

УДК 523.98

Распределение плотности потока солнечных радиовсплесков III типа

Ю. Ф. Юровский

Крымская астрофизическая обсерватория,
98409, Крым, Научный

Показано, что оценка вероятности излучения энергии описывается не распределением плотности потока P , а распределением обратной величины $1/P$. Применение этой закономерности для анализа опубликованных распределений позволило обнаружить, что всплески III типа с пиковым потоком порядка $100 \cdot 10^{-22}$ Вт/м²Гц содержат приблизительно в 10 раз больше энергии, чем суммарное излучение всех вместе взятых всплесков с потоком $10 \cdot 10^{-22}$ Вт/м²Гц каждый. Следовательно, источник излучает энергию в радиодиапазоне в основном в виде редких интенсивных всплесков, а не в виде множества слабых всплесков.

РОЗПОДІЛ ЩІЛЬНОСТІ ПОТОКУ СОНЯЧНИХ РАДІОСПЛЕСКІВ III ТИПУ, Юровський Ю. Ф. — Показано, що оцінка імовірності випромінювання енергії описується не розподілом щільності потоку P , а розподілом оберненої величини $1/P$. Застосування цієї закономірності для аналізу опублікованих розподілів дозволило виявити, що сплески III типу з піковим потоком порядку $100 \cdot 10^{-22}$ Вт/м²Гц містять приблизно в 10 разів більше енергії, ніж сумарне випромінювання всіх разом взятих сплесків з потоком $10 \cdot 10^{-22}$ Вт/м²Гц кожний. Отже, джерело випромінює енергію в радіодіапазоні в основному у вигляді рідких інтенсивних сплесків, а не у вигляді безлічі слабих сплесків.

FLUX DENSITY DISTRIBUTION IN SOLAR TYPE III RADIO BURSTS, by Yurovskij Yu. F. — It is shown that the estimate of the energy emission probability described by the distribution of the inverse quantity $1/P$ rather than the distribution of the flux density P itself. The application of this result to the analysis of the empirical histograms of type III bursts showed that the bursts with a peak flux of the order of $100 \cdot 10^{-22}$ W/m²Hz contain 10 times more energy than the total energy of all short tracks with a flux of $10 \cdot 10^{-22}$ W/m²Hz each. Therefore, the radio sources emit the is energy mainly in the form of powerful bursts rather than in the form of numerous weak bursts.

ВВЕДЕНИЕ

Модель источника излучения радиовсплесков должна описывать превращение одного какого-либо вида энергии (тепловой, кинетической, магнитной) в радиоизлучение. Соответственно существенное значение имеют сведения не только о длительности, полосе частот и интенсивности всплесков, но и

сведения о содержащейся в них энергии. Пиковый поток дециметровых всплесков III типа исследовался в работе Мелендеса и др. [2]. Измеренные значения потока 160 всплесков вошли в состав опубликованной гистограммы. Наличие максимума гистограммы в области минимальных значений потока привело авторов к заключению о том, что большинство всплесков слабые. Однако при этом остается невыясненным, какую часть полной энергии источника содержат эти слабые всплески.

Для выяснения этого вопроса в данной работе проведено уточнение методики определения потока и энергии всплесков по экспериментальным данным.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА

Пусть в результате наблюдений зарегистрировано N_{tot} всплесков с различным потоком P , величина которого лежит в интервале $[P_{\text{min}}, P_{\text{max}}]$. Очевидно, что более интенсивный всплеск содержит больше энергии, чем слабый всплеск. Величина P обычно описывается распределением $w(P) = n / (N_{\text{tot}} \Delta P)$, где $\Delta P = (P_{\text{max}} - P_{\text{min}}) / N_k = \text{const}$, N_k — количество интервалов (бинов) гистограммы. При этом относительная величина вариаций $\Delta P / P_k$ переменной P в каждом бине k гистограммы обратно пропорциональна значению абсциссы бина P_k . Следовательно, из-за различия критерия отбора гистограмма даже заведомо однородных данных будет содержать большее количество событий в первых бинах.

Разделим ось P на N_k интервалов длиной aP_k . Здесь $a = \sqrt[N_k]{P_{\text{max}} / P_{\text{min}}} - 1$ соответствует величине отклонения потока всплесков в пределах одного интервала и не зависит от P_k . Следовательно, в этом случае критерий отбора одинаков как для слабых, так и для мощных всплесков.

Количество всплесков в интервале aP равно $n = w(P) N_{\text{tot}} aP$. Суммарная энергия всплесков, входящих в этот интервал, пропорциональна потоку каждого всплеска, умноженному на их количество: $E \propto nP = w(P) N_{\text{tot}} aP^2$. Поскольку $N_{\text{tot}} a = \text{const}$ для изучаемого набора данных, то можно записать: $E \propto w(P) P^2$. Правая часть полученного выражения представляет собой результат преобразования распределений [1]: $E \propto w(1/P) = w(P) P^2$.

Таким образом, если наблюдается избыточное излучение, то принадлежность этого излучения к сильному или слабому всплеску с учетом заключенной в нем энергии описывается распределением $w(1/P)$ величины $1/P$, обратной потоку P , а не распределением $w(P)$ самого потока P .

Для сравнения с эмпирическим распределением рассмотрим две модели случайного процесса.

а) «Белый» шум. Пусть суммарная энергия всплесков разной мощности одинакова. В этом случае распределение $w(1/P) = 1 / (1/P_{\text{min}} - 1/P_{\text{max}}) = \text{const}$ плоское, а распределение $w(P)$ потока всплесков P представляет собой квадратичную гиперболу $w(P) = \text{const} / P^2$, нарастающую в сторону уменьшения потока всплесков. При этом отношение ординат двух бинов гистограммы i и j обратно пропорционально квадрату отношения их абсцисс: $n_i / n_j = (P_j / P_i)^2$.

Квадратичная гипербола удовлетворительно описывает распределение $w(P)$ в интервалах, удаленных от граничных значений P , что позволяет наглядно оценивать характер гистограммы. Если, например, абсциссы двух бинов отличаются вдвое, а их ординаты — приблизительно вчетверо, то события, образующие гистограмму, равновероятны. Однако вблизи границ диапазона изменений переменной P простейшая модель «белого» шума дает

существенные погрешности: при $P \rightarrow 0$ величина $1/P \rightarrow \infty$ и оценки становятся неточными.

б) Экспоненциальное распределение. Для сравнения эмпирической гистограммы с аналитическим распределением в более широком диапазоне изменений P предпочтительнее применение пуассоновской модели шума. Расстояние P между точками пуассоновской последовательности событий описывается экспоненциальным законом [1]: $w(P) = (1/\bar{P})\exp(-P/\bar{P})$, где $\bar{P} = 1/N_{\text{tot}} \sum_{i=1}^{N_{\text{tot}}} P_i$ — среднее значение потока всплесков. Распределение плотности вероятности энергии получим с помощью уже упоминавшегося преобразования распределений: $w(1/P) = P^2/\bar{P}\exp(-P/\bar{P})$.

СРАВНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ГИСТОГРАММЫ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА С АНАЛИТИЧЕСКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Копия гистограммы плотности потока, опубликованная в статье Мелендеса и др. [2], показана на рис. 1. Логарифмическая шкала по оси абсцисс заменена на линейную и для анализа взяты первые 18 бинов, в каждом из которых содержалось более одного всплеска. Для сравнения гистограммы с «белым» шумом четвертый бин был принят в качестве опорного и относительно него с помощью выражения $n_k = n_4(P_4/P_k)^2$ были вычислены ординаты других бинов аналитического распределения. Как и следовало ожидать, «белый» шум удовлетворительно описывает лишь часть гистограммы, достаточно удаленную от значений $P \rightarrow 0$, но ординаты двух первых бинов, близких к граничному значению $P = 0$, оказались много больше эмпирических величин. Поэтому описание гистограммы с помощью модели «белого» шума было признано неудовлетворительным.

Гораздо лучшее соответствие дает экспоненциальное распределение (плавная кривая на рис. 1). Параметр пуассоновского закона \bar{P} был вычислен по эмпирическим данным. Расхождение между гистограммой и аналитическим распределением находится в пределах статистических флуктуаций экспериментальных данных. Затем было построено эмпирическое распределение $w(1/P)$ для точек, соответствующих серединам бинов

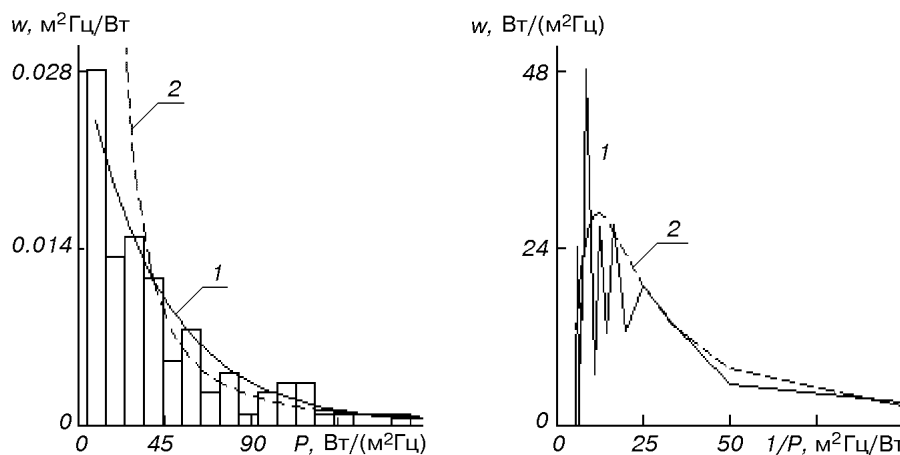


Рис. 1. Эмпирическое распределение потока всплесков [2] (гистограмма); 1 — аппроксимация экспоненциальным законом $w(P) = (1/\bar{P})\exp(-P/\bar{P})$, 2 — «белый шум» $w(P) = \text{const}/P^2$
 Рис. 2. Эмпирическое распределение $w(1/P)$ (ломаная линия 1) и его аппроксимация (2) экспоненциальным законом $w(1/P) = P^2/\bar{P}\exp(-P/\bar{P})$.

P_k исходной гистограммы (сплошная ломаная линия на рис. 2). Пунктирной линией на графике показано аналитическое распределение $w(1/P)$. Можно видеть, что и в этом случае аналитическая кривая располагается в пределах статистических флуктуаций эмпирического распределения.

Таким образом, характер распределения $w(1/P)$ свидетельствует о том, что вероятность излучения энергии увеличивается приблизительно в 10 раз по мере увеличения рассматриваемой величины потока от 10 до $100 \cdot 10^{-22}$ Вт/(м²Гц). Если принять во внимание слабую зависимость интенсивности всплесков от частоты (Мелендес и др. [2, рис. 7]) и полагать, что всплески имеют в среднем одинаковую длительность, то можно сделать следующее заключение: источник всплесков III типа затрачивает в 10 раз больше энергии на излучение мощных всплесков по сравнению с расходом энергии на суммарное излучение всех слабых всплесков, вместе взятых.

Из-за экспоненциального закона распределения $w(P)$ ординаты гистограммы быстро уменьшаются, и после некоторого значения P количество всплесков в бине оказывается меньше единицы. Поэтому вероятность наблюдения мощных всплесков в рассмотренном случае (гистограмма [2]) оказалась ограниченной не свойствами источника генерации, а объемом исходных данных.

ВЫВОДЫ

1. Вероятность излучения энергии в виде всплесков с заданным потоком P описывается распределением обратной величины $1/P$, а не распределением самой величины P .

2. Эмпирическая гистограмма плотности потока удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальным законом распределения, что свидетельствует в пользу того, что физический процесс, ответственный за излучение всплесков III типа, описывается пуассоновской статистикой.

3. Мощные всплески III типа с потоком порядка $100 \cdot 10^{-22}$ Вт/(м²Гц) содержат приблизительно в 10 раз больше энергии, чем ее содержится во всех вместе взятых слабых всплесках с потоком $10 \cdot 10^{-22}$ Вт/(м²Гц) каждый.

1. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Радио и связь, 1982.—624 с.

2. Melendez J. L., Savant H. S., Fernandes F. C. R., Benz A. O. Statistical analysis of high-frequency decimetric type III bursts // Solar Phys.—1999.—187, N 1.—P. 77—88.

Поступила в редакцию 07.03.00