УДК.621.396

І.Зелінський, канд.фіз.-мат.наук; А.Рудник, канд.техн.наук
Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

СХЕМА ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМИ ДЗЕРКАЛА АНТЕНИ

Розглянуто принципову схему оптичної системи для створення множини світлових марок на поверхні дзеркала антени, їх спостереження та визначення координат. Система дозволяє збільшити точність визначення координат поверхні за рахунок зменшення числа настроювань та юстувань оптики.

Ефективність використання дзеркальних антен для цілей радіозв'язку, - астрономії, локації і т.п. - визначається їх електричними характеристиками (діаграмою направленості, коефіцієнтами направленої дії, підсилення і т.д.). В значній мірі ці характеристики залежать від відповідності форми поверхні дзеркала до теоретичної .

Дзеркала великих наземних антен, діаметром 5, 7, 12 метрів і більше складають з окремих елементів (щитів), що розміщують концентричними поясами навколо осі дзеркала, а кутові точки щитів закріплюють так, що їх можливо пересувати в процесі юстування дзеркала. У разі відхилення форми дзеркала від теоретичної порушується синфазність хвильового фронту в розкриві та, як наслідок, погіршуються електричні характеристики антени. Величина допуску $\Delta\rho$ на відхилення форми дзеркала від теоретичної залежить від довжини радіохвилі, на якій працює антена [1]:

$$\Delta\rho \le \lambda / 16(1 + \cos\theta), \qquad (1)$$

де λ – довжина радіохвилі; θ –кут між віссю дзеркала та нормаллю до вибраної точки поверхні. Із виразу (1) випливає, що вимоги відповідності поверхні дзеркала до теоретично розрахованої зростають із зменшенням довжини випромінюваних радіохвиль.

При зборі поверхню дзеркала контролюють за допомогою контактних або безконтактних методів і систем [2–7]. Високоточними та ефективними засобами контролю є серед них оптичні методи та установки [5-7]. Контроль форми дзеркала оптичними методами означає вимірювання відстаней від точок поверхні дзеркала до його геометричної осі. Отримані дані перераховують у відхилення від теоретичного профілю дзеркала та застосовують при юстуванні поверхні.

Для визначення відстані від точки поверхні дзеркала до його осі застосовують метод, згідно з яким із кінців базового відрізка проектують у точку поверхні дві світлові марки. Визначивши значення даного відрізка, його положення відносно осі дзеркала та кута, під яким пучки перетинаються у вибраній точці, отримують координати поверхні в даній точці .

Недоліком відомих оптичних систем є потреба багаторазової зміни настроювання системи в процесі вимірювань, а саме: зміни напрямків пучків, що проектують зображення марок в різні точки поверхні, та зміни фокусування оптичної системи з метою отримання чіткого зображення марок. Очевидно, що збільшення числа настроювань системи знижує точність вимірювань та збільшує витрати часу.

Пропонується схема оптичної системи, що в певній мірі позбавлена вказаних недоліків, рис.1. Схема складається із трьох функціонально залежних частин.

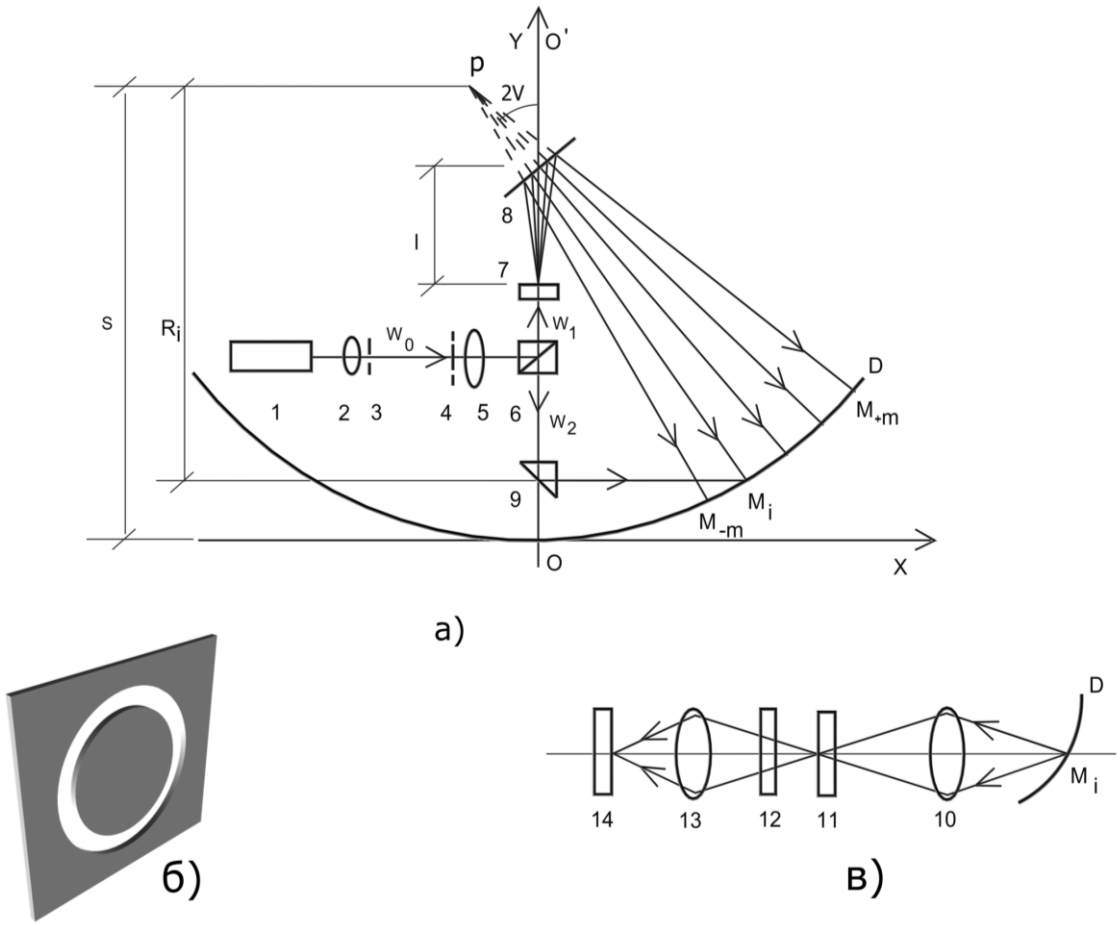


Рисунок 1 - Схема оптичної системи для формування світлових марок і визначення координат точок дзеркала - а), зовнішній вигляд кільцевої діафрагми - б) та схема системи спостереження - в). а) 1 – лазер; 2 – мікрооб'єктив; 3,4 – діафрагми; 5 – фокусуючий об'єктив; 6 – призма-куб із дзеркальною стороною; 7 – дифракційна решітка; 8 – плоске дзеркало; 9 – прямокутна призма; D – меридіональне січення дзеркала антени; W_0 , W_1 , W_2 - лазерні пучки; OO′ - вісь дзеркала; I – відстань від решітки до плоского дзеркала поздовж осі OO′; R – база оптичної системи (відстань між зображенням в дзеркалі 8 точки перетину робочої поверхні решітки віссю OO′, т.P, та точкою перетину віссю OO′ робочої грані прямокутної призми); S – відстань від вершини параболічного дзеркала, т.O, до зображення точки перетину решітки віссю OO′ в дзеркалі 8; 2V - кут між віссю OO′ та її зображенням в дзеркалі 8; M_{-m} , M_i, M_m - світлові марки на поверхні дзеркала; XOY – прямокутна система координат. в) 10,13 – фотографічні об'єктиви; 11 – оптична сітка (перехрестя); 12 – оптичний фільтр; 14 – площина спостереження зображення марок (екран)

Перша частина, оптичні елементи 1-5, служить для формування світлової марки. Друга частина, елементи 6-9 - для створення множини світлових марок на поверхні дзеркала D та визначення їх координат. Третя частина, елементи 10-14 - для візуального спостереження за процесом суміщення марок.

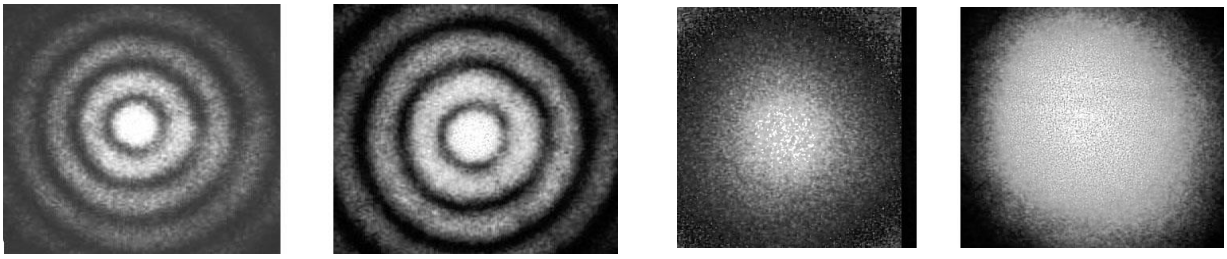
В якості світлової марки використовується картина дифракції на діафрагмі у вигляді кільця. Зовнішній вигляд діафрагми наведено на рис.1б. Для утворення марки застосовується когерентне джерело світла 1, наприклад, He-Ne лазер типу ЛГН-260 з довжиною хвилі випромінення 0,63 мкм. Вузький пучок світла W_0 розширюється мікрооб'єктивом 2, фільтрується від дифракційних шумів мікродіафрагмою 3, падає на кільцеву апертурну діафрагму 4 та фокусується об'єктивом 5 на дослідній поверхні. Утворена вісесиметрична дифракційна картина, рис.2а, служить в якості світлової марки (центральний максимум дифракції).

Відомо [8], що ширина центрального максимума дифракції світла на діафрагмі у вигляді кільця є суттєво меншою, ніж при дифракції на круглому отворі такого ж

діаметру (приблизно на 30 %) . Тому, встановлення перед фокусуючим об'єктивом 5 кільцевої діафрагми 4 дозволяє отримати меншу ширину марки, ніж без діафрагми і, в кінцевому результаті, збільшити точність візуального суміщення відповідних пар марок на етапі вимірювань.

Важливо також, що ширина центрального максимума марки зберігається практично однаковою в значному інтервалі відстаней по обидва боки від точки фокусування пучка W_0. Її ширина залежить від параметрів діафрагми 4 (радіуса і ширини кільця) та фокусної відстані об'єктива 5 і може регулюватись.

Зроблені висновки підтверджуються експериментально. На рис.2 а,б) зображені марки, що відповідають картинам дифракції пучка W_0 на кільцевій діафрагмі 4 на відстані 10 і 70 см від точки фокусування, по ходу пучка. Радіус зовнішнього кільця діафрагми складав 6 мм, ширина кільця - 1 мм, фокусна відстань об'єктива 5-300 мм. Із рисунків видно, що ширина обох центральних максимумів майже однакова і складає величину ~0,3 мм на відстані 3 м від об'єктива 5. Для порівняння наведені картини дифракції на круглій діафрагмі діаметром 6 мм, рис.2 в,г) , встановленій на місці діафрагми 4. Картини отримані на тих же відстанях від площини фокусування пучка, що і на рис.2 а,б). Очевидно, що розміри марок в даному випадку суттєво більші (~2 і 5 мм, відповідно), ніж при використанні кільцевої діафрагми. Використання картини дифракції на круглому отворі в якості світлової марки, як це робиться, наприклад, в [6], потребує додаткового фокусування оптичної системи при направленні її на різновіддалені від джерела точки дослідної поверхні. Картини на рис.2 зведені до одного масштабу.



а) б) в) г)

Рисунок 2 - Зображення світлових марок на відстані 10 і 70 см від точки фокусування по ходу пучка , відповідно, при застосуванні кільцевої - а,б) та круглої - в,г) апертурної діафрагми

Таким чином, застосування кільцевої діафрагми 4 в системі 1-5 дозволяє отримати світлову марку, яка не потребує додаткового фокусування системи при проектуванні марки в точки поверхні, відстань до яких різна.

З метою формування множини марок M_{-m} ,…,M_{+m} в різних точках січення поверхні дзеркала D проводиться мультиплікація створеної марки. Для цього застосовується дифракційна решітка 7 та плоске дзеркало 8. Пучок W_0 ділиться призмою-куб 6 (з нанесеним дзеркальним покриттям на поверхоню, протилежну падаючому пучку) на два співпадаючих з віссю OO′ пучки W_1 і W_2. Один із них, пучок W_1, падає по нормалі до поверхні решітки 7 та дифрагує в площині рисунка на ряд дискретно направлених пучків. Кути між пучками φ_i визначаються із формули дифракційної решітки [9]:

$$\varphi_i = \arcsin i\lambda\nu , \qquad (2)$$

де i = 0, ±1 , ±2 , …, ±m – порядок дифракції; ν - частота штрихів решітки. Дифраговані пучки спрямовуються дзеркалом 8 на контрольовану поверхню D під фіксованими кутами $2V+\varphi_i$ (2V – кут між віссю OO′ та нормаллю до дзеркала 8). При необхідності зміни на поверхні дзеркала взаємного положення марок проводиться заміна решітки 7

на решітку з відповідно іншою частотою штрихів або поворот дзеркала 8 у площині падіння на певний кут.

Слід зауважити, що максимальна величина кутів між пучками та кількість утворених ними марок обмежуються аберaціями пучків, що зростають із збільшенням частоти решітки та порядка дифракції. Так, збільшення астигматизму пучка приводить до порушення осьової симетрії марок та неможливості проведення вимірювань. На практиці застосовувалась решітка з частотою 100 лін./мм, а кількість пучків обмежувалась 0, ±1, ±2 та ±3 - ми порядками дифракції

Для подальшого визначення координат будь-якої із марок $M_{-m},\ldots,M_{+m,}$ наприклад, марки M_i (X_i ,$У_i$), пучок W_2 під прямим кутом до вісі OO′ направляється на зображення даної марки. Для цього застосовується прямокутна призма 9, що має можливість переміщення поздовж осі OO′. Після суміщення центральних максимумів відповідних марок реєструється значення вимірювальної бази R_i (відстань між зображенням у дзеркалі 8 точки перетину віссю OO′ робочої поверхні решітки, т.Р, та точкою перетину робочої поверхні призми 9). Легко показати, що координати марки M_i (X_i,$У_i$) на поверхні дзеркала будуть такими :

$$M_i (X_i, У_i) = M_i [R_i \operatorname{tg} (\arcsin i\lambda\nu) – l \sin 2V, S – R_i], \qquad (3)$$

де i – порядковий номер марки (рівний порядку дифракції); l – відстань від решітки 7 до дзеркала 8 поздовж осі OO ′; S - відстань від вершини дзеркала, т.О, до зображення в дзеркалі 8 точки перетину віссю OO′ робочої поверхні решітки, т.Р.

Таким чином, із виразу (3) випливає, що для отримання координат марок M_{-m} ,…,$M_{+m,}$ а одночасно і координат самої поверхні дзеркала, достатньо мати значення відповідних вимірювальних баз $R_{i.}$ Решта членів виразу є незмінними в процесі контролю дзеркала , а їх значення задаються перед початком вимірювань.

Схема оптичної системи для візуального спостереження за процесом суміщення рухомої марки пучка W_2 з множиною нерухомих марок M_{-m} ,..., M_{+m} наведена на рис.1 б). Фотографічний об’єктив 10 типу И-51 формує зображення однієї з нерухомих марок M_i в площині оптичної сітки (перехрестя) 11. При цьому систему 10 –14 орієнтують в просторі так, що центр перехрестя співпадає з серединою головного максимума марки. Оптичний фільтр 12 виділяє зображення марки на фоні розсіяного стороннього світла, а мікрооб’єктив 13 формує зображення марки з необхідним збільшенням у площині екрану 14. Контроль за суміщенням рухомої марки пучка W_2 з центром перехрестя сітки 11 проводиться при переміщенні призми 9 поздовж осі OO′.

Особливість спостереження марок на розсіюючій поверхні дзеркала антени полягає у наявності спекл-структури (зернистості) зображень, що ускладнює визначення середини головного максимума марок та понижує точність вимірювань. Величина спеклів σ в площині зображення [10] :

$$\sigma = 2{,}44 \lambda (\beta + 1) f / d, \qquad (4)$$

β - лінійне збільшення системи спостереження; f - фокусна відстань системи; d – діаметр вхідного зрачка. Для зменшення розмірів спеклів необхідно, як випливає із виразу (1), застосовувати оптичну систему з якомога меншим значенням f/d; також бажано розмістити систему спостереження на можливо меншій відстані від зображення марок.

Для проведення контролю форми дзеркала в інших меридіональних січеннях оптичні елементи 7-9 повертають навколо осі OO′ на відповідний кут та повторюють вимірювання.

Висновки

Картина дифракції на діафрагмі у формі кільця дозволяє сформувати світлову марку, яка, при направленні її у різновіддалені точки дзеркала антен не потребує додаткового фокусування оптичної системи.

Мультиплікація світлової марки за допомогою дифракційної решітки дозволяє отримати в січенні дзеркала антени множину марок, необхідну для визначення координат поверхні в даному січенні.

Розглянута схема оптичної системи дає можливість проведення контролю поверхні дзеркала антени шляхом вимірювань, відповідних маркам M_{-m} ,…,M_{+m}, базових відстаней R_i.

Наведена схема оптичної системи дозволяє збільшити точність вимірювань форми дзеркала та зменшити витрати часу за рахунок зменшення числа настроювань оптико-механічних вузлів у процесі досліджень.

Principle scheme of the optical system is considered for forming the set of the light marks on surface of the mirror antenna, their observation and determination of the coordinates. System allows to enlarge accuracy of the determination the form of mirror antenna to account of the reduction of the number of the adjustment optical elements.

Література

1. Белянский П.В., Терехова Г.А. Методы измерения отклонений профиля отражающей поверхности больших наземных и космических антенн. // Зарубежная радиоелектроника. – N 2, 1985. - С. 68-84.
2. Беляев В.П. Некоторые применения лазеров. – М.: Машиностроение, 1970.
3. Jacobs E., King H.E., - In: IEE Conf. on Design and Construction of Large Steerable Aerials, London, 1966. p. 218.
4. Schonbach W. – M.A.N. Forschungsheft, v. 14, 1969.
5. Земсков Г.Г., Семко И.А. Лазерное устройство для измерения линейных размеров //Зарубежная электроника. –N 4,1984. -С.48-53.
6. А.с. № 1682766 [СССР]. Способ бесконтактного измерения расстояний. Авт. изобр. Рудник А.Г. и др. – Заявл.05.09.1988. МКИ G 01 B 11/02.
7. Деклараційний патент №31486. Пристрій для вимірювання відхилень форми та розташування формоутворюючих поверхонь антенних дзеркал. Сиротюк В.В., Пастернак Б.М., Петруша В.О. та інші.- Заявл.15.09.1998.
8. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. –М.: Мир, 1971. - 495 с.
9. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. - 926 с.
10. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. – М.: Наука, 1985. - 221 с.

Одержано 24.11.2005 р.