

ВЕЙВЛЕТ–АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ «ЯДРО-ДЖЕТ» КВАЗАРОВ И БЛАЗАРОВ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

М.И.Рябов¹, А.Л.Сухарев¹, А.Е.Вольвач², Л.Н.Вольвач², Р.А.Сыч³, М.Аллер⁴

¹ Одесская обсерватория «УРАН-4» Радиоастрономического института НАН Украины

² НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория», Украина

³ Институт солнечно-земной физики СО РАН, Россия

⁴ Радиоастрономическая обсерватория Мичиганского университета, США

ABSTRACT. Long monitoring of fluxes of a radio emission blazars on centimetric and millimetric waves to be carrying out since 1965 on PT-26 the Radioastronomical observatory of Michigan university (UMRAO) in the USA (4.8, 8 and 14.5 Ggts) and since 1980 on PT-22 scientific research institute «Crimean astrophysical observatory» (22 and 36.8 Ggts). Carrying out of the comparative analysis of application of a standard method a Fourier of the analysis and more modern weivlet analysis for detection of dynamics of changes of flows actively investigated four blazars was the purpose of the given activity: 3C120, 3C345, 3C446 and BL Lac.

Введение

Исследуемые радиоисточники относятся к числу ярких и быстропеременных объектов, называемых блазарами, и исследуются во всех диапазонах электромагнитного спектра. Они характеризуются непрерывным спектром излучения во всех диапазонах (гамма, рентгеновском, ультрафиолетовом, оптическом, инфракрасном и радио) и очень слабыми, иногда не видимыми, спектральными линиями. Для блазаров типичны также быстрые и значительные изменения светимости во всех диапазонах спектра за период времени в несколько суток или даже часов. Одной из самых интересных структурных деталей блазаров являются струи или джеты. Согласно теоретическим моделям, струи формируются во внутренних частях аккреционного диска вокруг сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Область формирования струи столь компактна, что ее прямое наблюдение возможно только путем совместных наблюдений на VLBA, VLA и других радиотелескопах [1].

Наблюдения радиоисточников

Наиболее продолжительный мониторинг потоков радиоизлучения блазаров на сантиметровых и миллиметровых волнах проводится на PT-26 Радиоастрономической обсерватории Мичиганского университета (UMRAO) в США (4.8, 8 и 14.5 ГГц) с 1965 года. Методика наблюдений и обработки данных на PT-26 описаны в работе [3].

На частотах 22.2 и 36.8 ГГц наблюдения проводились на 22-м радиотелескопе НИИ «КрАО» с использованием модуляционных радиометров, имеющих флуктуационную чувствительность 0.04 К при постоянной времени 1 секунда [2].

Методика обработки данных

При обработке данных наблюдений применялись методы анализа временных рядов с применением различных методов фильтрации данных в предположении, что наблюдаемые изменения потока представляют собой суперпозицию различных процессов и периодов активности. Используемые данные наблюдений источников представлены в виде средних значений за период в 7 суток на указанных выше временных интервалах с неравномерной сеткой отсчетов.

Для повышения эффективности спектрального анализа Фурье все данные были освобождены от трендов и сглажены полиномиальным скользящим средним. Для выявления короткопериодических изменений потоков, использовался высокочастотный тригонометрический фильтр [4].

Недостаток периодограммного анализа заключается в том, что он не даёт информации о том, как именно гармонические составляющие исследуемого сигнала изменяются во времени. Так как переменность радиоисточников представляет сложные, нестационарные процессы, то использование вейвлет-анализа позволяет получить больше информации о структуре сигнала

на разных частотах, чем при использовании Фурье анализа. В нашей работе использовалось непрерывное вейвлет-преобразование на основе функции Морле. Это позволило выделить отдельные гармонические компоненты на разных масштабах, проследить их изменение со временем и продолжительность существования. Распределение полной энергии сигнала по масштабам можно проследить с помощью глобального вейвлет спектра, который соответствует спектру мощности сглаженному на каждом масштабе спектром Фурье анализирующего вейвлета [5, 6].

Результаты обработки наблюдений

3C120

Временной интервал используемых нами данных по радиоисточнику 3C120 на частоте 14.5 ГГц составил 36 лет, на частоте 8 ГГц – 44 года и на частоте 4.8 ГГц – 29 лет. Весь набор полученных значений периодов приведён в табл. 1. По wavelet-спектрам ним можно определить периоды гармонических колебаний потока, длительность существования этих гармонических колебаний на исследуемой частоте радиоисточника и изменение периодов со временем. На Рис. 1 для примера приведён wavelet-спектр радиоисточника 3C120. Полученные результаты были объединены в Таблице 1 для трёх частот наблюдений.

Долговременные периоды изменений потока продолжительностью около 10 – 13 лет и менее продолжительные периоды около 2 и 5 лет присутствуют на всех частотах. Близкие значения периодов 1.6 (14.5 ГГц), 1.3 (8 ГГц) и 1.6 (4.8 ГГц) могут быть проявлением одного процесса, идущего на различных частотах. Кроме того на частоте 14.5 ГГц существует слабая гармоника с периодом 0.6 года. Полный список обнаруженных периодов приведён в Таблице 1.

3C345

Для радиоисточника 3C345 длина временных рядов составляет 24 года на частоте 36 ГГц и 22 ГГц, 37 лет на частоте 14.5 ГГц, 45 лет на частоте 8 ГГц и 33 года на частоте 4.8 ГГц. Весь набор полученных значений периодов приведён в Табл. 2. На всех частотах преобладают длительные периоды изменений потока, от 24 до 8 лет. Диапазон коротких периодов от 6 до 2 лет. На различных частотах периоды заметно отличаются друг от друга. На Рис. 2 для примера приведён wavelet-спектр радиоисточника 3C345 на частоте 14.5 ГГц.

BL LAC

Этот радиоисточник обладает очень быстрой и высокоамплитудной переменностью, которая накладывается на медленную изменение плотности потоков. Длина временных рядов на частоте 14.5 ГГц составила 36 лет, на частоте 8 ГГц – 43 года и на частоте 4.8 ГГц – 31 год. По сглаженным данным мы получили очень близкие значения длительных периодов на всех

частотах. Весь набор полученных периодов приведён в Таблице 4. Ниже, на Рис. 4 для примера показан wavelet-спектр радиоисточника BL Lac на частоте 8 ГГц.

Период близкий к 8 годам является основным на трёх частотах, более короткие периоды имеют ограниченное время проявления во всем периоде наблюдений.

3C446

Для радиоисточника 3C446 длина временных рядов составляет 31 год на частоте 14.5 ГГц, 32 года на частоте 8 ГГц и 31 год на частоте 4.8 ГГц. Весь набор полученных периодов приведён в Таблице 5. У этого радиоисточника значение основного периода близок к 8 годам, и на трёх частотах получен схожий набор значений периодов, только на 14.5 ГГц самый короткий период имеет значение 1 год. На Рис. 5 для примера приведён wavelet-спектр радиоисточника 3C446 на частоте 14.5 ГГц.

Выводы

Поведение многих блазаров хорошо описывается моделью «ударной волны в джете», предложенной Маршером и Гиром. Эта модель предполагает, что излучение разных частот рождается в джете, электроны ускоряются на фронте ударной волны и теряют энергию, удаляясь от него. Электроны самых высоких энергий, которые излучают на коротких длинах волн сохраняются только вблизи фронта, в то время как более низкие частоты излучаются в большей по объёму области. В этом случае переменность на высоких частотах будет больше по амплитуде и быстрее по времени, а флуктуации потока на более низких частотах имеют более сглаженный характер, что обычно и наблюдается в большинстве блазаров [1].

Полученные нами результаты в целом согласуются с ранее опубликованными работами по исследованию переменности блазаров. В тоже время они дают более детальную картину позволяющую анализировать применимость тех или иных физических моделей. Многолетние наблюдения переменности активных ядер галактик в радио диапазоне показывают, что существует общая «организация» изменений потоков у разных источников – переменность существует на двух четко выраженных масштабах времени: медленной и быстрой. Медленные компоненты с характерными временами порядка десяти лет и более, а более короткие быстрые компоненты продолжительностью от нескольких месяцев до нескольких лет. По-видимому, длинные волны переменности отражают некоторые макроскопические процессы, например квазипериодические изменения темпа аккреции на ядро, тогда как короткопериодические колебания плотности потока представляют, вероятно, более или менее случайные явления, протекающие в непосредственной близости от центрального источника, например падение отдельных облаков вещества на аккреционный диск [7].

Таблица 1. Начальные и конечные даты гармонических колебаний (T_{start} , T_{end}), времена их существования (ΔT), начальные и конечные значения периодов (P_{start} , P_{end}), для радиосточника ЗС120. В колонках справа приведены значения максимумов спектральных мощностей для выделенных периодов, и времён, в которые эти максимумы наблюдались (F_r – частота исследуемого сигнала, P_r – выделенный период (гармонический компонент), P_w – максимум спектральной мощности, T – время проявления максимума спектральной мощности).

Freq, GHz	P_{start}	P_{end}	T_{start}	T_{end}	ΔT	F_r , GHz	P_r , Yr	T	P_w
14,5	10,3	10,3	1981,5	2005,5	24	14,5	10,3	1992,3	157
	6,2	6,4	1979,2	1997,5	18,3		6,4	1990,2	55
	4	4,3	1981	2004,7	23,7		4,3	1989	147
	2,5	2,3	1984,4	2007,8	23,4		2,3	1981,4	15
	1,6	1,6	1985,5	2006,5	21			1997,5	7
	1	1	1986,7	2002,5	15,8			2007,3	10
	0,6	0,6	1986	2001,5	15,5		1,6	1988,5	15
8	12,5	12,5	1968,2	1998	29,8		1999	20	
	4,7	4,7	1970	1996,3	26,3	1	1984,6	4	
	2,1	2,1	1969	1978,5	9,5		1997,7	3	
	1,3	0,9	1968	1978,5	10,5		2007,5	5	
						0,6	1997,5	7	
4,8	10,2	10,2	1985,7	2007,8	22,1	8	12,5	1975,5	1260
	4,3	4,3	1982,7	2003,5	20,8		4,7	1973	290
	2,5	2,5	1985,5	2003,5	18			1985	250
	1,6	1,6	1984,3	2000	15,7		2,1	1972	255
						0,9	1975	35	
						4,8	10,2	1996	260
							4,3	1989	133
							2,5	1983	10
							1,6	1987	12

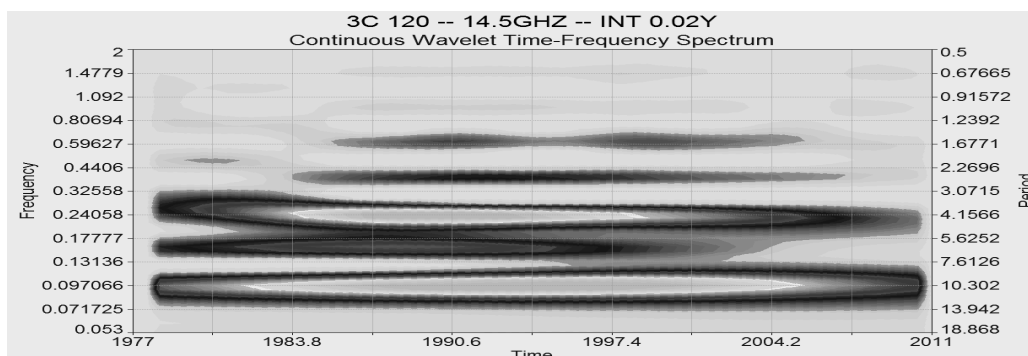


Рис. 1. Wavelet-спектр радиоисточника ЗС120 на частоте 14.5 ГГц.

Таблица 2. Начальные и конечные даты гармонических колебаний (T_{start} , T_{end}), времена их существования (ΔT), начальные и конечные значения периодов (P_{start} , P_{end}), для радиосточника 3C345. В колонках справа приведены значения максимумов спектральных мощностей для выделенных периодов, и времён, в которые эти максимумы наблюдались (Fr – частота исследуемого сигнала, Pr – выделенный период (гармонический компонент), Pw – максимум спектральной мощности, T – время проявления максимума спектральной мощности).

Freq, GHz	P_{start}	P_{end}	T_{start}	T_{end}	ΔT	Fr, GHz	Pr, Yr	T	Pw		
14,5	16	16	1975,5	2005	29,5	14,5	16	1986,3	3050		
	10,3	9,2	1978	2001,5	23,5		10	1981,5	2230		
	5,6	4,3	1979	2000	21		5,5	1985	719		
	3,3	2,6	1981,5	2005	23,5		3,3	1991,5	305		
8	14,5	14,5	1972,3	2002,5	30,2	8	14,5	1987	3716		
	8,2	8,2	1988	2006,5	18,5		8,2	1995	1420		
	6,2	5	1969,5	2007	37,5		6	1986,5	264		
	4	3,2	1972	1995	23		6	2003	234		
4,8	15,5	15,5	1982,3	2005,5	23,2	4,8	4	1998	244		
	8,1	8,1	1984,5	2003,5	19		15,5	1993,5	2678		
	5	5	1987	2002,5	15,5		8,1	1991,5	862		
	3,1	3,1	1996	2007	11		5	2000	270		
36	2	2	1979	2008	29	36	3,1	2001,3	87		
	8,84	1983,1	7,54	2000	17		2	2000	20		
	4,62	1983,3	4,17	1997,7	14,4		1,85	1985	1,85	2002,5	17,5
	2,8	1981,5	2,8	2003	21,5						
22	1,75	1985	1,75	2001,5	16,5						
	8,9	1983,5	7,75	2000	16,5						
	4,6	1985	3,9	1997	12						
	2,2	1982,5	2,2	2002,5	20						
	1,85	1985	1,85	2002,5	17,5						

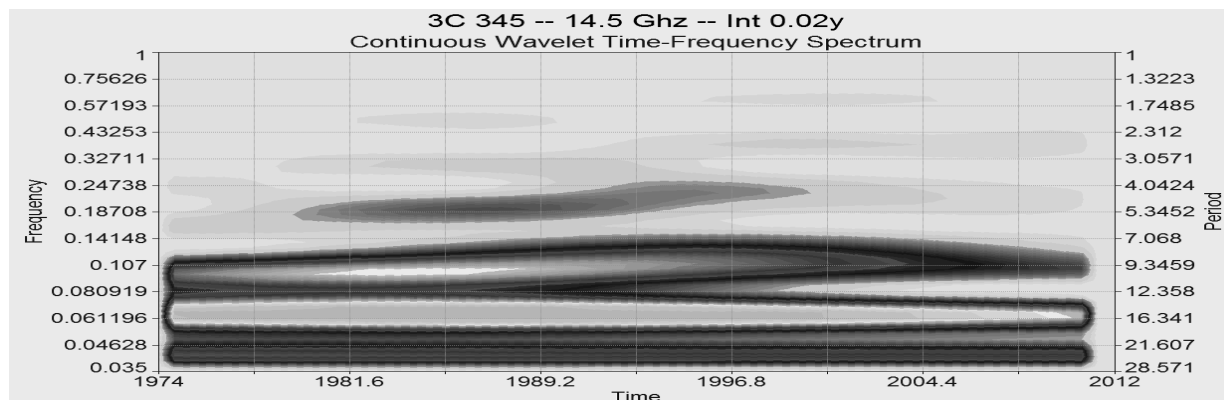


Рис. 2. Wavelet-спектр радиосточника 3C345 на частоте 14.5 ГГц.

Таблица 4. Начальные и конечные даты гармонических колебаний (T_{start} , T_{end}), времена их существования (ΔT), начальные и конечные значения периодов (P_{start} , P_{end}), для радиоисточника BL Lac. В колонках справа приведены значения максимумов спектральных мощностей для выделенных периодов, и времён, в которые эти максимумы наблюдались (F_r – частота исследуемого сигнала, P_r – выделенный период (гармонический компонент), P_w – максимум спектральной мощности, T – время проявления максимума спектральной мощности).

Freq, GHz	P_{start}	P_{end}	T_{start}	T_{end}	ΔT	Fr, GHz	Pr, Yr	T	Pw	
14.5	16,5	16,5	1979	2004,2	25,2	14,5	16,5	1987,4	213	
	6,7	7,5	1975	2001,7	26,7		7,5	1980,5	773	
	4,3	4,3	2000,3	2010,3	10		4,3	1979,3	87	
	2,7	2,5	1975	1991,3	16,3			2005,8	109	
	1,6	1,8	1996,8	2008,1	11,3		2,7	1975,5	50	
	1	1	1998,6	2006,8	8,2			2003,5	67	
8	13,8	15,1	1970,4	2007,5	37,1	8	1,6	1980	34	
	8,4	7,5	1976,5	2002,5	26			2004,5	52	
	3,1	4	1973,5	1985,2	11,7		1	1981	17	
	4,1	4,1	1997,5	2009,5	12			2000	11	
	2,6	2,4	1998,2	2009,2	11		4,8	13,8	1976,5	857
	1,4	1,2	1974,5	1985	10,5			8,4	1985,7	627
4.8	8,2	8,1	1981	2004	23	3,1		1978,5	170	
	5	4,1	1981,3	2008,7	27,4	4,1		1979,4	112	
	3,2	3,2	1983,7	1998	14,3			2003,1	100	
	2,6	2,4	2001,3	2010	8,7	2,6		1970	71	
	2	2	1980,5	1997	16,5		2001,5	30		
						1,4	1974,8	22		
						1982,2	15			
						1999,5	4			
						8,2	1986	632		
						5	2004,3	70		
						3,2	1992,7	21		
							2007,7	15		
						2,6	2002	17		
						2	1980,5	30		
							2004,8	25		

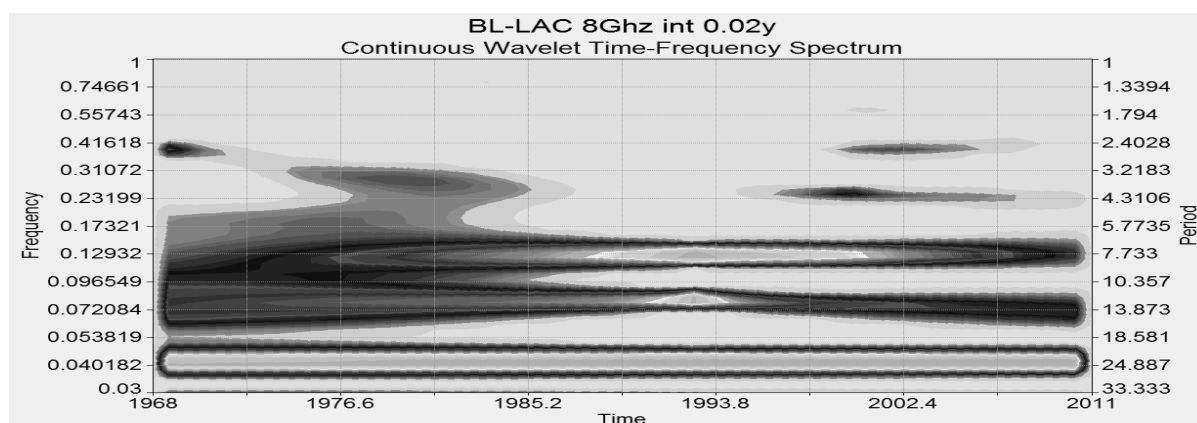


Рис. 4. Wavelet-спектр радиоисточника BL Lac на частоте 8 ГГц.

Таблица 5. Начальные и конечные даты гармонических колебаний (T_{start} , T_{end}), времена их существования (ΔT), начальные и конечные значения периодов (P_{start} , P_{end}), для радиосточника 3C446. В колонках справа приведены значения максимумов спектральных мощностей для выделенных периодов, и времён, в которые эти максимумы наблюдались (F_r – частота исследуемого сигнала, P_r – выделенный период (гармонический компонент), P_w – максимум спектральной мощности, T – время проявления максимума спектральной мощности).

Freq, GHz	P_{start}	P_{end}	T_{start}	T_{end}	ΔT
14,5	8,2	8,7	1988,1	2006	17,9
	5,5	5,1	1982,4	2001,7	19,3
	3,1	3,2	1983	2002,5	19,5
	2,1	2	1982,5	2001,4	18,9
	1,1	1,1	1988,5	1999	10,5
8	8,2	8,7	1984,5	2006,2	21,7
	5,2	5	1983,7	2001,5	17,8
	3,2	3,2	1981,3	2001,7	20,4
	2	2	1983	2001,4	18,4
4,8	8,7	9,2	1986,8	2008,5	21,7
	5,1	5,1	1984,7	1999,3	14,6
	3,1	3,1	1985,4	2002,7	17,3
	2,5	2,5	1986,2	2001,5	15,3

F_r , GHz	P_r , Yr	T	P_w
14,5	8,2	1997	1043
	5,5	1986,3	937
	3,1	1983,5	132
		2007,5	85
	2,1	1982,4	77
1,1	1980,8	10	
	1989,6	4	
	1999,5	5,5	
8	8,2	1996,2	800
	5,2	1986,7	270
	3,2	1982,7	131
		2007,7	55
2	1984,18	18	
	2000	6	
4,8	8,7	1999	378
	5,1	1986,1	107
	3,1	1984,5	20
		2007,3	12
2,5	1982,3	12	

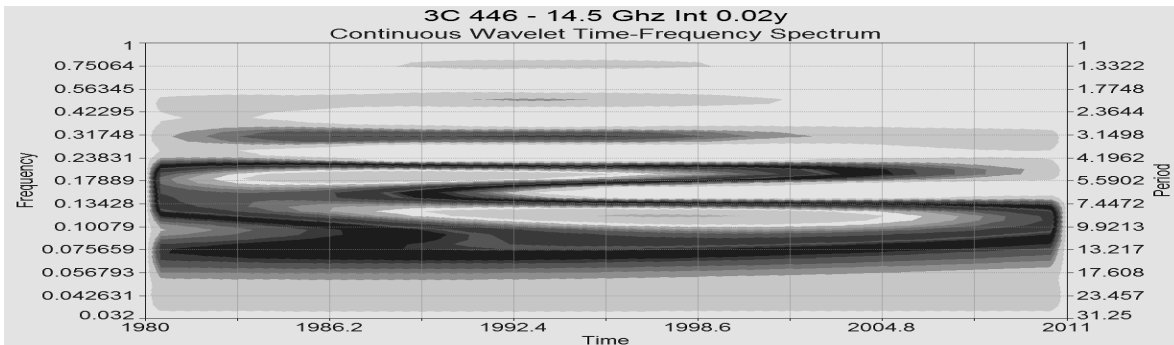


Рис. 5. Wavelet-спектр радиосточника 3C446 на частоте 14.5 ГГц.

В случае устойчивых периодов на длительных временах наблюдений, особый интерес представляют модели переменности на основе магнитного динамо. В активных ядрах галактик, также как и в микроквазарах, аккреционные диски связаны с джетами магнитным полем. Таким образом нестабильности в аккреционном диске могут передаваться в джеты [7, 8].

Предлагается также объяснение периодичности изменений плотности потоков у ряда источников в рамках модели орбитальных и прецессионных периодических изменений в системе из двойных черных дыр [8].

Литература

1. А.П.Маршер, С.Г.Эрштадг, Взгляд на активные ядра галактик из прошлого и настоящего. Труды конференции «Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее», СПбГУ, 2006.

2. И.Г.Моисеев, Н.С.Нестеров. Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1985, Т.73, С.154.
 3. M.F.Aller, H.D.Aller, P.A.Hughes. Bulletin of the American Astronomical Society. 2001, Vol. 33, p.1515.
 4. И.Гайдышев. Анализ и обработка данных (специальный справочник), Издательский дом «Питер» 2001.
 5. Штарк Г.Г. Применение вейвлетов для цифровой обработки сигналов. М.:Техносфера, 2007. 192 с.
 6. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. М.:ДМК Пресс, 2008. 448 с.
 7. Активные ядра и звёздная космогония. Под редакцией Д.Я. Мартынова. Издательство Московского университета, 1987 г.
 8. A massive binary black-hole system in OJ287 and a test of general relativity. M.J. Valtonen et al. Nature 452, 851 – 853, 2008.