Энтропийно-циклический предиктор глитчей пульсаров

Евгений Монахов
Независимый исследователь
VOSCOM ONLINE

1 Введение

Глитчи пульсаров — внезапные скачки частоты вращения нейтронных звёзд. Несмотря на десятилетия наблюдений, природа глитчей остаётся открытой проблемой. Особенно актуален вопрос: можно ли предсказывать время и величину глитчей на основе предварительных данных о вращении.

В данной работе предлагается простая квантово-статистическая модель, использующая энтропийные и циклические признаки тайминговых рядов для предсказания момента и величины глитча. Подход не требует сложных физических моделей внутреннего строения звезды и опирается только на обработку данных наблюдений.

2 Энтропийная компонента

Пусть $\nu(t)$ — наблюдаемая частота вращения пульсара, заданная на равномерной сетке времени. Рассмотрим первые разности:

$$\Delta_k = \nu(t_{k+1}) - \nu(t_k).$$

Нормируем их на локальное среднее (на окне длины W):

$$s_k = \frac{\Delta_k}{\langle \Delta \rangle_W}.$$

Строим гистограмму значений s_k с B бинами и вероятностями p_b. Энтропия Шеннона:

$$H = -\sum_{b=1}^{B} p_b \ln p_b.$$

Нормируем:

$$h = \frac{H}{\ln B}, \qquad h \in [0, 1].$$

h характеризует степень хаотичности вращения.

3 Циклическая компонента

Для того же окна длиной M точек рассмотрим дискретные гармоники с периодами $P \in \{8, 16, 32, 64\}$. Определим взвешенные коэффициенты:

$$A_P = \frac{1}{M} \left| \sum_{k=1}^{M} w_k e^{2\pi i k/P} \right|,$$

где w_k — нормированные данные (например, $w_k = (\nu(t_k) - \nu(t_1))/(|\nu(t_M) - \nu(t_1)| + \varepsilon)$). Определим интегральный показатель цикличности:

$$C = \frac{1}{4} \sum_{P \in \{8,16,32,64\}} \frac{A_P}{A_P + \varepsilon}.$$

4 Интегральный фактор предсказания

Определим безразмерный фактор

$$\Omega(t) = \exp\left(-\tfrac{1}{2}\left[h(t) + C(t)\right]\right).$$

Интервал значений: $0 < \Omega \leq 1$. Чем меньше Ω, тем больше «готовность системы» к глитчу.

5 Предсказание вероятности глитча

Определим интенсивность глитчей как

$$\lambda(t) = \lambda_0 \exp\left[\beta\left(\frac{1}{\Omega(t)} - 1\right)\right],$$

где λ_0 — базовая частота глитчей данного пульсара (можно оценить по статистике), $\beta \sim 1$. Тогда вероятность глитча в ближайшем окне Δt:

$$P_{\text{glitch}}(t, \Delta t) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda(\tau)\, d\tau\right).$$

6 Предсказание величины глитча

Введём характеристику локального «разрыва»:

$$g(t) = \frac{\text{median}(|\Delta_{k+1} - \Delta_k|)}{\text{median}(|\Delta_k|) + \varepsilon}.$$

Ожидаемая величина глитча при его возникновении:

$$\mathbb{E}\left[\frac{\Delta\nu}{\nu} \,\middle|\, \text{glitch at } t\right] \approx K \cdot \frac{1}{\Omega(t)} \cdot \frac{g(t)}{1 + g(t)},$$

где K — масштабный коэффициент, фиксируемый по первому крупному глитчу данного пульсара и далее неизменный.

7 Алгоритм проверки на данных

1. Взять исторические тайминговые ряды $\nu(t)$.
2. Выбрать окно $W = 30$–60 дней и шаг 1–5 дней.
3. Для каждого окна посчитать $h(t), C(t), \Omega(t)$.
4. Рассчитать $P_{\text{glitch}}(t, \Delta t)$ для $\Delta t = 30$ дней.
5. Построить «график готовности» пульсара к глитчу.
6. При возникновении глитча сравнить предсказанную и наблюдаемую величины.

8 Заключение

Предложенный энтропийно-циклический предиктор глитчей пульсаров основан только на обработке тайминговых рядов. Он позволяет прогнозировать вероятность и примерную величину глитча на основе квантово-статистических признаков вращения. Методика доступна для быстрой проверки на архивных данных и может дать новые эмпирические корреляции, которые в дальнейшем помогут в построении физических моделей внутреннего строения нейтронных звёзд.

Евгений Монахов
Независимый исследователь
VOSCOM ONLINE