بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

بررسی دقت اندازه گیری زمان همدوسی جو در مدل واکانونی سریع با دستگاه تلاطم سنج چهارروزنه

محسن پناهی[۱]، رامین شمالی[۲] و محمود ملاباشی[۱]

۱ تهران-دانشگاه علم و صنعت ایران-دانشکده فیزیک

۲ زنجان-دانشگاه زنجان-دانشکده فیزیک

چکیده- در این مقاله توانایی تلاطم سنج چهار روزنه در اندازه گیری زمان همدوسی جو به کمک شبیه سازی مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. به منظور تعیین واکانونی جو و تغییرات آن به کمک دستگاه تلاطم سنج چهارروزنه یک سری از تصاویر با فرکانس داده برداری ۷۰۰ هرتز شبیه سازی گردیده است. زمان همدوسی جو به وسیله برازش نمودن تابع ساختار زمانی واکانونی جو با مدل واکانونی سریع(*FADE*) استخراج می گردد. در این مقاله نشان داده شده است که دستگاه تلاطم سنج چهار روزنه قادر به اندازه گیری دقیق زمان همدوسی جو در فرکانس داده برداری بالا می باشد.

کلید واژه- اندازه گیری جبهه موج، تلاطم جو، تابع ساختار زمانی واکانونی جو، زمان همدوسی جو

Investigation of atmospheric coherence time measurement accuracy In fast defocus model by a 4 aperture differential image motion monitor

Mohsen Panahi[1], Ramin Shomali[2] and Mahmoud Mollabashi[1]

1 Depatment of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran

2 Depatment of Physics, University of Zanjan, Zanjan

Abstract- In this paper the ability of the 4- aperture differential image motion monitor (DIMM) is investigated and discussed to measure the atmospheric coherence time by simulation. Sequences of images with 700 Hz acquisition frequency are simulated to determine the atmospheric defocus and its variations with 4- aperture DIMM. The atmospheric coherence time is derived by fitting the temporal structure function of the atmospheric defocus to the fast defocus model. It is shown that the 4- aperture DIMM is able to measure the atmospheric coherence time accurately in high acquisition frequency.

Keywords: wave-front sensing, atmospheric turbulence, atmospheric defocus structure function, atmospheric coherence time

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

در انتخاب مکان رصدخانه و یا طراحی سامانه های اپتیک تطبیقی، دانستن پارامترهای جو ضروری است[۱]. یکی از این پارامترها مدت زمان دوام ساختارهای تلاطم و همچنین میزان سرعت نوسانات جبهه موج جو یا همان زمان همدوسی جو است که می توان مقدار آن را به کمک روش واکانونی سریع[۲] تخمین زد. این روش بر اساس پردازش نوسانات سریع در تلسکوپ های کوچک عمل می کند. همچنین قبلا نشان داده شده است که دستگاه تلاطم سنج چهار روزنه، ابیراهی واکانونی جو را با سرعت و دقت بالا اندازه گیری می کند[۳و۴]. در این مقاله قابلیت دستگاه تلاطم سنج چهار روزنه برای اندازه گیری زمان همدوسی جو به کمک شبیه سازی مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

۲- نظریه آزمون تلاطم سنج چهار روزنه برای اندازه گیری ابیراهی های مرتبه پایین

توانایی دستگاه تلاطم سنج چهار روزنه برای اندازه گیری ابیراهی های اولیه جوی در حضور ابیراهی های مرتبه بالای جو به کمک شبیه سازی عددی و آزمایش قبلا مورد بحث و بررسی قرار گرفته است[۳و۴]. اندازه ابیراهی واکانونی، در تلاطم سنج چهار روزنه با رابطه زیر محاسبه می شود

$$D=-\frac{(ta_{x\alpha}-ta_{x\beta})-(ta_{x\gamma}-ta_{x\delta})+(ta_{y\alpha}+ta_{y\beta})-(ta_{y\gamma}+ta_{y\delta})}{8F_{tel}d'}. \quad (۱)$$

که F_{tel} فاصله صفحه چهارروزنه از سطح حسگر CCD و ta_x/F_{tel} و ta_y/F_{tel} مولفه های ابیراهی های زاویه ای اندازه گیری شده از موقعیت ایده آل و α، β، γ و δ نشانگر روزنه ها هستند.

۳- تخمین زمان همدوسی جو با روش واکانونی سریع

زمان همدوسی جو با رابطه زیر تعریف می شود[۱]

$$\tau_0 = 0.314\frac{r_0}{\overline{V}} \quad (۲)$$

که r_0 پارامتر فرید و $\overline{V}$ سرعت متوسط باد است.

از آنجایی که جو از لایه های مختلفی تشکیل شده است، r_0 و $\overline{V}$ با روابط زیر تعریف می شوند

$$r_0 = [0.423((\frac{2\pi}{\lambda})^2(\cos\alpha)^{-1}\int_0^\infty C_n^2(h)dh]^{-3/5} \quad (۳)$$

$$\overline{V}=\left(\frac{\int_0^\infty V(h)^{5/3}C_n^2(h)\,dh}{\int_0^\infty C_n^2(h)dh}\right)^{3/5} \quad (۴)$$

که $C_n^2(h)$ پارامتر ساختار ضریب شکست (درارتفاع h و طول موج مشاهده شده λ) و α زاویه سمتی مشاهده است. توکووینین و کلرر یک مدل ارایه کردند که با اندازه گیری واکانونی جو و سرعت تغییرات آن، زمان همدوسی جو را می توان تخمین زد[۲]. در این مدل پیشنهادی تابع ساختار واکانونی جو برای N لایه متلاطم با رابطه زیر تعریف می شود

$$D_4^m(t)=1.94D^{5/3}\sum_{i=1}^N r_{0,i}^{-5/3}\left(\frac{C_1\left(\frac{2tV_i}{D}\right)^2+C_2\left(\frac{2tV_i}{D}\right)^6}{1+C_3\left(\frac{2tV_i}{D}\right)^\alpha+\left(\frac{2tV_i}{D}\right)^6}\right) \quad (۵)$$

که $r_{0,i}$ پارامتر فرید و V_i سرعت باد در لایه ها است ($i=1,...,N$). D قطر دهانه و ضرایب C_1، C_2، C_3 و α چند جمله ای هایی بر حسب انسداد مرکزی تلسکوپ(ε) هستند[۲]. تخمین واکانونی سریع برای محاسبه زمان همدوسی τ_0 به شکل زیر به دست می آید. ابتدا رشته ای از واکانونی های جو با فرکانس داده برداری ۷۰۰ هرتز اندازه گیری می شود، تابع ساختار زمانی $D_4(t)$ این رشته از رابطه زیر به دست می آید

$$D_4(t)=\left\langle(a_4(t'+t)-a_4(t'))^2\right\rangle \quad (۶)$$

برای تخمین پارامترهای جوی $r_{0,i}$ و V_i، به $D_4(t)$ مدل $D_4^m(t)$ برازش می شود. این برازش بر قسمت اولیه تابع ساختار اعمال می شود. به کمک $r_{0,i}$ و V_i تخمین زده شده برای هر لایه، پارامترهای جوی میانگین r_0 و $\overline{V}$ با روابط زیر محاسبه می شوند

$$r_0^{-5/3}=\sum_{i=1}^N r_{0,i}^{-5/3}\left(\frac{\overline{V}}{r_0}\right)^{5/3}=\sum_{i=1}^N\left(\frac{V_i}{r_{0,i}}\right)^{5/3} \quad (۷)$$

(۸)

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه **www.opsi.ir** معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

در نهایت با استفاده از رابطه ۲، زمان همدوسی جو τ_0 محاسبه می شود.

۴- شبیه سازی

۴-۱ اندازه گیری ابیراهی واکانونی جو با تلاطم سنج چهار روزنه

در این شبیه سازی، سه صفحه فاز در ارتفاع ۰، ۵ و ۱۰ کیلومتری در نظر گرفته می شود. این صفحات با آمار کولموگروف تولید می شوند[۵]. ماتریس های صفحات به صورت ۱۲۰۰۰ در ۱۲۰۰۰ پیکسل با اندازه واقعی ۲۴ متر در ۲۴ متر هستند. فرض می کنیم که نور یک ستاره $(\lambda = 0.5\mu m)$ بعد از عبور از سه صفحه فاز بر روی دریچه تلسکوپ با فاصله کانونی F_{tel}=۳/۹ m ، قطر دریچه D_{tel}=۳۶ cm و انسداد مرکزی ε=۰/۳۲ فرود می آید. برای شبیه سازی سرعت باد در لایه های مختلف جو، صفحات فاز در جلوی دریچه تلسکوپ حرکت می کنند. تابع موج مختلط برای نور اعوجاج یافته در دریچه تلسکوپ با روش انتشار لایه ای پرتو (split-step) محاسبه می شود[۶]. تابع موج مختلط و توزیع شدت در صفحه کانون برای یک تلسکوپ با تابع روزنه زیر

$$P=\begin{cases}1 & \text{داخل دریچه}\\ 0 & \text{در غیر اینصورت}\end{cases} \qquad (۹)$$

به شکل زیر می باشد

$$U_f = FFT(PU_i)\ ,\ I_f = |U_f|^2 \qquad (۱۰)$$

که FFT تبدیل فوریه سریع و U_i تابع موج مختلط بر روی دریچه تلسکوپ می باشد. دریچه دایروی با قطر ۱۸۰ پیکسل که در مرکز یک مستطیل با قدرت تفکیک ۵۰۰×۵۰۰ و اندازه پیکسل ۲mm×۲mm در صفحه دریچه شبیه سازی می گردد. صفحه مشاهده در صفحه کانون تلسکوپ با قدرت تفکیک ۵۰۰×۵۰۰ پیکسل و اندازه پیکسل ۲μm×۲μm قرار می گیرد. برای شبیه سازی تصاویر لکه در تلاطم سنج چهار روزنه از توابع دریچه زیر استفاده می شود.

$$P_j(x,y)=\begin{cases}1 & r_j^2 \le R^2 = 40^2\\ 0 & otherwise\end{cases},\quad j=\alpha,\beta,\gamma,\delta \qquad (۱۱)$$

که

$$r_{\alpha(\beta)}^2 = (x \pm 46)^2 + (y+46)^2$$
$$r_{\gamma(\delta)}^2 = (x \mp 46)^2 + (y-46)^2$$

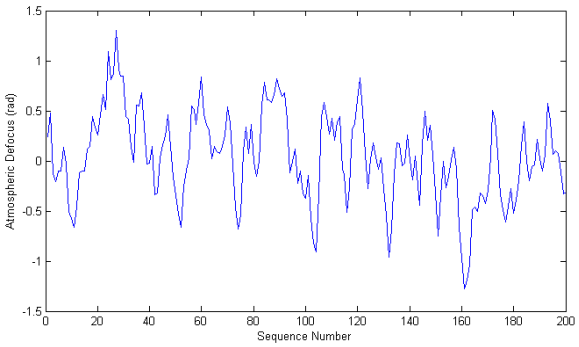
توابع تصویر لکه ها نیز به شکل زیر محاسبه می شوند:

$$I_j = \left|FFT\left(P_j U_i \exp\left(-iQ(z_j)\right)\right)\right|^2 \qquad (۱۲)$$

که $z_{\alpha(\beta)} = \mp z_2 - z_3$ ، $z_{\gamma(\delta)} = \mp z_2 + z_3$ و z_2 z_3 نیز جملات کج شدگی زرنیکه هستند که مانند یک گوه تصاویر هر لکه را جدا می کنند و Q ضریب تیلت می باشد. تصویر چهار لکه از رابطه زیر محاسبه می شود

$$I = \sum_j I_j = I_\alpha + I_\beta + I_\gamma + I_\delta \qquad (۱۳)$$

با استفاده از معادله (۱) و جابجایی مراکز لکه های واقعی از مراکز لکه های ایده آل، ابیراهی واکانونی جو به دست می آید(شکل۱).



شکل۱: واکانونی جوی برای رشته ای از تصاویر با r_0 = ۱۰ cm و $\bar{V}$ = ۲۰ m/s که با تلاطم سنج چهار روزنه در فرکانس داده برداری ۷۰۰ هرتز شبیه سازی شده است.

۴-۲ مدل تابع ساختار واکانونی جو

کلرر و توکووینین تابع ساختار واکانونی را با رابطه (۵) تعریف کردند[۲]. برای پارامترهای شبیه سازی این مقاله، مدل تابع ساختار واکانونی به شکل زیر نوشته می شود

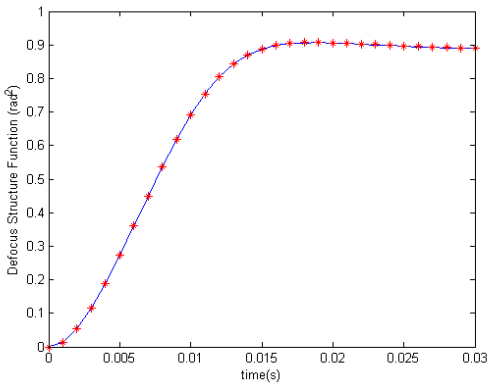
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه **www.opsi.ir** معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

$$D_4^m(t)=0.351\sum_{i=1}^{N} r_{0,i}^{-5/3}\left(\frac{1.08(V_i t)^2+496.8(V_i t)^6}{1+37.51(V_i t)^{1.88}+29225(V_i t)^6}\right) \quad (۱۴)$$

۳-۴ تخمین زمان همدوسی جوی

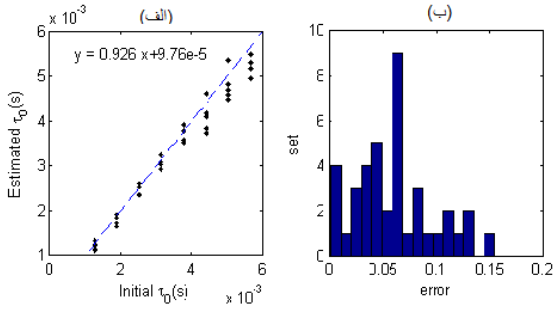
برای مجموعه ای از واکانونی های جوی اندازه گیری شده تابع ساختار زمانی $D_4(t)$ با معادله ۶ محاسبه می شود. تابع ساختار مدل $D_4^m(t)$ بر قسمت اولیه تابع ساختار محاسبه شده با روش لونبرگ-مارکوارت[۷] برازش می شود(شکل۲). بعد از یافتن تخمین هایی برای $r_{0,i}$ و V_i، پارامترهای جوی میانگین r_0 و $\overline{V}$ با استفاده معادلات ۷ و ۸ محاسبه می شوند. در نهایت تخمین زمان همدوسی جو با معادله ۲ به دست می آید.



شکل۲: توابع ساختار زمانی واکانونی جوی اندازه گیری شده در ۷۰۰ هرتز برای داده هایی که با r_0 = ۱۰ cm و $\overline{V}$ = ۲۰ m/s (خط) شبیه سازی شده است. منحنی برازش شده با مدل واکانونی سریع (علامت +)

۵- نتیجه گیری

در شکل ۳ زمان های همدوسی تخمین زده شده با زمان های همدوسی اولیه برای ۴۰ مجموعه با سرعت میانگین باد ۲۰ m/s مقایسه شده است که ۸۵ درصد داده ها خطای کمتر از ۱۰ درصد دارند. در واقع از طریق اجرای شبیه سازی های عددی نشان داده شد که تلاطم سنج چهار روزنه ابزاری قوی برای اندازه گیری هم زمان و زنده زمان همدوسی جو می باشد.



شکل۳: (الف) محور افقی زمان همدوسی اولیه و محور عمودی زمان همدوسی محاسبه شده با تلاطم سنج چهار روزنه است. (ب) محور افقی خطا و محور عمودی تعداد مجموعه ها است. (میانگین سرعت باد ۲۰m/s است)

مراجع

[1] Roddier F 1981 The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy *Prog. Optics.* 19, 281-376.

[2] Tokovinin A, Kellerer A and Coude Du Foresto V 2008 FADE, an instrument to measure the atmospheric coherence time *Astron. Astrophys.* 477, 671–678.

[3] Shomali R, Nasiri S and Darudi A 2011 Measurement of the atmospheric primary aberrations by a four-aperture differential image motion monitor *J. Opt.* 13, 055708(6pp).

[4] Shomali R, Darudi A and Nasiri S 2013 Experimental measurement of the atmospheric primary aberrations by a four-aperture differential image motion monitor *J. Opt.* 15, 125721 (6pp).

[5] Harding C M, Johnston R. A, Lane R G 1999 Fast Simulation of a Kolmogorov Phase Screen *Appl. Opt.* 38, 2161-70.

[6] Schmidt J D 2010 Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLB (SPIE).

[7] More, J. J., 1977 *"The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory," Numerical Analysis*, (ed. G. A. Watson, Lecture Notes in Mathematics 630, Springer Verlag, pp. 105-116).

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه **www.opsi.ir** معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]