

УДК 621.326

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

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МЕТОД ОПТИЧНОЇ ТРІАНГУЛЯЦІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ФОРМИ ДЗЕРКАЛА АНТЕНИ

Аналізуються метрологічні можливості модифікованого методу оптичної тріангуляції (метод трикутника) для дослідження форми поверхні дзеркала антени.

Ключові слова: оптична тріангуляція, лазер, оптичний прилад, дзеркальна антена.

Igor Zelinskyi, Mykhaylo Palamar, Myroslava Yavorska OPTICAL TRIANGULATION METHOD FOR CONTROLLING THE SHAPE OF THE ANTENNA MIRROR

The possibilities of the modified method of optical triangulation (triangle method) for studying the shape of the antenna mirror are analyzed.

Keywords: optical triangulation, laser, optical device, mirror antenna.

Електричні характеристики дзеркальних антен визначаються в значній мірі відповідністю форми поверхні дзеркала до теоретично розрахованої. Так, при створенні великих антен космічного радіозв'язку (діаметр дзеркала антен 3 – 20 метрів) допустимі відхилення поверхні дзеркала від теоретичної обмежені рівнем $\sim \pm 0.3$ мм [1].

Сучасні методи контролю дзеркала антен діляться на контактні та безконтактні. Контактні методи ґрунтуються на використанні механічних шаблонів та мікрометричних вимірювальних засобів. Їх основними недоліками являються низькі точність та швидкодія, що обмежує їх практичне використання.

Безконтактні оптичні методи контролю поверхні позбавлені цих недоліків, однак, потребують дорогої апаратури та високоточних механічних вузлів. Тому, розробка вимірювальних пристроїв, які поєднують в собі переваги дистанційного принципу вимірювання та невисоку собівартість лишається актуальною.

Для проведення вимірювань форми дзеркала антени пропонується метод оптичної тріангуляції із змінною вимірювальною базою. За основу береться відомий метод оптичної тріангуляції (метод трикутника) [2] із постійною вимірювальною базою, рис.1 а).

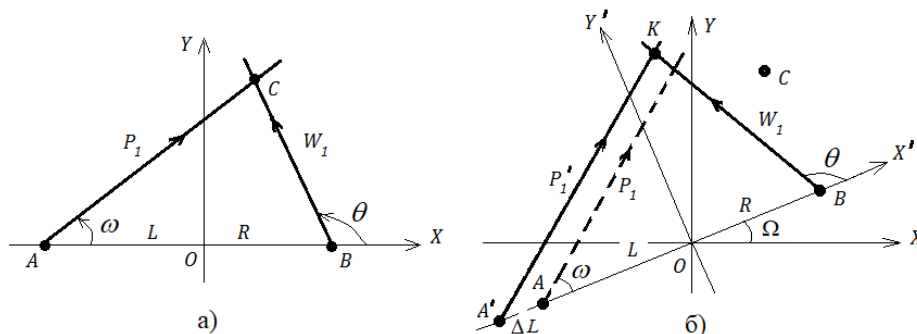


Рис. 1. Схеми вимірювань координат поверхні в методі оптичної тріангуляції (а) та в методі оптичної тріангуляції із змінною вимірювальною базою (б).

Згідно даного методу, для координатних вимірювань поверхні створюють два вузьких світлових пучки P_1, W_1 , що виходять під кутами ω, θ із кінців деякої вимірювальної бази $AB = R + L$ і перетинаються в контрольованій точці поверхні дзеркала, наприклад, в точці C .

Для аналізу методу користуємось його двомірним варіантом, коли точки $A, B,$

C лежать в одній площині XOY .

Нескладно довести, що координатам точки C відповідають наступні вирази:

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

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

Як результат похибок вимірювання кутів ω, θ виникають похибки обрахування координат $\Delta x, \Delta y$. Для їх оцінки використовують відповідні диференціали. У такому разі, граничні значення похибок $\Delta x, \Delta y$ задовольняють нерівностям:

$$|\Delta x| \leq \left| \frac{\partial x}{\partial \omega} \right| \cdot \Delta \omega + \left| \frac{\partial x}{\partial \theta} \right| \cdot \Delta \theta, \quad (3)$$

$$|\Delta y| \leq \left| \frac{\partial y}{\partial \omega} \right| \cdot \Delta \omega + \left| \frac{\partial y}{\partial \theta} \right| \cdot \Delta \theta, \quad (4)$$

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

Оцінимо гранично допустимі похибки вимірювань кутів ω, θ для певної геометрії експерименту. Нехай $R = 300$ мм, $L = 700$ мм, $\theta = 90^\circ$, $\omega = 70^\circ$. Якщо допустимі похибки визначення координат $\Delta x, \Delta y$ складають $\sim \pm 0.3$ мм, то користуючись виразами (1-4) та враховуючи, що $\Delta \omega \approx \Delta \theta$ отримуємо, що похибки $\Delta \omega, \Delta \theta$ не повинні перевершувати $1,1''$. У разі зменшення вимог до точності вимірювань координат до величини $\sim \pm 0.5$ мм, похибки визначення кутів ω, θ не повинні перевищувати $1,8''$. Таким чином, аналіз методу оптичної триангуляції з постійною вимірювальною базою показує, що контроль точності форми дзеркала антени вимагає застосування високоточного та очевидно дорогого за собівартістю обладнання.

В доповіді аналізується варіант методу оптичної триангуляції у якого значення кутів ω, θ залишаються постійними на протязі координатних вимірювань, а перетин пучків P_1 та W_1 в контрольованих точках, наприклад, в точці K , рис. 1 б), досягають шляхом повороту вимірювальної бази AB на кут Ω та зміни вимірювальної бази на величину ΔL .

У даному разі координати точок поверхні в системі координат XOY будуть визначатись згідно виразів:

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

$$y = \frac{R + (L \pm \Delta L) \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{ctg} \theta}{1 - \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{ctg} \theta} \cdot \sin \Omega + \frac{R + L \pm \Delta L}{\operatorname{ctg} \omega - \operatorname{ctg} \theta} \cdot \cos \Omega. \quad (6)$$

Граничні похибки $\Delta x, \Delta y$ в обрахунках координат x, y , як результат похибок вимірювань величин L, Ω , задовольняють нерівностям:

$$|\Delta x| \leq \left| \frac{\partial x}{\partial L} \right| \cdot \Delta L + \left| \frac{\partial x}{\partial \Omega} \right| \cdot \Delta \Omega \quad , \quad (7)$$

$$|\Delta y| \leq \left| \frac{\partial y}{\partial L} \right| \cdot \Delta L + \left| \frac{\partial y}{\partial \Omega} \right| \cdot \Delta \Omega \quad . \quad (8)$$

Користуючись виразами (5 – 8), та беручи до уваги геометрію експерименту, аналогічну до попереднього випадку, отримуємо вимоги щодо точності визначення довжини бази вимірювання $R + L \pm \Delta L$ та кута повороту Ω . Якщо допустимі помилки обрахування координат точок складають ± 0.3 мм, то гранично допустимі помилки визначення довжини бази вимірювань складають ~ 0.1 мм, а для кута Ω повороту $\sim 5''$. У разі допустимої помилки визначення координат $\sim \pm 0.5$ мм, вимоги до похибок визначення довжини бази зменшуються і складають ~ 0.2 мм, а вимоги до кута повороту $\sim 7''$.

Таким чином, аналіз та кількісні оцінки обох варіантів методу показують, що метод оптичної триангуляції із змінною базою вимірювань у декілька разів знижує вимоги до точності кутових вимірювань порівняно із методом з постійною вимірювальною базою. Також зменшується і кількість кутових вимірювань за рахунок вимірювань зміни довжини бази, а контроль довжини з точністю $\sim (0,1 - 0,2)$ мм технічно нескладний.

На основі розробленого методу спроектовано макет оптичного пристрою та проведено експериментальне дослідження поверхонь різної форми. Зовнішній вигляд оптичного пристрою показано на рис.2.

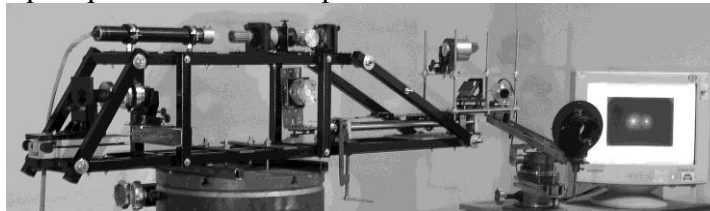


Рис. 2. Зовнішній вигляд діючого макету оптичного пристрою. На рис.3 а,б) наведено картини плоскої та параболічної поверхні, отримані

як

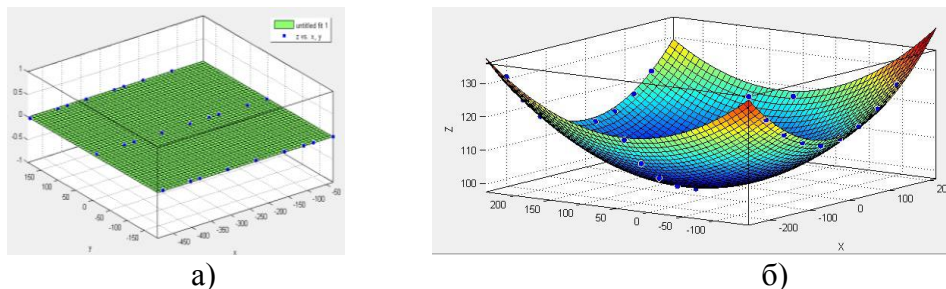


Рис. 3. Графіки $z = f(x, y)$ для плоскої (а) та параболічної (б) поверхонь

Результат апроксимації множини експериментально визначених координат точок для обох поверхонь. Відхилення поверхонь від теоретично заданих складає величину $\sim \pm 0,5$ мм.

Література

1. Поляк В.С. Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов: Опыт создания, проблемы анализа и синтеза / В.С. Поляк, Є.Я. Бервалдс. - Рига: Зинатне, 1990. - 526 с.
2. Palamar M., Zelinsky I., Yavorska M. The device for remote measurements of parameters of antenna reflectors. Вимірювальна техніка та метрологія, №76, 2015.