



ISSN 1607–2855

Том 8 • № 2 • 2012 С. 166 – 170

УДК 523.682

Автоматическая обработка радиосигналов при наблюдении метеоров методом загоризонтного зондирования

В.С. Вовк, Н.А. Калюжный, Е.С. Козырев, А.В. Шульга

Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория»

В статье рассмотрены аспекты наблюдений и результаты исследований метеорной активности радиотехническими средствами в НИИ НАО. Представлены аппаратный и программный комплексы регистрации сигналов загоризонтных FM-станций, которые отражаются от следов метеороидов в верхних слоях атмосферы. Приведен статистический анализ полученных данных.

АВТОМАТИЧНА ОБРОБКА РАДІОСИГНАЛІВ ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННІ МЕТЕОРІВ МЕТОДОМ ЗАГОРИЗОНТНОГО ЗОНДУВАННЯ, Вовк В.С., Калюжний М.А., Козырев Е.С., Шульга О.В. — У статті розглянуті аспекти спостережень та результати досліджень метеорної активності радіотехнічними засобами в НДІ МАО. Представлений апаратний та програмний комплекси реєстрації сигналів загоризонтних FM-станцій, що відбиваються від слідів метеороїдів у верхніх шарах атмосфери. Наведено статистичний аналіз отриманих даних.

AUTOMATIC RADIO SIGNAL PROCESSING IN METEOR OBSERVATION BY USING OF OVER-THE-HORIZON SENSING, by Vovk V.S., Kaluzhniy N.A., Kozyrev E.S., Shulga A.V. — The results and approaches of meteor scatter observation in RI NAO by using of radio method are represented in the article. The radio-technical equipment and processing method for detecting of meteors echo reflected from meteor trail in automatic mode are described. Statistic analyses of received data are given.

Ключевые слова: наблюдения метеоров; обработка радиосигналов.

Key words: meteor observations; radio signal processing.

1. ВВЕДЕНИЕ

Метеоры на протяжении длительного времени наблюдались оптическими средствами. С середины 20-го века наряду с традиционными оптическими методами радиолокационные методы становятся мощным средством изучения метеоров, позволяющим наблюдать метеоры круглые сутки. Радионаблюдения метеоров незаменимы при изучении дневных метеорных потоков, а также потоков, активность которых очень кратковременна. В настоящее время Метеорный центр данных Международного астрономического союза (International Astronomical Union Meteor Data Center) содержит 62 906 орбит метеоров, полученных в результате радарных наблюдений [1]. В таких наблюдениях используется принцип обратного рассеяния, когда приемник принимает сигнал, излученный собственным передатчиком и рассеянный назад ионизированным следом, возникающим при пролете метеороида в атмосфере Земли.

В связи с появлением огромного числа TV и FM-передатчиков, наиболее перспективным направлением исследований представляется наблюдение метеоров с помощью радаров прямого рассеяния (forward scattering) или FS-радаров. За счет отражений от ионизированного следа метеора возможна передача УКВ сигналов на расстояние до 2000 км. Привлекательность направления состоит в простоте используемых технических средств и приемлемом объеме финансовых затрат, доступных в том числе и на широком любительском уровне исследований.

В настоящее время основным наблюдателем метеоров в радиодиапазоне является сеть RMOB (Radio Meteor Observation Beacon) [2], сотрудничающая с IMO (International Meteor Organization). На май 2012 года в этой сети насчитывалось 27 зарегистрированных наблюдателей (таблица 1), которые находятся в Европе и в Северной Америке [2].

На основе технологии FS-радаров в Научно-исследовательском институте «Николаевская астрономическая обсерватория (НИИ НАО)» разработан и используется аппаратно-программный комплекс регистрации метеорных явлений [3, 4]. Особенностью комплекса является использование звукового сигнала с выхода частотного демодулятора FM-приемника для обнаружения метеоров. При этом может решаться задача исследования статистики метеорной активности, а также могут быть оценены скорости метеороидов и время существования их следов в атмосфере.

2. ОПИСАНИЕ АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

В НИИ НАО для приема сигналов метеорных отражений используется шестиэлементная антенна горизонтальной поляризации типа «волновой канал». Сигнал с выхода антенны подается на вход встроенного в персональный компьютер TV/FM-тюнера, выход частотного детектора которого подключен

Таблица 1

№ п/п	Передатчик	Диапазон, МГц	Мощность, кВт	Наблюдателей
1	GRAVES французский радар для наблюдения космических объектов, передатчик которого расположен возле городка Бруа-Обинье-Монсень. Координаты местоположения: 47° 20' 52,8''N, 5° 30' 54,36''E.	143,05	700	13
2	Метеорный маяк, расположенный в Ипре, Бельгия. Координаты местоположения: 50° 51' 0''N, 2° 53' 0''E	49,99	0.05	8
3	Телевизионные передатчики, расположенные на юге Канады. Координаты местоположения: 102°41'W 49°49'N, 51°01'N 99°32'W, 79°26'W 46°04'N	60–70	100	6

к линейному входу звуковой карты. При помощи свободно распространяемой программы SpectrumLab аудио поток круглосуточно сохраняется в файлы длительностью по 5 минут. Частота дискретизации составляет 11025 Гц.

В качестве передающего пункта была выбрана радиостанция в г. Кельце (Польша), находящаяся на расстоянии в 910 км и имеющая следующие параметры: мощность — 120 кВт, рабочая частота — 88,2 МГц, азимут — 301°. Передающий пункт был выбран исходя из соображений оптимальной дальности радиотрассы, максимально большой мощности передатчика и наличия свободного от местных помех частотного окна в г. Николаеве.

Обработка массивов данных проводится с помощью разработанной в НИИ НАО программы автоматического детектирования метеоров.

3. МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МЕТЕОРОВ

Большую часть времени звуковой сигнал, поступающий с выхода частотного демодулятора FM-приемника, настроенного на загоризонтную радиостанцию, представляет собой фоновый шум. В

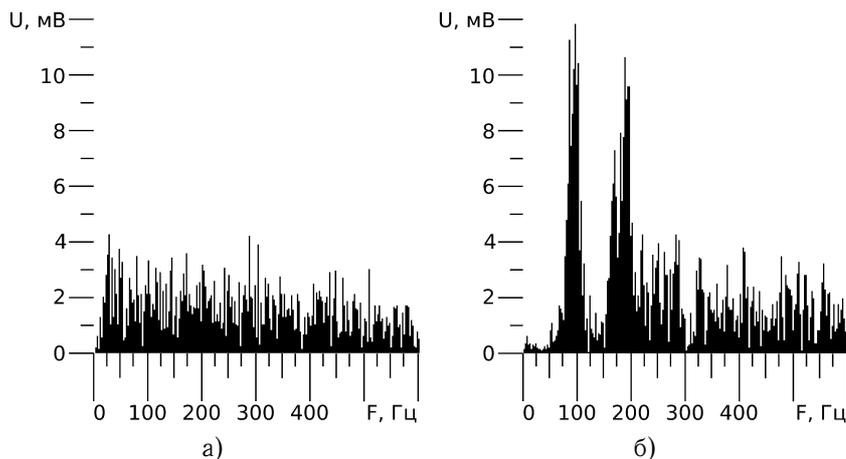


Рис. 1. Спектры сигналов, принимаемые приемником: а) спектр шумового сигнала, б) спектр отраженного от метеороидного следа сигнала ФМ станции

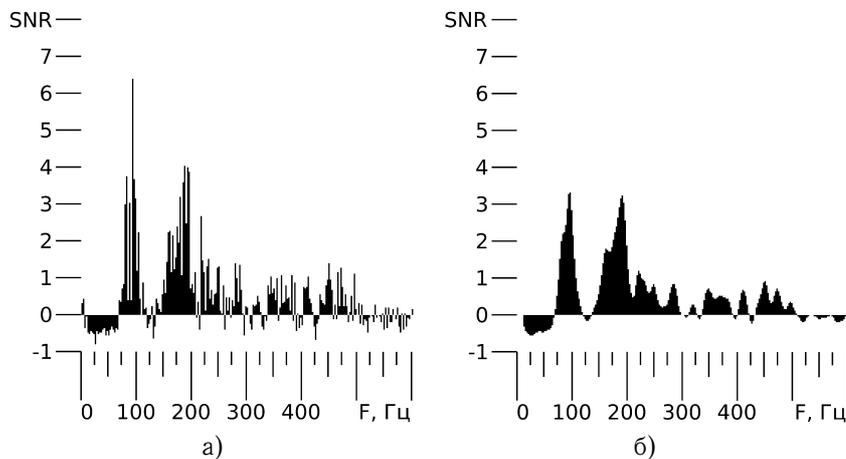


Рис. 2. Обработка спектров сигналов: а) изображение спектра после перехода к отношению сигнал/шум, б) сглаженный спектр

качестве примера на рис. 1а приводится спектр такого сигнала.

Эпизодически, вследствие отражения от ионизированного следа метеороида, на выходе FM-приемника появляется сигнал радиостанции, длительность которого в основном находится в интервале от 0.01 с до 10 с. Иногда аномальный прием загоризонтных радиостанций происходит в результате преломления радиоволн, обусловленного температурной инверсией в верхних слоях атмосферы. При этом одновременно могут приниматься несколько радиостанций. Продолжительность этого явления может составлять от нескольких минут до нескольких часов. Звуковой сигнал радиостанции содержит музыку и речевые фонемы, спектр которых отличается ярко выраженной неравномерностью в спектре. Данное обстоятельство иллюстрируется на рис. 1б. Также среди принимаемых сигналов присутствуют техногенные помехи, для которых характерно преобладание низких частот.

Автоматическое выделение метеоров включает следующие основные этапы:

1. Первичная обработка аудио потока;
2. Построение частотно-временного поля;
3. Обработка частотно-временного поля;
4. Расчет параметров временных интервалов частотно-временного поля;
5. Обработка параметров временных интервалов, выделение метеоров.

Первичная обработка заключается в скользящем сглаживании аудио потока позволяющем отсеять высокочастотную (> 1000 Гц) шумовую составляющую аудиосигнала по следующей формуле:

$$m = \frac{1}{2} \Delta t \cdot F_d, \quad \hat{A}_i = \frac{1}{2m+1} \sum_{j=i-m}^{i+m} A_j,$$

где: A_j — исходные значения амплитуды аудио потока; \hat{A}_i — сглаженные значения амплитуды; $\Delta t = 1$ мс — интервал времени для сглаживания; m — половинное количество амплитуд, по которым производится сглаживание; F_d — частота дискретизации.

Для автоматического выделения фрагментов аудио потока, содержащих сигнал радиостанции, строится частотно-временное поле — последовательность спектров аудио сигнала вычисленных на коротких интервалах времени. Частотно-временное поле вычисляется с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) по L отсчетам амплитуды с шагом Δk отсчетов. Обозначим через U_{kl} частотно-временное поле, с порядковым номером частотного фильтра БПФ l , соответствующем частоте $f_l = \frac{l}{L} F_d$, и номером временного интервала k , соответствующем моменту времени $t_k = \frac{k \cdot \Delta k}{F_d}$. Спектры аудио сигнала рассчитываются на интервалах времени $\frac{L}{F_d} = \frac{4096}{11025} \approx 0.372$ с с шагом $\frac{\Delta k}{F_d} = \frac{L}{2F_d} \approx 0.186$ с.

Фон частотно-временного поля имеет характерные особенности: плавное изменение средней амплитуды от частоты и наличие сосредоточенных по частоте спектральных пиков. В большинстве случаев такие пики появляются на частотах кратных 50 Гц, а также на частоте 23 Гц. По этой причине на первом этапе обработки частотно-временного поля производится устранение подобных пиков при помощи процедуры нормировки по следующей формуле:

$$SNR_{ki} = \frac{U_{ki} - \bar{U}_i}{\sigma_i},$$

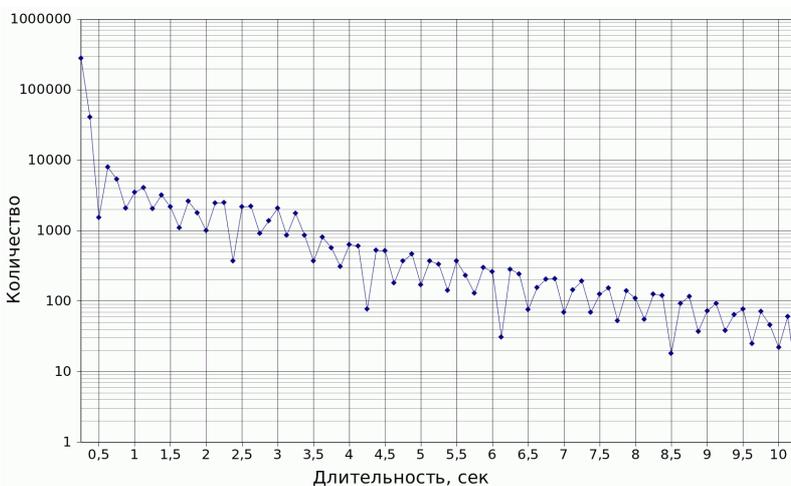


Рис. 3. Распределение метеорных явлений по суммарному времени их существования

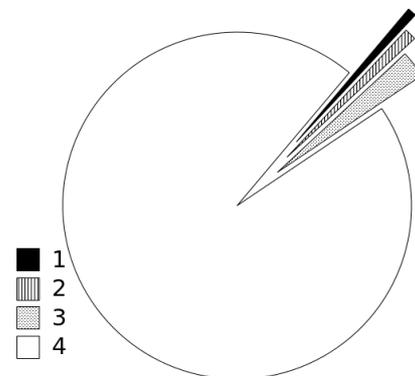


Рис. 4. Распределение явлений по суммарному времени существования за май 2012 года (поток η-аквариды): 1 — метеоры 0,83%; 2 — техногенные помехи 1,10%; 3 — температурная инверсия 2,51%; 4 — шум 95,56%

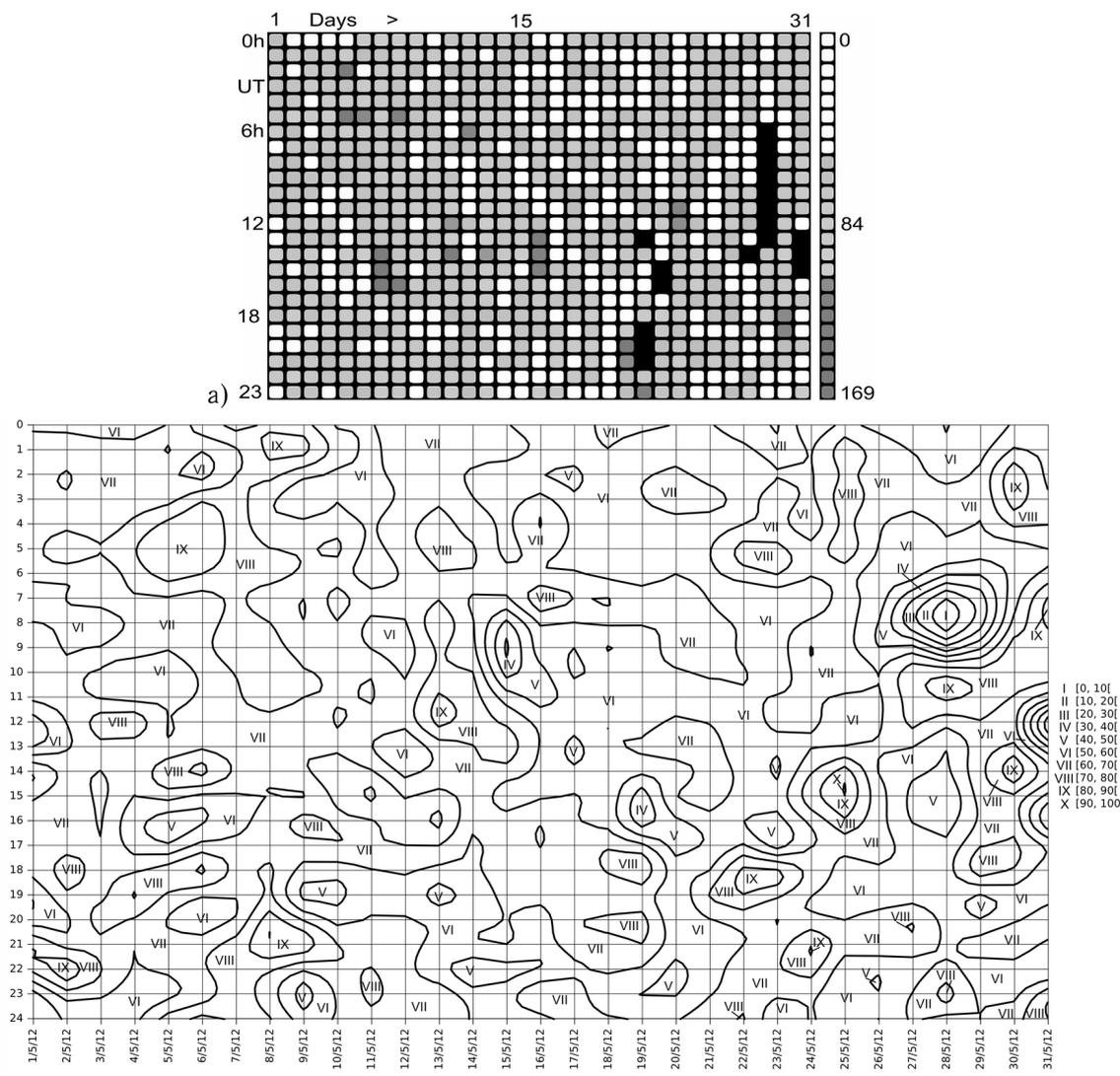


Рис. 5. Суточное распределение количества метеоров в час за май 2012 года (поток η -аквариды): а) в формате RMOB [2], б) сглаженное методом Шепарда.

где: SNR_{ki} — частотно-временное поле, приведенное к отношению сигнал/шум; \bar{U}_i и σ_i — среднее значение и СКО вариаций спектральной амплитуды i -го фильтра БПФ.

Таким образом, в частотно-временном поле убираются сосредоточенные по частоте спектральные составляющие, а также осуществляется перевод спектра из значений амплитуд аудио сигнала в значения отношения сигнал/шум. На рис. 2а приводится изображение спектра после перехода к отношению сигнал/шум. Исходным для построения рис. 2а был спектр, показанный на рис. 1б.

После нормировки проводится сглаживание спектров частотно-временного поля при помощи фильтра, переходной характеристикой которого в частотной области является функция Гаусса с шириной, равной 4 Гц. Для примера на рис. 2б приводится сглаженный спектр, полученный из спектра, изображенного на рис. 2а.

Для временных интервалов частотно-временного поля осуществляется расчет следующего набора параметров:

- 1) Частоты и амплитуды максимумов отношения сигнал/шум;
- 2) Коэффициент преобладания низких частот равный отношению суммы значений SNR на частотах 0–100 Гц к сумме значений SNR на частотах 200–400 Гц (для выделения техногенных помех):

$$\alpha_k = \frac{2 \sum_{j=0}^{N_{100}} SNR_{kj}}{\sum_{j=N_{200}}^{N_{400}} SNR_{kj}}$$

где: α_k — коэффициент преобладания низких частот для временного интервала k ; N_{100} , N_{200} и N_{400} —

номера фильтров БПФ, соответствующее частотам 100, 200 и 400 Гц.

Аудио сигнал на временном интервале k принимается за содержащий сигнал радиостанции, если его спектр удовлетворяет следующим условиям:

- коэффициент преобладания низких частот α_k не превышает порогового значения 0.5 (для устранения техногенных помех);
- в диапазоне частот 50–600 Гц максимум отношения сигнал/шум частотно-временного поля превышает пороговое значение 3.5.

Фрагменты аудио сигнала радиостанции длительностью менее 10 секунд считаются метеорами, с большей длительностью — явлениями температурной инверсии.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Автоматическая обработка с использованием выше описанного метода поволилась по данным наблюдений, полученным за период с 21 марта 2011 года по 31 июня 2012 года. В результате было выделено 391 515 явлений, идентифицированных как метеоры.

Проведен анализ статистики времени существования метеорного явления. Распределение метеорных явлений по времени их существования (рис. 3) соответствует данным, полученным на радарх обратного рассеяния [4].

Пример распределения количества метеоров в час по времени суток представлен в формате данных RМОВ на рис. 5а.

Как упоминалось выше, в принимаемом сигнале, помимо сигнала FM-станции, отраженного от метеоров, присутствуют помехи, а также шум, по своим характеристикам близкий к белому. Помехи можно разделить на две группы: техногенные помехи и помехи, обусловленные аномальным приемом загоризонтных радиостанций вследствие наличия температурной инверсии в тропосфере. Типичное относительное распределение суммарного времени существования этих явлений представлено на рис. 4.

Для оценки погрешности регистрации метеоров было вычислено среднеквадратическое отклонение с помощью модифицированного метода Шепарда [5]. Модифицированный метод Шепарда обеспечивает гладкость интерполяции табличных данных и прост в реализации, особенно в случае многомерных функций. Данный метод был применен для случая двухмерной функции зависимости количества метеоров от времени и даты (рис. 5б). Решение по модифицированному методу Шепарда находится в результате итерационного процесса. Условием выхода из итерационного процесса является изменение СКО текущей итерации по отношению к предыдущей больше чем на 10%. В конечном итоге получено СКО равное порядка 10 метеоров в час (при среднем количестве 60 метеоров в час).

5. ВЫВОДЫ

Изучение метеоров в радиодиапазоне является актуальной задачей для изучения эволюции Солнечной системы и оценки метеороидной опасности.

В НИИ НАО разработано и апробировано программное обеспечение для автоматического выделения метеоров по сигналам загоризонтных FM радиостанций. По данным наблюдений за период с 21 марта по 31 июня 2012 года 391515 явлений выделено как метеоры. Количество регистрируемых метеорных явлений в час в среднем составляет порядка 60, во время сильных потоков достигает 300, во время слабых — до 150.

Применение метода Шепарда позволило оценить внутреннюю погрешность регистрации метеоров: СКО составило 10 метеоров в час.

Определены пути дальнейшего совершенствования метода автоматической детектирования метеоров с целью повышения достоверности выделения метеорного явления и его детального амплитудно-частотного анализа.

1. Lindblad B.A., Steel D.I. Meteoroid Orbits Available from the IAU Meteor Data Center // Asteroids, comets, meteors 1993: proceedings of the 160th International Astronomical Union, held in Belgirate, Italy, June 14–18, 1993. Edited by Andrea Milani, Michel Di Martino, and A. Cellino. International Astronomical Union. Symposium no. 160. — Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994. — P. 497–501. <http://articles.adsabs.harvard.edu>
2. <http://www.rmob.org>
3. Сливинский А.П., Шульга А.В., Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Козырев Е.С., Вовк В.С. Исследование плотности метеорных потоков по сигналам FM станций в НИИ НАО / Дистанционное радиозондирование ионосферы: Сборник тезисов. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. — С. 35.
4. Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Сливинский А.П., Шульга А.В. Использование сигналов вещательных FM-станций для исследований численности метеоров // Космічна наука і технологія. — 2011. — **17**, № 3. — С. 72–82.
5. Masjukov A.V., Masjukov V.V. Multiscale modification of Shepard's method for multivariate interpolation of scattered data // Mathematical Modelling and Analysis. — 2005. — **10**. — P. 467–472. <http://www.techmat.vgtu.lt>

Поступила в редакцию 16.08.2012