

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ  
И ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ**

УДК 523.164.4

**СПЕКТР РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛАКТИКИ В ДИАПАЗОНЕ 200—350 МГц**

*М. Е. Миллер*

Актуальной проблемой в радиоастрономии является исследование спектральных характеристик распределенного космического радиоизлучения в различных областях небесной сферы и в широком диапазоне сантиметровых — метровых длин волн. Основой исследования спектрального состава космического радиоизлучения являются абсолютные измерения яркостных температур. В настоящей работе представлены результаты абсолютных измерений, проведенных в период 1982—85 гг. на радиоастрономической станции НИРФИ «Ст. Пустынь» в диапазоне 200—350 МГц. Особенностью данных наблюдений являлось одинаковое на всех рабочих частотах и достаточно высокое угловое разрешение (6,7°), что достигалось применением метода «черного» диска [1]. Расположение диска относительно антенны обеспечивало прохождение через главный луч диаграммы направленности за счет суточного вращения Земли областей неба на круге склонения  $\delta = -6,5^\circ$ . Все наблюдения были выполнены на радиоастрономическом комплексе в составе 12-метрового радиотелескопа РТВС-12 и 5-метрового «черного» диска, расположенного в зоне Френеля антенны [2]. Использовался перестраиваемый в полосе 150—400 МГц модуляционный радиометр с флукуационным порогом чувствительности 0,3 К при  $\tau = 1$  с. Приемник работал в составе измерительно-вычислительного комплекса на базе микроЭВМ «Электроника ДЗ-28» [2]. Наблюдения на рабочих частотах 212, 245, 290 и 350 МГц состояли из поочередной (длительностью по 1 мин) регистрации уровней радиоизлучения «черного» диска (координаты  $A_d = 40^\circ 35'$ ,  $h_d = 20^\circ 35'$ ) и экранируемого им космического фона. Антенна при этом оставалась неподвижной, а в направлении оси диаграммы появлялся (поднят) и затем исчезал (опущен) только диск. Каждый час повторялась тепловая калибровка по генератору шума на диоде 2Д2С. Управление режимами работы радиометра и предварительная обработка измеряемых радиоконтрастов  $\Delta T_{a,d}$  производились в диалоговом режиме с пульта микроЭВМ на основании пакета программ [3]. Сезон для наблюдений выбирался таким образом, чтобы области низких галактических широт (где яркостные температуры неба в исследуемом диапазоне сравнимы с температурой диска  $T_0$ ) на круге склонения  $\delta = -6,5^\circ$  проходили через диаграмму направленности антенны в ночное время. На каждой из рабочих частот было проведено по несколько сеансов наблюдений.

Расчет яркостных температур, усредненных в пределах телесного угла диска  $T_{\phi,d}$ , производился на основе соотношения [1]

$$\Delta T_{a,d} = [(T_0 + \Delta T_\xi) - T_{\phi,d}] 2(1 - \beta_d)\eta, \quad (1)$$

где

$$\Delta T_\xi = T_0 \left( \frac{\xi - 1}{2} \right) + T_{\phi, \text{дифр}}^{\Omega_{\text{гл. дифр}}} \left( \frac{1 - \beta_{\text{гл. дифр}}}{2} \right) + T_{\phi, \text{дифр}}^{\Omega_{\text{в-}} - \Omega_{\text{гл. дифр}}} \left( \frac{\beta_{\text{гл. дифр}} - \xi}{2} \right), \quad (2)$$

$T_{\phi, \text{дифр}}^{\Omega_{\text{гл. дифр}}}$  и  $T_{\phi, \text{дифр}}^{\Omega_{\text{в-}} - \Omega_{\text{гл. дифр}}}$  — усредненные, соответственно, по главному лепестку и по верхнему полупространству вне главного лепестка дифракционной диаграммы температуры фона;  $\beta_{\text{гл. дифр}}$  и  $\beta_d$  — коэффициенты рассеяния относительно, соответственно, главного лепестка дифракционной диаграммы системы антенна — диск и телесного угла  $\Omega_d$  диаграммы антенны;  $\eta$  — КПД антенны;  $\xi$  — дифракционная поправка, учитывающая вклад радиоизлучения Земли. Величины  $T_{\phi, \text{дифр}}^{\Omega_{\text{гл. дифр}}}$  и  $T_{\phi, \text{дифр}}^{\Omega_{\text{в-}} - \Omega_{\text{гл. дифр}}}$  рассчитывались на ЭВМ БЭСМ-6 с использованием стандартных процедур счета интегралов. При этом использовались обзоры неба на частотах 150 МГц [4] (для  $f = 212$  и 245 МГц) и 408 МГц [5] (для  $f = 290$  и 350 МГц) с пересчетом яркостных температур по частоте для значения спектрального индекса  $\beta = 2,6 \pm 0,1$  [6, 7].

В табл. 1 представлены результаты измерений радиоконтрастов  $\Delta T_{a,d}$  в интервале прямых восхождений  $\alpha = 16.00 - 00.00$ . На рис. 1 построены профили яркостных температур  $T_{\phi,d}$ , рассчитанные на основании измерений на частотах 212, 245, 290

$\alpha$ В, м	$l$	$b$	$f = 350$ МГц			$f = 290$ МГц			$f = 245$ МГц			$f = 212$ МГц		
			$\Delta T_{\text{а.д.}}, \text{К}$	$T_{\text{ф.дифр}}$	$T_{\text{ф.дифр}}$	$\Delta T_{\text{а.д.}}, \text{К}$	$T_{\text{ф.дифр}}$	$T_{\text{ф.дифр}}$	$\Delta T_{\text{а.д.}}, \text{К}$	$T_{\text{ф.дифр}}$	$T_{\text{ф.дифр}}$	$\Delta T_{\text{а.д.}}, \text{К}$	$T_{\text{ф.дифр}}$	$T_{\text{ф.дифр}}$
16.00	4	33	70	47	48	50	102	104	96	134	11	143	180	
17.00	14	21	66	67	54	43	114	122	21	139	5	217	230	
17.12	15	18	61	74	75	30	148	160	16	161	0	257	261	
17.30	18	14	54	95	97				2	217	13	347	338	
17.33	18	13							0	230				
17.42	19	12	47	118	119	17	183	199	10	272	31	422	420	
17.48	20	10	42	135	136	14	211	217	21	301	62	450	520	
17.54	21	9	35	154	155	8	242	240	25	339	77	494	580	
18.00	22	8	33	172	168	0	267	262	29	371	82	581	610	
18.06	22	6	27	193	188	9	304	298	42	401	87	562	637	
18.12	23	5	19	208	207	22	315	326	55	423	96	615	672	
18.18	24	4	13	223	223	35	335	357	62	453	110	615	725	
18.24	24	3	5	244	246	50	352	392	98	473	127	639	784	
18.27	25	2	0	253	258									
18.30	25	1	10	256	278	73	368	438	133	485	182	654	941	
18.36	26	0	25	269	308	96	383	485	159	493	212	662	1030	
18.42	26	7	7	242	265	68	349	421	117	475	166	637	890	
18.45	27	2	0	227	248									
18.48	27	3	5	214	232	50	310	372	99	456	127	615	772	
18.54	28	4	17	196	204	33	285	331	61	435	96	588	677	
19.00	28	6	22	180	188	0	265	264	47	400	78	553	607	
19.02	29	6												
19.03	29	7	30	157	165	0	247	250	31	372	57	517	535	
19.12	30	8	38	134	141	4	212	226	16	341	45	481	484	
19.18	30	9	45	115	120	8	185	202	10	309	41	441	457	
19.24	31	11				15			0	275				
19.30	32	11	54	86	93	24	138	165	6	245	15	372	355	
19.42	33	15	57	70	79	40	111	126	15	186	4	256	288	
19.48	34	16												
20.00	35	19	63	51	60	48	80	98	24	133	0	209	261	
21.00	43	32	71	35	40	62	56	62	35	82	10	119	137	
22.00	53	45	73	30	34	64	48	56	39	63	23	92	122	
23.00	67	57	75	28	30				44	60	24	88	112	
00.00	92	66	76	28	27				46	63	27	92	102	

и 350 МГц. На графиках точками помечены области, где  $\Delta T_{ад} = 0$ . Здесь же построен температурный спектральный индекс  $\beta(212/350)$  — (а), который находился из соотношения

$$\beta = \lg(T_{212}/T_{350}) \lg^{-1}(350/212). \quad (3)$$

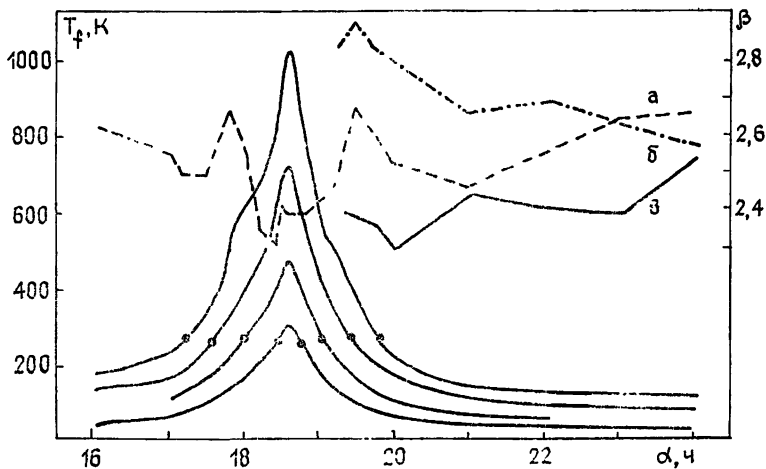


Рис 1 Профили яркостных температур  $T_{фд}$  на частотах (сверху вниз) 212, 245, 290, 350 МГц и температурные спектральные индексы  $\beta(212/350)$  — (а);  $\beta(408/212)$  — (б);  $\beta(350/150)$  — (в).

Погрешность  $\beta$  в данном случае весьма велика ( $\Delta(\beta) \sim 0,4 - 0,8$ ) из-за близости рассматриваемых частот и относительно больших ошибок абсолютных значений  $T_{фд}$  в областях с малой радиояркостью. Однако в самом общем виде профиль  $\beta(212/350)$  иллюстрирует корреляцию некоторого уменьшения спектрального индекса с областью низких галактических широт ( $|b| \leq 10^\circ$ ). Кроме того, на рис. 1 представлены результаты вычислений спектральных индексов  $\beta(408/212)$  — (б) и  $\beta(350/150)$  — (в) для области умеренных и высоких галактических широт. Наблюдаемые здесь угловые вариации значений температурного спектрального индекса не выходят за пределы погрешностей  $\Delta(\beta)$ . Правда, из сопоставления графиков (а), (б) и (в), рассчитанных для различных пар частот, видно, что в диапазоне 150—408 МГц имеются заметные частотные вариации спектрального индекса, которые имеют характер увеличения  $\beta$  с ростом частоты. Что касается полной среднеквадратичной погрешности абсолютных значений  $T_{фд}$ , она различна на разных уровнях радиояркости, так как зависит от ошибок используемых исходных радиообзоров, погрешностей интерполяции яркостных температур на рабочие частоты, величины измеряемых градиентов  $\Delta T_{ад}$  и т. д. В «нулевых» точках (где  $\Delta T_{ад} = 0$ ) погрешность минимальна и составляет  $\delta(T_{фд}) \approx 8\%$  на  $f = 212, 245$  и 350 МГц и  $\delta(T_{фд}) \approx 10\%$  на  $f = 290$  МГц. На уровнях радиояркости  $T_{фд} \sim 150 - 1000$  К  $\delta(T_{фд}) \approx 10 - 15\%$  по всему диапазону рабочих частот (на  $f = 350$  МГц,  $\delta(T_{фд}) \approx 10 - 25\%$ ), в то время как на уровнях  $T_{фд} \sim 50 - 130$  К  $\delta(T_{фд}) \approx 20 - 30\%$ .

Т а б л и ц а 2

Интервал частот, МГц	$n \pm \Delta(n)$	$\beta_{диф} \pm \Delta(\beta)$
350 — 212	$3,833 \pm 0,173$	$2,68 \pm 0,09$
290 — 212	$2,252 \pm 0,078$	$2,59 \pm 0,11$
350 — 245	$2,579 \pm 0,12$	$2,66 \pm 0,13$

Т а б л и ц а 3

Интервал частот, МГц	$n \pm \Delta(n)$	$\beta_{диф} \pm \Delta(\beta)$
350 — 212	$3,415 \pm 0,12$	$2,45 \pm 0,07$
290 — 212	$2,131 \pm 0,053$	$2,41 \pm 0,08$
350 — 245	$2,445 \pm 0,087$	$2,51 \pm 0,1$

Другой известной возможностью анализа спектра радиофона, более эффективной в данном случае, является методика так называемых  $T - T$ -диаграмм [8]. Если имеются измерения яркостных температур какой-либо области небосвода на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , отвечающие одному угловому разрешению, можно построить зависимость  $T_{f_1}(T_{f_2})$ , которую можно аппроксимировать прямой линией с тангенсом угла наклона

$$n = \Delta T_1 / \Delta T_{f_1} \quad (4)$$

$$\beta_{\text{диф}} = \lg n \lg^{-1}(f_2/f_1) \quad (5)$$

Величина

называется дифференциальным спектральным индексом. На рис. 2 приведены  $T-T$ -диаграммы, построенные для исследуемого участка небосвода. В табл. 2 представлены результаты вычислений  $\beta_{\text{диф}}$  для  $T-T$ -диаграмм рис. 2, исключая области заметной поляризации фона [9] и низких галактических широт ( $\alpha \sim 19\ 20-00.00$ ). Как видно из табл. 2, различия в значениях  $\beta_{\text{диф}}$  лежат в пределах погрешностей  $\Delta(\beta)$ , однако они, по всей вероятности, отражают тенденцию некоторого увеличения крутизны спектра с ростом частоты в этом диапазоне. Участок  $T-T$ -диаграмм, относящийся к области низких галактических широт ( $\alpha \sim 18.30-19\ 20$ ), аппроксимируется прямыми с меньшим наклоном по сравнению с областью умеренных широт (см. табл. 3). Таким образом, наблюдаемые на траектории  $\delta = -6,5^\circ$  и  $\alpha = 18.30-00.00$  угловые вариации дифференциального спектра нетеплового космического радионизлучения находятся в пределах  $\Delta\beta \leq 0,2$ , т. е. почти в два раза превышают среднеквадратичные ошибки  $\beta_{\text{диф}}$ . Поскольку в данной области отсутствуют мощные дискретные источники, отмеченные пространственные вариации носят объективный характер и качественно согласуются с результатами работ [10, 11].

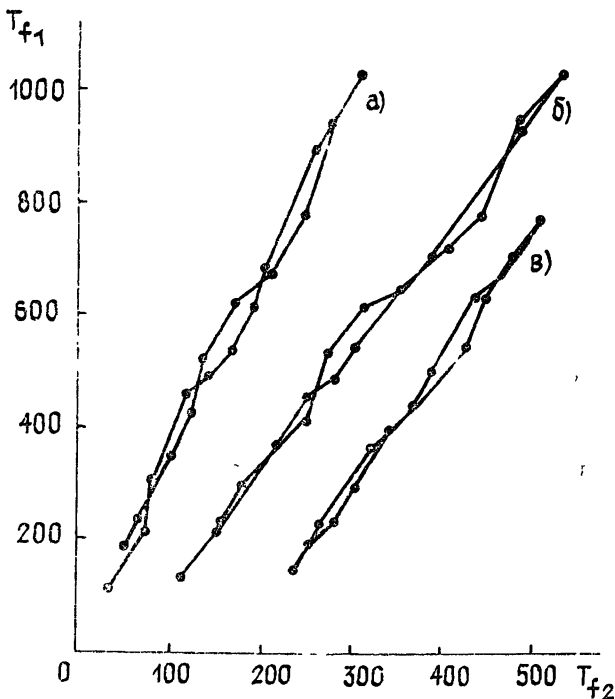


Рис. 2  $T-T$  диаграммы  
 (а)  $T_{f_1} = T_{212}, \text{К}$   $T_{f_2} = T_{350}, \text{К}$ ; (б)  $T_{f_1} = T_{212}, \text{К}$   $T_{f_2} = (T_{290} + 50), \text{К}$ ; (в)  $T_{f_1} = (T_{245} + 50), \text{К}$   $T_{f_2} = (T_{350} + 200), \text{К}$

Автор приносит глубокую благодарность В. Н. Бубукиной за помощь в расчетах на ЭВМ и Н. М. Цейтлин за внимание к работе и полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Миллер М. Е., Цейтлин Н. М. Тезисы XVII Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре и методам. — Ереван, 1985, с. 353.
2. Цейтлин Н. М., Мосалов И. В., Бахарев Н. В., Беккерман Б. М., Дугин Н. А., Миллер Е. А., Миллер М. Е., Пелюшенко С. А., Романычев А. А. Препринт НИРФИ № 176. — Горький, 1984.
3. Миллер М. Е. Препринт НИРФИ № 161 — Горький, 1983.
4. Landecker T. L., Wielebinski R. — Austr. J. Phys. Astrophys. Suppl., 1970, № 16, p. 1.
5. Haslam C. G. T., Salter C. J., Stoffel H., Wilson W. E. — Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1982, 47, p. 1.
6. Large M. I., Mathewson D. S., Haslam C. G. T. — Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 1961, 123, p. 123.
7. Webber W. R. — Austr. J. Phys., 1968, 21, p. 845.
8. Turtle A. J., Pugh J. F., Kenderdine S., Pauliny-Toth I. K. — Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1962, 124, p. 297.

- 9 Brown W. N., Spoelstra T. A. Th. — Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1976, 26, p. 129.
10. Sironi G. — Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1974, 166, p. 345.
11. Беляев П. П., Тарасов А. Ф., Токарев Ю. В., Юрищев М. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1983, 26, с. 1047.

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступила в редакцию  
18 марта 1986 г.

УДК 551 510 535

## О ДИСЛОКАЦИЯХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ОТРАЖЕННОГО ОТ ИОНОСФЕРЫ РАДИОСИГНАЛА

Т. А. Гайлит, В. Д. Гусев, М. И. Иванов

При исследовании флуктуаций фазы сигнала, отраженного от ионосферы, зарегистрированы резкие скачкообразные изменения (на  $2\pi$  и более) разности фаз в пространственно разнесенных точках, сопровождающиеся прохождением амплитуды через нуль

Для физического истолкования и математического описания этого явления может быть использовано понятие дислокаций поверхности волнового фронта, введенное для пространственно неоднородного поля лазерного излучения в [1, 2], где рассмотрены условия их появления, оценено их количество и выполнена визуализация явления в оптическом диапазоне. Согласно [1], в поперечном сечении пучка при достаточном развитии неоднородности поля неизбежно возникают точки, в которых интенсивность поля равна нулю. При распространении вдоль  $z$  эти дискретные точки (носители нулей интенсивности), согласно решению параболического уравнения, описывают криволинейные траектории и могут возникать и аннигилировать парами. При обходе вокруг носителя нуля по замкнутому контуру фаза поля получает дополнительный набег  $2\pi$ . Поскольку в полном поле имеется быстрый фазовый множитель  $\exp(ikz)$ , то можно сказать, что линии нуля содержат винтовую дислокацию поверхности волнового фронта. Дислокации были зарегистрированы экспериментально при наблюдении интерференции пространственно-неоднородного лазерного пучка с вспомогательной опорной волной [2]. В наблюдаемой интерференционной картине дислокации соответствуют ветвлению (рождению или уничтожению) интерференционной полосы.

Можно ожидать появления аналогичного явления в неоднородном поле радиоволны, отраженной от ионосферы. При отсутствии специальных направленных антенн отраженную радиоволну можно считать на конечных участках волнового фронта квазиплоской, т. е. удовлетворяющей условию  $k_x, k_y \ll k_z$ , где  $z$  — направление прихода волны,  $k_x, k_y \sim 1/l$  ( $l$  — пространственный размер неоднородностей поля,  $l \gg 1$ ). Это условие аналогично приближению параксиального волнового пучка в оптическом диапазоне, применяемому в [1].

Для визуализации и однозначной интерпретации явления в КВ диапазоне радиоволны используется специальный многопериодный фазометр, обеспечивающий непрерывную фоторегистрацию разности фаз в интервале  $(0 - 2\pi n)$ . Принцип работы фазометра состоит в следующем. Из одного принятого сигнала с помощью специального устройства формируется пилообразное напряжение развертки осциллографа с частотой, в  $n$  раз меньшей, чем промежуточная частота приемника. Из второго принятого сигнала формируются короткие импульсы, соответствующие нулям синусоиды промежуточной частоты с положительной производной. Они подаются на « $z$ »-вход осциллографа, подсвечивая пилообразное напряжение в соответствующие моменты времени. На экране наблюдаются  $n$  ярких точек, которые при изменении разности фаз между принятыми сигналами передвигаются по развертке. Для непрерывной фотозаписи применяется протяжка пленки в поперечном направлении. В обоих приемных каналах фазометра специальное внимание уделено устранению фазоамплитудной зависимости, обычно имеющей место в типовых приемниках и схемах.

При помощи многопериодного фазометра измеряется разность фаз отраженной от ионосферы волны в двух пространственно разнесенных точках (на антенной базе  $d$ ). Одновременно регистрируется амплитуда на одной из антенн. Из-за дрейфа неоднородностей ионосферы дифракционная картина отраженного поля, содержащая дислокации волнового фронта, движется по поверхности Земли. При прохождении дислокации через антенную базу разность фаз сигнала на антеннах получает дополнительный набег  $2\pi$  (или  $2\pi n$ , если корень  $m$ -кратный). В экспериментальной записи это проявляется как характерный резкий скачок разности фаз на  $2\pi$  (или  $2\pi m$ ), сопровождающийся прохождением амплитуды через нуль. На рис. 1 и 2 приведены образцы экспериментальной записи разности фаз и амплитуды. Здесь антенная база имеет длину около 80 м и ориентирована под углом  $45^\circ$  к направлению Север—Юг. В качестве приемных антенн используются полуволновые вибраторы. Из рис. 1 видно, что в неоднородном поле отраженного от ионосферы радиосигнала присутствуют