.* Laser device to measure air gap of electric machine. Patent RU No 2469264, 2012ю (Rus)

6. *Downey J.M.* A Stepped Frequency Continuous Wave Ranging Sensor for Aiding Pedestrian Inertial Navigation. – 2012. – Available at: <http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1110&context=dissertations>

7. *Joongsuk P.* Development of microwave and millimeter-wave integrated-circuit stepped-frequency radar sensors for surface and subsurface profiling. – 2003. – Available at: <http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/1588/etd-tamu-2003C-ELEN-Park-1.pdf?sequence=1>

8. *Nguyen C., Joongsuk P.* Stepped-frequency radar sensors: Theory, Analysis and Design. – Available at: [https://books.google.com.ua/books?id=II XeCwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Stepped-frequency+radar+sensors&hl=ru&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Stepped-frequency%20radar%20sensors&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=II XeCwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Stepped-frequency+radar+sensors&hl=ru&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Stepped-frequency%20radar%20sensors&f=false)

9. *Van Trees Harry L.* Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part 1: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory. – USA, John Wiley and Inc, 2001. – 690 p.

10. *Weiss J.M.* Continuous-Wave Stepped-Frequency Radar for Target Ranging and Motion Detection. – Available at: [http://micsymposium.org/mics\\_2009\\_proceedings/mics2009\\_submission\\_64.pdf](http://micsymposium.org/mics_2009_proceedings/mics2009_submission_64.pdf)

Надійшла 03.05.2017  
Остаточний варіант 14.07.2017