

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА И ПЛОЩАДЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

М. ЯКИМЕЦ

*Астрономическая обсерватория Вроцлавского университета,
Вроцлав, Польша*

Абстракт: В настоящей работе показано, что флуктуации как площади пятен, так и радиоизлучения Солнца, можно представить при помощи стационарных стохастических процессов. Форма корреляционных функций этих процессов даёт возможность предполагать, что каждый из них является суммой трёх независимых процессов:

- (а) процесса будущего суммой конечного числа гармоник с данными частотами и случайными амплитудами и фазами,
- (б) модулированного случайного процесса и
- (в) процесса типа белого шума.

Кроме того были исследованы функции распределения полученных процессов.

Abstract: The analysis concerns the solar activity fluctuations of a duration longer than 27 days. In previous papers of the author it has been shown that the fluctuations can be represented by means of a stationary stochastic process. The analysis concerned sunspot areas.

In the present investigation the analysis has been extended to the 2800 MHz radio flux measurements. It has been shown

Благодаря быстрому развитию теории стохастических процессов, а также возможности использования быстросчитающих машин, математический спектральный и корреляционный анализ всё чаще используется в астрономических исследованиях. Корреляционные функции используются при исследованиях Солнца, а также при исследованиях блеска неправильных переменных звёзд, где получены особо интересные результаты.

В предыдущей работе, доложенной на совещании в Сопоте (Якимец, 1969), был сделан анализ флуктуаций активности Солнца с продолжительностью большей, чем 27 дней. Как характеристика активности были взяты площади пятен. Показано, что флуктуации этой характеристики можно представить при помощи стационарного стохастического процесса.

В настоящей работе эти исследования были расширены на радиоизлучения Солнца на частоте 2800 МГц, а также был сделан более

that the fluctuations of the flux can also be represented by means of a stationary stochastic process. Moreover, it has been shown that the both obtained correlation functions can be well approximated in an analytical form:

$$r(\tau) = C_1 e^{-(\tau/\tau_1)^2} + C_2 e^{-\tau/\tau_2} \cos(\omega\tau + \varphi) + C_3 \delta(\tau),$$

where $C_1, C_2, C_3, \tau_1, \tau_2, \omega, \varphi$ — are constant parameters, τ the time interval, $\delta(\tau)$ the δ -function. τ_1 and τ_2 represent the respective relaxation times. The above representation of the correlation functions suggests that the investigated processes are sums of three independent stochastic processes of the following types:

- (a) a process being the sum of a finite number of harmonics with random amplitudes and phases,
- (b) a process of the type of a modulated random process, and
- (c) a process of the white noise type.

Moreover, the probability distribution for both the processes have been analysed. The distributions are slightly asymmetric and they differ essentially from a normal distribution.

подробный анализ полученных стохастических процессов. Особенно нас интересовали следующие проблемы:

1. Можно ли также флуктуации радиоизлучения представить при помощи стационарного стохастического процесса.
2. Существует ли разница между процессами, полученными для площади пятен и для радиоизлучения.
3. Как можно аппроксимировать аналитическими формулами вычисленные корреляционные функции и какие выводы можно получить из этих аппроксимаций.
4. Кроме того были исследованы функции распределения полученных процессов.

Обозначим среднее значение данного показателя активности Солнца, подсчитанное для данного синодического периода, как S . Последовательность значений $S(t)$ образует нестационарный стохастический процесс. Эта нестационарность является следствием сильного

влияния 11-летнего цикла на параметры процесса.

Приведем процесс $S(t)$ к виду:

$$X(t) = \frac{S(t) - f(t)}{f(t)^k} \quad (1)$$

где $f(t)$ представляет значение данного показателя активности, снятое с регулярной кривой, представляющей солнечный цикл, а k — постоянная. Было получено, что как для площади пятен, так и для радиоизлучения, стохастические процессы $X(t)$ стационарны в широком смысле. Это значит, что для них выполняются следующие условия:

математическое ожидание и дисперсия являются постоянными:

$$\begin{aligned} (a) \quad E(X) &= 0, \\ (б) \quad D^2(X) &= s^2 = \text{const}, \end{aligned} \quad (2)$$

а корреляционная функция зависит только от шага:

$$\begin{aligned} (в) \quad E(X(t)X(t+\tau)) &= E(X(0)X(\tau)) \\ &= \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} X_i X_{i+\tau} = R(\tau). \end{aligned}$$

Условие (а) выполняется здесь автоматически, согласно определению процесса X .

процессов, удобно использовать нормированную форму корреляционной функции $R(\tau)$:

$$r(\tau) = R(\tau)/R(0). \quad (3)$$

Нормированная корреляционная функция $v(\tau)$ для площади пятен показана на рисунке 1, а для радиоизлучения — на рисунке 2.

Корреляционная функция — это очень важная характеристика случайного процесса. По форме корреляционной функции можно указать для данного конкретного случая вероятный тип исследуемого процесса. Существует несколько случайных процессов с типичными корреляционными функциями. В природоведческих исследованиях, в радиотехнике, а также из теоретических рассуждений, часто получается следующая форма корреляционных функций:

$$R(\tau) = \sum_{k=1}^n c_k e^{-a_k |\tau|^k} \cos \omega_k \tau. \quad (4)$$

Форма полученных в этой работе функций позволяет предполагать, что они могут быть аппроксимированы функциями вида (4). В самом деле, после детального подбора получены следующие аппроксимации вычисленных корреляционных функций:

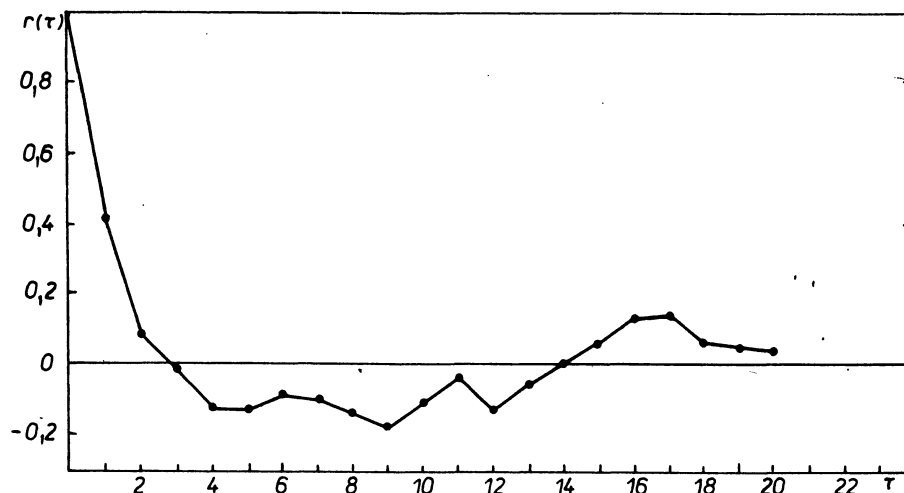


Рис. 1. Нормированная корреляционная функция для площади пятен.

Условие (б) может быть удовлетворено подбором значения постоянной k .

Условие (в) служит для проверки стационарности полученных процессов X .

Для того, чтобы иметь возможность сравнения между собой различных стохастических

$$r(\tau) = C_1 e^{-(\tau/\tau_1)^2} + C_2 e^{-\tau/\tau_2} \cos(\omega\tau + \varphi) + C_3 \delta(\tau), \quad (5)$$

где $\delta(\tau)$ — функция дельта Дирака. Значения постоянных параметров для исследованных процессов даны в таблице 1.

Таблица 1

	C_1	τ_1	C_2	τ_2	ω	φ	C_3
для площади пятен	0.61	1.25	0.20	37	0.29	0.75	0.24
для радиоизлучения	0.68	1.26	0.28	18	0.30	0.77	0.12

ционных функций (5) дает возможность предполагать, что стационарные стохастические процессы X , как для площади пятен, так и для радиоизлучения, являются суммой трёх независимых процессов:

$$X(t) = \xi_1(t) + \xi_2(t) + \xi_3(t). \quad (6)$$

Рассмотрим вкратце характер каждого из

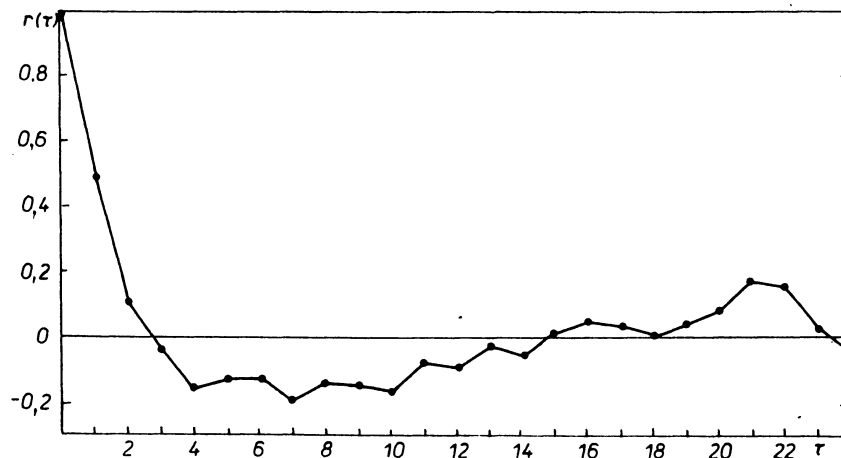


Рис. 2. Нормированная корреляционная функция для радиоизлучения на частоте 2800 МГц.

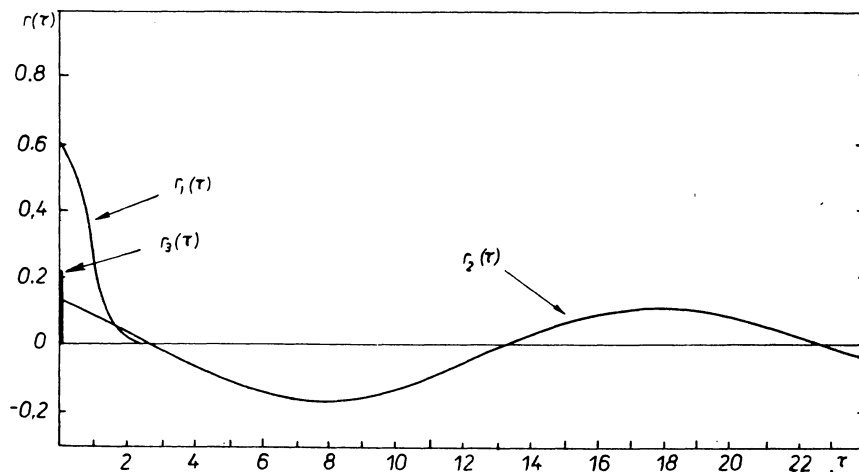


Рис. 3. Три составляющие корреляционной функции для площади пятен:

$$r_1 = 0.61 e^{-\tau/1.25^2}, \quad r_2 = 0.20 e^{-\tau/37} \cos(0.29 \tau + 0.75), \\ r_3 = 0.24 \delta(\tau).$$

На рисунках 3 и 4 показаны три составляющие корреляционных функций соответственно для площади пятен и радиоизлучения.

Форма полученных аппроксимаций корреля-

этих процессов и проанализируем их роль в суммарном процессе $X(t)$.

А. Корреляционные функции типа

$$r(\tau) = C_1 e^{-(\tau/\tau_1)^2} \quad (7)$$

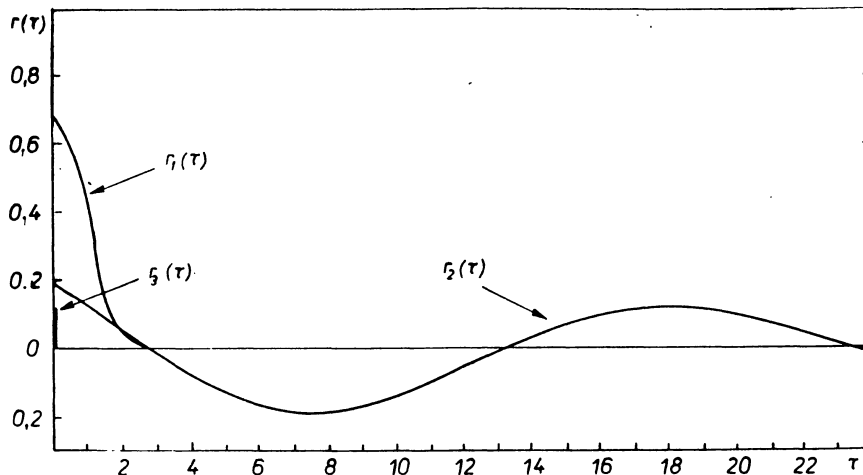


Рис. 4. Три составляющие корреляционной функции для радиоизлучения:

$$r_1 = 0.68 e^{-\tau/1.26^2}, \quad r_2 = 0.28 E^{-\tau/18} \cos(0.30\tau + 0.77), \\ r_3 = 0.12 \sigma(t).$$

характерны для случайных процессов, являющихся суммами конечного числа гармоник с данными частотами и случайными амплитудами и фазами, т. е.:

$$\xi_1(t) = \sum_{k=1}^n A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (8)$$

где A_k и φ_k — случайные величины (Яглом, 1952). В рассматриваемых случаях процесс ξ_1 играет главную роль в суммарном процессе X , что следует из больших значений коэффициентов C_1 (смотри таблицу 1). Времена релаксации τ_1 малы, немного превышают один синодический период вращения Солнца. Таким образом, эти процессы ξ_1 представляют те увеличения солнечной активности, эффекты которых затухают после одного оборота Солнца.

Б. Для так называемых модулированных случайных процессов:

$$\xi_2(t) = a(t)\cos\omega t + b(t)\sin\omega t, \quad (9)$$

где $a(t)$ и $b(t)$ — функции времени, мало изменяющиеся в течение периода колебаний $\frac{2\pi}{\omega}$, характерна корреляционная функция типа:

$$r_2(\tau) = \psi_1(\tau)\cos\omega\tau - \psi_2(\tau)\sin\omega\tau. \quad (10)$$

Здесь ψ_1 и ψ_2 — тоже медленно изменяющиеся функции τ (Рытов, 1966). Действительно, в нашем случае функции ψ_1 и ψ_2 вида:

$$\psi_1(\tau) = C_2 e^{-\tau/\tau_2} \cos \varphi,$$

$$\psi_2(\tau) = C_2 e^{-\tau/\tau_2} \sin \varphi$$

медленно изменяются, так как τ_2 большие. Из таблицы 1 видно, что времена релаксации τ_2 процессов ξ_2 значительно больше времен релаксации τ_1 процессов ξ_1 . Так как вклад процесса ξ_2 в суммарный процесс X меньше, чем процесса ξ_1 , то можно сказать, что в рассматриваемых случаях процесс ξ_2 играет роль модулированного фона для процесса ξ_2 .

В. Корреляционная функция типа функции дельта является характерной для некоррелируемых случайных процессов, называемых белым шумом (Рытов, 1966). Значения параметров C_3 показывают, что вклад такого процесса ξ_3 в суммарный процесс X небольшой, особенно для радиоизлучения. Процесс типа белого шума может быть результатом кратковременных, случайных повышений активности Солнца, эффекты которых затухают за время более короткое, чем один оборот Солнца.

Важные информации о характере случайного процесса можно получить из анализа его функции распределения. Эмпирические функции распределения для полученных процессов показаны на рисунке 5. При помощи критерия λ^2 было проверено, что эти функции существенно отличаются от нормального распределения. Рассматриваемые распределения несимметричны, при этом для площади пятен асимметрия больше. Из детального анализа следует, что причиной этой асимметрии являются кратковременные, значительные повышения активности Солнца, которым соответствуют пики в значениях процессов X . Поэтому можно

сказать, это исследованные процессы имеют импульсный характер.

В данное время ведётся дальнейший анализ

проблем, рассматриваемых в настраиваемой работе, при использовании других индексов активности Солнца.

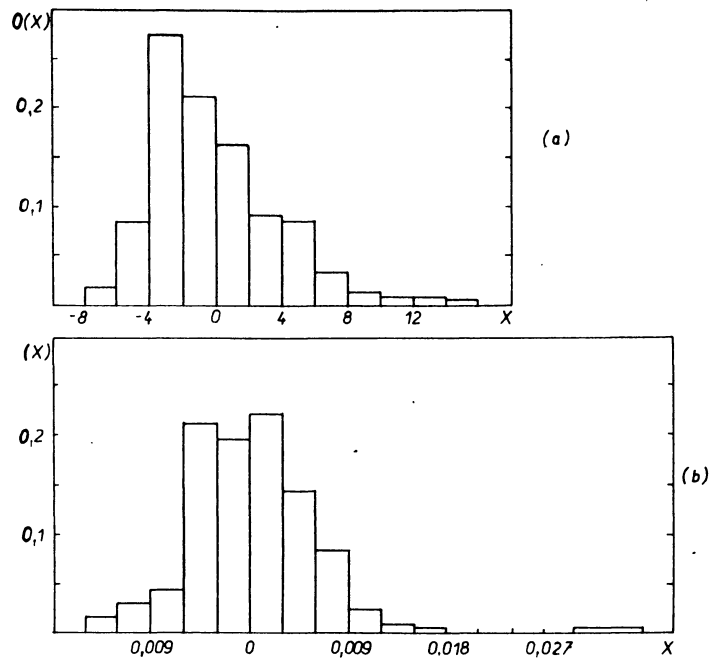


Рис. 5. Функции распределения процессов X : а — для площади пентаг, б — для радионзлучения.

Литература

JAGLOM, A. M. (1952): Usp. Mat. Nauk, T. VII.
JAKIMEC, M. (1969): Acta Astron., 19, No. 1.

РЫТОВ, S. M. (1966): Введение в статистическую радиофизику. Москва.