



طراحی جبران کننده ی کامل تک عدسی با قابلیت تبدیل جبهه ی موج تخت به سهموی، به منظور اندازه گیری دقت سطوح سهموی به روش تداخل سنجی

مسعود مردانی^۱، امید سعادت مند^۲

^{۱،۲} شرکت صنایع الکترواپتیک صا ایران

در این مقاله با طراحی یک مجموعه ی اپتیکی جبران کننده ی کامل تک عدسی، جبهه موج تخت خروجی از یک تداخل سنج به جبهه موج سهموی تبدیل خواهد شد و با استفاده از آن سطوح غیرکروی سهموی مورد آزمون قرار خواهد گرفت. در روشی که در این مقاله به آن پرداخته شده است، طراحی جبران کننده ی کامل با استفاده از تنها یک تک عدسی انجام شده است که در آن یک سطح تک عدسی، غیرکروی می باشد. با تک عدسی شدن جبران کننده، در مقایسه با جبران کننده ی دو عدسی، نیازی به تنظیم دقیق فاصله ی بین دو عدسی، تنظیم دقیق هم مرکزی و هم راستایی دو عدسی نخواهد بود و به این طریق دقت اندازه گیری افزایش چشمگیر خواهد یافت. همچنین با تک عدسی شدن جبران کننده، خطای سطوح عدسی ها و همچنین خطای ناشی از همگنی ماده ی اپتیکی کاهش خواهد یافت.

کلید واژه: جبران کننده ی کامل، غیرکروی، سهموی، تداخل سنجی، طراحی اپتیکی

Design of perfect null compensator, using a single lens, with capability to converting flat wavefront to parabolic wavefront for testing parabolic surfaces with interferometry method

Masoud Mardani¹, Omid Saadatmand²

^{1,2} Electro-Optical Industries of Sa-Iran

In this article, by design of a single lens, perfect optical null compensator, flat output wavefront of an interferometer is converted to parabolic wavefront and by that, parabolic surfaces can be tested. In method that is presented in this article, design of null compensator is done by using of one single lens that one side of that is aspherical. By using this single element null compensator, in comparing by two elements null compensators, it is not necessary to do accurate adjustment of distance between these two lenses and also it is not necessary to do accurate adjustment of alignment of them and according to these, accuracy of measurements is increased significantly. In addition, by reduction of number of lenses, surface error of lenses and also error of homogeneity of optical materials is reduced significantly.

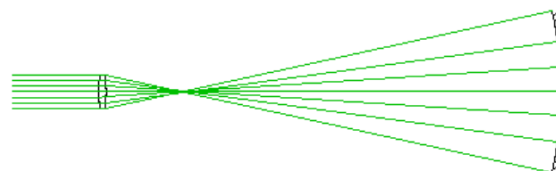
Keywords: perfect null compensator, Aspheric, Parabolic, Interferometry, Optical Design

مقدمه

در سامانه‌های تصویربرداری با قطر دهانه‌ی بزرگ نظیر تلسکوپ‌ها، استفاده از سطوح اپتیکی غیرکروی اجتناب ناپذیر است. به منظور ساخت سطوح غیرکروی، لازم است دقت سطح به روشی دقیق اندازه‌گیری شود، [3,4,5]. در [1] و [2]، به آزمون سطوح سهموی با طراحی جبران‌کننده‌ی کامل دو عدسی پرداخته شده است. در این مقاله یک روش تداخل‌سنجی ارائه خواهد شد که در آن با استفاده از تنها یک تک عدسی با قطر $D=40\text{mm}$ ، امکان اندازه‌گیری دقت یک سطح سهموی با قطر $D=190.0\text{mm}$ ، شعاع $R=434.6\text{mm}$ و ثابت مخروطی $k=-1.0$ فراهم خواهد شد. جبران‌کننده‌ی تک عدسی طراحی شده یک سطح کروی با شعاع $R=71.07\text{mm}$ و یک سطح غیرکروی با شعاع $R=248.78\text{mm}$ و ثابت مخروطی $k=54.8$ دارد. در این مقاله، در مقایسه با [1] و [2]، نیازی به انجام دقیق تنظیمات مربوط به فاصله‌ی دو عدسی و همچنین تنظیمات دقیق هم مرکزی و هم‌راستایی دو عدسی نخواهد بود و از این طریق دقت اندازه‌گیری افزایش محسوس خواهد یافت. همچنین به دلیل تک عدسی شدن جبران‌کننده، تاثیر خطای سطوح اپتیکی و همچنین همگنی مواد اپتیکی در اندازه‌گیری نيمرخ سطح سهموی مورد آزمون کاهش خواهد یافت.

طراحی چیدمان آزمون

در شکل ۱ چیدمان آزمون سطح سهموی، در نرم افزار طراحی اپتیکی Zemax، [6] دیده می‌شود. اطلاعات مربوط به طراحی این مجموعه در شکل ۲ دیده می‌شود. در این چیدمان، جبهه‌موج تخت خروجی از تداخل‌سنج بر تک عدسی جبران‌کننده وارد و جبهه‌موج سهموی به منظور آزمون سطح سهموی، از آن خارج خواهد شد.

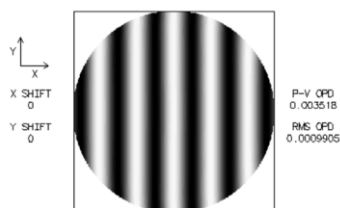


شکل ۱: چیدمان اپتیکی پیشنهادی برای آزمون سطح سهموی با طراحی جبران‌کننده‌ی کامل تک عدسی

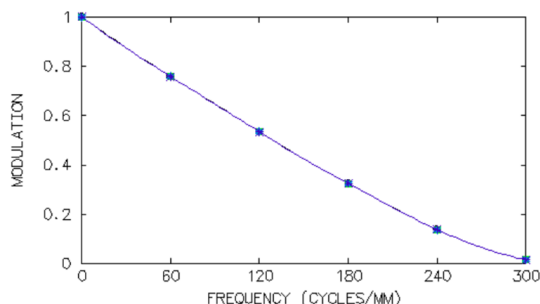
Ent beam radius	20.000000	Field angle	5.7296e-05	Primary wavln	0.63280
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
AST	71.070000	9.000000	20.000000	BK7	C
2	-248.780000	538.288977	19.138952	AIR	CA
3	-434.600000	-538.288977	95.000000	REFL_HATCH	A
4	-248.780000	-9.000000	19.138884	BK7	CA
5	71.070000	-100.000000	19.999945	AIR	C
IMS	0.000000	0.000000	20.000086		

شکل ۲: اطلاعات مربوط به طراحی مجموعه‌ی جبران‌کننده‌ی کامل تک عدسی در نرم‌افزار Zemax

همانگونه که در الگوی تداخلی شکل ۳ دیده می‌شود، جبران‌کننده‌ی طراحی شده، با بیشینه‌ی ناهمواری برابر با $PV=0.003518\lambda$ ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$)، از دقت بسیار بالایی برخوردار است. منحنی MTF چیدمان اپتیکی شکل ۱، حاصل از نرم‌افزار طراحی اپتیکی Zemax، که بیانگر کیفیت سیستم طراحی شده در فرکانس‌های فضایی مختلف می‌باشد در شکل ۴ دیده می‌شود. در این شکل منحنی MTF بر منحنی MTF طرح محدود به پراش منطبق شده است که این مساله دلالت بر کیفیت بسیار بالای طراحی دارد.



شکل ۳: الگوی تداخلی جبران‌کننده‌ی کامل تک عدسی طراحی شده



شکل ۴: منحنی MTF جبران‌کننده‌ی کامل تک عدسی طراحی شده

۳- تحلیل حساسیت چیدمان

۳-۱- حساسیت چیدمان به وجود خطا در ضخامت

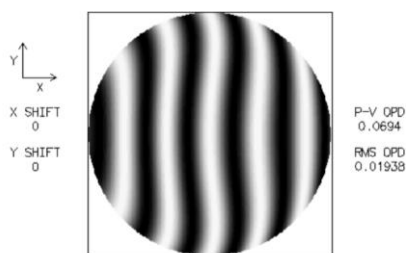
مرکزی جبران‌کننده‌ی تک عدسی

با اعمال خطا در ضخامت مرکزی عدسی جبران‌کننده به میزان 0.05mm ، در پنجره‌ی شکل ۵، الگوی تداخلی مشابه شکل ۶ خواهد شد. همانگونه که در این الگو دیده می‌شود، تاثیر این خروج از تفرانس در اندازه‌گیری دقت سطح سهموی مورد آزمون ناچیز می‌باشد.

می‌شود، تاثیر این خروج از تفرانس در اندازه‌گیری دقت سطح سهموی مورد آزمون ناچیز می‌باشد.

Ent beam radius		20.000000 Field angle		5.7296e-05 Primary wavl		0.632	
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL		
OB3	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR			
AS1	71.040000	9.000000	20.000000	AS	BK7	C	C
2	-248.780000	538.257050	19.138588	S	AIR		CA
3	-434.600000	-538.257050	95.000000		REFL_HATCH		A
4	-248.780000	-9.000000	19.140348	S	BK7	C	CA
5	71.040000	-100.000000	20.001769	S	AIR		C
TMS	0.000000	0.000000	20.000549	S			

شکل ۹: اعمال خطا به میزان 0.03mm در شعاع سطح کروی عدسی
حیران‌کننده

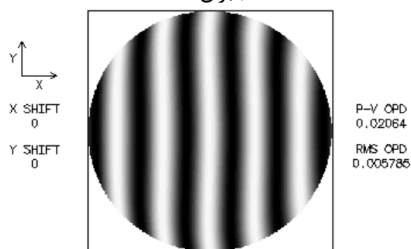


شکل ۱۰: الگوی تداخلی در نتیجه‌ی اعمال خطا به میزان 0.03mm در شعاع سطح کروی عدسی جبران‌کننده

همچنین در صورت اعمال خطا به میزان 0.05mm در شعاع سطح غیرکروی عدسی جبران کننده، در پنجره‌ی شکل ۱۱، الگوی تداخلی مشابه شکل ۱۲ خواهد بود. همانگونه که در این الگو دیده می‌شود، تاثیر این خروج از تیلرانس در اندازه‌گیری دقت سطح سهموی مورد آزمون ناچیز می‌باشد.

Gen	Setup	wavelength	Field Points	Variables	Draw Off	Group	Notes
Lens: No name			Zoom	1 of 1	1.37	3.5300000	
Entr beam radius		20.00000	Field angle	5.7296e-05	Primary wavl	0.63280	
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL		
OBJ	0.00000	1.0000e+20	1.0000e+14		AIR		
AST	71.070000	9.00000	20.00000	AS	BK7	C	
2	-248.730000	538.28555	V	19.138952	S	AIR	CA
3	-434.60000	-538.28555	P	95.00000		REFL_HATCH	A
4	-248.730000	P	19.138450	S	BK7	C	CA
5	71.070000	P	-100.00000	19.999511	S	AIR	
IMS	0.00000	0.00000	19.999976	S			

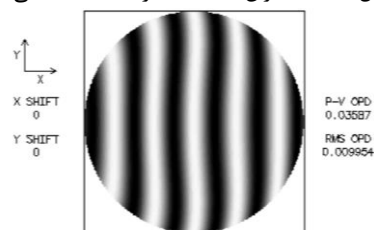
شکل ۱۱: اعمال خطا به میزان 0.05mm در شعاع سطح غیر کروی عدسی
حیران‌کننده



شکل ۱۲: الگوی تداخلی در نتیجه‌ی اعمال خطا به میزان 0.05mm در شعاع سطح غیر کروی عدسی جریان‌کننده

Gen	Setup	wavelength	Field Points	Variables	Draw Off	group	Notes
Lens: No name			Zoom	1 of 1	1:1	4, 20.000000	
Entr beam radius		20.000000	Field angle	5.7296e-05	Primary wavln	0.632800	
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL		
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14				
AST	71.070000	9.050000	20.000000	AS	BK7	C	C
2	-248.780000	538.270723	V	19.134168	S	ATR	CA
3	-434.600000	-338.270723	P	95.000000	REFL_HATCH		A
4	-248.780000	-9.050000	P	19.135061	S	BK7	CA
5	71.070000	-100.000000	P	20.000903	S	ATR	C
IMS	0.000000	0.000000	0.000000	20.000329	S		

شکل ۵: اعمال خطا به میزان 0.05mm در ضخامت عدسی، جبران کننده



شکل ۶: الگوی تداخلی در صورت خروج از تفرانس ضخامت مرکزی عدسی حیران کننده به میزان 0.05mm

۲-۳- حساسیت چیدمان به وجود خطای هم‌مرکزی عدسی جبران‌کننده‌ی کامل

با اعمال خطای هم‌مرکزی در عدسی جبران‌کننده‌ی کامل به میزان $30\text{arcsec}=0.008333^\circ$ ، در پنجره‌ی شکل ۷، الگوی تداخلی مشابه شکل ۸ خواهد شد. همانگونه که در این الگو دیده می‌شود، تاثیر این خروج از تفرانس در اندازه‌گیری دقت سطح سهموی مورد آزمون ناچیز می‌باشد.

Decenter - Tilt Order: **Decenter, then Tilt**

Decenterations			Offset of Tilt vertex		
DCX	DCY	DCZ	TOL	TOY	TOZ
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Rotation Angles (degrees)

TLA	TLB	TLC	TOL	TOY	TOZ
0.008333	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Pickup type: **None**

Coordinates: Local Tilt and bend: No

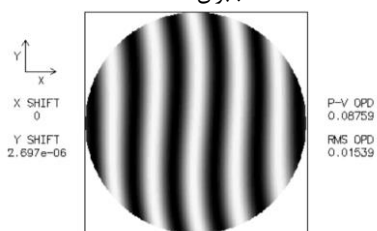
Coordinate return: **Yes** Return to surface: 1 (untilted coordinates)

Use base coordinate system for coordinate returns to this surface: **Yes**

Delete Coordinates Data

شکل ۷: اعمال خطا به میزان $30\text{arcsec}=0.008333^\circ$ در هم مرکزی عدسی

جبر از کننده



شکل ۸: الگوی تداخلی در نتیجه‌ی اعمال خطا به میزان $0.008333^\circ = 30\text{arcsec}$ در هم‌مرکزی عدسه، حیران‌کننده

۳-۳- حساسیت چیدمان به وجود خطا در شعاع سطوح عدسی جبران کننده‌ی کامل

با اعمال خطا به میزان 0.03mm در شعاع سطح کرومی عدسی جبران‌کننده، در پنجره‌ی شکل ۹، الگوی تداخلی مشابه شکل ۱۰ خواهد بود. همانگونه که در این الگو دیده

آزمون، آسان‌تر و در مدت زمان کمتر امکان‌پذیر خواهد شد.

مراجع

[۱] امید سعادت‌مند، مسعود مردانی، حمیدرضا فلاح، مرتضی حاجی محمودزاده، "طراحی اپتیکی جبران‌کننده‌ی کامل به منظور انجام آزمون دقت سطح در آینه‌ی اولیه‌ی سهموی یک تلسکوپ فضائی"، هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهارمین کنفرانس مهندسی فوتونیک، ۱۳۹۰

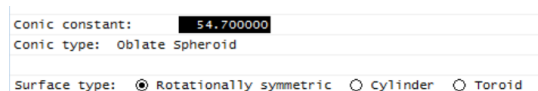
[۲] مسعود مردانی، امید سعادت‌مند، "طراحی جبران‌کننده‌ی کامل با قابلیت تبدیل جبهه‌ی موج تخت به سهموی، به منظور اندازه‌گیری دقت سطوح سهموی به روش تداخل‌سنجی"، بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و هشتمین کنفرانس مهندسی فوتونیک، ۱۳۹۴

- [3] Daniel Malacara, *Optical Shop Testing*, 2007.
 [4] J. R. Moya, and J. E. A. Landgrave, "Third-Order Design of Refractive Offner Compensators" Appl. Opt 26, 2667 (1987).
 [5] A. Offner "A null Corrector for Paraboloidal Mirrors" Appl. Opt. 2, 153 (1963).
 [6] Optical Design Program User's Guide, October 15 2007, www.zemax.com

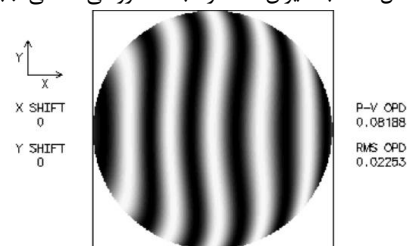
۳-۴- حساسیت چیدمان به وجود خطا در ثابت

مخروطی سطح غیرکروی عدسی جبران‌کننده

با اعمال خطا به میزان 0.1 در ثابت مخروطی سطح غیرکروی عدسی جبران‌کننده، در پنجره‌ی شکل ۱۳، الگوی تداخلی مشابه شکل ۱۴ خواهد شد. همانگونه که در این الگو دیده می‌شود، تاثیر این خروج از تفرانس در اندازه‌گیری دقت سطح سهموی مورد آزمون ناچیز می‌باشد.



شکل ۱۳: اعمال خطا به میزان 0.1 در ثابت مخروطی عدسی جبران‌کننده



شکل ۱۴: الگوی تداخلی در نتیجه‌ی اعمال خطا به میزان 0.1 در ثابت مخروطی عدسی جبران‌کننده

۴- نتیجه‌گیری

حد نهایی هر یک از تفرانس‌های ارائه شده در تحلیل حساسیت طرح، با توجه به قابل حصول بودن تفرانس در روند ساخت و همچنین با توجه به مطلوب بودن کیفیت طرح در صورت اعمال تفرانس استخراج شده است. در حساسیت طرح نسبت به خروج از تفرانس پارامترهای مختلف دیده می‌شود که بیشترین حساسیت مربوط به خطای سنترینگ جبران‌کننده می‌باشد و لازم است در روند ساخت با توجه ویژه مورد کنترل قرار گیرد. با توجه به تک عدسی بودن جبران‌کننده‌ی طراحی شده، در مقایسه با جبران‌کننده‌های دو عدسی طراحی شده در [1] و [2]، نیازی به انجام تنظیمات دقیق مربوط به فواصل عدسیها و همچنین تنظیمات دقیق پارامترهای هم‌مرکزی و هم‌راستایی بین عدسیها در مجموعه‌ی جبران‌کننده نخواهد بود و از این طریق دقت اندازه‌گیری افزایش چشمگیر خواهد یافت. همچنین با توجه به کاهش تعداد عدسیها، تاثیر خطای سطوح اپتیکی و همچنین تاثیر ناهمگنی مواد اپتیکی در دقت اندازه‌گیری کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر با توجه به تک عدسی شدن جبران‌کننده، برپایی چیدمان