

УДК 681.7.055.34

Контроль формы поверхности вторичного зеркала радиотелескопа «Миллиметрон»

Капустин А. В.^{1,*}, Лазарева Н. Л.¹,
Пуряев Д. Т.¹

[*ejingui@gmail.com](mailto:ejingui@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Предложен новый метод контроля формы поверхности вторичного зеркала из проекта радиотелескопа «Миллиметрон», которое представляет собой выпуклый гиперboloид с экстремальным сочетанием значений конструктивных параметров. Контроль формы поверхности зеркала предлагается выполнять по частям, используя в качестве вспомогательного элемента вогнутое сферическое зеркало, диаметр которого лишь в 1,4 раза превышает диаметр контролируемого гиперboloида. Центральную зону гиперboloида предложено контролировать с помощью вогнутого сферического зеркала и компенсатора его аберраций. Периферийную зону предложено контролировать используя то же самое сферическое зеркало, последовательно «накладывая» его на различные участки периферийной зоны гиперboloида.

Ключевые слова: контроль, выпуклое зеркало, гиперболическое зеркало, анаберрационные точки, интерферометр, компенсатор, зеркало Манжена

Введение

Оптические системы современных крупных телескопов в большинстве случаев строят по схеме Кассегрена. Вторичные зеркала объективов таких телескопов – выпуклые гиперboloиды. Из источников информации [1 – 9] следует, что контроль формы выпуклых гиперболических поверхностей чаще всего выполняют либо методом анаберрационных точек (используя схему Хиндла), либо методом компенсации аберраций нормалей гиперboloидов. В отдельных случаях для контроля выпуклых гиперboloидов используют линзу Физо [10], которая содержит эталонную асферическую поверхность, обращенную в сторону гиперboloида. Диаметр линзы Физо должен быть соизмерим с диаметром контролируемой поверхности. В случае, описанном в работе [10], предложено контролировать выпуклый гиперboloид диаметром более 3000 мм по частям, используя линзу Физо диаметром 1000 мм. Во всех случаях для анализа деформаций волнового фронта, отраженного от выпуклого гиперboloида, используют лазерные интерферометры.

В последние годы в России изготовлены и сданы заказчикам высокоточные выпуклые гиперболические зеркала для зарубежных оптических телескопов TTL, NOA, VST и VISTA [4, 5, 8]. В таблице 1 представлены основные конструктивные параметры гиперболических зеркал этих телескопов. Здесь использованы следующие обозначения: r_0 – вершинный радиус кривизны, K – коническая константа, $D_{\text{св}}$ – световой диаметр и D_0 – диаметр нерабочей зоны, которая располагается в центре контролируемой поверхности. Контроль формы поверхностей этих зеркал выполняли с помощью интерферометра, в измерительной ветви которого реализовали метод анаберрационных точек. Поскольку данные зеркала имели экстремальные сочетания конструктивных параметров, их поверхности контролировали по частям с помощью двух сфер Хиндла применительно к каждому гиперболоиду. Одна из сфер Хиндла обеспечивала контроль центральной зоны гиперболоида, а другая – контроль периферийной зоны. Контролируемые зоны перекрывали друг друга не менее, чем на 200 мм с целью последующего объединения результатов контроля двух зон в единое целое. Сферы Хиндла, которые предназначались для контроля периферийных зон, устанавливали вблизи контролируемых поверхностей, что позволило значительно уменьшить их диаметр, по сравнению с диаметрами сфер Хиндла, которые были бы необходимы для реализации классического варианта схемы. Самые большие трудности при контроле вызвал выпуклый гиперболоид из проекта VISTA, так как необходимая для охвата его периферийной зоны сфера Хиндла, имела отношение радиуса кривизны к диаметру $r : D = 1:1$.

Таблица 1. Конструктивные параметры гиперболических зеркал крупных телескопов

№ п/п	Название проекта	r_0 , мм	K	$D_{\text{св}}$, мм	D_0 , мм
1	TTL	4813.19	-4,179	645	59
2	NOA	4602,2	-4,2087	753	139
3	VST	4374,46	-5,421864	938	176
4	VISTA	4018,71	-5,548792	1241,5	350
5	Миллиметрон	229,667	-1,1472777	492	25

1. Разработка концепции метода контроля поверхности выпуклого гиперболического зеркала радиотелескопа «Миллиметрон»

В настоящее время опубликованы сведения о проекте радиотелескопа «Миллиметрон» [11]. Вторичное зеркало этого телескопа представляет собой выпуклый гиперболоид с экстремальным сочетанием значений конструктивных параметров (см. таблицу 1). Допустимое среднеквадратическое отклонение (RMS) поверхности гиперболоида из проекта «Миллиметрон» составляет 3 мкм. Очевидно, что производственный и аттестационный контроль формы поверхности этого гиперболоида следует выполнять интерферометрическим методом. Анализ данных из источников информации показал, что при разработке оптической системы измерительной ветви

интерферометра, предназначенного для контроля выпуклых гиперboloидов, предпочтение следует отдавать вариантам, в которых рабочий волновой фронт дважды контактирует с контролируемым гиперboloидом: в таком случае повышается точность контроля. Двухкратное отражение рабочего волнового фронта от контролируемой поверхности обеспечивается при реализации схемы Хиндла, в которой использованы анаберрационные точки контролируемого гиперboloида.

Рассмотрим возможность контроля вторичного зеркала радиотелескопа «Миллиметрoн» в классической схеме Хиндла, которая показана на рис. 1. Здесь 1 – сфера Хиндла, 2 – выпуклый гиперboloид, точка O – вершина гиперboloида, точки F_1 и F_2 – геометрические фокусы гиперboloида, которые являются его анаберрационными точками.

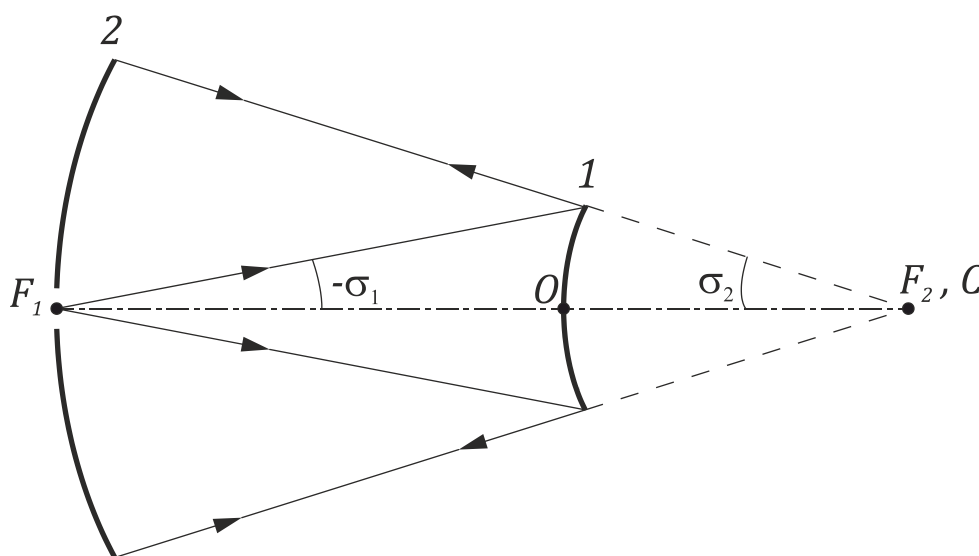


Рис. 1. Классическая схема Хиндла

Расчетные значения конструктивных параметров оптической системы измерительной ветвей интерферометра для контроля гиперboloида из проекта «Миллиметрoн», построенной по схеме Хиндла, следующие:

удаления геометрических фокусов $OF_1 = -3222,6831$ мм и $OF_2 = 110,649142$ мм;

тангенсы апертурных углов падающего и отраженного пучков лучей

$$\operatorname{tg} \sigma_1 = -0,073 \text{ и } \operatorname{tg} \sigma_2 = -15,172;$$

радиус кривизны сферы Хиндла $r_{\text{сф}} = 3333,3$ мм и ее диаметр $D_{\text{сф}} = 6652,2$ мм.

Очевидно, что практическая реализация классической схемы Хиндла в данном случае невозможна. Контроль по частям, как это описано в источниках [4, 5, 8], также проблематичен.

Характерной особенностью выпуклого гиперboloида из проекта «Миллиметрoн» является то, что направляемый из первого фокуса (точки F_1) световой луч, после отражения от гиперboloида идет под углом $\sigma_2 > 90^\circ$ к оптической оси: $\sigma_2 = 93,75^\circ$, как это

показано на рис. 2 (обозначения на рис. 2 аналогичны обозначениям на рис. 1). Поэтому для возврата этого луча к контролируемому гиперboloиду необходима сфера Хиндла с нетехнологичными параметрами.

Если для контроля центральной зоны данного гиперboloида использовать классическую схему Хиндла, то вершину сферы Хиндла придется совмещать с точкой F_1 (см. рис. 2), которая удалена от гиперboloида на расстояние более 3 м. В таком случае диаметр сферы Хиндла, необходимой для контроля центральной зоны гиперboloида диаметром 160 мм, окажется более 3 м. Очевидно, что такой вариант не пригоден по технологическим соображениям.

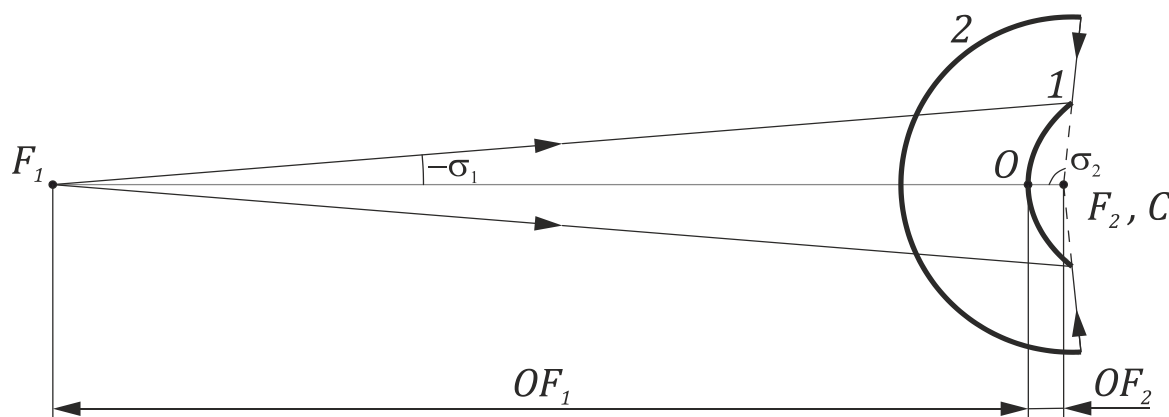


Рис. 2. Ход лучей через анаберрационные точки выпуклого гиперboloида из проекта «Миллиметр»

Идея, положенная в основу предлагаемого метода, заключается в том, что контроль центральной и периферийной зоны выпуклого гиперboloида осуществляется отдельно, но с помощью одного и того же вогнутого сферического зеркала. Для контроля, как центральной зоны гиперboloида, так и его периферийной зоны, используется ход лучей через анаберрационные точки. Отличительной особенностью схемы контроля центральной зоны гиперboloида является то, что здесь используется нетрадиционный ход лучей в отношении сферического зеркала. Поэтому сферическое зеркало вносит aberrации, которые необходимо компенсировать. В качестве компенсатора мы использовали зеркало Манжена, расположенное вблизи вершины гиперboloида, причем его диаметр меньше диаметра неконтролируемой зоны гиперboloида.

Контроль периферийной зоны выпуклого гиперboloида предлагается выполнять, используя классическую схему Хиндла, «накладывая» вспомогательное сферическое зеркало на различные участки периферийной зоны гиперboloида. Таким образом, контроль всей поверхности гиперboloида выполняется по частям с последующим объединением результатов в единое целое. Рассмотрим этапы контроля подробно.

2. Контроль центральной зоны гиперболического зеркала

Для центральной зоны гиперboloида мы предлагаем принципиально новую схему (рис.3) измерительной ветви интерферометра. Оптическая ось измерительной ветви ориентирована вертикально.

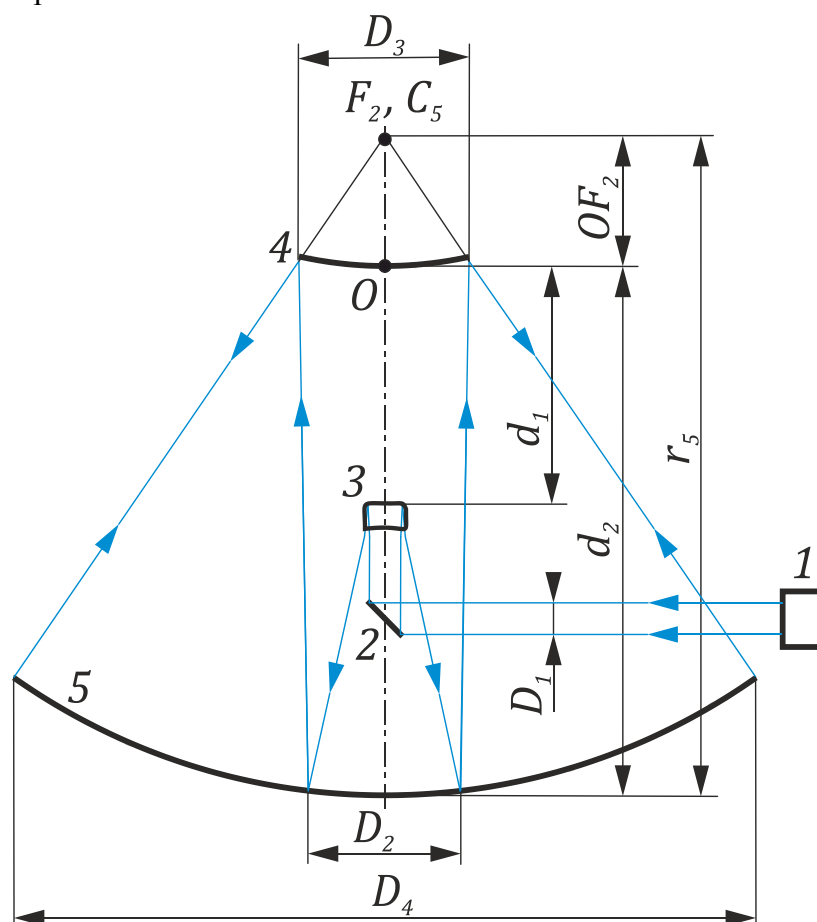


Рис. 3. Схема контроля центральной зоны выпуклого гиперболоида из проекта «Миллиметр»

Здесь реализован ход лучей через анаберрационные точки контролируемого гиперболоида 4. Поэтому сам гиперболоид не нарушает гомоцентричности падающего на него пучка лучей. Для сокращения длины оптической системы измерительной ветви и увеличения чувствительности контроля здесь используется вогнутое сферическое зеркало 5, которое трижды отражает рабочий волновой фронт. Первый раз лучи рабочего гомоцентрического пучка лучей падают на зеркало 5 по нормальям, так как центр кривизны зеркала (точка C5) расположен в фокусе F2 гиперболоида. Второй раз лучи, отраженные от гиперболоида, падают на то же зеркало под произвольными углами, поэтому возникают сферические aberrации, которые устранены с помощью компенсатора aberrаций.

Для обеспечения компактности оптической системы нами выбрано вогнутое сферическое зеркало с радиусом кривизны 500 мм. В таком случае компенсатором его aberrаций может быть зеркало Манжена 3 [12], на которое с помощью наклонного

плоского зеркала 2 направлен узкий коллимированный пучок лучей, выходящих из интерферометра 1. Преимущество коллимированного пучка лучей, направленных на зеркало Манжена в том, что нет необходимости точно выдерживать расстояние от интерферометра до зеркала Манжена.

При расчетах компенсационной системы, состоящей из сферического зеркала с радиусом кривизны 500 мм и зеркала Манжена, мы принимали во внимание то обстоятельство, что зеркало Манжена может экранировать центральную зону гиперboloида в пределах диаметра 25 мм (см. таблицу 1). На входе в компенсационную систему использован узкий коллимированный пучок лучей. Оптимальный вариант рассчитанной нами оптической системы измерительной ветви интерферометра содержит зеркало Манжена из стекла ЛК6. Преломляющая и отражающая поверхности зеркала Манжена – сферические. Остаточные волновые aberrации оптической системы измерительной ветви при автоколлимационном ходе лучей не превышает $0,2\lambda$ ($\lambda = 0,6328$ мкм – длина волны He-Ne лазера), RMS волнового фронта, выходящего из измерительной ветви интерферометра, составляет $0,07\lambda$. Такой уровень aberrационной коррекции в данном случае вполне удовлетворителен, так как допустимая RMS поверхности вторичного зеркала радиотелескопа «Миллиметрон» составляет 3 мкм, что в 60 раз больше RMS рабочего волнового фронта.

Ниже представлены геометрические параметры оптической системы измерительной ветви интерферометра для контроля центральной зоны выпуклого гиперboloида из проекта «Миллиметрон»:

толщины воздушных промежутков $d1 = 192,7$ мм и $d2 = 389,35086$ мм;

световые диаметры элементов измерительной ветви $D1 = 15,8$ мм, $D2 = 148,4$ мм, $D3 = 169,3$ мм и $D4 = 664,8$ мм.

Вогнутое сферическое зеркало с радиусом кривизны 500 мм и световым диаметром 664,8 мм совместно с компенсатором в виде зеркала Манжена диаметром 15,8 мм обеспечивает контроль центральной зоны выпуклого гиперboloида диаметром 169,3 мм.

3. Контроль периферийной зоны гиперболического зеркала

Рассмотрим вопрос о контроле периферийной зоны данного гиперboloида с использованием этого же сферического зеркала и метода анаберрационных точек. Для этого сформирована оптическая система (рис. 4), в которой реализован ход лучей через анаберрационные точки гиперboloида Г и использована виртуальная вогнутая сфера ВС с радиусом кривизны 500 мм. Здесь также показан ход реальных лучей, которые направляются из фокуса F_1 гиперboloида на его поверхность, отражаются от нее и достигают поверхности виртуальной сферы. В таблице 2 представлены значения координат точек пересечения реальных лучей с гиперболической и сферической поверхностями, отложенные вдоль оси u . Здесь u_r – координаты точек на контролируемом гиперboloиде, u_{bc} – координаты точек на виртуальной сфере.

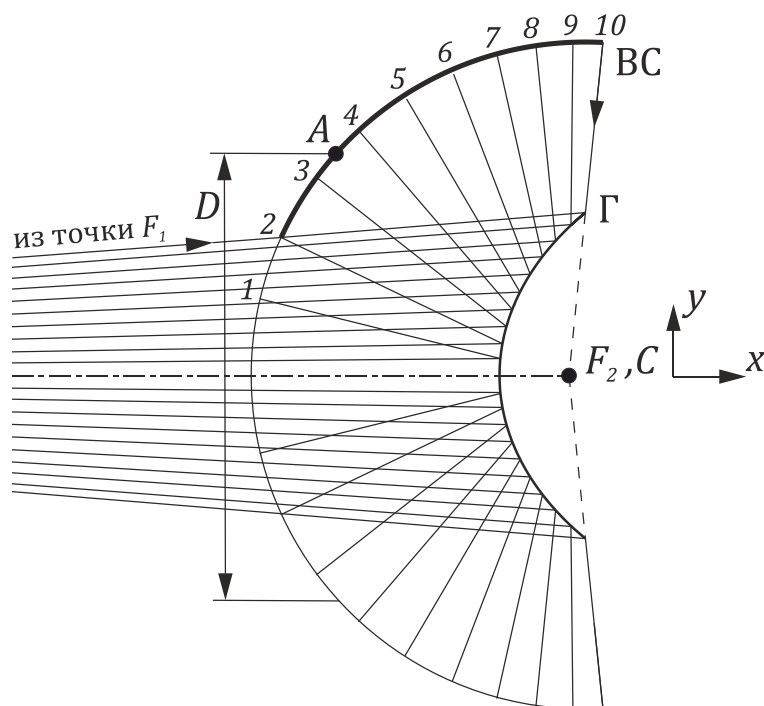


Рис. 4. Схема взаимного расположения гиперboloида Γ из проекта «Миллиметрoн» и виртуальной сферы BC

Таблица 2. Координаты точек пересечения реальных лучей с гиперболической и виртуальной сферической поверхностями

№ луча	y_{Γ} , мм	y_{BC2} , мм
1	24,6	109,8
2	49,3	211,8
3	74,1	300,1
Край центральной зоны	89	344,9
4	99,0	371,2
5	124,3	424,5
6	149,8	461,5
7	175,7	484,6
8	202,1	496,5
9	229,0	500,0
10	246,0	498,9

Из данных таблицы 2 следует, что первые три луча отражаются от центральной зоны гиперboloида, а остальные лучи – от его периферийной зоны. Между 3-им и 4-ым лучами расположен луч (на рис. 4 он не показан), который приходит в край центральной зоны гиперboloида – точку A . Вогнутое сферическое зеркало, необходимое для контроля центральной зоны гиперboloида, должно иметь световой диаметр $D = 664,8$ мм.

Поскольку длина дуги, символизирующей сферу с радиусом кривизны 500 мм, на участке от 2-го до 10-го луча составляет 586 мм, то очевидно, что зеркала диаметром 664,8 мм достаточно, чтобы отразить лучи, идущие от периферийной зоны гиперboloида. На рис. 4 положение зеркала для контроля центральной зоны показано жирной линией.

Расчеты показали, что центральная зона гиперboloида имеет диаметр 169 мм, для обеспечения контроля его периферийной зоны нижняя точка сферического зеркала должна располагаться (см. рис. 4) над исследуемым гиперboloидом на высоте $y_{\text{вс}} = 50$ мм. При раздельном контроле центральной и периферийной зон гиперboloида ширина зоны перекрытия составит приблизительно 35 мм, что позволит свести результаты контроля центральной и периферийной зон в единое целое.

На рис. 5 показана схема «наложения» сферического зеркала диаметром 664,8 мм на выпуклый гиперboloид. Здесь окружность 1 символизирует контролируемый гиперboloид, окружность 2 – сферическое зеркало, окружность 3 ограничивает центральную зону гиперboloида. Следует отметить, что контроль периферийной зоны придется выполнять поэтапно, перемещая сферическое зеркало 2 относительно контролируемого гиперboloида по кругу, так как это показано на рис. 5. Зоны перекрытия соответствуют областям, окрашенным серым цветом.

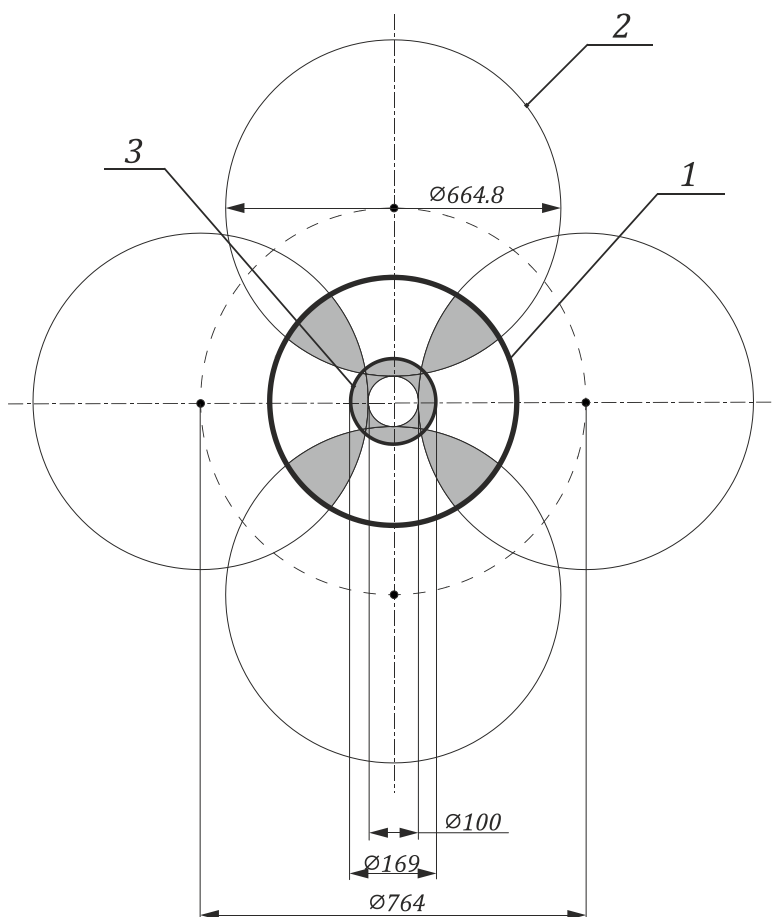


Рис. 5. Схема «наложения» сферического зеркала на выпуклый гиперboloид.

При контроле периферийной части гиперболического зеркала остаточные aberrации отсутствуют, поэтому погрешность контроля гиперboloида во многом определяется погрешностями поверхности вспомогательного сферического зеркала, которое надлежит тщательно аттестовать. Требования к соблюдению формы вспомогательного зеркала следует назначать на пределе технологических возможностей.

Заключение

Разработанный метод возможно использовать для контроля выпуклых гиперболических зеркал с экстремальными параметрами. В основу метода положена идея раздельного контроля центральной и периферийной зон гиперboloида с помощью одного и того же вогнутого сферического зеркала и метода анаберрационных точек. Отличительной особенностью схемы контроля центральной зоны гиперboloида является то, что здесь используется нетрадиционный ход лучей в отношении сферического зеркала. Поэтому необходимо компенсировать aberrации сферического зеркала. В качестве компенсатора использовано зеркало Манжена, расположенное вблизи вершины гиперboloида, причем его диаметр меньше диаметра неконтролируемой зоны гиперboloида. Остаточные волновые aberrации в компенсационной системе на основе вогнутого сферического зеркала и зеркала Манжена позволяют обеспечить контроль формы поверхности центральной зоны вторичного зеркала радиотелескопа «Миллиметрoн» с необходимой точностью. Сферическая поверхность вспомогательного зеркала должна быть изготовлена на пределе технологических возможностей и тщательно аттестована.

В заключение можно отметить, что предлагаемый вариант контроля выпуклого гиперboloида из проекта «Миллиметрoн» представляется нам вполне реальным для практической реализации совместно с интерферометром GPI XP [13].

Список литературы

1. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 262 с.
2. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. Справочник технолога-оптика / под ред. М.А. Окатова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
3. Simpson F.A., Oland B.H., Meckel J. Testing Convex Aspheric Lens Surfaces with a Modified Hindle Arrangement // Optical Engineering. 1974. Vol. 13. P. G101.
4. Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A., Atad-Ettenqui E., Egan I., Bennet R.V., Craig S.C. M1 and M2 mirrors manufacturing for VISTA telescope // Proceeding of SPIE. 2004. Vol. 5494. P. 374-381. DOI: [10.1117/12.553006](https://doi.org/10.1117/12.553006)
5. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A. Manufacturing

- of secondary mirrors from Sital CO-115M for European projects TTL, NOA, and VST // Proceeding of SPIE. 2001. Vol. 4451. P. 138-144. DOI: [10.1117/12.453612](https://doi.org/10.1117/12.453612)
6. Burge J.H. Measurement of large convex aspheres // Proceeding of SPIE. 1996. Vol. 2871. P. 362-373. DOI: [10.1117/12.269059](https://doi.org/10.1117/12.269059)
7. Smith B.K., Burge J.H., Martin H.M. Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes // Proceeding of SPIE. 1997. Vol. 3134. P. 51-61. DOI: [10.1117/12.295151](https://doi.org/10.1117/12.295151)
8. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Pridnya V.V., Patrikeev V.E., Ignatov A.N., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. M2 secondary mirror manufacturing for VISTA project // Proceeding of SPIE. 2008. Vol. 7018. P. 701-813. DOI: [10.1117/12.789013](https://doi.org/10.1117/12.789013)
9. Пуряев Д.Т., Романов А.М. Интерферометр для контроля формы оптических поверхностей: а.с. 1260676 СССР. 1986. Бюл. № 36. 3 с.
10. Burge J., Zhao C. TMT Metrology study for M2 and M3. EXHIBIT D – TMT. OPT. TEC. 07.025. REL02. October 4, 2007.
11. Обсерватория Миллиметрон (проект «Спектр-М»): сайт. Режим доступа: <http://millimetron.ru/> (дата обращения 01.04.2015).
12. Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т., Рожков О.В. Оптическая система интерферометра для контроля формы выпуклых сферических поверхностей большого диаметра на базе вогнутого сферического зеркала и зеркала Манжена // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 9. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/917.html> (дата обращения 01.04.2015).
13. Typical Interferometer Setups // Zygo Corporation: company website. Available at: <http://www.zygo.com/?/met/interferometers/setups/> , accessed 01.04.2015.

Testing the Secondary Mirror Surface Form of a Radiotelescope «Millimetron»

A.V. Kapustin^{1,*}, N.L. Lazareva¹, D.T. Puryaev¹

[*ejingui@gmail.com](mailto:ejingui@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: testing, convex mirror, hyperbolic mirror, aberration-free points, interferometer, compensator, Mangin mirror

A new method to test a surface form of the convex high-aperture hyperbolic mirrors has been developed with the secondary mirror of a telescope «Millimetron» as an example. It was proposed to use the selfsame auxiliary spherical mirror relatively small in diameter for testing the inner central part and outer part of a hyperbolic mirror.

To test the central part of a hyperbolic mirror, an aberration-free points method is offered. It uses the non-traditional ray path for the secondary mirror. As a result, the overall length of interferometer measurement branch optical system is significantly reduced. Working wave front is reflected trice from the auxiliary spherical mirror surface and twice from the hyperbolic mirror under test. Double interaction of the working wave front with tested surface increases sensitivity of optical testing.

The feature of the working bundle ray path is that the rays fall towards the auxiliary mirror once perpendicular to the surface and twice at the arbitrary angles to the surface. As a result, the homocentricity of the ray bundle is violated, i.e. the spherical aberrations arise. To compensate aberrations, a Mangin mirror compensator is used. It is placed in the central non-working zone of a hyperbolic mirror.

The outer part of hyperbolic mirror is tested using the selfsame auxiliary spherical mirror according to Hindle scheme in several stages with serial imposition of the auxiliary mirror until information about the whole surface is collected. The interferometer provides measurements recording the interferogram from each part of the surface of tested mirror. Then to obtain complete information about the mirror surface form the interferograms are united.

The article presents calculation results of the optical systems for testing the hyperbolic secondary mirror of the radiotelescope «Millimetron», which has extremely high aperture. It has been shown that the auxiliary spherical mirror of 665 mm in diameter and with 500 mm radius of curvature provides testing of hyperbolic mirror of 492 mm in diameter with the aperture angle of an edge ray exceeding 90 degrees. The wave front aberration residuals of the interferometer measurement branch optical system with auto-collimation ray path make 0.2 of He-Ne laser wavelength.

References

1. Puryaev D.T. *Metody kontrolya opticheskikh asfericheskikh poverkhnostei* [Test methods for optical aspheric surfaces]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 262 p. (in Russian).
2. Okatov M.A., Antonov E.A., Baigozhin A., et al. *Spravochnik tekhnologa-optika* [Handbook for technologist- optician]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2004. 679 p. (in Russian).
3. Simpson F.A., Oland B.H., Meckel J. Testing Convex Aspheric Lens Surfaces with a Modified Hindle Arrangement. *Optical Engineering*, 1974, vol. 13, p. G101.
4. Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A., Atad-Ettenqui E., Egan I., Bennet R.V., Craig S.C. M1 and M2 mirrors manufacturing for VISTA telescope. *Proceeding of SPIE*, 2004, vol. 5494, pp. 374-381. DOI: [10.1117/12.553006](https://doi.org/10.1117/12.553006)
5. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A. Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA, and VST. *Proceeding of SPIE*, 2001, vol. 4451, pp. 138-144. DOI: [10.1117/12.453612](https://doi.org/10.1117/12.453612)
6. Burge J.H. Measurement of large convex aspheres. *Proceeding of SPIE*, 1996, vol. 2871, pp. 362-373. DOI: [10.1117/12.269059](https://doi.org/10.1117/12.269059)
7. Smith B.K., Burge J.H., Martin H.M. Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes. *Proceeding of SPIE*, 1997, vol. 3134, pp. 51-61. DOI: [10.1117/12.295151](https://doi.org/10.1117/12.295151)
8. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Pridnya V.V., Patrikeev V.E., Ignatov A.N., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. M2 secondary mirror manufacturing for VISTA project. *Proceeding of SPIE*, 2008, vol. 7018, pp. 701-813. DOI: [10.1117/12.789013](https://doi.org/10.1117/12.789013)
9. Puryaev D.T., Romanov A.M. *Interferometr dlya kontrolya formy opticheskikh poverkhnostei* [Interferometer to control the shape of optical surfaces]. Inventor's certificate USSR, no. 1260676, 1986. (in Russian).
10. Burge J., Zhao C. *TMT Metrology study for M2 and M3*. EXHIBIT D – TMT. OPT. TEC. 07.025. REL02. October 4, 2007.
11. Observatoriya Millimetron (proekt “Spektr-M) [“Millimetron” observatory (“Spektr-M” project)]: website. Available at: <http://millimetron.ru/> , accessed 01.04.2015. (in Russian).
12. Lazareva N.L., Puryaev D.T., Rozhkov O.V. Interferometer’s optical system to control the shape of convex spherical surfaces of large-diameter on the base of concave spherical mirrors and Mangin mirror. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/917.html> , accessed 01.04.2015. (in Russian).
13. Typical Interferometer Setups. Zygo Corporation: company website. Available at: <http://www.zygo.com/?/met/interferometers/setups/> , accessed 01.04.2015.