



## طراحی جبران کننده‌ی کامل تک عدسی با قابلیت تبدیل جبهه‌ی موج تخت به سهموی، به منظور اندازه‌گیری دقت سطوح سهموی به روش تداخل‌سنجی

مسعود مردانی<sup>۱</sup>، امید سعادت‌مند<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> شرکت صنایع الکترواپتیک صا ایران

در این مقاله با طراحی یک مجموعه‌ی اپتیکی جبران‌کننده‌ی کامل تک عدسی، جبهه‌ی موج تخت خروجی از یک تداخل‌سنج به جبهه‌ی 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 جبران‌کننده‌ی کامل با استفاده از تنها یک تک عدسی انجام شده است که در آن یک سطح تک عدسی، غیرکروی می‌باشد. با تک عدسی شدن جبران‌کننده، در مقایسه با جبران‌کننده‌ی دو عدسی، نیازی به تنظیم دقیق فاصله‌ی بین دو عدسی، تنظیم دقیق هم‌مرکزی و هم‌راستایی دو عدسی نخواهد بود و به این طریق دقت اندازه‌گیری افزایش چشمگیر خواهد یافت. همچنین با تک عدسی شدن جبران‌کننده، خطای سطوح عدسی‌ها و همچنین خطای ناشی از همگنی ماده‌ی اپتیکی کاهش خواهد یافت.

کلید واژه: جبران‌کننده‌ی کامل، غیرکروی، سهموی، تداخل‌سنجی، 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 Mardani<sup>1</sup>, Omid Saadatmand<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> 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.

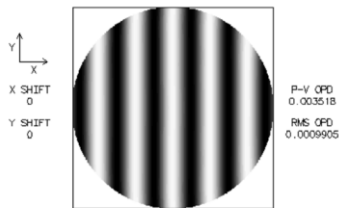
Keywords: perfect null compensator, Aspheric, Parabolic, Interferometry, Optical Design

## مقدمه

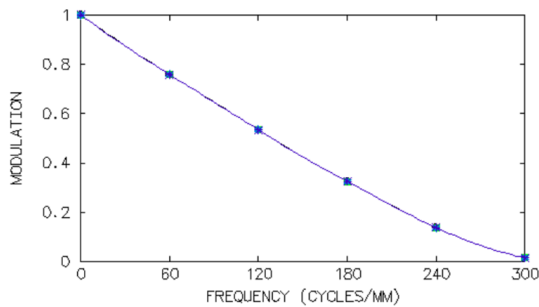
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
AST	71.070000	9.000000	20.000000	BK7	C
2	-248.780000	538.288977	19.138952	AIR	CA
3	-434.600000	-538.288977	95.000000	REFL_HATCH	A
4	-248.780000	-9.000000	19.138884	BK7	CA
5	71.070000	-100.000000	19.999945	AIR	C
IMS	0.000000	0.000000	20.000086		S

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

همانگونه که در الگوی تداخلی شکل ۳ دیده می‌شود، جبران کننده‌ی 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 جبران کننده‌ی کامل تک عدسی طراحی شده



شکل ۴: منحنی MTF جبران کننده‌ی کامل تک عدسی طراحی شده

### ۳- تحلیل حساسیت چیدمان

#### ۳-۱- حساسیت چیدمان به وجود خطا در ضخامت

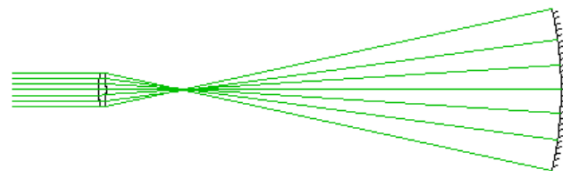
##### مرکزی جبران کننده‌ی تک عدسی

با اعمال خطا در ضخامت مرکزی عدسی جبران کننده به میزان  $0.05\text{mm}$ ، در پنجره‌ی شکل ۵، الگوی تداخلی مشابه شکل ۶ خواهد شد. همانگونه که در این الگو دیده می‌شود، تاثیر این خروج از تلرانس در اندازه‌گیری دقت سطح سهموی مورد آزمون ناچیز می‌باشد.

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 جبران کننده‌ی 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. جبران کننده‌ی 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 جبران کننده، تاثیر خطای سطوح اپتیکی و همچنین همگنی مواد اپتیکی در اندازه‌گیری نیرخ 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 جبران کننده وارد و جبهه‌موج سهموی به منظور آزمون سطح سهموی، از آن خارج خواهد شد.

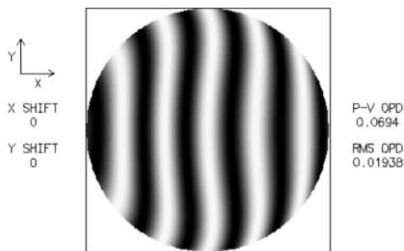


شکل ۱: چیدمان اپتیکی پیشنهادی برای آزمون سطح سهموی با طراحی جبران کننده‌ی کامل تک عدسی

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

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
AST	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 C
5	71.040000	-100.000000	20.001769	S	AIR C
IMS	0.000000	0.000000	20.000549	S	

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

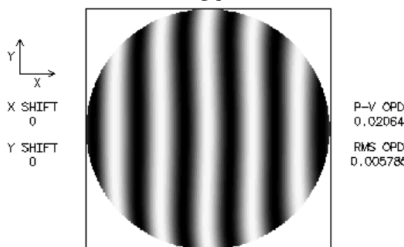


شکل ۱۰: الگوی تداخلی در نتیجه‌ی اعمال خطا به میزان 0.03mm در شعاع سطح کروی عدسی جبران کننده

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 تلرانس در اندازه‌گیری دقت سطح سهموی مورد آزمون ناچیز می‌باشد.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
AST	71.070000	9.000000	20.000000	AS	BK7 C C
2	-248.730000	538.283552	19.138952	S	AIR CA
3	-434.600000	-538.283552	95.000000	REFL_HATCH	A
4	-248.730000	-9.000000	19.138450	S	BK7 C C
5	71.070000	-100.000000	19.999511	S	AIR C
IMS	0.000000	0.000000	19.999976	S	

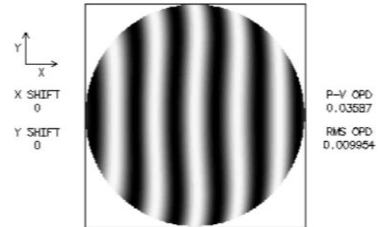
شکل ۱۱: اعمال خطا به میزان 0.05mm در شعاع سطح غیرکروی عدسی جبران کننده



شکل ۱۲: الگوی تداخلی در نتیجه‌ی اعمال خطا به میزان 0.05mm در شعاع سطح غیرکروی عدسی جبران کننده

Gen	Setup	wavelength	Field Points	Variables	Draw Off	Group	Notes
Lens: No name Zoom 1 of 1 1:1 1.2250e+06							
Ent beam radius 20.000000 Field angle 5.7296e-05 Primary wavln 0.632801							
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL		
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR			
AST	71.070000	9.000000	20.000000	AS	BK7 C C		
2	-248.780000	538.270723	19.134168	S	AIR CA		
3	-434.600000	-538.270723	95.000000	REFL_HATCH	A		
4	-248.780000	-9.000000	19.135061	S	BK7 C C		
5	71.070000	-100.000000	20.000903	S	AIR C		
IMS	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 تلرانس ضخامت مرکزی عدسی جبران کننده به میزان 0.05mm

## ۲-۳- حساسیت چیدمان به وجود خطای هم‌مرکزی عدسی جبران کننده‌ی کامل

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

Decenter - Tilt Order: Decenter, then Tilt						
Decenterations						
DCX	DCY	DCZ	Offset of Tilt vertex			
Rotation Angles (degrees)	TLA	TLB	TLC	TOX	TOY	TOZ
0.000000	0.000000	0.000000	0.008333	0.000000	0.000000	0.0000

شکل ۷: اعمال خطا به میزان  $0.008333'' = 30\text{arcsec}$  در هم‌مرکزی عدسی جبران کننده



شکل ۸: الگوی تداخلی در نتیجه‌ی اعمال خطا به میزان  $0.008333'' = 30\text{arcsec}$  در هم‌مرکزی عدسی جبران کننده

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

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

آزمون، آسان تر و در مدت زمان کمتر امکان پذیر خواهد شد.

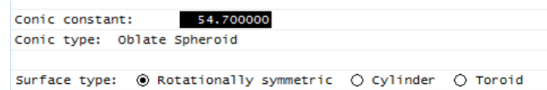
### مراجع

- [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](http://www.zemax.com)

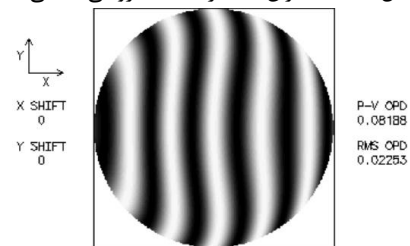
### ۴-۳- حساسیت چیدمان به وجود خطا در ثابت

#### 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 ترانس 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 ترانس‌های ارائه شده در تحلیل حساسیت طرح، با توجه به قابل حصول بودن ترانس در روند ساخت و همچنین با توجه به مطلوب بودن کیفیت طرح در صورت اعمال ترانس استخراج شده است. در حساسیت طرح نسبت به خروج از ترانس 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