

УДК 681.7.08

Оптическая система измерительной ветви интерферометра для контроля формы поверхности вторичного зеркала телескопа ТМТ

*Пичужкин Е.С., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Оптико-электронные приборы научных исследований»*

*Научный руководитель: Лазарева Н.Л., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru*

Вторичные зеркала современных телескопов в большинстве случаев выпуклые гиперboloиды. Производственный контроль формы выпуклых гиперболических поверхностей в большинстве случаев выполняют методом анаберрационных точек, используя при этом в качестве вспомогательных элементов вогнутые сферические зеркала (сферы Хиндла) [1, 2]. Сферическое зеркало 2 (рис. 1) формирует сходящийся гомоцентрический пучок лучей, вершина которого (точка C) совпадает с одним из геометрических фокусов (точкой F_2) выпуклого гиперboloида 1. Диаметр сферического зеркала всегда значительно больше диаметра контролируемого гиперboloида. Он определяется значениями отрезка OF_1 и апертурного угла σ_2 луча, приходящего в крайнюю точку гиперboloида.

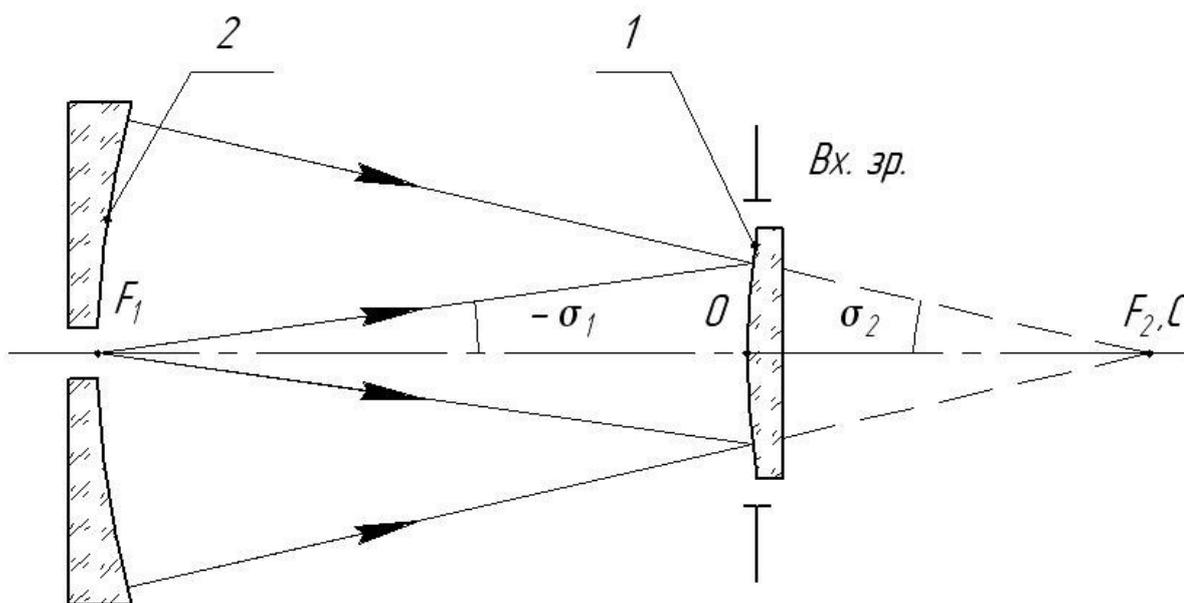


Рис. 1. Оптическая система измерительной ветви интерферометра для контроля выпуклых гиперболических поверхностей методом анаберрационных точек

В последнее время диаметры выпуклых гиперболических зеркал значительно увеличились. Например, на Лыткаринском заводе оптического стекла изготовлены и сданы Заказчикам вторичные зеркала для европейских проектов *TTL*, *NOA*, *VST* и *VISTA*, параметры которых даны в таблице. Допустимые деформации волнового фронта, сформированного этими зеркалами, измеряются в нанометрах. Поэтому контроль формы их поверхностей должен быть высокоточным. В производственных условиях эти зеркала контролировали методом анаберрационных точек. Если для их контроля использовать схему рис. 1, то необходимы слишком большие сферы Хиндла. Поэтому при контроле гиперболоидов из проектов *TTL*, *NOA*, *VST* и *VISTA* использовали не одну, а две сферы Хиндла [3, 4]. Одна из сфер обеспечивала контроль центральной зоны выпуклого гиперболоида, а вторая – периферийной зоны. Чтобы объединить результаты контроля обеих зон в единое целое, контролируемые зоны должны обязательно перекрываться. Зона перекрытия во всех случаях была не менее 200 мм. Следует отметить, что сферы Хиндла, обеспечивающие контроль периферийных зон, всегда устанавливалась вблизи контролируемого гиперболоида. Это позволило значительно уменьшить их диаметры по сравнению с диаметрами, которые необходимы для реализации классической схемы (см. рис. 1).

Основные параметры вторичных зеркал крупных телескопов и сфер Хиндла, использованных при контроле формы гиперболических поверхностей

Параметры гиперболоидов	Название проекта			
	<i>TTL</i>	<i>NOA</i>	<i>VST</i>	<i>VISTA</i>
Материал	Ситалл СО-115м			
Внешний диаметр, мм	645	753	938	1241,5
Диаметр отверстия, мм	59	139	176	350
Вершинный радиус, мм	4813,19	4602,2	4374,46	4018,81
Коническая константа	-4,179	-4,2087	-5,421864	-5,548792
Толщина по оси, мм	110	115	130	156,6
Диаметр / радиус кривизны сферы Хиндла для центральной зоны, мм	1610 / 6300	1640 / 3995	1640 / 3995	1985 / 2708
Диаметр / радиус кривизны сферы Хиндла для периферийной зоны, мм	1640 / 3995	1985 / 2708	1985 / 2708	2420 / 2510

Контроль самого большого гиперболоида из таблицы (проект VISTA) вызвал значительные трудности [4]. Для контроля его периферийной зоны была изготовлена сфера Хиндла диаметром 2420 мм с радиусом кривизны 2510 мм. Центральную зону этого гиперболоида контролировали с помощью сферы Хиндла диаметром 1985 мм. Следует отметить, что для контроля такого гиперболоида за один прием потребовалась бы сфера Хиндла диаметром 3952 мм с радиусом кривизны 4162 мм.

В настоящее время стоит вопрос о контроле вторичного зеркала из проекта *TMT*, внешний диаметр которого составляет 3110 мм. Вершинный радиус этого гиперболоида

$r_0 = 6227,68$ мм, а коническая константа $K = -1,318228$. Зеркало имеет отверстие в центральной зоне диаметром 189 мм. Для анализа возможности применения для его контроля метода анаберрационных точек нами были вычислены параметры классической схемы (см. рис. 1). Отрезки, определяющие удаления геометрических фокусов зеркала от его вершины, следующие: $OF_1 = -42038,838$ мм, $OF_2 = 2899,102$ мм. Передний и задний апертурные углы крайних лучей, проходящих через анаберрационные точки гиперболоида, составляют величины: $\sigma_1 = -0,037$ рад, $\sigma_2 = 0,52$ рад. Для контроля формы поверхности такого гиперболоида за один прием потребуется сфера Хиндла диаметром 44793 мм с радиусом кривизны 44938 мм. Полученные расчетные данные продемонстрировали нереальность реализации классической схемы применительно к вторичному зеркалу проекта *TMT*.

В работе [5] предложено контролировать гиперболоид из проекта *TMT* с помощью интерферометра Физо, Диаметр эталонной пластины которого составляет 1000 мм.

Авторы работы [5] предлагают контролировать гиперboloид диаметром 3110 мм по частям, как это представлено на рис. 2. Здесь окружность 1 – контролируемый гиперboloид, окружности 2 и 3 – эталонные пластины интерферометра. Предполагается, что в качестве эталона в интерферометре будут использованы две различные пластины. Каждая из пластин содержит вогнутую эталонную поверхность в виде внеосевой асферики. Пластина 2 предназначена для контроля центральной зоны гиперboloида. Она накладывается на гиперboloид 6 раз таким образом, что центр пластины располагается над окружностью с радиусом 450 мм. Пластина 3 должна обеспечить контроль периферийной зоны. Центр второй пластины должен располагаться над окружностью с радиусом 1150 мм. Вторая пластина устанавливается в 12 позиций. Таким образом, контроль формы всей поверхности гиперboloида диаметром 3110 мм обеспечивается путем 18 переналожений двух различных эталонов. Для сведения результатов контроля, полученных на каждой из стоянок, в единое целое предусматривается перекрытие контролируемых зон, как это показано на рис. 2.

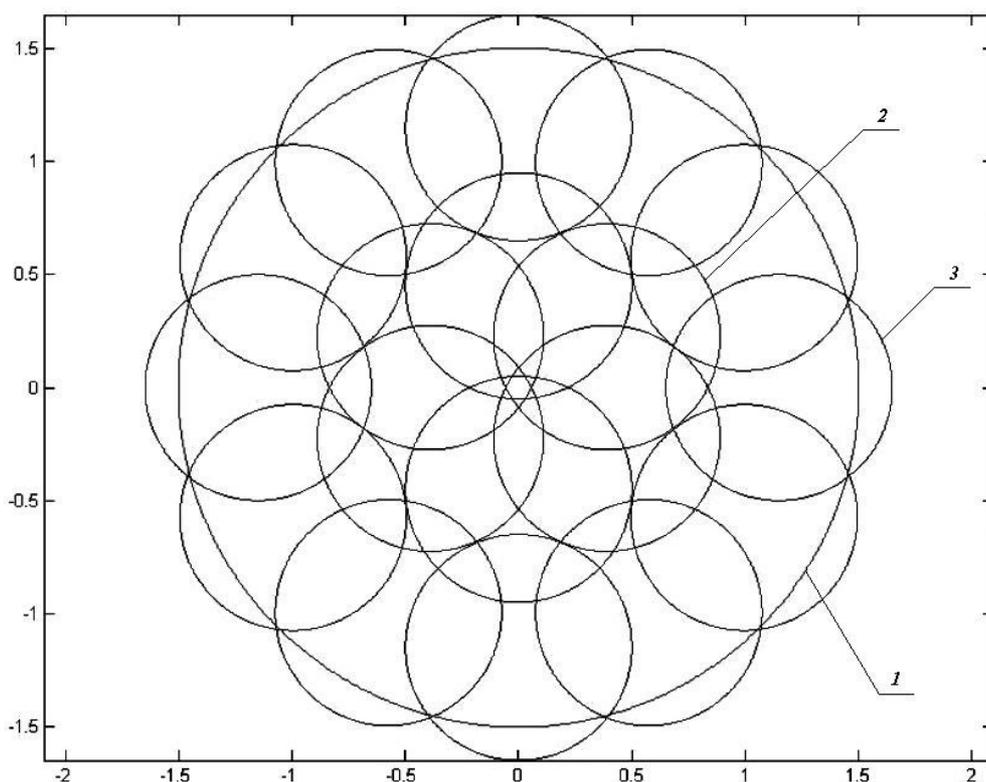


Рис. 2. Схема переналожений двух эталонов диаметром 1000 мм по поверхности выпуклого гиперboloида из проекта *TMT*

В качестве альтернативы способу контроля, описанному в работе [5], нами предлагается использовать компенсационный метод совместно с интерферометром типа Тваймана – Грина. Пример оптической системы измерительной ветви для контроля

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

выпуклого гиперboloида диаметром 478 мм представлен в работе [6]. В данном случае используется компенсационный метод контроля гиперboloида. Компенсатор aberrаций нормалей здесь зеркально-линзовый. В качестве зеркального компонента использовано сферическое зеркало диаметром 801 мм, которое направляет лучи рабочего пучка по нормалям к контролируемому гиперboloиду. Значение радиуса кривизны зеркала близко к значению вершинного радиуса контроливаемого гиперboloида. В случае, описанном в работе [6], продольная aberrация крайней нормали $\Delta s_n = 30,988$ мм, а тангенс угла наклона крайней нормали $\text{tg } \varphi = 0,07$. Одно сферическое зеркало не может внести такие большие aberrации. Поэтому перед зеркалом установлена двухлинзовая система. Первая по ходу лучей линза компенсатора диаметром менее 10 мм установлена в параллельном пучке лучей, входящих в измерительную ветвь интерферометра. Вторая линза диаметром 44 мм имеет менисковую форму. Внутри менисковой линзы параксиальные лучи идут параллельно оптической оси, что позволяет изменять вносимые ею aberrации высших порядков путем изменения ее толщины. В результате остаточные волновые aberrации всей компенсационной системы в автоколлимационном ходе лучей не превышают $0,02\lambda$, где $\lambda = 0,6328$ мкм – длина волны *He-Ne* лазера.

Для разработки компенсационной системы применительно к выпуклому гиперboloиду проекта *TMT* нами вычислены продольная aberrация крайней нормали контроливаемого гиперboloида и тангенс угла наклона крайней нормали к оптической оси. В данном случае aberrации велики при большом значении угла наклона крайней нормали: $\Delta s_n = 254,657$ мм, $\text{tg } \varphi = 0,247$. Очевидно, что компенсатор будет иметь сложную конструкцию.

Основываясь на опыте расчета компенсационных систем с зеркально-линзовыми компенсаторами, в качестве зеркального компонента мы выбрали вогнутое сферическое зеркало с радиусом кривизны, равным вершинному радиусу контроливаемого гиперboloида. С целью упрощения разработки оптимальной компенсационной системы был рассчитан имитатор aberrаций нормалей выпуклого гиперboloида. Имитатор позволил выполнять расчеты в обратном ходе лучей от имитатора к компенсатору.

Анализ остаточных aberrаций системы, состоящей из имитатора и выбранного сферического зеркала, показал, что в качестве линзового компонента можно использовать систему, состоящую из отрицательной линзы в качестве силового компонента и линзы с равными радиусами кривизны, внутри которой параксиальные лучи проходят параллельно оптической оси. Линза с равными радиусами в таком случае играет роль компенсатора aberrаций высших порядков. Построенный по такой схеме линзовый компенсатор эффективен с точки зрения идеальной aberrационной коррекции в системе.

Расчеты компенсационной системы, выполненные по формулам aberrаций третьего порядка, показали, что диаметр зеркального компонента должен быть около 5200 мм, а диаметр линзового компонента в пределах 500...600 мм. Известно, что линзы диаметром до 600 мм для крупногабаритных объективов в промышленности изготавливают. Поэтому такой линзовый компонент вполне реален. Хуже обстоит дело с зеркальным компонентом. При диаметре 5200 мм возникают проблемы не только с его изготовлением, но и с использованием в схеме контроля.

Чтобы решить эту проблему, можно изготовить зеркало, диаметр которого будет меньше, например, 2800 мм. Тогда контроль выпуклого гиперboloида диаметром 3110 мм будет выполнен по частям, путем переналожения сферического зеркала. Предлагаемая нами схема переналожений показана на рис. 3. Здесь: 1 – контролируемый гиперboloид, 2 – сферическое зеркало диаметром 2800 мм, 3 – линзовый компонент компенсатора диаметром 552 мм.

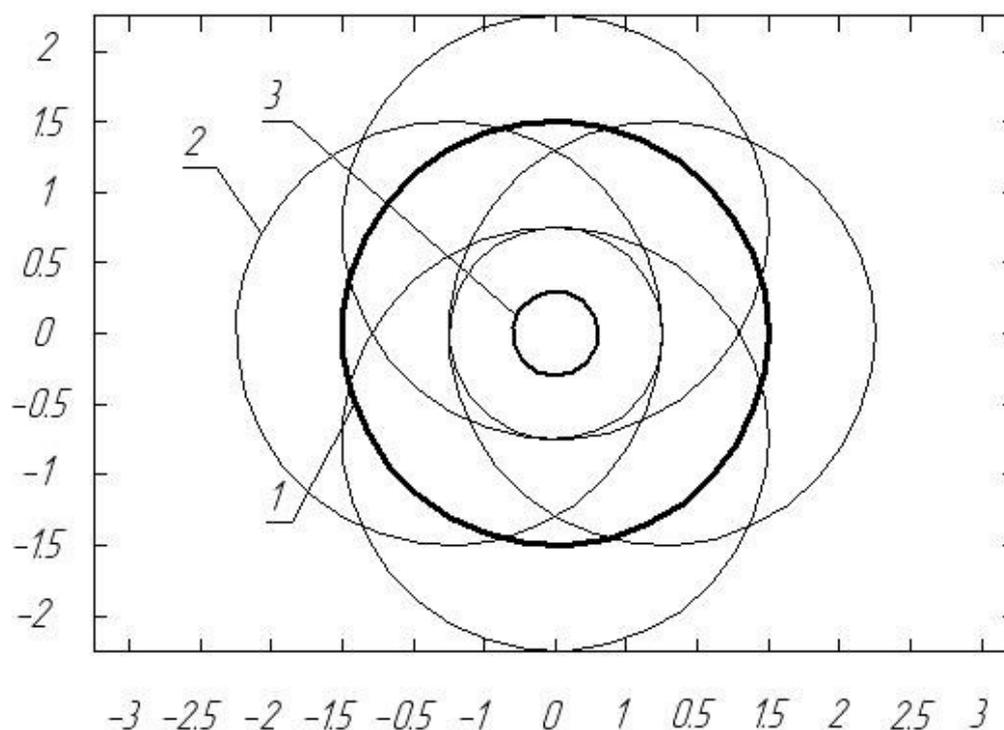


Рис. 3. Схема переналожений сферического зеркала диаметром 2800 мм по поверхности выпуклого гиперboloида из проекта *TMT*

На рис. 4 представлена схема оптимального расчетного варианта компенсационной системы, предназначенной для интерферометрического контроля формы поверхности выпуклого гиперboloида из проекта *TMT*. Здесь 1 – контролируемый гиперboloид

диаметром 3110 мм, 2 – вогнутое сферическое зеркало диаметром 5206 мм, 3 – двояковогнутая линза из стекла ТФ5, 4 – положительная менисковая линза из стекла К8. 5 – интерферометр типа Тваймана – Грина. Диаметры обеих линз по 552 мм. Вершина гомоцентрического пучка лучей, выходящего из интерферометра, располагается левее контролируемого гиперboloида, причем этот пучок свободно проходит через отверстие диаметром 189 мм в гиперboloиде. Числовая апертура пучка, входящего в измерительную ветвь интерферометра, составляет 0,3.

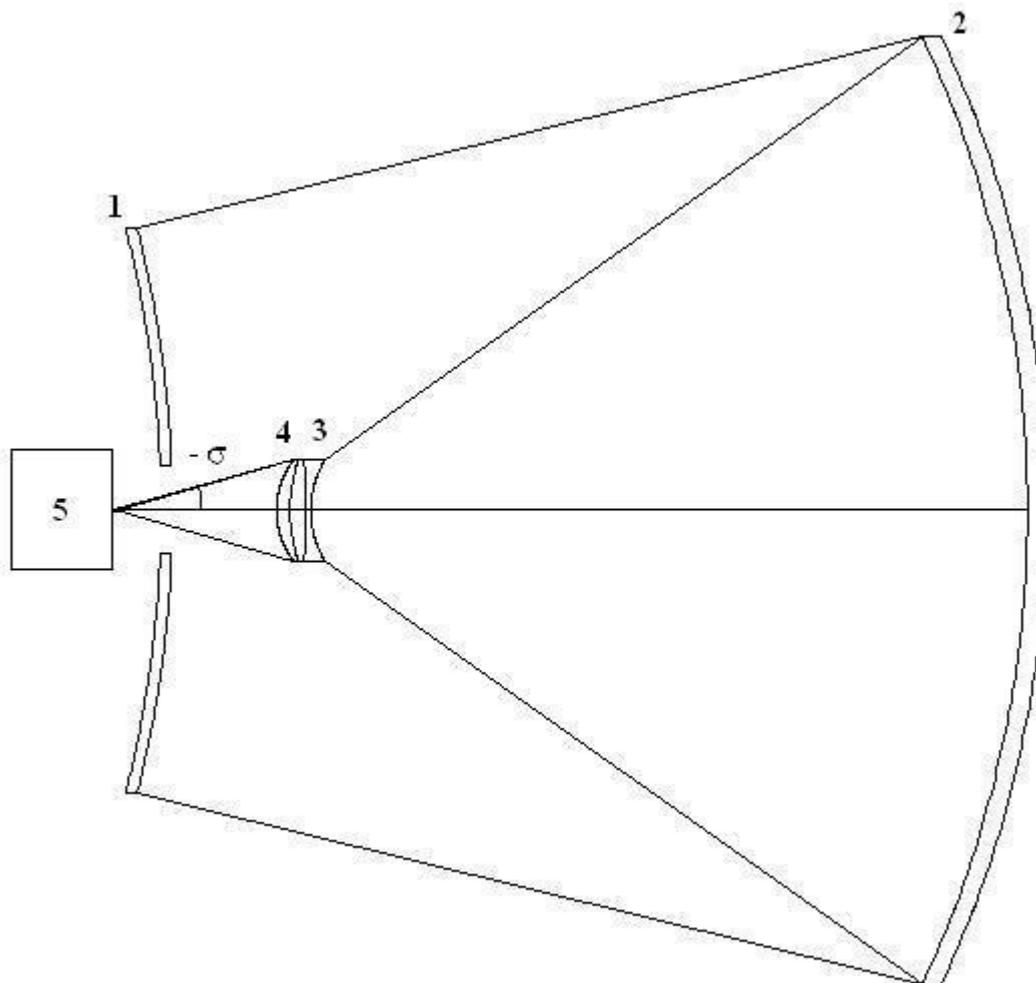


Рис. 4. Схема компенсационной системы для контроля формы поверхности выпуклого гиперboloида из проекта *ТМТ*

Данная компенсационная система получена в результате оптимизации исходной системы, о которой говорилось выше.

Практически идеальная абберационная коррекция в компенсационной системе была достигнута путем асферизации вогнутой поверхности менисковой линзы. Эта поверхность близка к гиперболической, поэтому проблема ее контроля решается

сравнительно легко. На рис. 5 представлен график остаточной волновой aberrации в компенсационной системе при автоколлимационном ходе лучей. Максимальное значение aberrаций не превышает значения $0,04\lambda$.

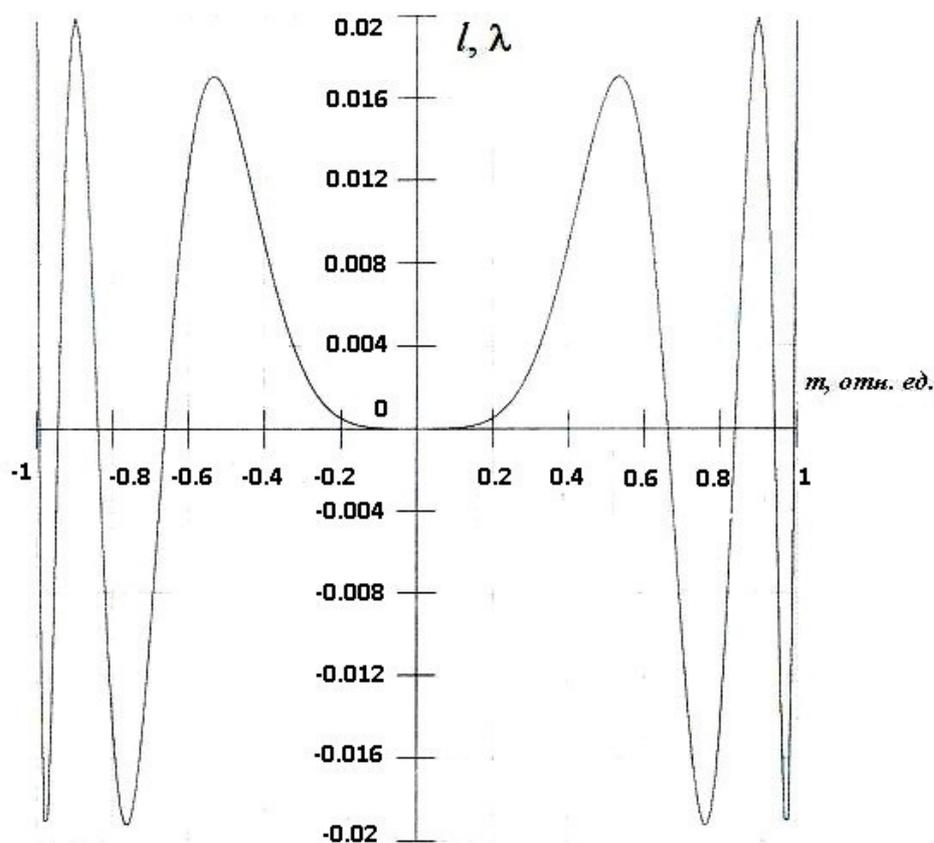


Рис. 5. График остаточной волновой aberrации в компенсационной системе для контроля выпуклого гиперboloида из проекта *TMT*

В заключение можно отметить, что разработанная нами оптическая система измерительной ветви интерферометра для контроля выпуклой поверхности гиперboloида из проекта *TMT* является оригинальной. По нашему мнению основной недостаток этой системы заключается в использовании асферической поверхности в линзовой части компенсатора. Поэтому дальнейшая работа будет проводиться в направлении изменения конструкции компенсатора с целью исключения из него асферической поверхности.

Список литературы

1. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: «Машиностроение», 1976. 262.с.

2. Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Проектирование измерительных ветвей интерферометров для контроля формы оптических поверхностей: Учеб. пособие, Ч. 1 / Под ред. Д.Т. Пуряева. – М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 48 с., ил.
3. Jim Burge and Chunyu Zhao. TMT Metrology study for M2 and M3// EXHIBIT D – TMT.ОРТ.Тес.07.025.REL.02. October 4, 2007
4. Пуряев Д.Т., Лазарева Н.Л., Иконина А.В. Оптические системы двухлучевых интерферометров: Учеб. пособие. – Ч. 3 / Под ред. Д.Т. Пуряева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 60 с.: ил.