

Дифференциальная спекл-поляриметрия: применение методики ExPo

Борис Сафонов

24 апреля 2013

Extreme Polarimeter (ExPo) — visitor instrument на телескопе WHT[1]. Этот прибор имеет поле зрения $20 \times 20''$, масштаб 39 mas/пкс, что в 4 раза больше, чем частота дискретизации, полагающаяся по теореме Котельникова. Перед детектором установлен поляризационный элемент, делящий изображение на два, соответствующие перпендикулярным направлениям поляризации. В качестве детектора используется EMCCD, частота кадров 35 кадров/сек. В системе также есть полуволновая пластинка, которая стоит непосредственно перед последней коллимирующей линзой. Материал пластинки — ферроэлектрический жидкий кристалл, свойства которого можно зависят от внешнего электрического поля. Благодаря этому ориентацией оси пластинки можно управлять на временах порядка 1 мс. Делитель пучков установлен за последней коллимирующей линзой, и является последним оптическим элементом в системе. После каждого кадра полуволновая пластинка меняет местами изображения, соответствующие горизонтальной и вертикальной поляризации. Полученные кадры затем обрабатываются методом двойной разности:

$$Q = 0.5((F_{h1} - F_{v1}) - (F_{h2} - F_{v2})) \quad (1)$$

Метод двойной разности позволяет значительно продвинуться по достижимому контрасту. В свете результатов статьи [2] это улучшение можно связать со следующими обстоятельствами. Дифференциальные поляризационные aberrации, возникающие в системе на всем ее протяжении, от телескопа и до детектора включительно, приводят к возникновению остаточного спекл-шума, ограничивающего достижимый контраст. Применяемая методика позволяет избавиться от той части этих aberrаций, которые возникают *после* полуволновой пластинки. Однако это возможно только при условии, что искажения, вносимые атмосферой не успевают сильно эволюционировать между кадрами. На первый взгляд это условие довольно жесткое, однако практика показывает, что метод успешно работает.

Интересно оценить возможности ExPo при синтезе его с дифференциальной спекл-поляриметрией, описанной в [2]. Мы предлагаем следующую модификацию алгоритма ДСП для обработки данных, полученных с ExPo-подобным прибором, т.е. с переменной изображений после каждого кадра. Кадры $\tilde{F}_{h1}(\mathbf{f})$ и $\tilde{F}_{v1}(\mathbf{f})$, полученные в ориентации #1 полуволновой пластинки, будем обрабатывать в соответствии с формулой (6) из [2]

$$\mathcal{R}_1(\mathbf{f}) = \frac{\langle \tilde{F}_{h1}(\mathbf{f}) \tilde{F}_{v1}^*(\mathbf{f}) \rangle_M}{\langle \tilde{F}_{v1}(\mathbf{f}) \tilde{F}_{v1}^*(\mathbf{f}) \rangle_M - K_v^{-1}}. \quad (2)$$

Кадры $\tilde{F}_{h2}(\mathbf{f})$ и $\tilde{F}_{v2}(\mathbf{f})$, полученные в ориентации #2, будем обрабатывать отдельно несколько иначе:

$$\mathcal{R}_2(\mathbf{f}) = \frac{\langle \tilde{F}_{v2}(\mathbf{f}) \tilde{F}_{h2}^*(\mathbf{f}) \rangle_M}{\langle \tilde{F}_{h2}(\mathbf{f}) \tilde{F}_{h2}^*(\mathbf{f}) \rangle_M - K_h^{-1}}. \quad (3)$$

В приложении Б [2] было показано (уравнение (38)), что выражение (2) можно упростить до:

$$\bar{\mathcal{R}}_1(\mathbf{f}) = \mathcal{R}_0 \left(1 + \frac{\langle \tilde{T}_{\text{atm}}^* \Delta \tilde{T} \rangle}{\langle \tilde{T}_{\text{atm}} \tilde{T}_{\text{atm}}^* \rangle} \right), \quad (4)$$

обозначения см. там же. В предположении, что атмосферные искажения не изменяются от экспозиции к экспозиции, а также что полуволновая пластинка является первым оптическим элементом в системе, можно показать, пользуясь аппаратом упомянутого приложения Б, что для (3) справедливо:

$$\bar{\mathcal{R}}_2(\mathbf{f}) = \mathcal{R}_0^* \left(1 - \frac{\langle \tilde{T}_{\text{atm}} \Delta \tilde{T}^* \rangle}{\langle \tilde{T}_{\text{atm}} \tilde{T}_{\text{atm}}^* \rangle} \right). \quad (5)$$

Скомбинируем (4) и (5) следующим образом:

$$\bar{\mathcal{R}}(\mathbf{f}) = 0.5(\bar{\mathcal{R}}_1(\mathbf{f}) + \bar{\mathcal{R}}_2(\mathbf{f})) = \mathcal{R}_0 \quad (6)$$

Как видно, в описанном идеализированном случае метод позволяет полностью избавиться от спекл-шума. Рассмотрим теперь ограничения применимости, начиная с флуктуаций атмосферных искажений.

Чтобы определить их роль мы смоделировали процесс наблюдений и обработку. В качестве модели атмосферы мы рассмотрели два турбулентных слоя: первый на нулевой высоте, с интенсивностью $2.92 \times 10^{-13} \text{ м}^{1/3}$, скорость ветра 2.2 м/с, второй — на высоте 10 км, интенсивностью $2.92 \times 10^{-13} \text{ м}^{1/3}$, скорость ветра 10 м/с (грубая модель медианных условий на Шатджатмазе). Телескоп 2.5 м, фокус Кассегрена, полоса V. Полное количество кадров — 200. Мы рассчитали $\bar{\mathcal{R}}_1(\mathbf{f})$, $\bar{\mathcal{R}}_2(\mathbf{f})$ и $\bar{\mathcal{R}}(\mathbf{f})$ для бесконечно яркого источника (без учета фотонного шума), результаты приведены на рис. 1. Были взяты периоды 5, 7, 10, 20 мс. Как видно из рисунков, при периоде больше 20 мс величина спекл-шума не уменьшается. При периоде 10 мс она уменьшается в 5-8 раз, при 5 мс — почти на 2 порядка.

Таким образом, при достаточной частоте кадров метод ExPo представляется довольно эффективным методом устранения спекл-шума, возникающего после полуволновой пластинки. Однако напомним, что в [2] было показано, что спекл-шум не играет большой роли для объектов слабее 1^m , при условии, что дифференциальные поляризационные аберрации в приборе не сильно больше, чем в телескопе. Таким образом, ExPo имеет смысл применять в ДСП только в том случае, если окажется, что дифференциальные аберрации после полуволновой пластинки велики, т.е. приводят к появлению спекл-шума, сравнимого с фотонным шумом для интересующих нас объектов.

Для желающих развить идею, представленную здесь, предлагается оценить уменьшение спекл-шума количественно. В качестве отправной точки можно взять приложение В [2].

Список литературы

- [1] Canovas, H., Rodenhuis, M., Jeffers, S. V., Min, M., and Keller, C. U., “Data-reduction techniques for high-contrast imaging polarimetry. Applications to ExPo,” *Astronomy and Astrophysics* **531**, A102 (July 2011).
- [2] Safonov, B., “Performance Analysis of Differential Speckle Polarimetry,” *Astronomy Letters* **38**, 1–16 (Apr. 2013).

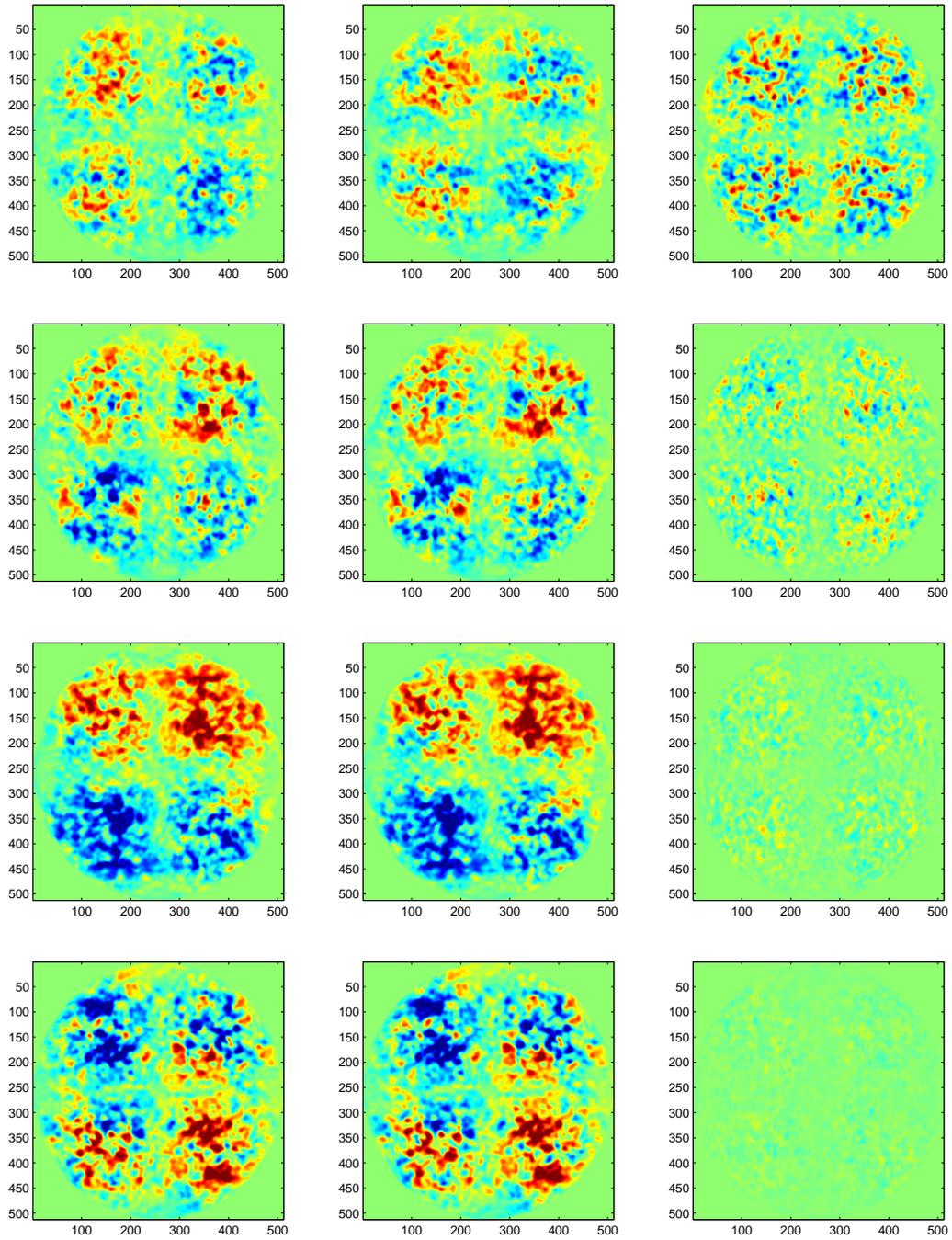


Рис. 1: *Первый столбец:* величина $\overline{\mathcal{R}}$ для ориентации полуволновой пластинки #1 (формула (4)), *второй столбец:* тоже для ориентации #2 (формула (5)), *третий столбец:* их комбинация (формула (6)). По осям отложена пространственная частота в условных единицах, нулевая частота соответствует точке (256, 256), частота среза 256.