

УДК 681.518

Мирослава Яворська, к.т.н., доц., Ігор Зелінський, к.ф.-м.н., доц., Михайло Паламар, д.т.н., проф., Тарас Горин

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

### ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНІ РЕФЛЕКТОРА АНТЕНИ

Досліджується точність модифікованого методу оптичної триангуляції для контролю поверхні рефлектора параболічної антени. Дано оцінки до вимог до точності вимірюваного обладнання при реалізації запропонованого варіанту методу оптичної триангуляції із змінною вимірювальною базою.

Ключові слова. Оптична триангуляція, оптичний пристрій, дистанційні вимірювання.

### Igor Zelinskyi, Mykhaylo Palamar, Myroslava Yavorska, Taras Horyn THE ACCURACY ESTIMATION OF THE OPTICAL DEVICE FOR THE ANTENNA SURFACE MEASUREMENT

The accuracy of the modified optical triangulation method for the parabolic reflector measurement is studied. The estimates to the requirements for the accuracy of the measured equipment are given.

Keywords. Optical triangulation, optical device, remote measurement.

Досліджено точність модифікованого методу дистанційного вимірювання просторових координат за допомогою оптичної системи, представленої на рис.1б).

В основу запропонованого методу покладено принцип оптичної триангуляції [1,3], (рис. 1 а).

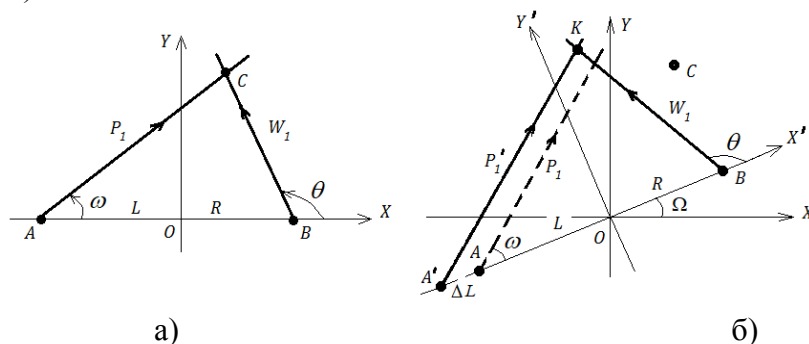


Рис. 1. Схеми вимірювань координат поверхні методом оптичної триангуляції (а) та методом оптичної триангуляції із змінною вимірювальною базою (б).

На похибки обчислення координат віддалених позицій впливають похибки виставлення безпосередньо вимірюваних параметрів. У випадку на рисю 1а) – кутів  $\omega$ ,  $\theta$ , оскільки робочі формули перерахунку координат мають наступний вигляд:

$$x = \frac{R + L \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{ctg} \theta}{1 - \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{ctg} \theta}, \quad (1)$$

$$y = \frac{R + L}{\operatorname{ctg} \omega - \operatorname{ctg} \theta}. \quad (2)$$

З врахуванням співвідношень (1) і (2) і за умови що  $\Delta\omega = \Delta\theta$  можна показати, що загальне відхилення від вимірної позиції, спричинене похибками обладнання, становитиме:

$$\Delta_r = \sqrt{|\Delta x|^2 + |\Delta y|^2} = \frac{R+L}{\sin^2(\theta-\omega)} \Delta\omega. \quad (3)$$

де  $\Delta\omega, \Delta\theta$  - гранично допустимі похибки експериментального обладнання у фіксуванні кутів  $\omega, \theta$ .

Тобто вимога дотримання допустимої похибки у визначенні просторового положення точки в межах  $\sim \pm 0.3$  мм передбачає можливість реєстрації кутових переміщень на вимірювальному обладнанні з точністю

$$\Delta\omega \leq 0.0003 \frac{\sin^2(\theta-\omega)}{R+L} (rad),$$

а за оцінкою зверху, наприклад, для  $R=300$ мм,  $L=700$  мм,  $\Delta\omega \leq \frac{0.0003}{R+L} (rad) = 1.03''$

Якщо ж вимоги до точності вимірювань знижені до  $\sim \pm 0.5$  мм, похибки виставлення кутів  $\omega, \theta$  не повинні перевищувати  $1.72''$ .

Отже, згідно з проведеними оцінками, реалізація методу оптичної триангуляції за схемою на рис. 1а) для контролю поверхні дзеркала антени потребує застосування високоточного та очевидно дорогого за собівартістю обладнання.

В запропонованому варіанті методу оптичної триангуляції [2], вимірбвальна схема якого показана на рис. 1б), значення кутів  $\omega, \theta$  утримуються постійними під час вимірювань, а фіксування пучків  $P_I$  та  $W_I$  на вимірюваній позиції, наприклад в точці К, досягають шляхом повороту вимірювальної бази  $AB$  на кут  $\Omega$  та зміни вимірювальної бази на величину  $\Delta L$ .

Координати точок поверхні в системі координат приладу в такому випадку знаходимо за співвідношеннями (4), (5):

$$x = \frac{R+(L \pm \Delta L) \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{ctg} \theta}{1 - \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{ctg} \theta} \cdot \cos \Omega - \frac{R+L \pm \Delta L}{\operatorname{ctg} \omega - \operatorname{ctg} \theta} \cdot \sin \Omega, \quad (4)$$

$$y = \frac{R+(L \pm \Delta L) \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{ctg} \theta}{1 - \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{ctg} \theta} \cdot \sin \Omega + \frac{R+L \pm \Delta L}{\operatorname{ctg} \omega - \operatorname{ctg} \theta} \cdot \cos \Omega, \quad (5)$$

а похибки в обчисленні координат  $\Delta x, \Delta y$  - за співвідношеннями (6), (7):

$$|\Delta x| \leq \left| \frac{\partial x}{\partial L} \right| \cdot \Delta L + \left| \frac{\partial x}{\partial \Omega} \right| \cdot \Delta \Omega, \quad |\Delta y| \leq \left| \frac{\partial y}{\partial L} \right| \cdot \Delta L + \left| \frac{\partial y}{\partial \Omega} \right| \cdot \Delta \Omega. \quad (6)$$

$$\Delta_r = \sqrt{|\Delta x|^2 + |\Delta y|^2} = \frac{R+L}{\sin^2(\theta-\omega)} \Delta\omega \quad (7)$$

Приймаючи до уваги інсталювані у досліджуваному пристрої значення :  $R=300\text{мм}$ ,  $L=700\text{ мм}$ ,  $\omega=1.22\text{rad}$ ,  $\theta=1.57\text{ rad}$ , , співвідношення (6) і (7) можемо представити у вигляді:

$$x = 0.3 \cos \Omega - 2.75(1 + \Delta L) \sin \Omega,$$

$$y = 0.3 \sin \Omega + 2.75(1 + \Delta L) \cos \Omega.$$

Звідси

$$|\Delta x| \leq (2.75 \sin \Omega) \Delta_{\Delta L} + C(\Delta L) \sin(\Omega + \Theta) \Delta \Omega,$$

$$|\Delta y| \leq (2.75 \cos \Omega) \Delta_{\Delta L} + C(\Delta L) \cos(\Omega + \Theta) \Delta \Omega,$$

$$C(\Delta L) = \sqrt{7.49 + 5.54 \Delta L + \Delta L^2}, \quad \Theta = a \tan \frac{0.3}{2.75(1 + \Delta L)},$$

тобто відхилення вимірюваної позиції від результату вимірювання не перевищуватиме

$$|\Delta r| \leq \sqrt{|\Delta x|^2 + |\Delta y|^2} = \sqrt{7.56 \Delta_{\Delta L}^2 + C(\Delta L)^2 \Delta \Omega^2 + 5.5 C(\Delta L) \cos \Theta \Delta_{\Delta L} \Delta \Omega},$$

або

$$|\Delta r| \leq \sqrt{7.56 \Delta_{\Delta L}^2 + C(\Delta L)^2 \Delta \Omega^2 + 15.13(1 + \Delta L) \Delta_{\Delta L} \Delta \Omega} \quad (8)$$

Отже,кщо допустима похибка визначення координат точки становить  $\pm 0.3\text{ мм}$ , то гранично допустимі помилки фіксування довжини бази  $\Delta_{\Delta L}$  і кута повороту  $\Delta \Omega$  повинні задовільняти нерівність

$$\sqrt{7.56 \Delta_{\Delta L}^2 + C(\Delta L)^2 \Delta \Omega^2 + 15.13(1 + \Delta L) \Delta_{\Delta L} \Delta \Omega} \leq 0.0003. \quad (9)$$

Слід зауважити, що, на відміну від (5), у нашому випадку похибка в робочому діапазоні зміни вимірюваних величин  $\Omega, \Delta L$  практично не залежить від їх значень. Оскільки область зміни  $\Delta L$  знаходиться в межах кількох міліметрів, що становить тисячні частки від загальної довжини бази, для наближеної оцінки передбачуваних відхилень можемо використовувати співвідношення

$$\sqrt{7.56 \Delta_{\Delta L}^2 + 2.74 \Delta \Omega^2 + 15.13 \Delta_{\Delta L} \Delta \Omega} \leq 0.0003 \quad (10)$$

На рис.2 приведено залежність похибки вимірювання від точності визначення лінійного (0.05мм – 0.12мм) та кутового (1'' - 9'') переміщення бази. Заштриховано область зміни  $\Delta \Omega$  і  $\Delta_{\Delta L}$ , для якої похибка вимірювання не перевищує 0.3мм. Якщо

допустима похибка визначення координат  $\sim \pm 0.5$  мм, вимоги до похибок визначення довжини бази зменшуються і складають  $\sim 0.2$  мм, а вимоги до кута повороту  $\sim 7''$ .

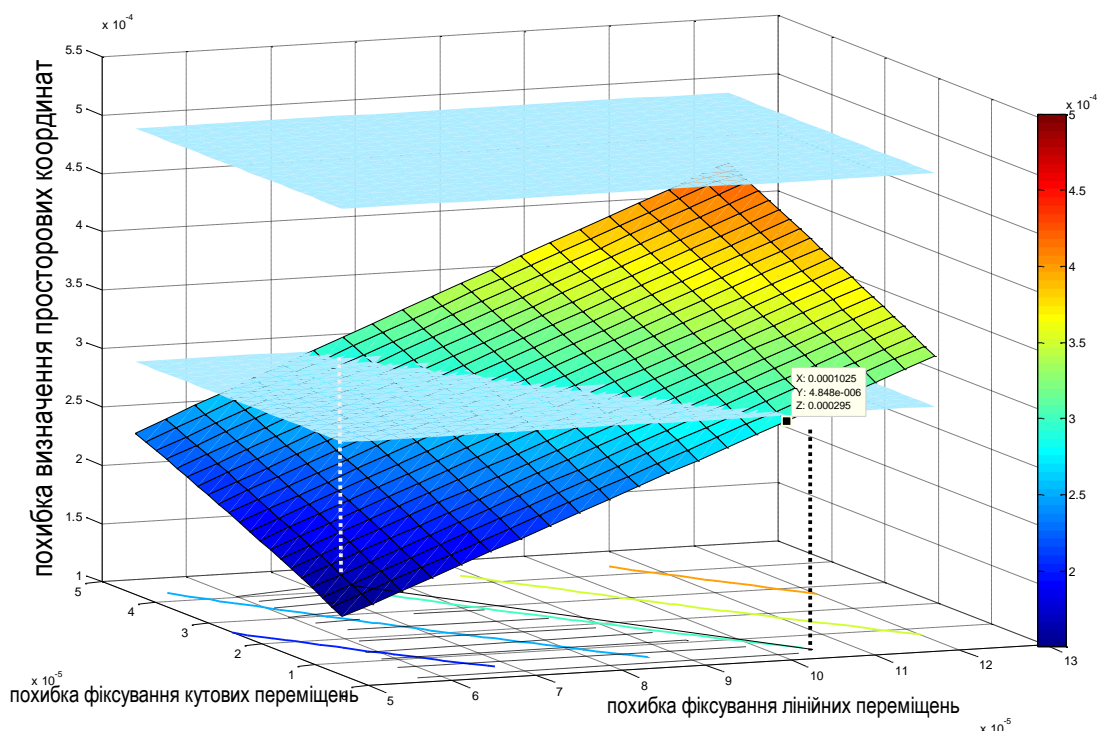


Рис. 2. Залежність похибки вимірювання від точності фіксування лінійних і кутових переміщень.

Як бачимо, точнісні оцінки обох варіантів вимірювання показують, що запропонований метод оптичної триангуляції із змінною базою дозволяє використовувати обладнання із меншими вимогами до точності фіксування кутових переміщень. Причому половина операцій вимірювання кутових переміщень замінена вимірюваннями зміни довжини бази, а контроль лінійного переміщення з точністю  $\sim (0,1 - 0,2)$  мм технічно нескладний.

### Література

1. Axel Donges, Reinhard Noll. Laser Measurement Technology. Fundamental and Applications. ISBN: 978-3-662-43633-2.
2. Palamar M., Zelinsky I., Yavorska M. The device for remote measurements of parameters of antenna reflectors // Вимірювальна техніка та метрологія. - 2015. - №76.
3. Бемянский П.В., Терехова Г.А. Методы измерения профиля отражающей поверхности больших наземных и космических антенн // Зарубежная радиоэлектроника. - №2. - 1985. - С.68-84.