

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЕТА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ТИПА РАТАН-600 С УЧЕТОМ АБЕРРАЦИЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Г. Б. Гельфрейх

Описывается алгоритм расчета диаграммы направленности антенны переменного профиля, при котором главный отражатель антенны рассматривается как многоэлементный интерферометр. Алгоритм позволяет легко рассчитывать aberrации главного зеркала, возникающие при продольных и поперечных выносах облучателя из главного фокуса, а также поляризационные характеристики диаграммы. При расчетах используются формулы, выведенные автором для задач радиоастрономической юстировки антенны [1]. Реализация алгоритма на ЭВМ показала достаточно высокую скорость счета и удобство в пользовании для применения алгоритма в системе математического обеспечения радиотелескопа. Обсуждаются возможные направления использования описанного алгоритма, при составлении которого особое внимание уделено вопросам удобства его практического применения при наблюдениях на РАТАН-600.

A calculating algorithm of the variable profile antenna pattern is described, where the main mirror is considered as a multyelement interferometer. The algorithm allows to calculate easily aberrations of the main mirror which arise at longitudinal and transverse displacements of the feed from the primary focus, as well as polarization characteristics of the pattern. In the calculations there have been used the formulas deduced by the author for radio-astronomical adjustment of the antenna [1]. Realization of the algorithm with a computer has shown a sufficiently high calculating rate and convenience for utilization of the algorithm in the software system of the radio telescope. Possible employments of the algorithm described are discussed. In working out of the algorithm special attention has been paid to convenience of its application to observations with RATAN-600.

Введение

Интерпретация радиоастрономических наблюдений, в том числе построение радиоизображений космических источников методом апертурного синтеза, требует хорошего знания диаграммы направленности антенной системы. При расчете диаграммы таких сложных систем, как антенны переменного профиля (АПП), встречаются дополнительные трудности, обусловленные сложной формой раскрыва антенны и существенным изменением структуры диаграммы с углом места наблюдений. В ряде работ исследовались диаграммы АПП Большого пулковского радиотелескопа и РАТАН-600 [2—5]. При этом использовались как расчетные методы, так и прямые измерения, а также метод оптического моделирования.

В данной статье описывается один возможный алгоритм для расчета диаграммы антенны типа АПП и опыт его реализации на ЭВМ посредством языка ФОРТРАН. При разработке алгоритма ставилась цель удовлетворить по возможности полно запросам наблюдателей, работающих на радиотелескопе РАТАН-600. Выдвигались следующие требования.

Входными параметрами программы должны быть обычно используемые наблюдателем длина волны (в мм), высота источника (в град.) и т. п.

Расчитанная диаграмма должна совпадать с экспериментально измеренной с точностью, достаточной для использования при обработке радио-

астрономических наблюдений (во всех точках не более нескольких процентов от максимального значения).

Программа должна обеспечить расчет диаграммы при произвольных поперечном и продольном выносе облучателя из фокальной точки антенны (расчет aberrаций главного зеркала), а также расчет паразитных диаграммных эффектов, по крайней мере, по круговой поляризации.

Простые модификации программы должны осуществлять приближенный, но быстрый счет формы диаграммы, необходимый для предварительных оценок (при составлении программы наблюдений, выборе режима работы радиотелескопа и т. п.).

Результаты счета должны выводиться в системе координат, которой пользуется наблюдатель (например, высота и азимут на небесной сфере или склонение и часовой угол). Интервалы и число точек счета должны легко варьироваться. При этом желательно, чтобы счет каждой отдельной точки производился независимо.

1. Метод расчета диаграммы

Метод состоял в том, что мы рассматривали главное зеркало антенны как многоэлементный интерферометр, элементами которого являются щиты, составляющие отражающую поверхность.¹ Для расчета диаграммы направленности производилось суммирование полей сигналов, отраженных от отдельных щитов с учетом их фазы, набегающей от фокальной точки до некоторой плоскости, проходящей через центр антенны. Плоскость эта бралась перпендикулярной направлению на рассматриваемую точку небесной сферы, для которой производится счет диаграммы. Эта часть расчета велась в приближении лучевой оптики. Диаграмма антенны по полю

$$E(x, y) = \sum_{(k)} A_k e^{i \frac{2\pi}{\lambda} D_k(x, y)}. \quad (1)$$

Здесь k — номер щита, A_k — амплитуда облучения по полю, λ — длина волны, $D_k(x, y)$ — расстояние от фокальной точки (фазового центра рупорка облучателя) до упомянутой плоскости, x и y — координаты точки на небесной сфере.

Диаграмма антенны по интенсивности имеет вид

$$I(x, y) = EE^*/S. \quad (2)$$

Нормировка диаграммы к единице в максимуме осуществляется с помощью множителя

$$S = \sum_{(k)} A_k \sum_{(k)} A_k^*. \quad (3)$$

Обычно A_k — вещественные, что соответствует случаю, когда облучатель дает на излучение цилиндрическую волну.

Для расчета поляризационных паразитных эффектов используется (см. [7]) более общая форма записи представления диаграммы, дающая тензор поляризации

$$I_{\xi\eta}(x, y) = \left(\sum_{(k)} A_k^k e^{i \frac{2\pi}{\lambda} D_k(x, y)} \right) \left(\sum_{(l)} A_l^{l*} e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} D_l(x, y)} \right) / S, \quad (4)$$

где ξ и η — прямоугольные координаты в упомянутой выше плоскости, k и l — номера щитов. Вид множителей типа A_k^k учитывает распределение поля в раскрыве антенны и определяет паразитные поляризационные эффекты; их расчет описан в следующем разделе.

¹ Представление диаграммы АПП как многоэлементного интерферометра использовалось также Л. В. Князевой [6].

Расчет D_k может быть выполнен с помощью формулы, выведенной автором [1] для задач радиоастрономической юстировки антенны, которую мы используем в виде

$$D_k(a_M, h) = R_k \cos h \cos(a_M - \varphi_k) + \sqrt{R_k^2 + F^2 - 2R_k F \cos(\varphi_k - a_F)}, \quad (5)$$

R_k — расстояние от центра антенны до центра щита, h — высота источника над горизонтом (здесь она нами интерпретируется как угол места направления на точку картинной плоскости), a_M — азимут источника (направления картинной плоскости), F — расстояние фокальной точки в горизонтальной плоскости антенны до центра антенны, φ_k — азимут центра щита из центра антенны, a_F — азимут фокальной точки. Полезно иметь в виду, что первое слагаемое в формуле (5) представляет расстояние от плоскости, проходящей через центр антенны, до щита, а второе — от щита до фокальной точки.

Расчет диаграммы описанным способом может производиться для антенны, установленной обычным или каким-либо специальным (например, зонированным) образом. Для рядовых наблюдений на заданных высоте и азимуте величины F и a_F вместе со всеми R_k рассчитываются обычным образом по аргументам, которые используются для расчета таблиц установки антенны [2]. Следует помнить, что положения фокальной точки, определяемые величинами F и a_F , в формуле (5) несколько отличаются от положения фокальной точки, рассчитанного по алгоритму установки антенны. Эти смещения (продольное ΔF и поперечное ΔT относительно оси симметрии антенны) задаются как входные параметры при расчете диаграммы и определяют абберрации, причем

$$a_F = \arctg(\Delta T / (F_1 + \Delta F)), \quad F = \sqrt{\Delta T^2 + (F_1 + \Delta F)^2}, \quad (6)$$

где F_1 — расчетное расстояние от центра до фокуса антенны (найденное по алгоритму расчета установки антенны).

Если a_0 и h_0 — азимутальные координаты точки наведения антенны, то локальная прямоугольная система координат на небе (x, y) соответствует координатам

$$a_M = a_0 + x / \cos h, \quad h = h_0 + y. \quad (7)$$

В ряде случаев более полезны другие системы небесных координат, например экваториальная. Переход от одной системы к другой совершается по обычным формулам сферической астрономии (см., например, [8]).

Результаты счета могут выводиться, например, в виде матрицы чисел, нормированных к максимуму безабберационной диаграммы. При этом в программе необходимо предусмотреть смещения координат центра матрицы на максимум рассчитываемой диаграммы с учетом выноса фокальной точки (облучателя). Программа также легко реализуется в виде подпрограммы для счета значения диаграммы в отдельной заданной точке.

Для сокращения времени счета в случае, когда достаточно получить более грубую картину центральных лепестков диаграммы, антенна представляется некоторой выборкой щитов, расположенных равномерно вдоль ее поверхности.

Приближенный учет влияния высоты щита можно выполнить, введя огибающую диаграмму, определяемую высотой облучаемой части щитов, например, считая, что

$$A_k = A_k(h - h_0).$$

2. Расчет [распределения поля] в раскрыве антенны

Простейшим и наиболее надежным путем нахождения распределения поля в раскрыве является измерение сигналов при радиоастрономической юстировке [1]. Однако в этом случае необходим пересчет амплитуд облучения при смещении облучателя в новое положение (т. е. при изменении высоты наблюдений).

Для определения поляризационных характеристик необходимо также расчет разложения поля на взаимно ортогональные компоненты. При расчете распределения поля, кроме формы диаграммы облучателя в горизонтальной плоскости $f(\psi)$, необходимо учитывать следующие влияния на A_{ξ}^k .

1. Изменения расстояний от фокальной точки до щитов ρ_k при перемещении облучателя с изменением h_0 .

2. Величину площади проекции облучаемой части щита на картинную плоскость σ_k .

3. Изменение соотношений A_{ξ}^k и A_{η}^k — проекций поля на оси ξ и η системы координат в картинной плоскости.

Таким образом,

$$A_{\xi}^k = f(\psi_k) \sigma_k \sin \gamma_k / \sqrt{\rho_k}, \quad A_{\eta}^k = f(\psi_k) \sigma_k \cos \gamma_k / \sqrt{\rho_k}. \quad (8)$$

Величина $f(\psi)$ может быть найдена экспериментально, величина ρ_k представляет второе слагаемое в формуле (5)

$$\rho_k = \sqrt{R_k^2 + F^2 - 2R_k F \cos(\varphi_k - \alpha_F)}. \quad (9)$$

Если считать, что тип поляризации облучателя не зависит от угла ψ_k , то разворот плоскости поляризации при отражении от щитов совершается на угол γ_k , для определения которого нетрудно вывести формулу

$$\gamma_k = \arctg(\operatorname{tg}(\psi_k - \alpha_N^k) \sin h). \quad (10)$$

Наконец, площадь облучаемой части проекции щита на картинную плоскость для случая, когда сохраняется постоянная высота облучаемой части (равная высоте вторичного зеркала), получается умножением исходной площади (или ширины) щита на косинус угла (см. [1, 2]).

$$a_N^k = \arctg(\cos h \sin \psi_k / (1 + \cos h \cos \psi_k)). \quad (11)$$

Кроме того, если поперечное сканирование осуществляется за счет перемещения каретки с входными рупорками приемников [2, 9], необходимо учитывать перемещение краевых обрывов функции $f(\psi)$. Эти обрывы $f(\psi)$ для $\psi < \psi_1$ и $\psi > \psi_2$ появляются при весьма малых значениях $f(\psi)$, для больших $|\psi|$, при которых имеет место (обычно пренебрежимо малое) переоблучение поверхности вторичного зеркала.

3. Реализация алгоритма

Рассмотренный алгоритм был нами практически реализован для антенны ПАТАН-600 в виде программы на соответствующих версиях языка ФОРТРАН в трех вариантах: для ЭВМ М-222, ЕС-1020 и «Электроника 100 И». В этих программах входными параметрами были высота установки антенны (в град.), поперечный и продольный выносы облучателя из фокуса (в мм), распределение поля в раскрыве антенны (в произв. ед.) как функция номера щита для данной высоты источника (пересчет распределения поля в раскрыве и учет поляризационных эффектов не производился). Расчетом счета была матрица значений диаграммы, параметры которой (интервалы точек счета по обеим осям и число точек) также задавались как входные параметры.

Время счета для ЭВМ М-222 при этом составляло около 1 сек. на точку (для других ЭВМ соответственно — больше). Поскольку при счете нас интересуют прежде всего части диаграммы направленности антенны вблизи главного лепестка, который смещается на небесной сфере при движении облучателя, то надо было предусмотреть смещение начала координат (центра) выводимой на печать матрицы диаграммы. Это смещение предварительно рассчитывалось по приближенным формулам, следующим из геометрии антенны,

$$\Delta x = \Delta T / (R - F), \quad \Delta y = (1 - \cos \psi_1) \Delta F / ((1 - \cos \varphi_1) R \sin h_0), \quad (12)$$

где ΔT — поперечное, ΔF — продольное смещения облучателя, R — радиус антенны, индекс 1 относится к «крайнему» щиту. В программе, однако, реализовалось смещение на ближайшее меньшее целое число шагов координатной сетки, а величина смещения выводилась на печать.

Нормировка диаграммы велась относительно амплитуды, получаемой при синфазном сложении сигналов от всех щитов. Для возможного ускорения счета с потерей точности была предусмотрена возможность представления антенны в виде интерферометра из меньшего числа щитов. Эксперимент показал, что для средних высот сокращение числа щитов в десять раз (с десятикратным уменьшением времени счета) приводит лишь к незначительной (менее 1%) потере точности счета для главного лепестка диаграммы и центрального поля боковых лепестков.

Заметим, что счет диаграммы начинается с расчета установки щитов антенны по радиусу. При этом из дальнейших расчетов отбрасываются щиты, кинематика которых не позволяет их использовать при наблюдениях на заданной высоте.

Примеры счета безабберационной диаграммы и трех случаев диаграммы, искаженной абберациями, приведены на рис. 1—4. Естественно, что данная программа легко может быть реализована как подпрограмма системы обработки наблюдений или других программных систем.

Заключение

Проведенный эксперимент с увеличением дискретизации счета показал, что основное наше допущение о дискретности представления поверхности антенны не сказывается существенно на точности счета по крайней мере для центральной части поля диаграммы направленности антенны. В то же время скорость счета уже на ЭВМ средней мощности оказывается достаточно высокой для того, чтобы включить программу как часть математического обеспечения ряда задач. В связи с этим укажем на некоторые перспективные, с нашей точки зрения, пути использования алгоритма.

1. Расчет ожидаемой формы записи спокойного Солнца для выделения локальных источников.

2. Расчет ширин и восстановление распределения яркости источников, прошедших на известном (вообще говоря, не центральном) уровне диаграммы антенны.

3. «Чистка» двумерных изображений источников.

4. Оценочные расчеты формы диаграммы, необходимые при составлении программы наблюдений.

5. Устранение поляризационных паразитных эффектов диаграммы антенны расчетным путем.

6. Расчет влияния ошибок установки антенны на форму и качество диаграммы.

7. Учет влияния «дырок» в антенне при неполной поверхности (когда не выставлена часть щитов).

8. Расчет смещений главного лепестка при боковом и продольном выносах фокуса, оценка допустимых выносов (абберационных потерь).

Расчет диаграмм нестандартных установок антенны и методов наблюдений (например, с зонированием поверхности).

Автор благодарит А. Н. Коряжину за полезные замечания по данной работе и И. П. Звереву за помощь в вычислениях на ЭВМ и оформлении работы.

Литература

1. Гельфрейх Г. Б. Радиоастрономический способ юстировки антенн переменного профиля. — Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 1972, № 188, с. 139—148.
2. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А., Шиврис О. Н. Большой пулковский радиотелескоп. — Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 1960, № 164, с. 3—26.

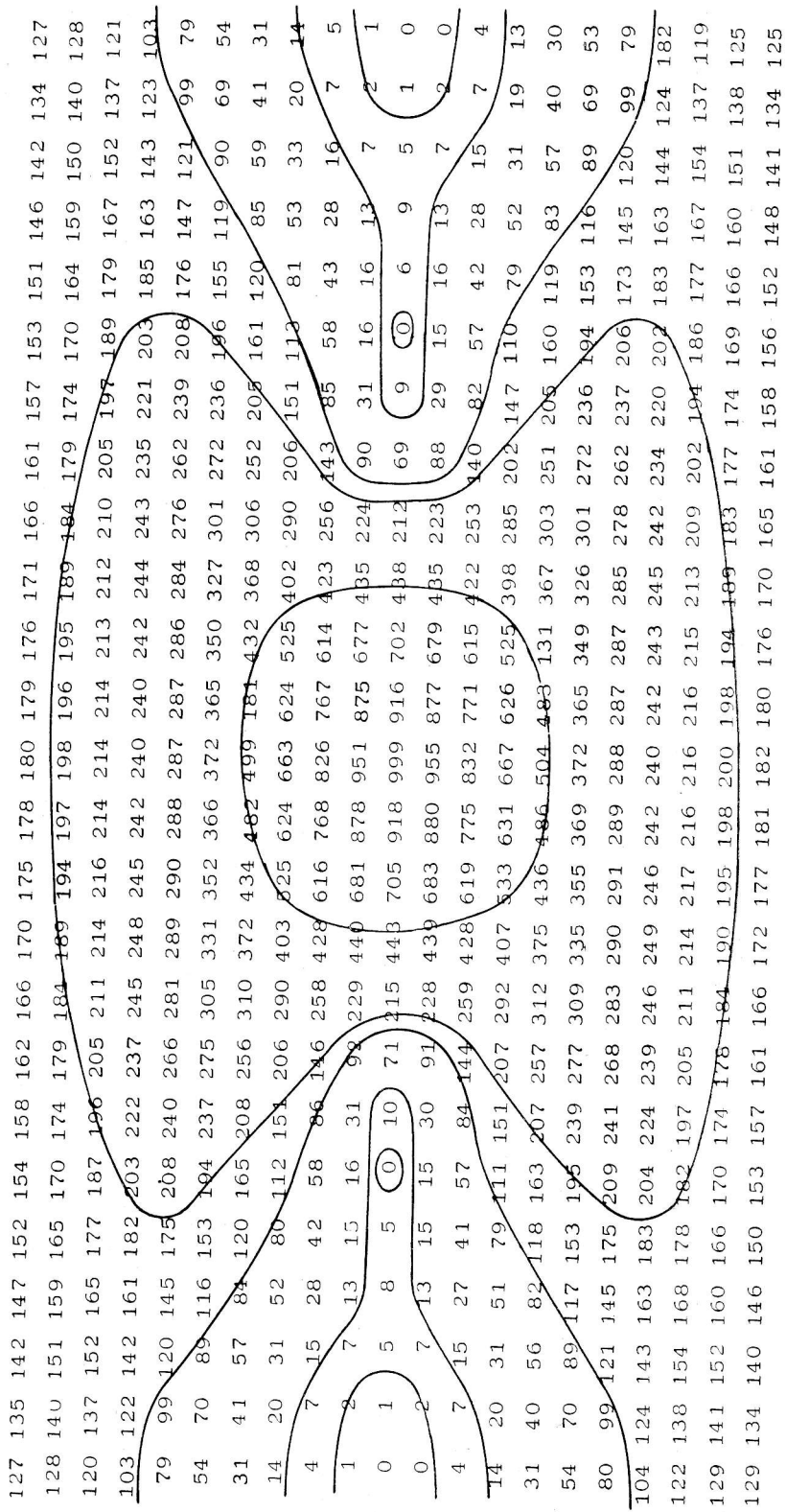


Рис. 4. Рассчитанная диаграмма направленности РАГАН-600 для спадающего к краям до нуля распределения поля в раскрыве антенны. Цифры представляют значения, нормированные к максимуму безабберационной диаграммы (в долях процента). Угол места $\theta=53^\circ 3'$, длина волны $\lambda=40$ мм, расстояние между точками по горизонтали — $5''$, по вертикали — $30''$. Вынос фокуса отсутствует. Проведены изолинии по мощности.

100	106	111	115	120	125	132	141	151	159	164	168	171	173	177	183	190	198	205	208	207	202	190	173	153
104	109	113	117	123	131	142	153	162	170	175	179	185	191	204	217	229	238	241	237	227	209	187	162	136
105	109	115	121	131	142	155	165	172	177	182	191	206	225	246	264	279	283	274	257	232	202	169	136	107
100	106	114	126	141	156	167	174	177	183	195	218	250	283	311	330	333	319	291	256	214	173	135	101	74
89	98	112	132	152	166	173	176	181	198	229	271	319	362	388	391	374	334	283	228	176	132	94	64	43
73	86	106	131	152	163	166	172	192	233	293	360	417	457	466	437	387	321	250	184	128	85	55	33	20
53	70	97	123	139	142	145	163	216	300	400	484	537	545	512	447	365	277	196	128	77	45	24	13	7
35	55	84	106	110	103	106	151	250	381	532	632	663	624	533	423	311	215	135	77	40	18	7	2	1
21	43	70	83	74	55	66	140	293	491	674	778	777	681	532	373	240	142	78	38	16	5	1	0	0
13	36	60	65	43	17	32	132	326	568	780	886	857	715	517	328	181	89	39	16	5	1	0	0	0
10	34	57	58	32	2	19	129	338	598	821	926	887	726	512	308	158	69	26	9	3	1	1	1	0
13	36	61	65	44	17	31	132	326	570	781	889	858	713	515	326	181	89	40	16	6	2	0	0	0
21	43	70	84	74	56	64	139	291	490	677	782	780	681	530	372	239	142	78	39	16	5	1	0	0
35	56	83	106	111	103	107	151	252	392	535	636	664	623	533	422	310	213	134	76	38	17	7	3	1
54	70	96	122	139	143	144	163	215	298	399	484	537	546	513	450	368	277	195	127	77	45	25	13	6
74	86	107	131	153	164	166	172	191	233	292	358	417	454	462	440	388	322	248	182	127	86	56	34	20
91	100	113	131	150	165	173	174	180	196	227	270	319	363	391	394	373	332	282	228	178	134	96	66	42
102	109	115	126	140	154	165	171	178	184	197	220	251	285	313	330	330	316	290	256	217	177	138	102	73
106	111	115	120	128	140	153	164	173	178	185	195	209	228	247	263	275	279	273	257	235	204	170	137	107
104	109	113	116	121	130	141	153	164	172	177	181	185	192	202	214	225	236	241	239	229	211	187	161	136
99	106	110	115	118	125	132	142	151	159	165	168	170	172	175	181	189	198	206	209	209	202	190	173	154

Рис. 2.

То же, что на рис. 1, но для случая поперечного выноса фокуса на $\Delta T = +100$ мм. Картина смещена по горизонтали на $5'' \times 23 = 115''$.

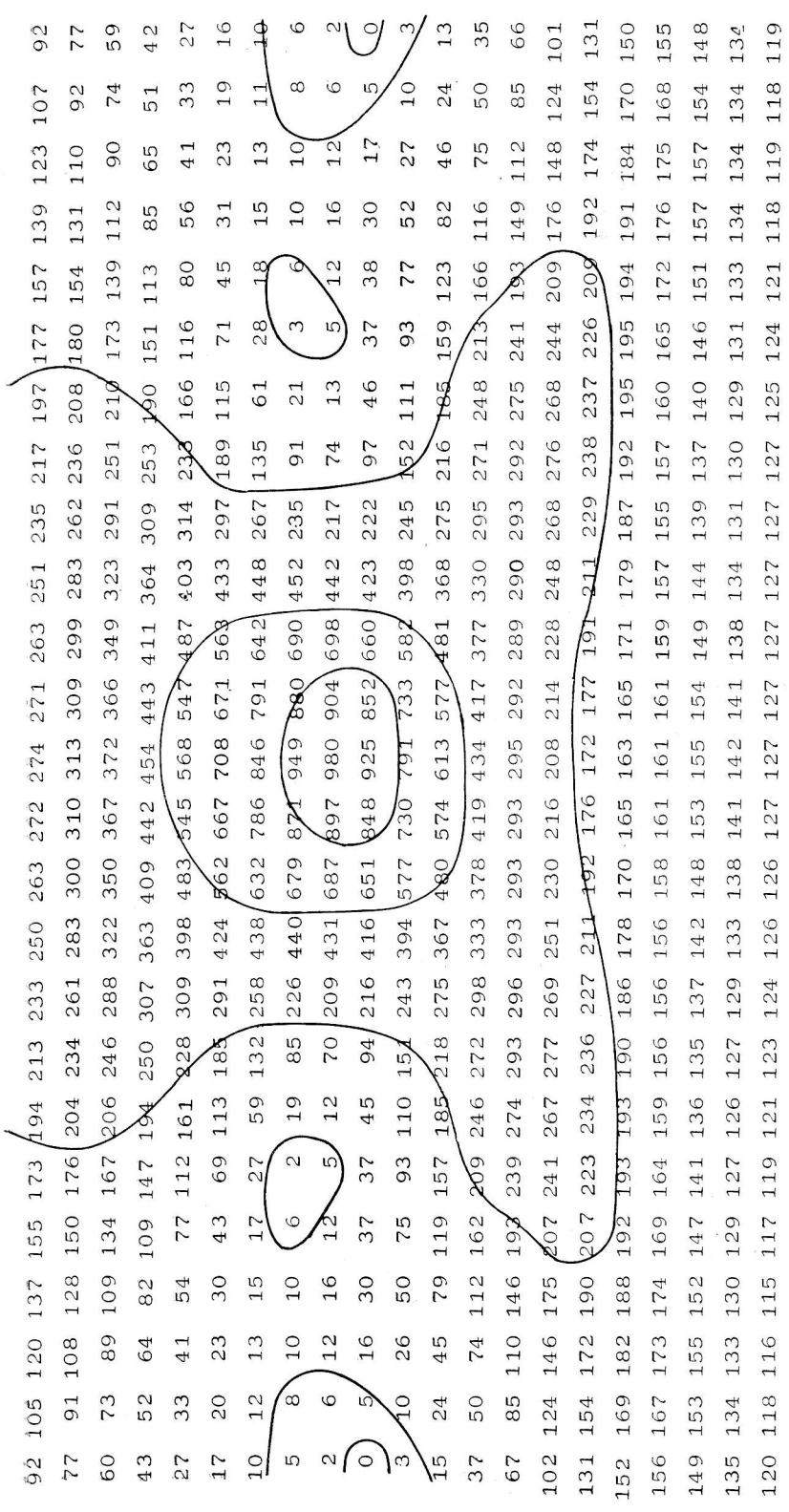


Рис. 3.

То же, что на рис. 1, но для случая продольного выноса фокуса на $\Delta F = +200$ мм. Картина смещена по вертикали на $30'' \times (-12) = -360''$.

84	91	98	107	118	132	150	168	188	208	228	249	269	287	300	305	301	288	264	234	200	166	135	106	82
79	85	93	104	117	135	154	174	197	233	252	285	318	345	360	361	344	313	272	225	178	137	103	77	55
71	77	86	98	113	131	151	174	205	246	293	347	395	426	434	415	374	318	255	193	140	98	67	45	31
59	67	76	90	104	120	139	169	215	280	357	432	490	516	503	456	382	298	215	147	93	58	35	22	14
47	56	67	79	87	96	116	158	233	338	452	549	605	606	554	464	856	249	150	93	49	25	13	7	6
36	47	58	66	64	62	82	146	262	416	571	680	718	677	574	440	302	185	100	47	18	5	2	2	2
26	40	53	54	40	28	49	134	295	498	686	802	812	722	565	391	238	124	54	17	2	0	1	2	2
19	37	54	52	28	4	24	128	320	562	775	889	869	735	538	340	183	81	29	7	2	3	3	2	2
14	39	62	63	36	5	21	127	331	585	803	910	874	719	509	309	161	73	31	16	11	9	6	3	1
15	45	77	87	66	36	42	131	316	551	756	857	823	681	490	312	182	103	62	39	25	14	7	2	0
21	54	95	120	114	88	82	142	282	469	649	736	726	627	485	347	240	164	111	73	42	21	9	3	1
37	69	115	151	161	145	130	154	235	362	492	579	597	556	478	391	311	239	173	115	69	37	19	9	4
60	86	129	172	194	189	169	165	195	260	343	415	461	473	456	420	368	304	238	165	109	67	41	24	14
86	104	136	175	202	207	191	172	166	186	230	285	339	384	411	413	390	242	280	214	157	111	77	52	31
111	120	130	165	188	198	190	171	156	150	164	199	247	298	343	369	369	345	304	255	207	163	123	88	59
125	128	134	147	161	172	174	166	152	143	143	157	186	226	268	301	318	318	305	278	246	207	168	128	92
130	129	127	129	136	144	152	154	153	148	144	144	155	174	202	228	251	269	277	274	260	235	202	166	131
123	123	120	117	119	124	134	142	150	152	149	145	142	145	156	172	194	215	236	346	247	237	217	191	163
112	113	112	111	111	113	120	129	138	144	146	143	138	134	135	141	155	173	191	207	217	219	213	200	182
101	105	107	103	109	110	115	119	125	131	135	137	134	131	129	129	134	142	154	167	178	186	191	191	184
94	97	102	105	107	108	109	110	113	116	121	125	128	129	128	127	127	128	131	137	145	155	163	168	169

Рис. 4.

То же, что на рис. 1, но для случая смещения фокуса по обеим координатам: $\Delta T=100$ мм, $\Delta F=200$ мм. Картина смещена по обеим координатам соответственно на $115''$ и $-360''$.

3. Стоцкий А. А. Аберрации главного зеркала антенны переменного профиля и сканирование диаграммы направленности путем смещения облучателя. — Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 1972, № 188, с. 63—76.
4. Гельфрейх Г. Б., Коржавин А. Н. Оптическое моделирование антенн СВЧ с отражателем переменного профиля. — Радиотехника и электроника, 1968, 13, с. 1176—1189.
5. Кузнецова Г. В., Соболева Н. С. О поляризационных измерениях на антеннах с отражателем переменного профиля. — Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 1964, № 172, с. 122—127.
6. Князева Л. В. Сканирование лучом в антенне переменного профиля путем смещения первичного источника и облучающей системы. — В кн.: Антенны, вып. 19. М., 1974, с. 33—45.
7. Есепкина Н. А. Поляризационные характеристики антенн радиотелескопов. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1972, 4, с. 157—169.
8. Загребин Д. В. Введение в астрометрию. М., «Наука», 1966, 478 с.
9. Амстиславский А. З., Копылов А. И., Просмушкин М. И. Конструкция отражающих элементов и облучателя радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. Главн. астрон. obs. в Пулкове, 1972, № 188, с. 89—96.

Декабрь 1975 г.
