

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ГЛАВНОМ ЗЕРКАЛЕ
АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ
ПО ДАННЫМ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ
ОТРАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Г. Б. Гельфрейх, В. М. Спитковский

В статье рассматривается применение метода радиоастрономической юстировки антенн переменного профиля (АПП) к задаче определения характера облучения главного зеркала. Проведена экспериментальная проверка метода на волнах 6.6 и 3.04 см. Показаны преимущества использования радиоастрономического метода перед радиотехническими способами определения распределения облучения на отражателе.

An application of the radioastronomical method for adjustment of the variable profile antennas (VPA) to the problem of determining the pattern of the primary mirror illumination is discussed in the paper. An experimental verification of the method was made at the wavelengths of 6.6 and 3.04 cm. The advantage of the radioastronomical method over radio techniques for determining the distribution of illumination is shown.

Распределение облучения (по полю и мощности) на главном зеркале антенны переменного профиля (АПП) является одним из важнейших факторов, который необходимо учитывать при расчетах диаграммы направленности антенной системы, а, следовательно, и при последующей точной обработке радиоастрономических наблюдений.

До 1966 г. исследования распределения облучения на отражателе проводились на Большом пулковском радиотелескопе (БПР) радиотехническими способами: посредством монохроматического излучения генератора стандартных сигналов (на волнах 3.2 и 4.5 см) и с помощью шумового генератора на лампе бегущей волны (ЛБВ) на волне 3.04 см. Радиотехнические методы измерений весьма трудоемки и сложны, но главным их недостатком является то, что поле (или мощность) определяется лишь в отдельных точках отражающей поверхности исследуемого элемента. Такая методика содержит следующие источники ошибок: а) погрешности отдельных измерений в зондируемых точках вблизи отражающей поверхности; б) ошибки аппроксимации распределения облучения по высоте отражающего элемента; в) ошибки интегрирования при вычислении полного потока излучения, отраженного в направлении вторичного зеркала от элемента отражателя АПП.

Прогресс в антенных измерениях на БПР стал возможен с развитием техники конструирования маломощных приемников сантиметрового диапазона, чувствительность которых оказалась достаточно высокой для наблюдения радиоизлучения от сильного источника (прежде всего от Солнца) на одном отражающем элементе главного зеркала антенны переменного профиля (размеры отражающего элемента БПР: 3×1.5 м).

В Пулкове был предложен и отработан метод радиоастрономической юстировки антенн переменного профиля. Этот метод является обобщением известного способа юстировки электрических осей зеркальных антенн по космическим радиоисточникам на каждый элемент секционированного главного зеркала антенных систем с отражателем переменного профиля.

Основной задачей, решаемой радиоастрономическим методом юстировки, является определение а) положений нуль-пунктов трех координат каждого отражающего элемента, б) точного положения фокуса вторичного

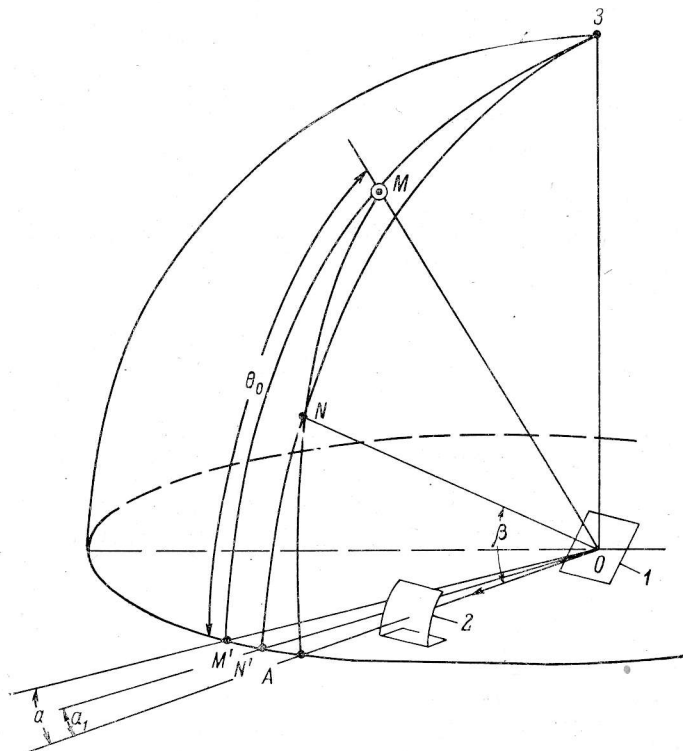


Рис. 1. Расположение вторичного зеркала, юстируемого отражающего элемента и наблюдаемого радиоисточника.
1 — отражающий элемент; 2 — вторичное зеркало.

зеркала, в) систематических ошибок шкал и г) цены деления шкалы — для угловых координат.

Кроме этого, если произвести дополнительную обработку данных юстировки, можно получить картину распределения облучения на отражателе АПП.

Для проведения юстировочных работ отражающий элемент главного зеркала прежде всего должен быть наведен на источник радиоизлучения. Для этого его устанавливают с высокой точностью по угловым координатам (азимуту и углу места) на момент наблюдения (точность установки по радиусу при работе с одним элементом существенного значения не имеет). Применяемые для наведения на источник радиоизлучения расчетные формулы были получены Г. Б. Гельфрейхом.

Остановимся на основных положениях теоретической разработки этого метода. Рассматривается система: источник радиоизлучения—отражающий элемент АПП—вторичное зеркало АПП (рис. 1). Пусть O —

центр небесной сферы, совпадающий с геометрическим центром отражающего элемента, Z — точка зенита, OM — направление на источник радиоизлучения (Солнце), ON — направление нормали отражающего элемента, OA — направление на облучатель (вторичное зеркало). Вследствие законов зеркального отражения точки A , N , M лежат на дуге большого круга и дуга AN равна дуге MN . Из сферических треугольников $M'MA$ и $N'NA$ следует, что угол места нормали отражающего элемента β определится по формуле

$$\sin \beta = \frac{\sin \theta_0}{\sqrt{2(1 + \cos \theta_0 \cos a)}}, \quad (1)$$

где θ_0 — угол места источника радиоизлучения; a — азимутальный угол между направлением на источник и направлением на облучатель, причем $a = a_M - \varphi$ ($a_M = a_\odot$ — азимут источника, φ — азимут облучателя).

Так как радиоастрономические юстировочные работы проводятся вблизи меридиана, то приращение азимута в этом случае выражается следующим образом [1]:

$$a_\odot = \pm 15 \frac{\cos \delta_\odot}{\sin \zeta_\odot} \Delta t^m. \quad (1a)$$

Здесь Δt^m — время в минутах, отсчитываемое от момента кульминации; δ_\odot — склонение Солнца на день наблюдения; ζ_\odot — меридиональное зенитное расстояние Солнца, равное $\varphi_0 - \delta_\odot$ (φ_0 — географическая широта места наблюдения).

Для вычисления φ может быть использована формула

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \psi}{\cos \psi - \frac{f}{r}}. \quad (1b)$$

Здесь ψ — азимут центра отражающего элемента из центра исходной окружности АПП (для БПР $|\psi| = 0^\circ 9$ ($n - 0.5$), n — порядковый номер отражающего элемента); f — расстояние от центра исходной окружности до фокуса F антенной системы на день наблюдений; r — расстояние от центра антенны до середины юстируемого элемента. Для западной части антенны φ и ψ отрицательны, для восточной — положительны.

Отметим, что шкалы установки углов места на БПР устроены так, что для наведения на источник радиоизлучения на угломерах необходимо устанавливать величину $90^\circ - \beta$ (см. рис. 1).

Вторая угловая координата — азимут нормали отражающего элемента — определяется выражением

$$\sin a_1 = \cos \theta_0 \sin (a - a_1), \quad (2)$$

где a_1 — азимутальный угол между направлением на облучатель и проекцией нормали на плоскость горизонта, $a_1 = \alpha - \varphi$ (α — отсчет азимута нормали элемента).

Практически, при наведении отражающего элемента на источник радиоизлучения, удобно использовать другую величину — скорость поворота элемента по азимуту при слежении за Солнцем — v_α . Формула для вычисления этой величины получается из (2)

$$v_\alpha = \frac{da}{dt} \approx \frac{1}{2} \cos \beta \sin 2a_1 (\operatorname{ctg} \varphi - \operatorname{tg} a_1) \frac{da'}{dt}, \quad (3)$$

где

$$\operatorname{tg} a_1 = - \frac{\cos \theta_0 \sin \varphi}{1 + \cos \theta_0 \cos \varphi} \quad (3a)$$

и

$$\frac{da'}{dt} = 15 \frac{\cos \delta \odot}{\cos \theta_0} \quad (3б)$$

(δ — в минутах дуги, θ_0 — в минутах времени). Чтобы выразить v_α в миллиметрах шкалы (мм/мин.) азимутальных отсчетов отражающего элемента, используем формулу

$$v_\alpha = \frac{L}{\rho'} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (4)$$

Здесь L — база азимутальной шкалы для данного отражающего элемента (определенная для БПР геодезическим способом), равная половине расстояния между азимутальными шкалами механизма поворота ($L_{\text{БПР}} = 360$ мм); $\rho' = 3437.75$ — число минут в радиане. Для точных юстировочных работ величина v_α должна быть вычислена на машине с точностью до пятого знака для каждого отражающего элемента и протабулирована на каждый день наблюдений. Для грубых юстировочных работ и для определения характера облучения отражателя v_α может быть вычислена с меньшей точностью и представлена в виде графиков. На рис. 2 в качестве примера показан ход v_α во второй серии экспериментов на волне 6.6 см (см. ниже).

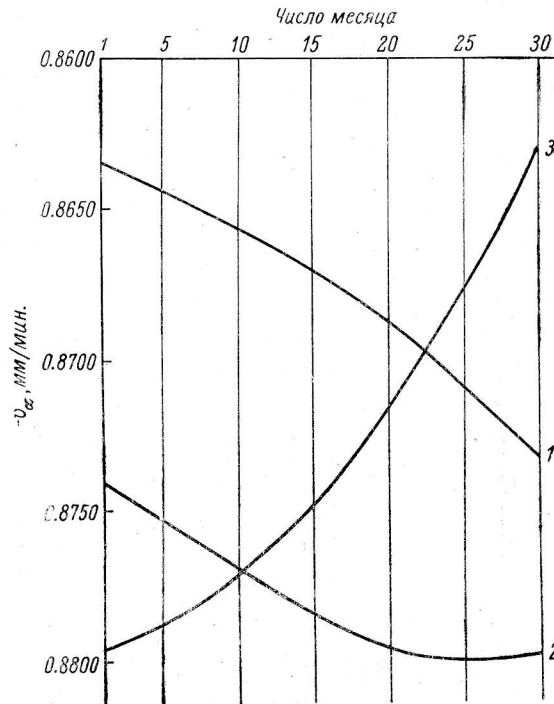


Рис. 2. График скорости поворота v_α отражающего элемента (по экспериментам 1967 г.).

1 — июль; 2 — август; 3 — сентябрь.

Полный процесс радиоастрономической юстировки состоит в наведении отражающего элемента (или нескольких отражающих элементов) на источник радиоизлучения и юстировочных перестановках по всем трем координатам.

Для целей определения распределения облучения на отражателе АПП достаточно навести отражающий элемент (щит) на источник радиоизлучения (Солнце) и проделать перестановки его только по углу места на некоторую величину $\pm \Delta$. Для БПР $|\Delta| = 20'$ (независимо от длины волны). Получаемая при этом запись (рис. 3) соответствует юстировочной записи по углу места. Для трех значений угла места (исходного β_0 и полученных при перестановках $\beta_0 + \Delta$, $\beta_0 - \Delta$) измеряют по записи антенную температуру (соответственно T_1 , T_2 и T_3). Последующая обработка данных отличается от хода обработки для задачи юстировки (вычисление нуль-пунктов) и состоит в определении максимального значения антенной темпера-

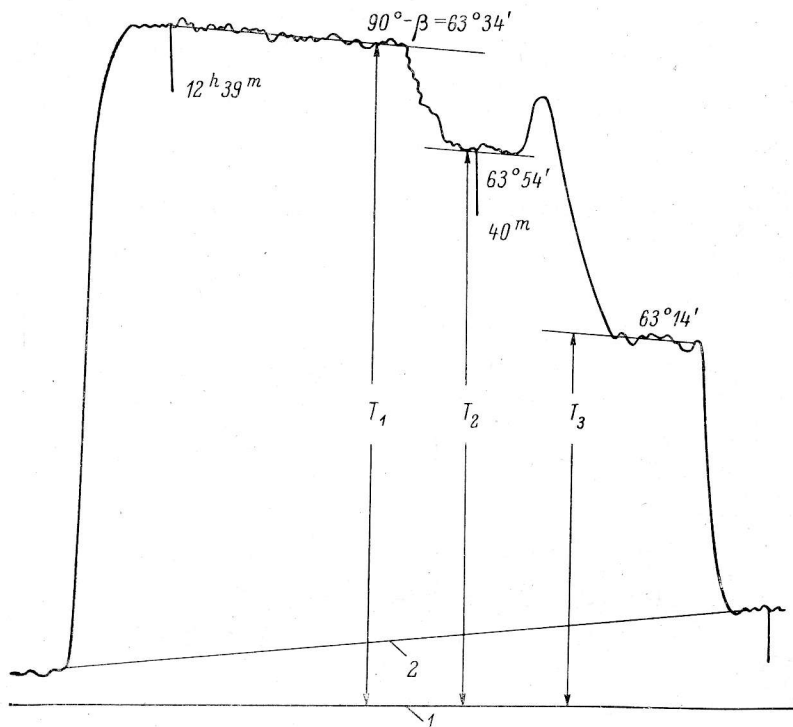


Рис. 3. Юстировка четвертого восточного отражающего элемента БПР по углу места на волне 6.6 см.

1 — уровень радионизлучения неба; 2 — кажущийся уход нуля из-за неполного отведения ранее юстировавшегося элемента.

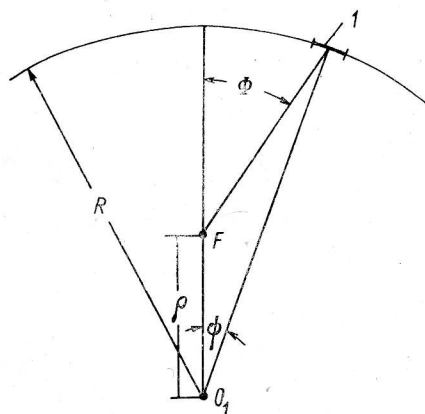


Рис. 4. К определению азимута отражающего элемента из фокуса АПП.

1 — юстируемый отражающий элемент; O_1 — центр исходной окружности АПП.

туры T_{\max} отражающего элемента, адекватного полному потоку излучения от него. Это значение T_{\max} определяется по формуле

$$T_{\max} = T_1 e^{-0.288 \frac{\lg \frac{T_3}{T_2}}{1 + 2 \frac{\lg \frac{T_3}{T_1}}{1 + \lg \frac{T_3}{T_2}}}} \quad (5)$$

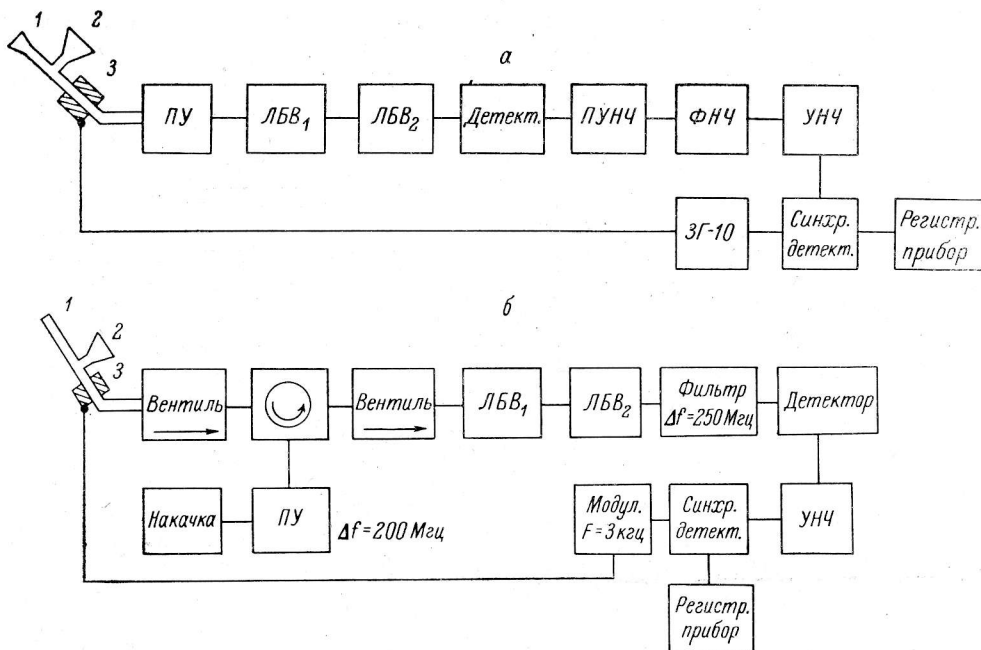


Рис. 5. Блок-схемы применяемых радиометров.

a — для $\lambda = 6.6$ см; b — для $\lambda = 3.04$ см. 1 — первичный облучатель; 2 — эквивалент антенны; 3 — модулятор.

Вычисленные значения T_{\max} для исследуемых отражающих элементов АПП нормируются к максимальному значению из всех полученных $T_{\max \max}$. Строя зависимость $\frac{T_{\max}(n)}{T_{\max \max}}$, получаем характеристику облучения главного зеркала антенны переменного профиля.

Технические характеристики применяемых радиометров

Тип приемника	Длина волны (см)	Суммарный коэффициент усиления по мощности (дБ)	Полоса пропускания (МГц)	Максимальная чувствительность ($^{\circ}$ К)	Собственная шумовая температура ($^{\circ}$ К)	Постоянная времени (сек.)	Регистрирующий прибор
Параметрический, конструкции В. Я. Гольнева	6.6	120	200	0.05	450	3	ЭПП-09
Параметрический, конструкции Д. В. Королькова и Г. М. Тимофеевой . .	3.04	70	200	0.07	200	1	ЭПП-09

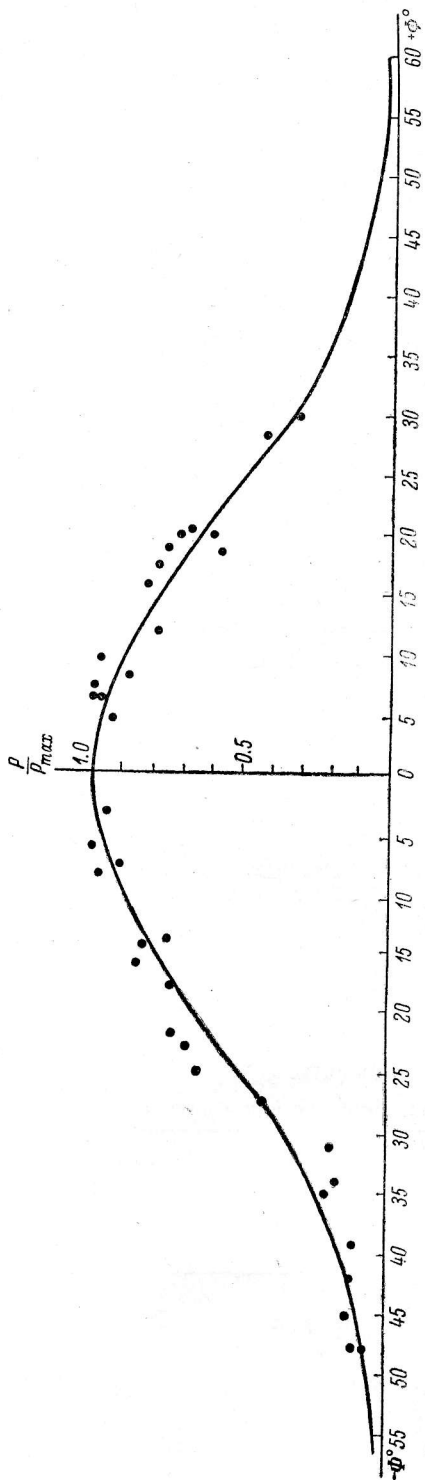


Рис. 6. Распределение облучения по мощности на главном зеркале БПР по данным экспериментов 1966 г. на волне 6.6 см.

Обработка юстировочных данных с целью получения распределения облучения имеет, кроме определения T_{\max} , еще одну особенность. Если используются записи, полученные при разных положениях источника, значительно отличающихся по высоте, то необходимо провести редукцию за угол из фокуса АПП для каждого исследованного отражающего элемента (привести все результаты к одной высоте). Это легко сделать, зная положение вторичного зеркала (рис. 4), по формуле

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{R \sin \psi}{R \cos \psi - \rho}. \quad (6)$$

Описываемый метод проверялся экспериментально, применительно к БПР, на волнах 6.6 и 3.04 см. В первом случае измерения производились при помощи параметрического приемника конструкции В. Я. Гольнева, во втором — при помощи параметрического приемника конструкции Д. В. Королькова и Г. М. Тимофеевой [2]. Блок-схемы приемников приведены на рис. 5, а их технические характеристики — в таблице.

На волне 6.6 см были осуществлены две серии экспериментов — летом 1966 г. и летом 1967 г. При обработке первой серии экспериментов, из-за большого разброса измерений по датам, была проведена редукция результатов на 15 VI 1966 г. График зависимости облучения отражателя по мощности от угла из фокуса АПП представлен для этого случая на рис. 6. Результаты измерений по второй серии экспериментов (поскольку даты близкие, редукция не понадобилась) представлены в виде функции от номера отражающего элемента на рис. 7. Сравнение данных по обеим сериям экспериментов на волне 6.6 см показывает хорошее совпадение между собой и с расчетными значениями характеристик распределения облучения на отражателе [3].

На волне 3.04 см была проведена одна серия измерений (по Солнцу), при обработке которых получено распределение облучения по мощности

вдоль главного зеркала БПР (рис. 8, кривая 1). На кривой 2 показано распределение облучения по мощности вдоль главного зеркала, полученное с помощью шумового генератора на ЛБВ, при отражателе, установленном

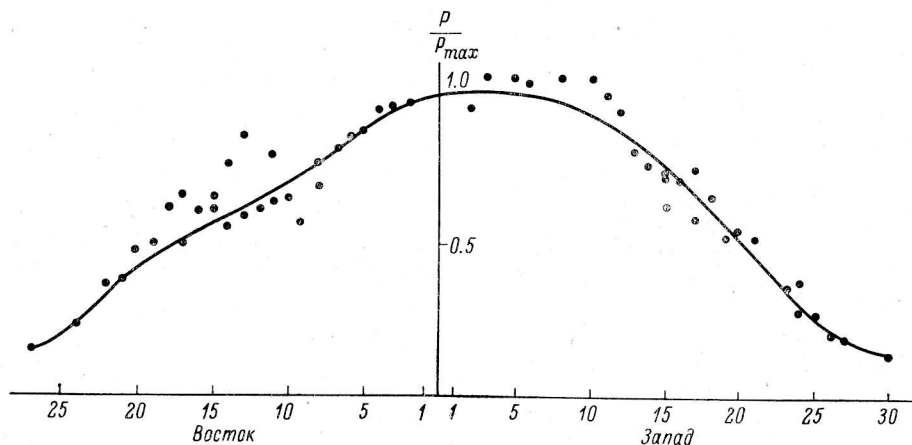


Рис. 7. Распределение облучения по мощности на главном зеркале БПР по данным экспериментов 1967 г. на волне 6.6 см.

на горизонт (отражающие элементы вертикальны). При такой установке эффективная площадь антенны больше, чем при наблюдениях Солнца (особенно на больших углах места), и, в соответствии с этим, кривая 2 лежит на графике выше кривой 1.

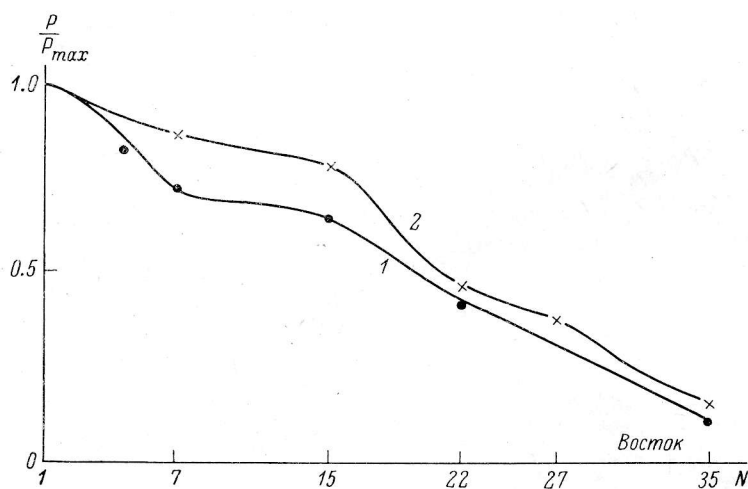


Рис. 8. Распределение облучения по мощности на главном зеркале БПР по данным экспериментов 1966 г. на волне 3.04 см.

1 — по данным радиоастрономической юстировки; 2 — по измерениям с шумовым генератором. N — номер щита.

Приведенный метод дает возможность снимать распределение облучения одновременно на нескольких волнах (если позволяет чувствительность приемников), что невозможно при радиотехнических способах измерений.

Особенно важно то, что радиоастрономический метод дает сразу эффективные значения мощности сигнала от исследуемого отражающего

элемента, причем автоматически учитывается качество его поверхности. Кроме того, этот метод исключает ошибки, связанные с построением и интегрированием распределения облучения по высоте отражающего элемента.

Авторы выражают благодарность М. А. Макшанчиковой и В. Н. Вашкевич за помощь, оказанную ими в наблюдениях и вычислениях.

Литература

1. Д. В. Загребин. Введение в астрометрию. Изд. «Наука», 1966.
2. Д. В. Корольков, Г. М. Тимофеева, Приборы и техника эксперимента, № 1, 36, 1967.
3. В. М. Спитковский. Распределение облучения на вторичном зеркале и элементах отражателя антенны переменного профиля. Наст. сборник, стр. 68.

Декабрь 1967 г.
