

УДК 681.7

PACS number: 07.60-j

Д. Л. ЧЕЧЕТКИН, И. П. БЕЛЯНКИН, В. В. СИЛИН,  
С. И. СЛАВГОРОДСКИЙ, В. М. ШУЛЬГАРадиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Искусств, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: chechotkin@rian.kharkov.ua, shulga@rian.kharkov.ua

## ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕНН МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ АСТРОНОМИИ

Предмет и цель работы: разработка датчика для бесконтактного измерения и построения профиля параболических поверхностей антенных систем миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с диаметром раскрытия до 2 м.

Методы и методология работы: Используется быстродействующая ПЗС матрица и фотоэлектрические преобразования перемещений для определения положения светового пятна на обмеряемой поверхности.

Результаты работы: Полученные экспериментальные данные показывают, что разработанный датчик обеспечивает точность оценки среднеквадратической ошибки для обмеряемой поверхности не хуже 15 мкм.

Заключение: Использование оптического датчика при измерениях зеркала антенны позволяет исключить возможные повреждения поверхности и необходимость контроля давления контактного датчика на измеряемую поверхность.

Ключевые слова: оптический датчик, измерение профиля, параболическая антенна, антенна субмиллиметрового диапазона

### 1. Введение

Требования к качеству изготовления параболических поверхностей для антенных систем, в том числе антенн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, определяются длиной волны, на которой предполагается проводить радиоастрономические наблюдения, и среднеквадратичным отклонением (СКО) их формы от идеального параболоида. Зависимость эффективной поверхности параболической антенны  $S$  от этих параметров представлена в работе Рузе [1], в которой приводится широко используемое на практике выражение

$$S = S_0 \exp\left(-\frac{\lambda}{4\pi\sigma}\right)^2,$$

где  $S_0$  – площадь апертуры параболической поверхности,  $\lambda$  – длина волны,  $\sigma$  – СКО поверхности.

В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах для целей современной радиоастрономии наиболее часто применяются параболоиды с диаметром от нескольких метров до нескольких десятков метров. СКО поверхности лучших из

них составляет единицы микрометров. Такая точность достигается для поверхностей из алюминевых сплавов или композитных материалов. При их изготовлении используются специальные технологии, и одним из трудно решаемых вопросов является создание контрольно-измерительной аппаратуры для контроля кривизны поверхности при изготовлении.

Для относительно небольших зеркал (диаметром до 2 метров) можно использовать промышленные координатно-измерительные машины (КИМ), которые обеспечивают точность измерения до нескольких микрометров. Их действие основано на использовании контактного датчика, который имеет механический контакт с измеряемой поверхностью [2, 3]. Для небольших деталей (размером несколько десятков сантиметров) разработаны бесконтактные датчики, использующие отражение лазерного луча от измеряемой поверхности. Точность таких измерительных устройств может быть меньше одного микрометра.

Недостатком контактных датчиков является необходимость учитывать погрешность, вносимую геометрическими размерами и формой контактного щупа (как правило, он имеет сферическую форму диаметром в несколько миллиметров). При уменьшении этого диаметра появ-

ляется погрешность, связанная с деформациями поверхности при ее контакте со щупом. Поэтому измерения надежно проводятся на относительно твердых поверхностях (например, стальных) или используется система контроля давления с помощью тензодатчиков.

Следует отметить, что высокоточные КИМ, вне зависимости от типа датчика, являются сложными в использовании устройствами, их стоимость составляет сотни тысяч долларов. Опыт применения таких КИМ при изготовлении зеркальных антенн в Украине нам не известен.

Мы разработали прототип относительно недорогого бесконтактного оптического датчика, который позволяет проводить измерения профиля криволинейных поверхностей размером от нескольких десятков сантиметров до двух метров. Основным его назначением является контроль профиля параболических антенн при их изготовлении. Поскольку мы рассматриваем антенны для наблюдений в субмиллиметровом диапазоне ( $1 \div 0.1$  мм), необходимо обеспечить точность измерений СКО не хуже

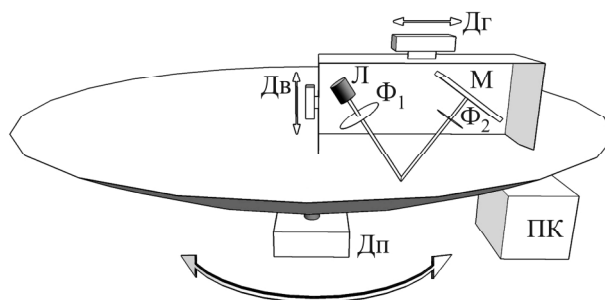
$$\sigma = \lambda_{\min} / 4\pi,$$

где  $\lambda_{\min}$  – минимальная рабочая длина волны. Для эффективного использования антенны в коротковолновой части субмиллиметрового диапазона (примерно до 300 мкм) значение СКО поверхности должно быть не хуже 20 мкм.

## 2. Особенности конструкции и использования оптического датчика

Общее конструктивное исполнение оптического датчика показано на рис. 1. Датчик установлен на специальной платформе и имеет три степени свободы. Относительно обмеряемой поверхности датчик может линейно перемещаться по горизонтали и вертикали. Третья координата измерения формируется путем поворота обмеряемого зеркала вокруг оси. Таким образом, образуется цилиндрическая система координат, в которой происходит регистрация массива точек, характеризующих профиль поверхности зеркала.

Для решения задачи высокоточной фиксации координат измеряемых точек предложено использовать линейные и угловые фотоэлектрические



**Рис. 1.** Схема использования оптического датчика при измерениях профиля поверхности антенных зеркал параболической формы: Л – полупроводниковый лазер, Ф1 – фокусирующее устройство лазера, Ф2 – фокусирующее устройство матрицы, М – ПЗС матрица, Дв – двигатель перемещения датчика по вертикали и совмещенный с ним линейный ФПП вертикали, Дг – двигатель горизонтального перемещения датчика и совмещенный с ним линейный ФПП горизонтали, Дп – двигатель и ФПП вращения зеркала, ПК – система управления и сбора данных измерений

кие преобразователи перемещений (ФПП) [3]. Они достаточно эффективно применяются в промышленных КИМ с контактными механическими датчиками и позволяют получать точность измерения линейных перемещений в несколько микрометров. В нашем случае для измерения линейных перемещений по горизонтали и вертикали использовались ФПП производства ПНВП “Микротех” серии WTB-1, которые позволяют проводить измерения линейных перемещений на расстоянии до 1000 мм с точностью до 6 мкм. Для определения угла поворота зеркала вокруг оси использовался угловой ФПП – ЛИР-158А производства СКБ ИС, который позволил фиксировать поворот зеркала с точностью до  $0.01^\circ$ .

Оптический датчик определяет заданную точку на обмеряемой поверхности, а для измерения ее координат используются ФПП. Таким образом устраняется механический контакт с поверхностью.

Для управления двигателями горизонтали и вращения зеркала, а также обеспечения автоматического режима измерений использовалось специальное программное обеспечение МАСН-3, разработанное для станков с числовым программным управлением. Для управления работой оптического датчика и двигателем вертикали была разработана специальная программа –

программа управления оптическим датчиком (ПУОД). На рис. 2 показан пример изображения на экране монитора при работе ПУОД.

Отраженный от обмеряемой поверхности луч лазера с помощью фокусирующего устройства Ф2 (см. рис. 1) фокусируется на поверхность ПЗС матрицы. Отдельная подпрограмма постоянно анализирует положение и форму отраженного пятна на поверхности ПЗС матрицы и формирует на экране монитора яркостный центр отражения лазера. Перед началом измерений яркостный центр устанавливается в середине экрана и принимается за ноль системы координат измерительной установки.

Датчик установлен таким образом, чтобы его перемещение относительно обмеряемой поверхности по горизонтали или углу (см. рис. 1) приводило к перемещению яркостного центра только по вертикали, текущее положение яркостного центра можно наблюдать на экране монитора (рис. 2).

Для управления датчиком программно сформировано четыре области. Область 1 – зона регистрации показаний ФПП. При попадании в нее яркостного центра происходит считывание показаний с ФПП, определяющих перемещения

по вертикали, горизонтали и угол поворота зеркала. Как правило, размер этой области (количество пикселей ПЗС матрицы) выбирается в зависимости от размеров измеряемых неровностей поверхности. В нашем случае размер области 1 соответствовал 2 пикселям ПЗС матрицы, или 7.6 мкм перемещения.

В областях 2, 3, 4 программно анализируется направление и значение отклонения яркостного центра от области 1 и осуществляется управление двигателем вертикали для скорейшего возвращения яркостного центра в зону регистрации.

Чем больше отклонение, тем выше скорость возврата к зоне регистрации. Для исключения случаев “проскакивания” зоны регистрации по мере приближения к ней скорость перемещения уменьшается. В процессе управления датчиком используются три скорости перемещения.

При испытаниях были использованы два типа матриц – КМОП (CMOS) матрица от вебкамеры типа РК-335, применяемой в системах охранной сигнализации, и ПЗС (CCD) матрица от камеры для астрономических наблюдений

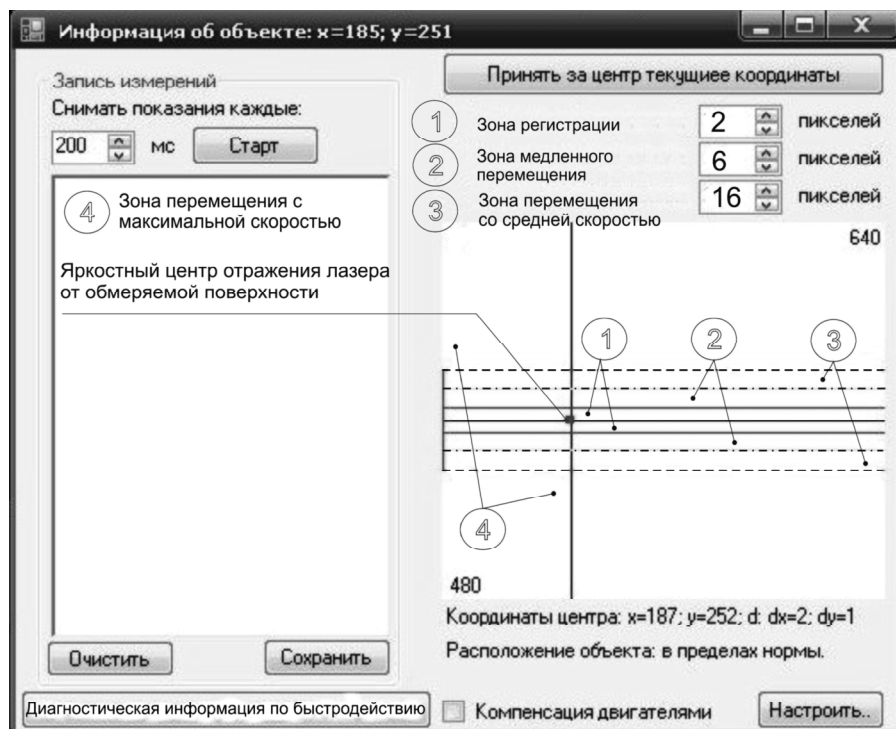


Рис. 2. Изображение на экране монитора во время работы программы управления оптическим датчиком

Lumenera LU070M. Размер матриц позволял реализовать разрешение  $640 \times 480$  пикселей и частоту анализа изображения кадров от 25 до 40 в секунду. С такой же частотой происходит подача команд управления на двигатели перемещений.

Размер ПЗС матрицы определяет поле зрения датчика, т. е. размер контролируемой поверхности. Точность измерений поверхности при помощи датчика зависит от поля зрения и числа пикселей ПЗС матрицы. В конструкции датчика предусмотрена возможность изменения поля зрения с помощью фокусирующей оптической системы Ф2 (рис. 1). Это позволяет использовать датчик при измерении поверхностей с различными размерами неровностей – при больших неровностях выбирается большее поле зрения. Соотношение между числом пикселей и значением линейного перемещения по вертикали определяется несложной калибровкой перед началом измерений.

### 3. Использование оптического датчика для измерений профилей поверхностей

Для проверки функциональности и аттестации оптического датчика были проведены испытания, в которых определялось СКО измерений для двух объектов, взятых за эталоны, – плоской и параболической поверхностей.

Для автоматизации режима регистрации измерений были написаны управляющие программы для МАСН-3 с учетом геометрии обмеряемой поверхности и необходимой дискретности получения данных.

*Плоская поверхность.* В качестве контрольной измеряемой поверхности была выбрана инструментальная лекальная линейка длиной 60 см. Согласно сертификату изделия, ее поверхность выполнена с точностью 2 мкм. Поэтому мы рассматриваем лекальную линейку как тестовую при использовании оптического датчика. Измерения проводились в автоматическом режиме с шагом перемещения вдоль линейки 5 мм. Поле зрения было выбрано таким образом, чтобы область регистрации (рис. 2) не превышала перемещения яркостного центра отражения лазера по вертикали в 2 пикселя, что

соответствует линейному перемещению по вертикали в 7.6 мкм.

На верхней панели рис. 3 приведены результаты измерения профиля части лекальной линейки длиной 500 мм ( $X$  и  $Y$  – соответственно горизонтальное и вертикальное перемещения датчика относительно обмеряемой поверхности). Прямая линия – это результат аппроксимации данных измерений методом наименьших квадратов. Наклон этой прямой определяется точностью установки лекальной линейки относительно базовой горизонтальной плоскости измерительной установки. И, как видно из рисунка, этот наклон составляет величину  $b = \operatorname{tg} \alpha = 0.000078$ .

На нижней панели показаны измеренные отклонения от плоской поверхности линейки без учета ее наклона относительно базовой горизонтальной плоскости. Полученное СКО составляет 7 мкм (рис. 3). С учетом точности изготовления лекальной линейки, найденное СКО можно рассматривать как точность измерения профиля поверхности лекальной линейки при помощи оптического датчика.

*Параболическая поверхность.* Для измерений был выбран изготовленный на станке с числовым программным управлением параболоид с диаметром апертуры 190 мм. Точность изготовления задавалась равной 20 мкм. В центральной части параболоида имелось технологичное отверстие диаметром 22 мм. Измерения профиля поверхности проведены по диаметру апертуры через  $20^\circ$ . Геометрия измерений показана на левой панели рис. 4. По данным измерений методом наименьших квадратов найдена опти-

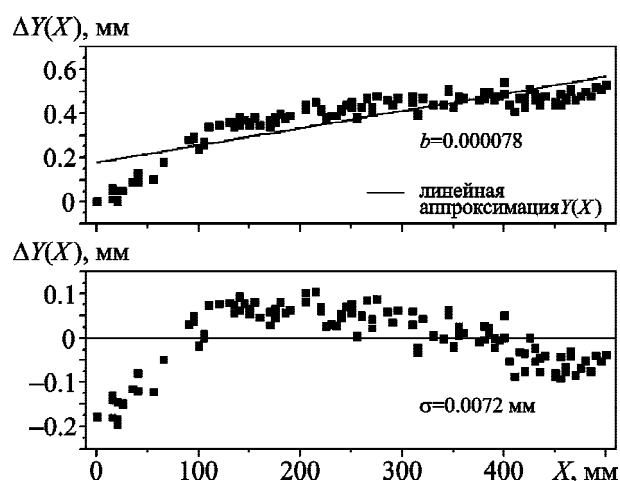


Рис. 3. Результаты обмера лекальной линейки

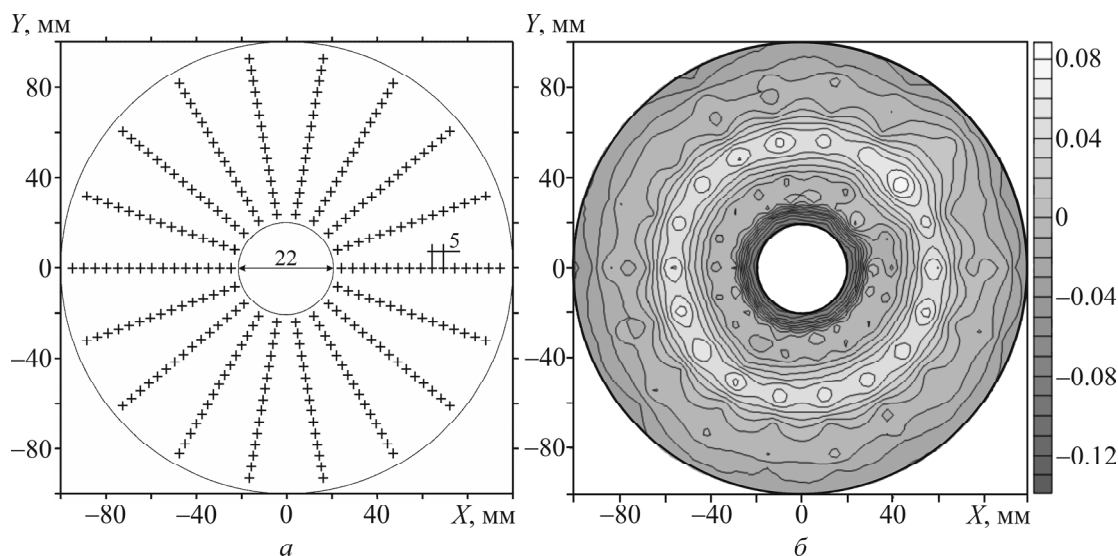


Рис. 4. Геометрия (слева) и карта размеров неровностей параболоида (справа)

мальная теоретическая параболическая поверхность. На правой панели рис. 4 приведена карта отклонений реальной поверхности от параболической. Рассчитанное СКО поверхности не превышает 20 мкм, что хорошо согласуется с предполагаемой точностью изготовления параболоида.

#### 4. Выводы

Разработанный датчик дает возможность выполнять бесконтактный обмер параболических поверхностей с точностью не хуже 15 мкм, которая определяется характеристиками использованных в составе установки ФПП, что позволяет применять датчик для контроля профиля поверхностей антенн, предназначенных для наблюдений в субмиллиметровом диапазоне, на длинах волн вплоть до 300 мкм. Повышение точности измерений возможно при использовании более точных линейных и угловых ФПП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ruze J. Antenna tolerance theory – a review // Proc. IEEE. – 1966. – Vol. 54, No. 4. – P. 633–640.
2. Пекарш А. И., Феоктистов С. И., Колыхалов Д. Г., Шпорт В. И. Координатно-измерительные машины и комплексы // Наука и технологии в промышленности. – 2011. – № 3. – С. 36–48.
3. Зубарев Ю. М., Косаревский С. В., Ревин Н. Н. Автоматизация координатных измерений. Учебное пособие. – СПб: Изд-во ПИМаш, 2011. – 160 с.

#### REFERENCES

1. RUZE, J., 1966. Antenna tolerance theory – a review. *Proc. IEEE*. vol.. 54, no. 4, pp. 633–640.
2. PEKARSH, A. I., FEOKTISTOV, S. I., KOLYKHALOV, D. G. and SHPORT, V. I., 2011. Coordinate measuring machines and complexes. *Nauka i tekhnologiya v promyshlennosti*. no. 3, pp. 36–48 (in Russian).
3. ZUBAREV, Y. M., KOSAREVSKIY, S. V. and REVIN, N. N., 2011. *Automation of coordinate measurements*. St. Petersburg: PIMash Publ. (in Russian).

*D. L. Chechetkin, I. P. Belyankin, V. V. Silin, S. I. Slavgorodskiy, and V. M. Shulga*

Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine,  
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### OPTICAL SENSOR FOR SURFACE PROFILE MONITORING OF PARABOLIC ANTENNA FOR MILLIMETER AND SUBMILLIMETER ASTRONOMY

*Purpose:* developing the sensor for non-contact measurement and profiling parabolic surfaces of antenna systems in the millimeter and submillimeter range with an aperture diameter up to 2 m.

*Design/methodology/approach:* Using a high-speed CCD and photoelectric displacement transducer for determining position of light spot on the antenna surface.

*Findings:* The experimental data show that the designed sensor provides RMS estimation accuracy for the antenna surface better than 15 microns.

*Conclusions:* Used is the optical sensor for antenna surface measurements avoids surface damage and need to control contact sensor pressure on the measured surface.

*Key words:* optical sensor, profile measurement, parabolic antenna, submillimeter antenna

Д. Л. Чечоткін, І. П. Белянкін, В. В. Сілін,  
С. І. Славгородський, В. М. Шульга

Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

#### ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПРОФІЛЯ ПОВЕРХНІ ПАРАБОЛІЧНИХ АНТЕН МІЛІМЕТРОВОЇ І СУБМІЛІМЕТРОВОЇ АСТРОНОМІЇ

*Предмет і мета роботи:* розробка датчика для безконтактного вимірювання і побудови профілю параболических поверхонь антенних систем міліметрового і субміліметрового діапазонів з діаметром розкриття до 2 м.

*Методи та методологія роботи:* Використовується швидкодіюча ПЗЗ матриця і фотоелектричні перетворювачі пе-

реміщень для визначення положення світлової плями на обмірюваній поверхні.

*Результати роботи:* Отримані експериментальні дані показують, що розроблений датчик забезпечує точність оцінки середньоквадратичної похибки для обмірюваної поверхні не гірше 15 мкм.

*Висновок:* Використання оптичного датчика при вимірах дзеркала антени дозволяє виключити можливі пошкодження поверхні і необхідність контролю тиску контактного датчика на вимірювану поверхню.

*Ключові слова:* оптичний датчик, вимірювання профілю, параболическа антена, антена субміліметрового діапазону

*Статья поступила в редакцию 01.04.2016*