

УДК 004.932.2, 621.397.424.2
 EDN: UHXFBF

PACS: 95.75.Mn, 42.79.Pw

Мобильная система определения атмосферной турбулентности одноапертурным методом

© И. В. Шалдырван*, В. В. Комаров, М. Ю. Фокин, В. А. Егоров

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, пос. Нижний Архыз, КЧР, 369167 Россия

* E-mail: shaldyrvan@sao.ru

Статья поступила в редакцию 18.06.2026; после доработки 25.08.2026; принята к публикации 22.10.2026
 Шифр научной специальности: 2.2.6., 1.2.2.

Разработана мобильная система для измерения атмосферной турбулентности с использованием метода одной апертуры. Это метод мониторинга дифференциальных движений изображения (DIMM), предполагающий неклассическое исследование большого количества изображений, полученных с помощью одного фотодетектора.

Ключевые слова: DIMM, CMOS-матрица, метод обработки изображений.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-103-110

1. Введение

Прозрачность атмосферы является важным фактором, влияющим на различные сферы деятельности человека. Её необходимо учитывать при проведении исследований и разработке технологий, связанных с использованием солнечной энергии, с астрономическими исследованиями, а также имеющих двойное назначение.

Исследование прозрачности атмосферы – сложный и наукоемкий процесс, так как само понятие прозрачности атмосферы является объемным [1] и включает в себя три составных процесса, происходящих одновременно во время прохождения излучения сквозь слои атмосферы, как показано на рис. 1:

1) атмосферную экстинкцию – отношение потока прямого излучения, прошедшего через атмосферу к потоку излучения на верхней границе атмосферы;

2) астрономическую видимость, обусловленную атмосферной турбулентностью (или атмосферную видимость, или seeing, или

угловой размер атмосферных изображений, или атмосферное разрешение);

3) рассеяния излучения, зависящие от длины волны излучения (рэлеевское рассеяние, не влияющее на длину волны излучения, но интенсивность которого зависит от длины волны излучения и состава атмосферы, и рамановское рассеяние, изменяющее длину волны проходящего через атмосферу излучения).

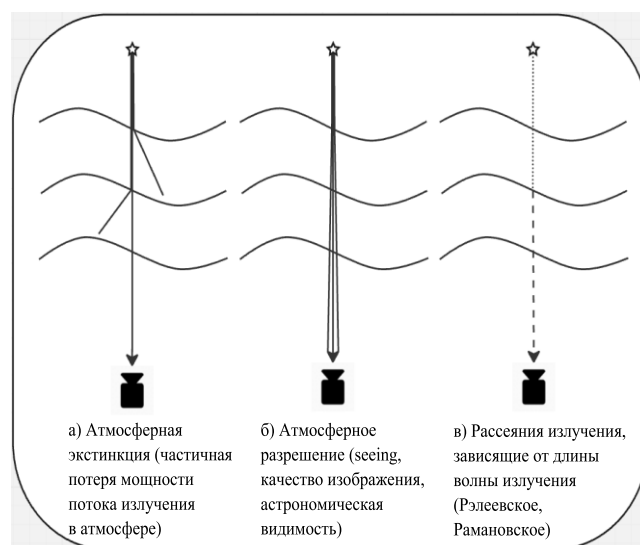


Рис. 1. Процессы в составе понятия «прозрачность атмосферы»

Данные процессы в составе прозрачности атмосферы зависят как друг от друга, так и от метеорологических параметров:

- масса воздуха, через которую проходит излучение;
- содержание водяного пара – пар поглощает часть излучения в инфракрасном диапазоне, что приводит к нагреву атмосферы;
- концентрация аэрозолей (пыли, дыма, тумана) и облаков – они рассеивают и поглощают излучение;
- атмосферная турбулентность и ветровая нагрузка – неравномерность атмосферы, обусловленная перемещением воздушных масс, влияет на распределение рассеивания и поглощения солнечного излучения на всем пути прохождения излучения через атмосферу;
- время суток и сезон года – количество излучения, достигающего земной поверхности, изменяется в зависимости от угла падения лучей;
- угол места – с увеличением угла места толщина атмосферы, через которую проходят лучи, увеличивается, что увеличивает вероятность взаимодействия лучей с атмосферными частицами и молекулами. В результате коэффициент прозрачности атмосферы начинает уменьшаться по мере приближения к горизонту.

В целях исследования прозрачности атмосферы нами была разработана система определения атмосферной видимости (или атмосферного разрешения) одноапертурным методом, позволяющая вычислить центр фигуры (центроид) Полярной звезды и значение полной ширины на половине максимума (FWHM) звезды, что и является значением астрономической видимости, обусловленной состоянием атмосферы (seeing), а также радиуса Фрида (r_0) [2].

2. Метод мониторинга дифференциальных движений изображения

Метод определения атмосферной видимости (или атмосферного разрешения), используемый в нашей системе – метод мониторинга дифференциального движения изображения (Differential-Image-Motion-Monitor –

DIMM). Классический DIMM [3] на данный момент является общепринятым инструментом для измерения параметра seeing. В нем параметр Фрида оценивается по дисперсии движения дифференциального изображения в двух малых апертурах, обычно вырезанных маской в одном большом зрачке телескопа, либо с применением двух согласованных с одним сенсором телескопов.

Успех и широкое внедрение DIMM привели к некоторой путанице. Часто считается, что модуль DIMM – это надежный и самокалиброванный инструмент, который всегда правильно измеряет качество изображения. Однако ряд тонких инструментальных эффектов в модулях DIMM могут искажать результаты [3].

Точная калибровка и устранение смещения результатов DIMM становится критически важным пунктом для сравнения площадок и прогнозирования изображения телескопа, а громоздкость прибора чаще всего требует его стационарного размещения.

Нами была разработана система с компактным прибором для получения изображений с одной апертурой, с исследованием большого количества изображений, разнесенных относительно друг друга не физически, а по времени, в отличие от классического DIMM.

В работах [3], [4] приведены уравнения, связывающие величину дисперсии положения центра изображения (изменение положения центроида Полярной звезды в серии изображений относительно друг друга), диаметр телескопа D_m и параметр Фрида r_0 :

$$\sigma_*^2 = K \times \lambda^2 \left(\frac{1}{r_0} \right)^{5/3} \times \left(\frac{1}{D_m} \right)^{1/3}. \quad (1)$$

Дальнейшие вычисления проводятся для $\lambda = 550$ нм ($5,5 \times 10^{-7}$ м), что соответствует примерно середине диапазона видимого света. Параметр K зависит от отношения расстояния между апертурами к диаметру апертур (для классического DIMM). В случае нулевого расстояния (одна апертура) $K = 0,358$. Из работы [4] следует, что в нашем случае параметр Фрида вычисляется как:

$$r_0 = \left(\frac{0,358 \times \lambda^2}{\sigma_*^2} \right)^{0,6} \times \left(\frac{1}{D_m} \right)^{0,2}. \quad (2)$$

Параметр Фрида же определяет seeing или атмосферное разрешение – FWHM изображения ограниченного атмосферной турбулентностью для телескопа произвольного диаметра и вычисляется по [4] так:

$$FWHM(\text{rad}) = 0,98 \times \frac{\lambda}{r_0} \quad (3)$$

или:

$$FWHM(\text{arcsec}) = 0,98 \times \frac{\lambda}{r_0} \times 206265.$$

Полученные по формулам (2) и (3) значения соответствуют зенитному расстоянию Z Полярной звезды. Чтобы получить значения для зенита, учитываем изменение воздушной массы с зенитным расстоянием. Параметр Фрида и seeing пропорционален воздушной массе в степени 0,6:

$$FWHM_z = FWHM_p / (\cos Z)^{-0,6} \quad (4)$$

и

$$r_{0z} = r_{0p} \times (\cos Z)^{-0,6}. \quad (5)$$

Эта зависимость показана на рис. 2.

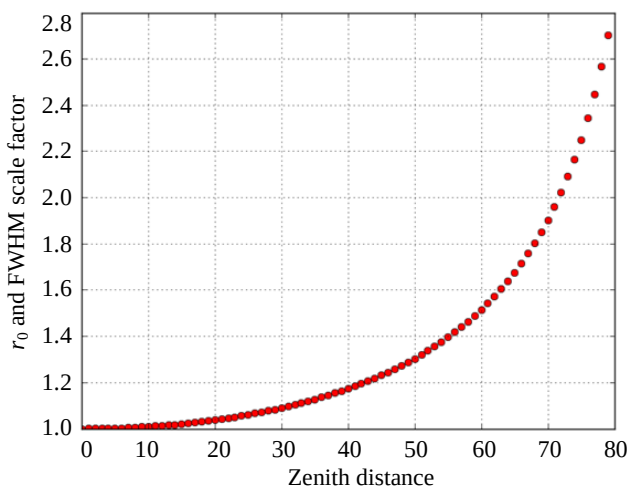


Рис. 2. Изменение параметра Фрида и FWHM зенитным расстоянием

3. Технические характеристики

В нашей системе для получения атмосферной видимости (или атмосферного разрешения) в свободной атмосфере [5] должен использоваться прибор для получения множества изображений Полярной звезды без гидирования с одной апертурой, для данных вычислений требуется серия снимков с короткими интервалами между снимками и короткими экспозициями. Для получения таких снимков лучше всего подходят камеры с CMOS-сенсором.

По причине использования неклассического метода определения атмосферной видимости удалось сконструировать компактный и мобильный прибор на базе IP-камеры массового производства с CMOS-сенсором Sony IMX335 с разрешением 2592×1944, форматом изображения 4/3 и объектива с фокусным расстоянием (FL) = 63,5 мм и с полем зрения $H = 4,24$ и $V = 3,18$ угл. град.

IMX335LQN – это твердотельный CMOS-сенсор с активными пикселями размером 6,52 мм (тип 1/2,8) и квадратной матрицей с 5,14 млн эффективных пикселей. Этот чип может работать от трёх источников питания: аналогового 2,9 В, цифрового 1,2 В и интерфейсного 1,8 В и отличается низким энергопотреблением. Высокая чувствительность достигается примененной в исполнении данного сенсора технологии обратной засветки пикселя (Back Side Illumination, BSI). Этот чип оснащён электронным затвором с переменным временем интегрирования заряда.

Спектральная чувствительность сенсора IMX335LQN показана на рис. 3.

Смоделирован и исполнен в атмосферостойких материалах (ASA, или атмосферостойкий ABS) корпус для камеры. Размеры корпуса камеры, модель и внешний вид которого показаны на рис. 4, не превышают 10×10×10 см для исключения колебаний системы из-за ветровых нагрузок. В корпусе реализована возможность менять угол места объектива камеры для использования системы на любых широтах северного полушария.

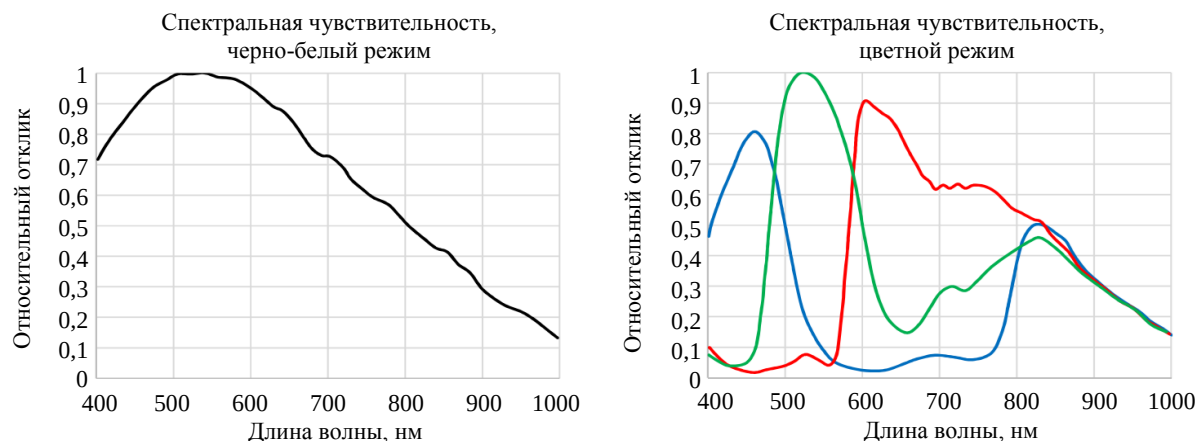


Рис. 3. Спектральная чувствительность сенсора IMX335LQN

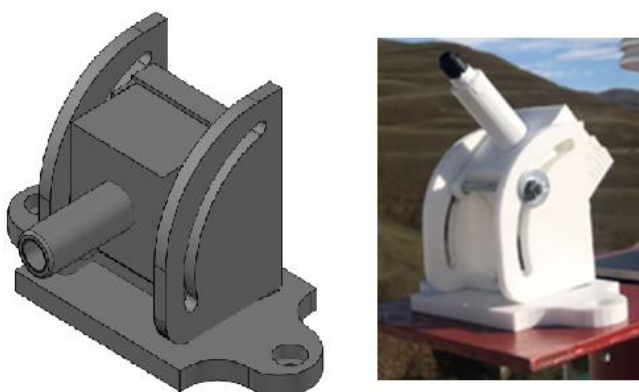


Рис. 4. Модель и внешний вид камеры системы определения атмосферной видимости

Обработка изображений, полученных камерой, производится посредством скрипта python с применением свободно распространяемых библиотек, что позволяет выполнить разные версии системы. Мобильная автономная система «камера-ноутбук/мини-ПК-USB-

модем-PowerBank/зарядная станция-солнечная панель» с обработкой изображений непосредственно на месте установки системы и передачи в сеть готовых результатов измерений схематически показана на рис. 5.

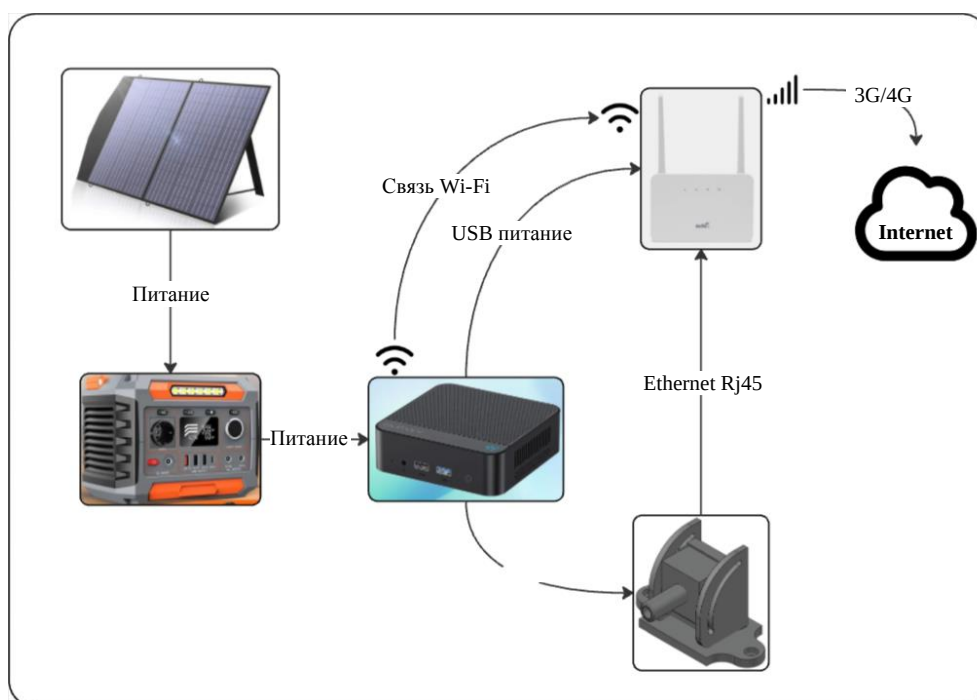


Рис. 5. Схема автономной системы «камера-ноутбук/мини-ПК-USB-модем-PowerBank/зарядная станция-солнечная панель»

Мобильная система «камера-маршрутизатор-PowerBank/зарядная станция-солнечная панель» с передачей изображений на стационарный компьютер через сеть Internet с последующей их обработкой показана на рис. 6.

Также нами ведется разработка системы на базе камеры с CMOS-матрицей Sony IMX335

для определения атмосферной видимости (или атмосферного разрешения) в дневное время посредством исследования большого количества изображений Солнца. Размеры корпуса не превышают 6×6×20 см, модель показана на рис. 7.

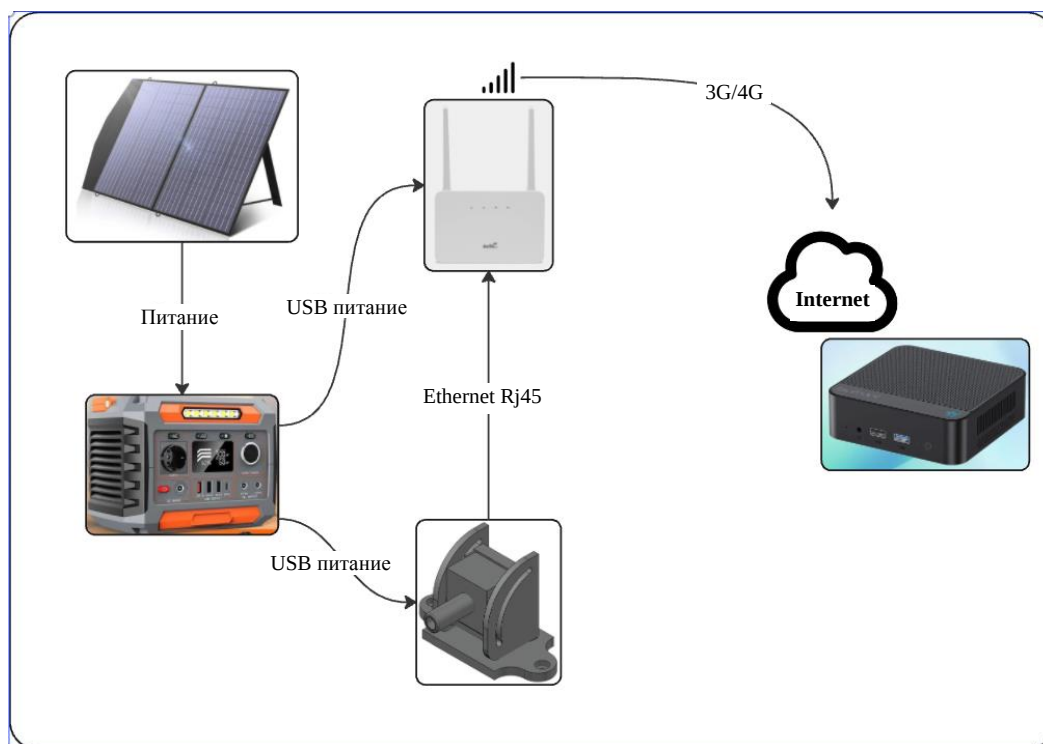


Рис. 6. Схема автономной системы «камера-маршрутизатор-PowerBank/зарядная станция-солнечная панель»

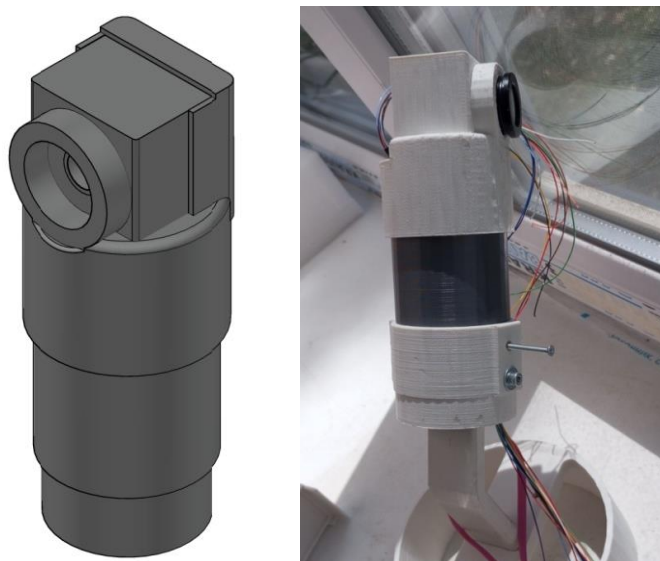


Рис. 7. Модель и внешний вид разрабатываемой системы для определения атмосферной видимости в дневное время по изображениям Солнца

4. Полученные результаты

Были изготовлены и установлены четыре идентичные камеры:

- в КЧР на территории оптических телескопов САО РАН (крыша телескопа Цейсс-1000) [6];
- в станции Зеленчукской (КЧР) вблизи радиотелескопа РАТАН-600;
- на пункте Радиоастрономической обсерватории «Зеленчукская» радио интерферометрической сети «Квазар-КВО» вблизи села Даусуз (КЧР);
- в поселке Буршаг (Республика Дагестан) у подножия горы Джугудуг.

15.05.2026 была установлена и запущена в работу пятая система – на площадке Крым-

ской Астрофизической обсерватории в поселке Научный (Республика Крым).

Предварительные испытания идентичных камер показали типовую погрешность измерений камеры, обусловленную шумами матрицы, составляющую около 0,2 %, и хорошую сходимость результатов измерений, полученных посредством обработки изображений с камер, установленных в непосредственной близости друг от друга (расстояние не более 0,5 м друг от друга) [7]. Как показано на рис. 8, разница средних значений за ночь между двумя идентичными приборами (Polar 1 и Polar 2), установленными на расстоянии не более 0,5 м друг от друга, составляет 1,6 % (среднее значение Polar 1 – 1,344 угл.сек, среднее значение Polar 2 – 1,322 угл.сек.).

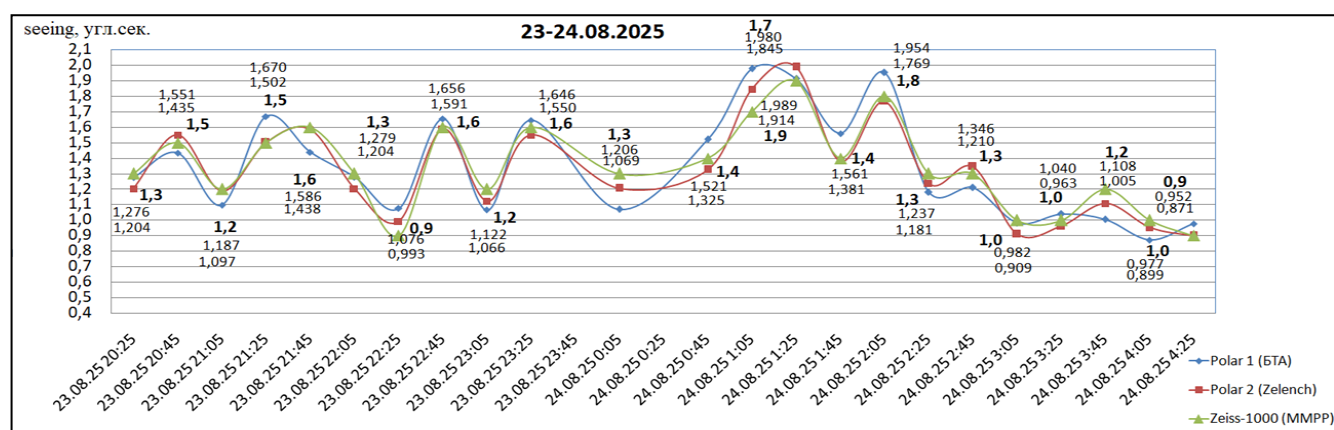


Рис. 8. Сравнение значений, полученных двумя идентичными системами, установленными вблизи друг от друга, со значениями, полученными при обработке изображений прибора MMPP телескопа Цейсс-1000

Также были произведены сравнения значений seeing, полученных нашей системой, с измерениями, полученными на других приборах [8]. Сравнение со значениями, полученными на приборе MMPP телескопа Цейсс-1000 [9] также показано на рис. 8. Сравнение со значениями, полученными на приборе W-DIMM по Веге (черные точки на графике), со значениями, полученными нашей системой

по Полярной звезде (синяя линия), показано на рис. 9. Разница средних значений составляет 13,07 % в ночь 27–28.08.2024 (W-DIMM – 1,520 угл.сек., Polar – 1,322 угл.сек.), и 16,61 % в ночь 28–29.08.2024 (W-DIMM – 1,137 угл.сек., Polar – 0,948 угл.сек.). Данные, полученные прибором W-DIMM, для сравнения предоставлены Институтом астрономии РАН (Копылов Е. А.).

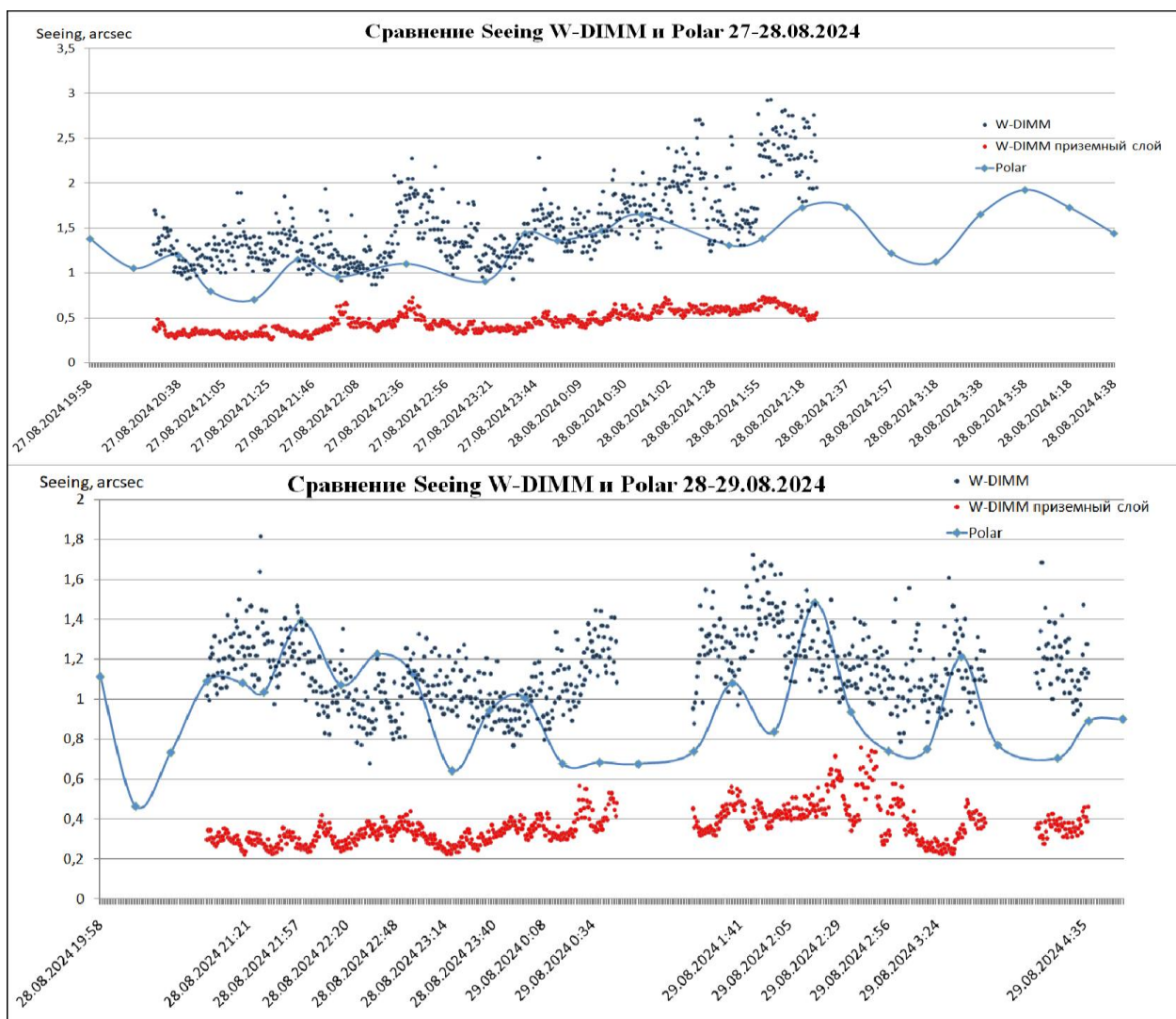


Рис. 9. Сравнение значений, полученных системой мониторинга атмосферного разрешения по Полярной звезде со значениями, полученными в это же время также на ВНП САО РАН прибором W-DIMM по Веге

5. Заключение

Нами разработана система определения атмосферной видимости, являющейся одним из факторов прозрачности атмосферы. Отличительной особенностью от классических систем стали малые габаритные размеры, мобильность и, в сочетании с применением солнечной панели, энергонезависимость, позволяющая работать данной системе автономно в полевых условиях. Полученные результаты показали низкий уровень погрешностей, хорошую сходимость измерений с камерами, установленными в непосредственной близости друг от друга, а также хорошую сходимость с измерениями, полученными на других приборах классическими методами.

Авторы выражают признательность рецензенту за конструктивные замечания, учет которых способствовал более полному раскрытию содержания статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большая советская энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия. 1969—1978.
2. Шалдырван И. В., Комаров В. В., Фокин М. Ю. / Известия Крымской Астрофизической Обсерватории. 2023. Т. 119 (2). С. 12–18.
3. Tokovinin A. / Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2002. Vol. 114. P. 1156–1166.
4. Sarazin M., Roddier F. / Astronomy and Astrophysics. 1990. Vol. 227. P. 294–300.

5. Kornilov V., Shatsky N., Voziakova O., Safonov B., Potanin S., Kornilov M. / Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2010. Vol. 408. P. 1233–1248.

6. Komarov V. V., Moskvitin A. S., Bychkov V. D., et al. / Astrophysical Bulletin. 2020. Vol. 75 (4). P. 486–500.

7. Шалдырван И. В., Комаров В. В. / Сборник научных работ XIII Всероссийской научной конферен-

ции «Системный синтез и прикладная синергетика». – Ростов-на-Дону – Таганрог, 2025. С. 129–132.

8. Шалдырван И. В., Комаров В. В., Фокин М. Ю. / Сборник научных трудов XII Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». – Таганрог, 2024. С. 236–239.

9. Komarov V. V., Komarova V. N., Moskvitin A. S. / Galaxies. 2025. Vol. 13 (3). P. 58.

PACS: 95.75.Mn, 42.79.Pw

Mobile system for determining atmospheric turbulence using the single-aperture method

I. V. Shaldyrvan*, V. V. Komarov, M. Yu. Fokin, and V. A. Egorov

Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences (SAO RAS),
Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkessia, 369167 Russia

*E-mail: shaldyrvan@sao.ru

Received 18.06.2026; revised 25.08.2026; accepted 22.10.2026

A mobile system for measuring atmospheric seeing using the single-aperture method has been developed. This is the Differential-Image-Motion-Monitor (DIMM) monitoring method with a non-classical study of a large number of images obtained using a single photodetector.

Keywords: DIMM, CMOS sensor, image processing method.

REFERENCES

1. The Great Soviet Encyclopedia. Moscow: Soviet Encyclopedia. 1969–1978 [in Russian].
2. Shaldyrvan I. V., Komarov V. V., and Fokin M. Yu., *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.* **119**, 12–18 (2023) [in Russian].
3. Tokovinin A., *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **114**, 1156–1166 (2002).
4. Sarazin M. and Roddier F., *Astronomy and Astrophysics* **227**, 294–300 (1990).
5. Kornilov V., Shatsky N., Voziakova O., Safonov B., Potanin S. and Kornilov M., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **408**, 1233–1248 (2010).
6. Komarov V. V., Moskvitin A. S., Bychkov V. D., et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 486–500 (2020).
7. Shaldyrvan I. V. and Komarov V. V. *Collection of scientific papers of the XIII All-Russian scientific conference “System Synthesis and Applied Synergetics”*. Rostov-on-Don – Taganrog, 2025, pp. 129–132.
8. Shaldyrvan I. V., Komarov V. V., and Fokin M. Yu. *Collection of scientific papers of the XII All-Russian scientific conference “System Synthesis and Applied Synergetics”*. Taganrog, 2024, pp. 236–239.
9. Komarov V. V., Komarova V. N., and Moskvitin A. S., *Galaxies* **13** (3), 58 (2025).

Об авторах

Шалдырван Игорь Викторович, старший инженер-исследователь, Специальная астрофизическая обсерватория РАН (369167, пос. Нижний Архыз, Россия). E-mail: shaldyrvan@sao.ru

Комаров Владимир Владимирович, к.т.н., научный сотрудник, Специальная астрофизическая обсерватория РАН (369167, пос. Нижний Архыз, Россия). E-mail: komarov@sao.ru SPIN-код: 7478-9198, AuthorID: 101730

Фокин Максим Юрьевич, старший инженер-исследователь, Специальная астрофизическая обсерватория РАН (369167, пос. Нижний Архыз, Россия). E-mail: maksimfokin01@gmail.com

Егоров Валерий Анатольевич, инженер, Специальная астрофизическая обсерватория РАН (369167, пос. Нижний Архыз, Россия).