

УДК 524.7-357:52-17

# О МЕТОДЕ ПОИСКА ВРАЩЕНИЙ ПОЗИЦИОННОГО УГЛА ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ПОМОЩИ КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

© 2025 Е. А. Шкодкина<sup>1\*</sup>, С. С. Савченко<sup>1,2</sup>, Е. В. Шишкина<sup>1</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия<sup>2</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 9 августа 2024 года; после доработки 26 сентября 2024 года; принята к публикации 5 октября 2024 года

Электрический вектор поляризации излучения большинства блазаров демонстрирует значительные изменения во времени. Иногда эти изменения происходят упорядоченно — такие события принято называть вращениями. В работе исследуется метод поиска и анализа вращений электрического вектора поляризации при помощи кросс-корреляционного анализа. Метод исследован на модельных примерах: от самых простых до приближенных к наблюдаемому в реальных объектах поведению. Для простых моделей вращений получены некоторые аналитические результаты. Анализ показал, что данный метод, за исключением тривиальных случаев, вероятно, не может быть использован для эффективного обнаружения и изучения вращений.

Ключевые слова: *методики: поляриметрические — методы: анализ данных — галактики: активные*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Активные ядра галактик (АЯГ) являются самыми яркими постоянными источниками электромагнитного излучения во Вселенной. Галактики с активными ядрами составляют малый процент от всех известных галактик, но уже много десятилетий привлекают внимание исследователей. Свойства этих объектов наиболее ярко выражены в подклассе блазаров. Их излучение, наблюдаемое во всех диапазонах длин волн, имеет множество особенностей. К ним относятся двугорбое спектральное распределение энергии, поляризация излучения, переменность блеска и поляризации на различных временных масштабах, вращения позиционного угла поляризации.

Из-за значительной удаленности АЯГ и их компактности прямое наблюдение отдельных компонентов подавляющего большинства этих объектов оказывается невозможным. По этой причине их структура зачастую исследуется косвенными методами. Согласно современным моделям (Marscher et al., 2008) большая часть оптического излучения блазаров формируется в релятивистских джетах, обладающих спиральным магнитным полем. В оптическом диапазоне доминирует синхротронное излучение, которое возникает в результате движения

заряженных частиц в джете. Это излучение по своей природе поляризовано. Изучение свойств поляризованного излучения позволяет получить информацию о структуре магнитного поля и строении джета, неразрешимого в оптическом диапазоне.

На заре исследования поляризационных характеристик блазаров считалось, что значения степени поляризации (polarization degree, PD) и позиционного угла электрического вектора поляризации (electric vector positional angle, EVPA), наблюдаемые для этих объектов, изменяются хаотически (Kinman et al., 1966; Moore et al., 1982). Однако позже появились сообщения о событиях монотонного изменения EVPA, которые принято называть вращениями (Ledden and Aller, 1979; Kikuchi et al., 1988). На сегодня известно множество описаний подобных событий, их изучению уделено большое внимание (например, Blinov et al., 2015, 2016; Jermak et al., 2016; Otero-Santos et al., 2023 и другие работы).

На кривых EVPA могут наблюдаться разные типы вращений. В одних случаях известны сообщения об одиночных или повторяющихся событиях вращений в одном направлении (Raiteri et al., 2017). В других наблюдаются кратные вращения, последовательно изменяющие свое направление, — так называемые «качели» (Jermak et al., 2016; Cohen et al., 2018; Cohen and Savolainen, 2020).

\*E-mail: shkodkina.e.a@gmail.com

Для объяснения вращений, наблюдаемых в бларах, предлагаются различные модели структуры джета. Их часто разделяют на две категории: стохастические и детерминированные. Стохастические модели включают в себя описание турбулентных движений плазмы и запутанных магнитных полей (Marscher, 2014; Kiehlmann et al., 2017). Детерминированные модели описывают переменность EVPA через упорядоченные магнитные поля: релятивистские эффекты (Peirson and Romani, 2019), искривление джета (Nalewajko, 2010), распространение ударных волн в джете (Marscher et al., 2008; 2010) или другие эффекты. Предполагается, что в реальности в одном и том же объекте может наблюдаться комбинация различных механизмов, в том числе принадлежащих разному типу.

Для более глубокого понимания реальных механизмов требуется собрать и проанализировать большое количество наблюдательных данных. Найти вращения на многолетних кривых EVPA — непростая задача. Такие события являются редкими. Кроме того, измерения EVPA содержат неопределенность  $\pm \pi n$ , что накладывает ограничения на плотность наблюдений во времени (Kiehlmann et al., 2021). Savchenko et al. (2024) предложили метод поиска вращений, основанный на статистических критериях. Часто наблюдаемые характеристики связывают с другими событиями, например с уменьшением степени поляризации излучения (Blinov et al., 2016; Jermak et al., 2016) или с изменением потока неполяризованного излучения (Marscher et al., 2010; Blinov et al., 2015; Otero-Santos et al., 2023). В некоторых ситуациях это может не только помочь в выборе и обосновании модели вращений, но и косвенным образом сузить круг поиска таких событий на многолетних кривых. Тем не менее поиск вращений все еще остается сложной задачей.

В данной работе мы изучили возможность поиска и анализа вращений EVPA методом кросс-корреляции. Обсуждаемая идея была предложена Lagionov et al. (2016). Мы попытались рассмотреть ее более подробно, остановившись на простых, но показательных модельных примерах.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

### 2.1. Параметры Стокса

Позиционный угол электрического вектора поляризации и степень линейной поляризации определяются как

$$\text{EVPA} = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{u}{q} \right), \quad \text{PD} = \sqrt{q^2 + u^2},$$

где  $q = Q/I$  и  $u = U/I$  — параметры Стокса, нормированные на полный поток. Изменение нормированных параметров Стокса отражает изменение

параметров поляризации: при изменении полного потока, но постоянной поляризации, нормированные параметры Стокса остаются неизменными.

И наоборот, нормированные параметры Стокса могут быть выражены через EVPA и PD:

$$q = \text{PD} \cos(2 \text{EVPA}), \quad u = \text{PD} \sin(2 \text{EVPA}).$$

Как видно, параметры  $q$  и  $u$  выражаются через простые периодические функции, аргументом которых является значение EVPA. Из этого следует, что, в случае монотонного изменения EVPA, должен наблюдаться некоторый фазовый сдвиг между значениями параметров  $q$  и  $u$ . Иными словами, между наблюдаемыми равными значениями  $q$  и  $u$  должна наблюдаться постоянная для всех моментов времени задержка. При случайном изменении EVPA вероятность наблюдать схожее поведение будет крайне мала. Кроме того, так как PD в данном случае влияет только на абсолютные значения параметров Стокса, ее изменение не должно сказываться на разнице между одновременно измеренными значениями параметров.

### 2.2. Кросс-корреляционная функция

Функция взаимной корреляции, называемая также кросс-корреляционной (Cross Correlation Function, CCF), описывает степень статистической взаимосвязи между двумя различными наблюдаемыми величинами в один и тот же или разные моменты времени. Она используется для определения степени сходства между двумя временными рядами в зависимости от сдвига во времени. Значительная корреляция между величинами является свидетельством существования некоторой статистической связи между ними, хотя эта связь необязательно должна иметь причинно-следственный характер.

Кросс-корреляционная функция двух вещественных стационарных случайных процессов определяется как

$$R_{XY}(\tau) = \frac{\mathbb{E}[(x(t) - \mu_X)(y(t + \tau) - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}.$$

Здесь  $\mathbb{E}[\dots]$  — математическое ожидание,  $\tau$  — рассматриваемая задержка,  $x(t)$  и  $y(t)$  — реализации случайных процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$ ,  $\mu_X, \mu_Y$  и  $\sigma_X, \sigma_Y$  — соответствующие математические ожидания и стандартные отклонения. Принятая нормировка такова, что значения  $R_{XY}$  лежат в промежутке  $[-1; 1]$ . Если  $X(t) \equiv Y(t)$ , то функция  $R_{XY}(\tau)$  называется автокорреляционной.

Это выражение справедливо для непрерывных сигналов. В реальных задачах мы чаще всего имеем дело с дискретными реализациями случайных процессов. На практике для оценки выборочной

кросс-корреляции в дискретном случае используются различные приближения данного определения.

Оценка кросс-корреляции для стационарных временных рядов  $x(t)$  и  $y(t)$ , значения которых одинаково равномерно распределены во времени  $t_n = (n - 1)\Delta t$ , где  $n = 1, 2, \dots, N$ , может быть выражена:

$$r_{xy}(\tau_k) = \frac{\frac{1}{N^*} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})(y_{n+k} - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2 \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2}}$$

В данном случае задержка принимает только дискретные значения:  $\tau_k = k\Delta t$ , где  $k \in \mathbb{Z}$ . Здесь  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние выборочные значения  $x(t)$  и  $y(t)$ .

Коэффициент  $\frac{1}{N^*}$ , в зависимости от выбранного определения, может быть равен  $\frac{1}{N}$  или  $\frac{1}{N - k}$ . Согласно Welsh (1999) ни один из вариантов не является предпочтительным. В данной работе мы рассматриваем нормировку  $\frac{1}{N - k}$ , которая позволяет корректно учесть количество входящих в суммирование точек на каждом сдвиге  $k$ . Чтобы сгладить эффект выбора нормировки, мы придерживаемся общепринятого практического правила и рассматриваем задержки не более половины длины исследуемого ряда:  $|k| \leq \frac{N}{2}$ .

Выводы нашего исследования не зависят от нормировки, так как мы рассматриваем крайне простые модельные примеры. Однако выбранный исследователем метод оценки действительно может влиять на вид выборочной кросс-корреляционной функции.

Методы подсчета кросс-корреляции для неравномерных временных рядов, как и численные оценки для равномерного случая, могут вносить собственные погрешности, связанные с тем, насколько оценка близка к истинному значению.

### 3. АНАЛИЗ ВРАЩЕНИЙ

Как утверждается Larionov et al. (2016), доминирование на кривой EVPA тех или иных событий можно оценить, вычислив кросс-корреляционную функцию  $q(t)$  и  $u(t)$ . В случае доминирования событий монотонного изменения EVPA фазовый сдвиг будет проявляться на графике кросс-корреляционной функции в виде смещенных относительно нуля пиков. При наличии только стохастического поведения EVPA, без согласованных вращений, на графике кросс-корреляционной

функции не будет наблюдаться никакой структуры, отличающейся от случайной. Стоит отметить, что под «доминированием событий» может пониматься как относительная продолжительность событий на кривой, так и амплитуда наблюдаемых изменений. Это уточнение не было сделано авторами оригинальной работы. Как мы убедимся далее, оба этих сценария влияют на вид кросс-корреляционной функции параметров  $q$  и  $u$ .

Расстояние между кросс-корреляционными пиками будет зависеть от скорости вращения электрического вектора: более быстрое изменение EVPA приводит к меньшему расстоянию между пиками. Тренд кросс-корреляционной функции вблизи нулевой задержки должен указывать на направление вращения: положительный тренд — вращение по часовой стрелке, отрицательный — против часовой стрелки. Принципиальным моментом является рассмотрение небольших временных задержек: именно таким образом авторы предлагают искать короткие вращения на длинных кривых EVPA, визуально не наблюдаемые без детального изучения кривой.

Далее мы попытаемся оценить справедливость описанных рассуждений, рассмотрев несколько простых модельных примеров. Оценим, как характер изменения EVPA влияет на вид кросс-корреляционной функции параметров  $q$  и  $u$ . Мы начнем с тривиальных случаев и затем перейдем к рассмотрению более сложных сценариев вращений. Абсолютные значения скорости моделируемых нами вращений находятся в пределах  $5^\circ 7' - 17^\circ 2'$  в сутки, что соответствует  $0.1 - 0.3$  радиана в сутки. Эти значения выбраны в соответствии с опубликованными в литературе скоростями вращений EVPA (Blinov et al., 2015; Savchenko et al., 2024). Все модельные кривые заданы на равномерной временной сетке при отсутствии ошибок измерений.

#### 3.1. Простой случай линейного вращения

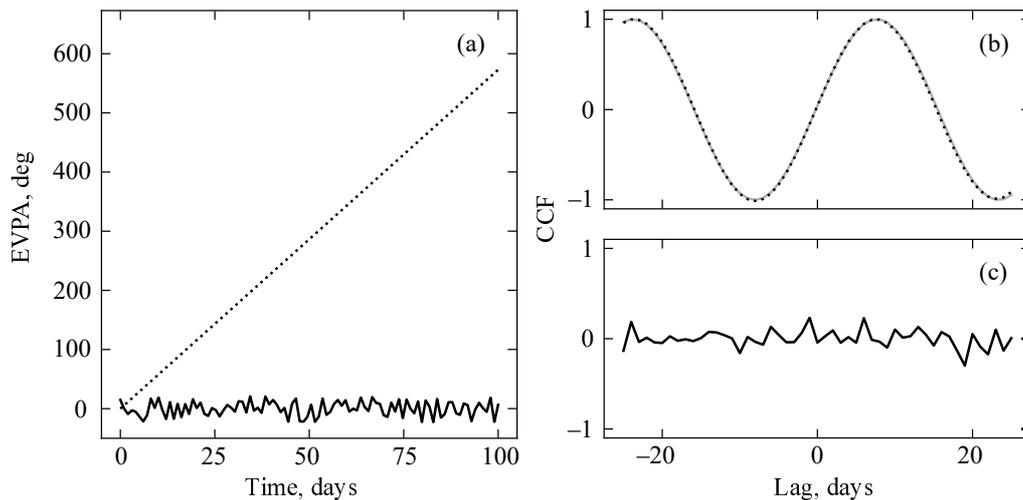
Рассмотрим идеальный случай длительного изолированного монотонного вращения EVPA по часовой стрелке со скоростью  $a_r$  радиан в сутки при постоянной степени поляризации:

$$EVPA(t) = a_r t, \quad PD(t) = \text{const.}$$

Параметры  $q(t)$  и  $u(t)$  в данном случае описываются периодическими функциями с детерминированным аргументом:

$$q = PD \cos(2a_r t), \quad u = PD \sin(2a_r t).$$

Для эргодических случайных процессов центрированная кросс-корреляционная функция может



**Рис. 1.** Простейшие случаи изменения EVPA. На панели (а) показаны «наблюдаемые» значения EVPA: пунктиром отмечен случай монотонного вращения EVPA со скоростью  $a_d \approx 5.7^\circ$  в сутки, сплошной линией — случай равномерного изменения EVPA. На панели (b) показана кросс-корреляционная функция для случая монотонного изолированного вращения (линией отмечены значения, полученные аналитически, пунктиром — численная оценка), на панели (c) изображена кросс-корреляция параметров  $q$  и  $u$  случайного равномерного изменения EVPA.

быть определена в интегральном виде через усреднение по времени реализаций  $x(t)$  и  $y(t)$ :

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x})(y(t + \tau) - \bar{y}) dt.$$

Здесь  $[0, T]$  — временной промежуток, на котором определены функции,  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние значения по времени:

$$\bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \quad \bar{y} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt.$$

Для неслучайных функций  $R_{xy}$  для всех задержек  $\tau$  равна нулю. Однако в этом случае можно получить выражение нецентрированной кросс-корреляционной функции, формально применив следующую формулу:

$$K_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt.$$

Пользуясь данной формулой, для параметров Стокса  $q(t)$  и  $u(t)$  в описанного случая изолированного монотонного изменения EVPA получаем

$$K_{qu}(\tau) = \frac{1}{2} PD^2 \sin(2a_r \tau).$$

На рис. 1 изображены аналитический результат и численная оценка кросс-корреляции. В данном простейшем случае на графике кросс-корреляционной функции действительно наблюдается картина корреляционных пиков, смещенных относительно нуля. Полученные численно и

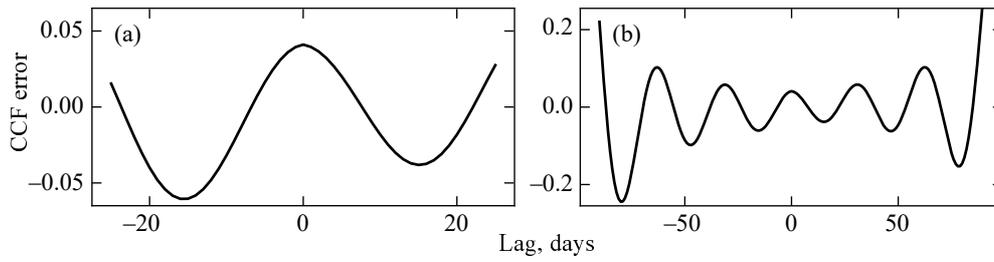
аналитически значения практически совпадают на рассматриваемом диапазоне задержек. Модуль отклонений для малых задержек порядка  $10^{-2}$ . Небольшая асимметрия отклонений обусловлена особенностями сетки для моделируемого случая и исчезает при большем количестве данных. На рис. 2 приведены графики отклонений для малых и больших задержек; рис. 2b демонстрирует ожидаемое увеличение колебаний отклонений с увеличением задержки. Такое поведение объясняется тем, что для оценки кросс-корреляции на каждой следующей задержке используется все меньшее количество отсчетов анализируемых временных рядов (Welsh, 1999).

Для сравнения на рис. 1 также приведен график кросс-корреляционной функции в случае, когда изменение EVPA не имеет выделенного направления:  $q$  и  $u$  в каждый момент времени независимы и принимают случайные значения, описываемые равномерной функцией распределения.

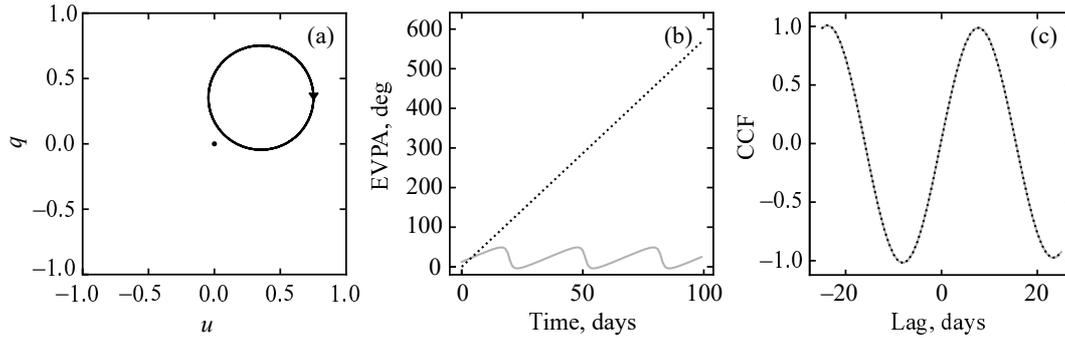
В случае изолированного линейного вращения EVPA имеет место обратная зависимость расстояния между кросс-корреляционными пиками (или расстояния между последовательными максимумом и минимумом) от скорости вращения:

$$\Delta\tau = \frac{k}{a_r},$$

причем  $k = \frac{\pi}{2}$  для расстояния между последовательными максимумом и минимумом. Этот факт является прямым следствием связи рассматриваемых тригонометрических функций  $\sin x = \cos\left(x + \frac{\pi}{2}\right)$ .



**Рис. 2.** Отклонения используемой численной оценки кросс-корреляционной функции от значений, полученных аналитически, для случая монотонного изолированного вращения. На панели (a) приведены отклонения оценки для малых задержек, соответствующих рис. 1b. На панели (b) показано поведение отклонений с увеличением диапазона рассматриваемых задержек.



**Рис. 3.** Простейший случай двух источников. Панель (a): вид плоскости  $q-u$  для  $q_{\text{obs}}-u_{\text{obs}}$ ; стрелкой указано направление вращения. Панель (b): изменение EVPA, наблюдаемое (obs, линией) и принадлежащее переменному (var, пунктиром) источнику. Панель (c): оценки кросс-корреляции параметров  $q_{\text{obs}}-u_{\text{obs}}$  (линией) и  $q_{\text{var}}-u_{\text{var}}$  (пунктиром).

### 3.2. Случай двух источников

Общий вид кросс-корреляционной функции, полученный выше в предположении одного источника поляризованного излучения, сохранится также и в случае, если в наблюдаемом объекте имеется два источника поляризованного излучения: постоянный (в литературе часто называется *optically polarized core*, OPC, Villforth et al., 2010) и переменный, в котором происходит вращение. Наблюдаемые параметры Стокса  $q_{\text{obs}}$  и  $u_{\text{obs}}$  являются результатом суммирования параметров излучения двух источников постоянного и переменного излучения:

$$q_{\text{obs}} = q_{\text{const}} + q_{\text{var}}, \quad u_{\text{obs}} = u_{\text{const}} + u_{\text{var}}.$$

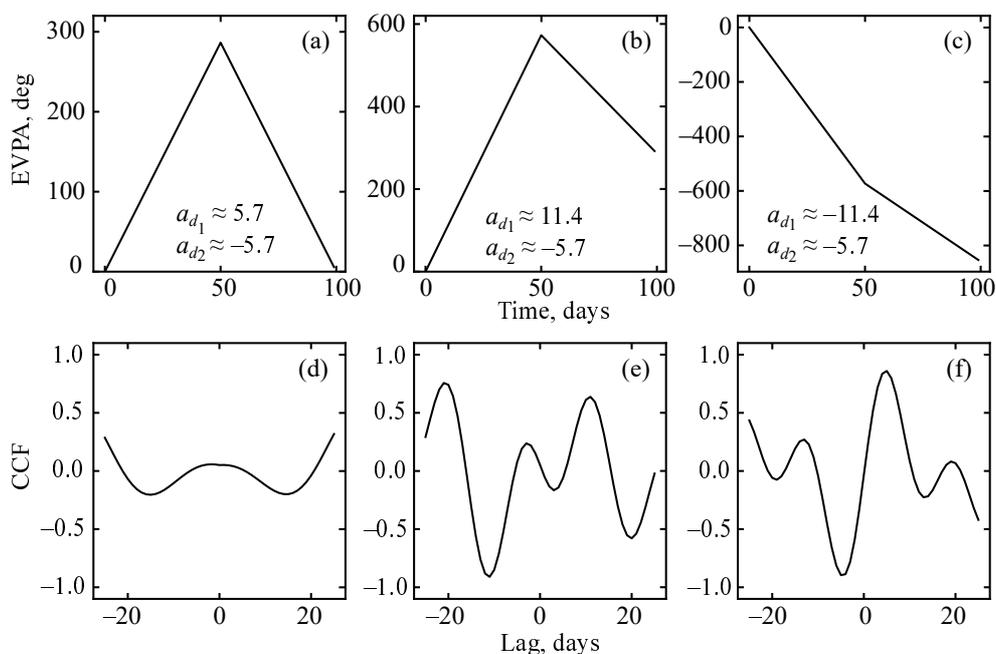
Если степень поляризации постоянного источника выше, чем переменного, то на плоскости  $q-u$  вращение не будет захватывать начало координат и на графике зависимости EVPA от времени линейного монотонного вращения наблюдаться не будет. Вместо этого наблюдаемые значения EVPA будут колебаться относительно значения, соответствующего углу поляризации постоянного источника. Однако на кросс-корреляционной функции будут наблюдаться последовательные пики — функциональная зависимость CCF получается такой же, как и в случае отсутствия постоянного источника (рис. 3).

### 3.3. Случай участков линейного вращения с разной скоростью

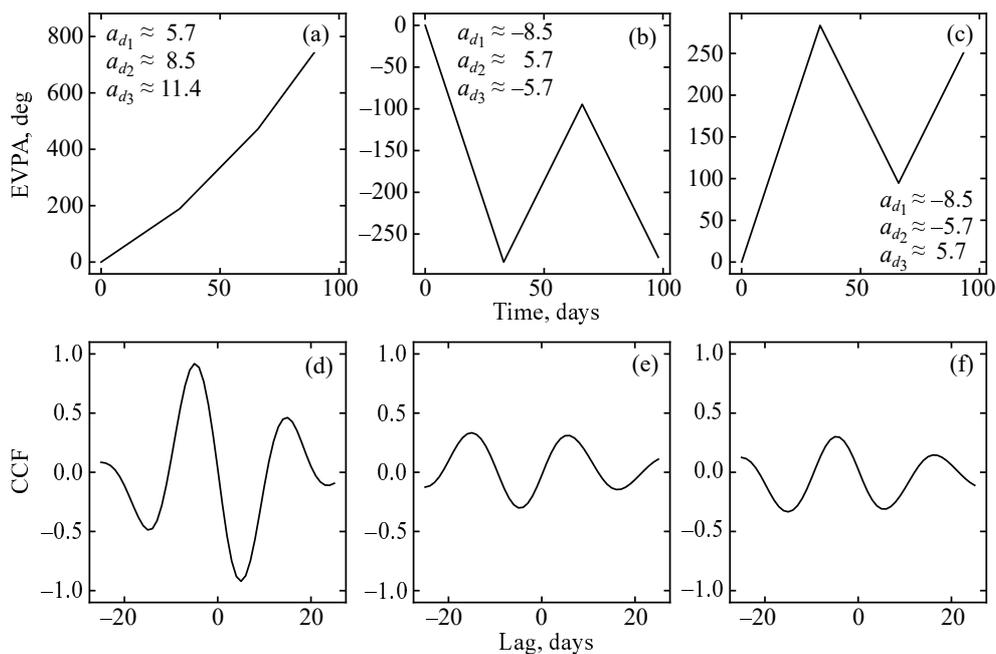
Как уже было отмечено, для некоторых объектов известны случаи кратных вращений EVPA, последовательно меняющих свое направление (Jermak et al., 2016; Cohen et al., 2018; Cohen and Savolainen, 2020). Кроме того, не только направление, но и скорость вращения могут изменяться со временем. Мы рассмотрим эти сценарии, моделируя несколько линейных участков монотонного вращения на кривой EVPA.

Обозначим через  $n$  число рассматриваемых участков линейного изменения  $EVPA = a_{r_i} t$ ,  $a_{r_i}$  — скорость изменения EVPA в радианах в сутки,  $a_{d_i}$  — скорость изменения EVPA в градусах в сутки, для каждого участка  $i = 1, \dots, n$ . Во всех случаях рассматриваются изменения EVPA при постоянной степени поляризации  $PD = \text{const}$ . На рис. 4–7 приведены описываемые ниже примеры.

Наблюдаемая картина кросс-корреляций даже в простейших случаях ( $n > 1$  участков) линейного изменения EVPA зависит и от направления вращений, и от количества участков линейного изменения, и от разности скоростей вращений на разных участках. Чем более разнообразные изменения наблюдаются на кривой EVPA, тем более сложной становится картина. Ни положение экстремумов,



**Рис. 4.** Случаи  $n = 2$ . На панелях (a)–(c) изображены различные случаи нескольких участков монотонного изменения EVPA с разной скоростью. Скорости вращений  $a_{d_n}$  указаны в градусах в сутки. На панелях (d)–(f) приведены соответствующие оценки кросс-корреляции параметров  $q$  и  $u$ .



**Рис. 5.** То же, что на рис. 4, но для случая  $n = 3$ .

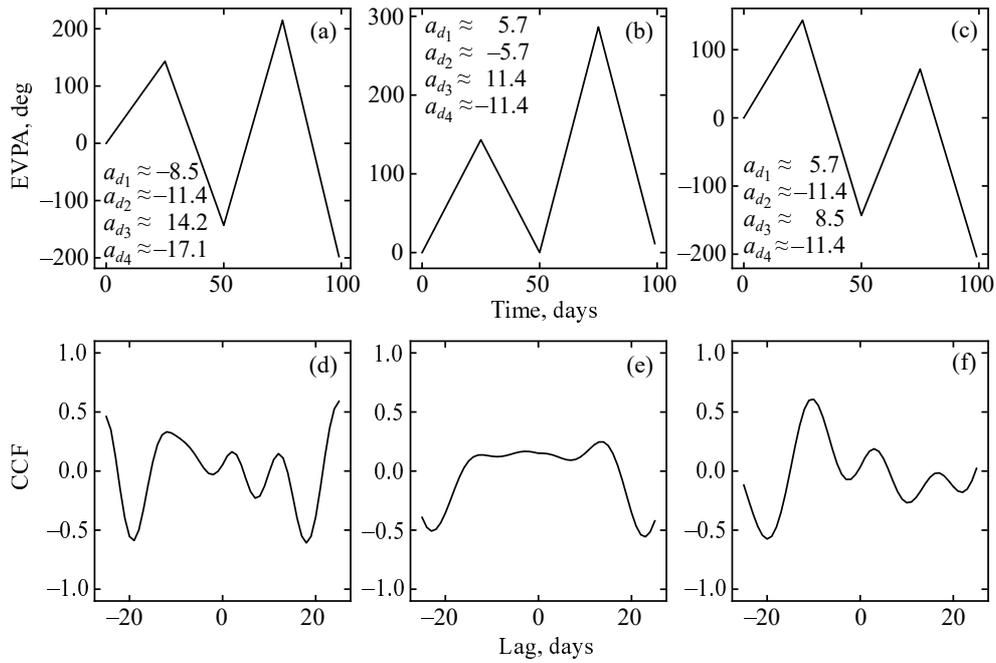
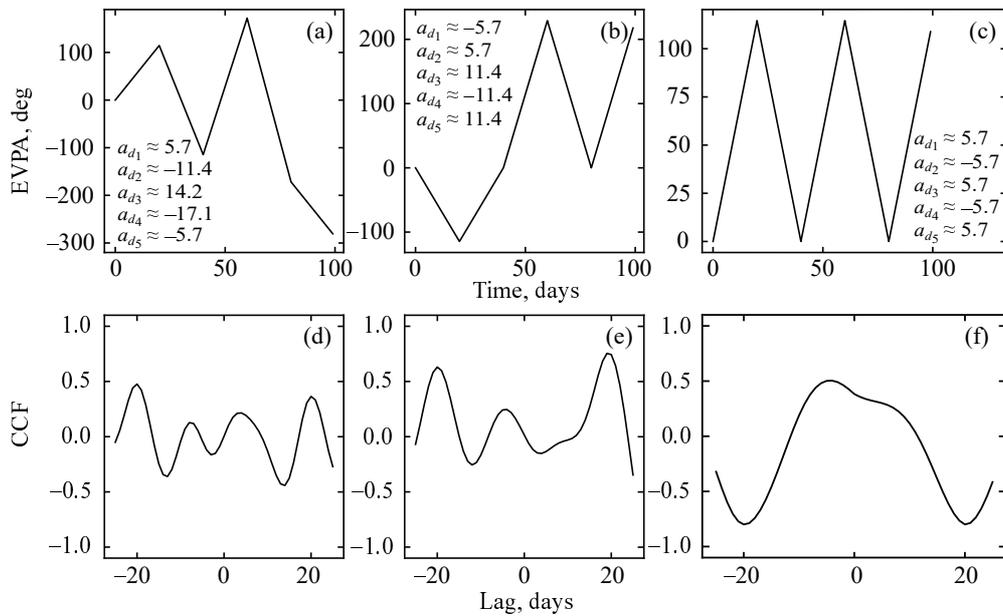
ни тренд кривой корреляции вблизи нуля не являются характеристиками, которые позволяли бы восстановить характер вращений.

Единственное утверждение, которое остается справедливым в рассмотренных вариантах равномерной временной сетки и отсутствия случайных

ошибок, — картина кросс-корреляций параметров  $q$  и  $u$  отличается от случайной.

### 3.4. Случай участков линейного вращения и случайного изменения

Рассмотрим последний, наиболее приближенный к реальности вариант. Предположим, что

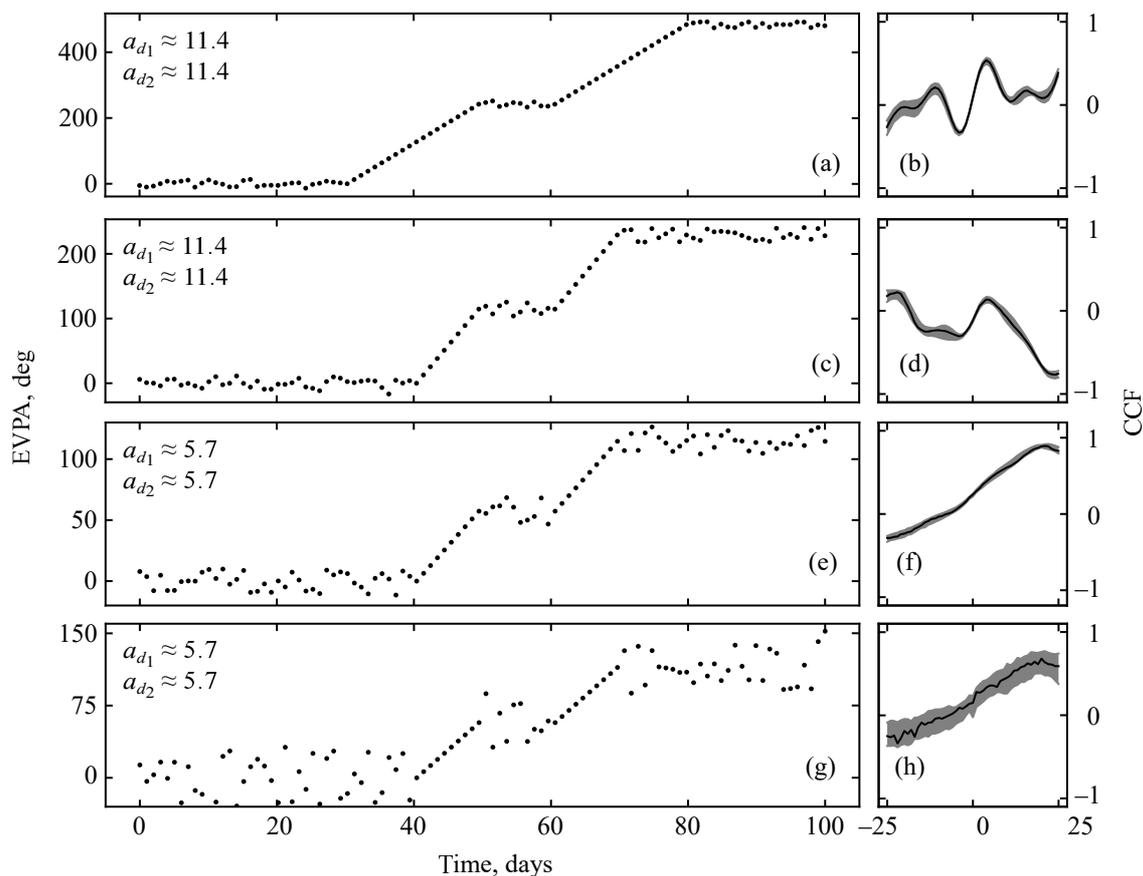
Рис. 6. То же, что на рис. 4, но для случая  $n = 4$ .Рис. 7. То же, что на рис. 4, но для случая  $n = 5$ .

участки случайного равновероятного изменения EVPA сменяются участками линейного изменения — вращениями. Участки монотонного изменения не содержат отклонений от линейного тренда.

Мы рассмотрим два примера вращений и оценим для каждого вид кросс-корреляционной функции параметров Стокса  $q$  и  $u$ . Первый — событие двойного вращения по часовой стрелке, похожее на описанное Raiteri et al. (2017) для блазара PG 1553+113. Второй — событие вращения со

сменой направления, о котором сообщалось Cohen et al. (2018) и Cohen and Savolainen (2020).

Изначально положение событий вращения на кривых EVPA было задано случайно. Положение событий влияет на форму кросс-корреляционной картины, однако в каждом из вариантов при малых амплитудах участков случайного изменения EVPA кросс-корреляционная картина отличается от случайной. Затем, чтобы оценить влияние участков случайного изменения на вид кросс-



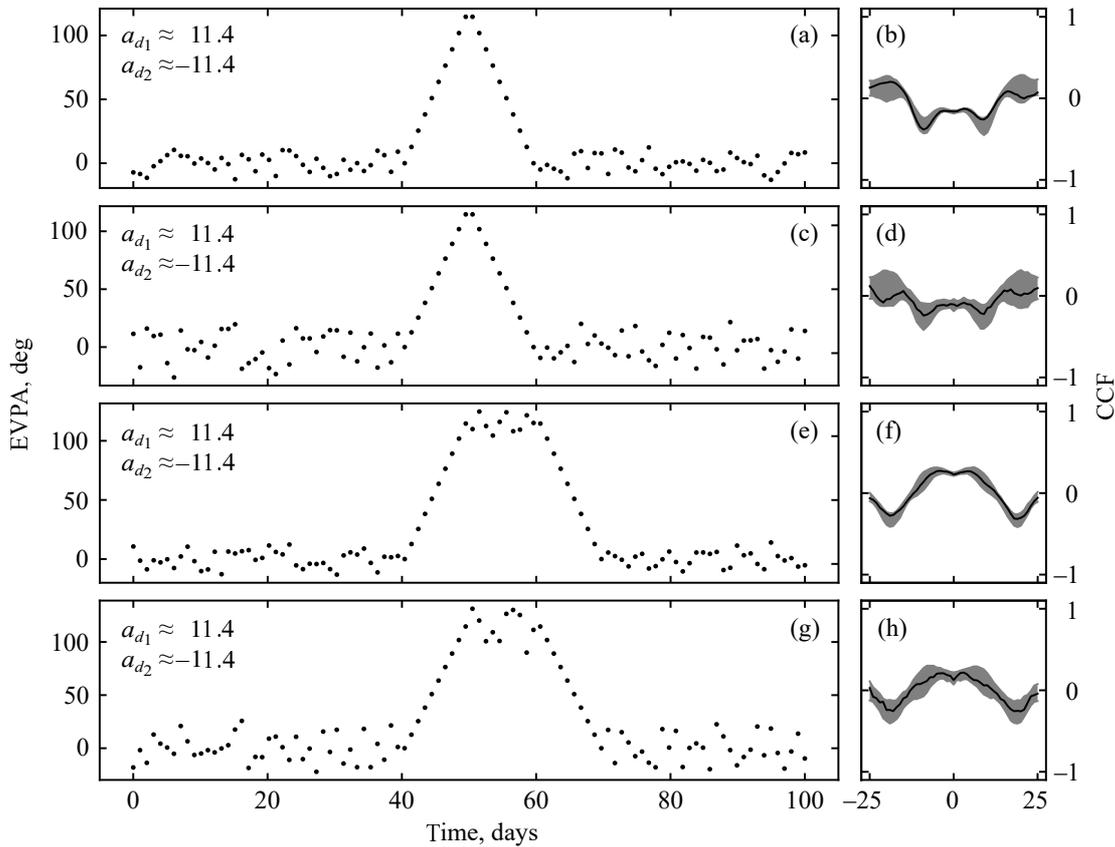
**Рис. 8.** События двойного вращения по часовой стрелке, которое предваряется и затем сменяется участками случайного равновероятного изменения EVPA. Приведены кривые EVPA для случаев длительного двойного вращения (а), двойного вращения (с), медленного вращения (е), медленного вращения с участками случайного равновероятного изменения EVPA с большой амплитудой (г); соответствующие оценки кросс-корреляционной функции параметров  $q$  и  $u$  приведены на панелях (b), (d), (f), (h) соответственно. Скорости вращений  $a_{d_n}$  указаны в градусах в сутки.

корреляционной функции в каждом отдельном варианте, была произведена многократная генерация кривых с фиксированными параметрами (положение событий вращения на кривой, скорость вращений, амплитуда случайных изменений EVPA). Для каждого варианта было сгенерировано  $10^3$  кривых. На панелях (b), (d), (f) и (h) рис. 8 и 9 в каждом случае приведен график кросс-корреляции параметров  $q$  и  $u$  для типичного ряда EVPA, представленного на панелях (a), (c), (e), (g). Серым цветом отмечена область всевозможных значений кросс-корреляционных функций для множества генераций. Чем выше амплитуда случайных изменений, тем более вероятно отклонение наблюдаемой кросс-корреляционной картины от некоторых типичных значений.

Рассмотрим первый пример. Событие двойного вращения EVPA по часовой стрелке, которое предваряется и затем сменяется участками случайного равновероятного изменения. На рис. 8 продемонстрированы различные случаи такого события. Как видно из рисунка, на наблюдаемую кросс-

корреляцию параметров  $q$  и  $u$  влияют длительность вращений, скорость вращений и амплитуда случайных изменений. Чем короче, медленнее вращение и чем значительнее проявляются случайные изменения EVPA, тем менее выраженной становится картина корреляционных пиков. Ошибка измерений и отклонение поведения EVPA от линейного тренда, которые свойственны любым реальным данным, также повлияют на оценку кросс-корреляции.

Рассмотрим второй пример. Событие вращения EVPA со сменой направления, которое предваряется участками случайного равновероятного изменения. На рис. 9 продемонстрированы два варианта, когда вращение со сменой направления происходит непрерывно и когда оно прерывается участком случайного изменения EVPA. Для каждого варианта дополнительно рассмотрены различные значения амплитуд случайного равновероятного изменения EVPA. В обоих примерах вращение оказывается скомпенсированным, тренд кросс-корреляционной функции на малых задержках отсутствует. Похожая картина наблюдалась



**Рис. 9.** События двойного вращения со сменой направления, которое предваряется и затем сменяется участками случайного равновероятного изменения EVPA. Слева приведены кривые EVPA для случаев последовательного двойного вращения с изменением направления (панели (a) и (c)) и двойного вращения с изменением направления, прерываемого участком равновероятного изменения EVPA (панели (e) и (g)). Пары реализаций отличаются амплитудой случайных равновероятных изменений EVPA. На панелях (b), (d), (f), (h) приведены соответствующие оценки кросс-корреляционной функции параметров  $q$  и  $u$ . Скорости вращений  $a_{d_n}$  указаны в градусах в сутки.

для некоторых вариантов нескольких участков монотонного изменения EVPA с разной скоростью. Такое поведение имеет место для подавляющего большинства проведенных нами симуляций вращений со сменой направления, вне зависимости от положения событий на кривой EVPA. Если наблюдения будут дополнительно содержать ошибки измерений и отклонения поведения EVPA от линейного тренда, кросс-корреляционная картина на малых задержках может оказаться неотличимой от случайной.

Для получившихся кривых картина кросс-корреляции  $q$  и  $u$ , как и в более простых вариантах, отличается от случайной. На наблюдаемую картину влияет положение событий на кривой EVPA, длина участков вращений, количество точек данных, скорость вращений, амплитуда случайных изменений направления EVPA. Кроме того, важным фактором оказывается форма вращений, то есть относительная скорость изменений на разных участках. В сценариях последовательных участков вращения EVPA со сменой направления

кросс-корреляционная картина часто оказывается лишенной структуры при рассмотрении малых временных задержек.

Мы не можем численно оценить влияние на наблюдаемую картину каждого из параметров вращений, так как предложенный метод предполагает лишь визуальную интерпретацию наличия или отсутствия детерминированной компоненты на графике оценки кросс-корреляционной функции, а значит, неизбежно опирается на субъективную оценку исследователя. Выделение детерминированной компоненты в зашумленных данных при помощи различных численных методов будет вносить дополнительно ошибку используемого метода в нашу оценку.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена идея поиска и анализа вращений электрического вектора поляризации методом, предложенным Larionov et al. (2016). Мы попытались развить идею, рассмотрев простые модельные примеры.

На протяжении всего исследования мы отвечаем на вопрос о том, как выглядит оценка кросс-корреляции параметров Стокса  $q$  и  $u$  в различных сценариях вращений EVPA. Нами были рассмотрены простые случаи вращений и соответствующий вид оценки кросс-корреляционной функции. Кривые задавались без добавления ошибок на плотной равномерной сетке наблюдений, чтобы устранить возможное влияние неравномерности на результаты оценки.

Во всех исследуемых вариантах корреляционная картина отличалась от случайной, однако мы не можем подтвердить, что по положению экстремумов кросс-корреляционной функции или наклону ее производной на нулевой задержке можно восстановить какие-либо физические параметры. Рассмотрение только малых временных задержек, которое предлагалось Lagionov et al. (2016), в некоторых случаях не дает представления о структуре кросс-корреляции. Картина кросс-корреляции  $q$  и  $u$  не содержит информации о том, в каком месте исходной кривой локализованы вращения, хотя и зависит от их расположения. Сама попытка сделать заключение о наличии или отсутствии вращений на кривой EVPA по виду кросс-корреляционной функции параметров опирается на субъективную оценку исследователя. Из-за этой субъективности оценить мощность и чувствительность метода не представляется возможным. На основе имеющихся результатов мы делаем вывод о невозможности решения обратной задачи, а именно невозможности оценки поведения EVPA по виду кросс-корреляционной функции параметров  $q$  и  $u$ .

При использовании данного метода для анализа реальных наблюдений исследователь неизбежно столкнется с влиянием на оценку кросс-корреляции неравномерности сетки и ошибок наблюдений. На результат будет также влиять выбранный исследователем метод оценки кросс-корреляции. В рассматриваемой нами задаче методы, основанные на усреднении данных на небольших интервалах времени, такие как DCF (Edelson and Krolik, 1988), при выборе неправильного интервала усреднения могут потенциально сгладить как случайные изменения  $q$  и  $u$ , так и короткие участки монотонного изменения параметров. Методы, основанные на интерполяции данных, например ICCF (Gaskell and Peterson, 1987), могут потенциально создавать видимость влияния вращений, которых в реальности нет, на картину кросс-корреляционной функции, дополняя измерения параметров  $q$  и  $u$  участками линейного изменения. Кроме того, реальные вращения EVPA зачастую демонстрируют поведение, отличное от строго линейного изменения, что может быть обусловлено самими механизмами генерации поляризованного излучения активной области. Все это

неизбежно усложняет любые попытки сделать вывод о физических свойствах наблюдаемых явлений. Мы рекомендуем использовать альтернативные методы поиска событий вращений на многолетних кривых EVPA.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за комментарии, которые помогли улучшить данную работу.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00121, <https://rscf.ru/project/23-22-00121/>.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Blinov, V. Pavlidou, I. Papadakis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453** (2), 1669 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv1723
2. D. Blinov, V. Pavlidou, I. E. Papadakis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **457** (2), 2252 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw158
3. M. H. Cohen, H. D. Aller, M. F. Aller, et al., *Astrophys. J.* **862** (1), article id. 1 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aac31
4. M. H. Cohen and T. Savolainen, *Astron. and Astrophys.* **636**, id. A79 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936907
5. R. A. Edelson and J. H. Krolik, *Astrophys. J.* **333**, 646 (1988). DOI:10.1086/166773
6. C. M. Gaskell and B. M. Peterson, *Astrophys. J. Suppl.* **65**, 1 (1987). DOI:10.1086/191216
7. H. Jermak, I. A. Steele, E. Lindfors, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462** (4), 4267 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw1770
8. S. Kiehlmann, D. Blinov, I. Liodakis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (1), 225 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2055
9. S. Kiehlmann, D. Blinov, T. J. Pearson, and I. Liodakis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472** (3), 3589 (2017). DOI:10.1093/mnras/stx2167
10. S. Kikuchi, M. Inoue, Y. Mikami, et al., *Astron. and Astrophys.* **190**, L8 (1988).
11. T. D. Kinman, E. Lamla, and C. A. Wirtanen, *Astrophys. J.* **146**, 964 (1966). DOI:10.1086/148976
12. V. M. Larionov, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, and P. S. Smith, *Galaxies* **4** (4), id. 43 (2016). DOI:10.3390/galaxies4040043

13. J. E. Ledden and H. D. Aller, *Astrophys. J.* **229**, L1 (1979). DOI:10.1086/182918
14. A. P. Marscher, *Astrophys. J.* **780** (1), article id. 87 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/780/1/87
15. A. P. Marscher, S. G. Jorstad, F. D. D'Arcangelo, et al., *Nature* **452** (7190), 966 (2008). DOI:10.1038/nature06895
16. A. P. Marscher, S. G. Jorstad, V. M. Larionov, et al., *Astrophys. J.* **710** (2), L126 (2010). DOI:10.1088/2041-8205/710/2/L126
17. R. L. Moore, J. R. P. Angel, R. Duerr, et al., *Astrophys. J.* **260**, 415 (1982). DOI:10.1086/160266
18. K. Nalewajko, *International Journal of Modern Physics D* **19** (6), 701 (2010). DOI:10.1142/S0218271810016853
19. J. Otero-Santos, J. A. Acosta-Pulido, J. Becerra González, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **523** (3), 4504 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad1722
20. A. L. Peirson and R. W. Romani, *Astrophys. J.* **885** (1), article id. 76 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab46b1
21. C. M. Raiteri, F. Nicastro, A. Stameria, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **466** (3), 3762 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw3333
22. S. S. Savchenko, D. A. Morozova, S. G. Jorstad, et al., *Astrophysical Bulletin* **79** (2), 186 (2024).
23. C. Villforth, K. Nilsson, J. Heidt, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **402** (3), 2087 (2010). DOI:10.1111/j.1365-2966.2009.16133.x
24. W. F. Welsh, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111** (765), 1347 (1999). DOI:10.1086/316457

## On the Method of Searching for Rotations of the Electric Vector Positional Angle Using Cross-Correlation Analysis

E. A. Shkodkina<sup>1</sup>, S. S. Savchenko<sup>1,2</sup>, and E. V. Shishkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia

<sup>2</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, St. Petersburg, 196140 Russia

The electric vector positional angle exhibits significant changes over time in most blazars. Sometimes these changes occur in an orderly fashion—such events are commonly referred to as rotations. This study examines a method for detecting and analyzing these rotations through cross-correlation analysis. The proposed method is evaluated using a range of model examples, from the most straightforward to those that mimic behaviors observed in real objects. For simplest models, some analytical results have been obtained. The analysis showed that the proposed method, except for trivial cases, is likely not suitable for effectively detecting and studying rotations.

Keywords: *methods: data analysis—techniques: polarimetric—quasars: general*