

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ФОКАЛЬНОЙ ТОЧКИ АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

Г. Б. Гельфрейх, В. М. Спитковский, М. Н. Макшанчикова

Известный в оптике метод Гартмана модифицирован и применен для отыскания точного положения фокальной точки антенны с отражателем переменного профиля. Выведены формулы для оценки числа отражающих элементов (щитов), которые необходимо исключить из центральной части главного зеркала для реализации «диафрагмы Гартмана», и для минимального числа щитов на краях главного зеркала, обеспечивающих такую величину сигнала на выходе радиометра, которая необходима для проведения измерений. Приведены результаты экспериментальной проверки метода на Большом пулковском радиотелескопе (на длине волны 6.6 см). Достаточно высокая точность метода (около 0.01λ) позволяет производить установку облучателя антенны на найденную точку фокуса при наблюдениях в миллиметровом диапазоне.

The well-known Hartmann's method in optics was modified and applied to finding the precise position of the focal point of a variable profile antenna. Formulas were deduced for the evaluation of a number of reflecting screens which are to be eliminated from the central part of the main mirror for realization of a «Hartmann screen» and the minimum number of reflecting screens at the edges of the main mirror to provide for a radiometer output signal necessary for the measurements by this method. The results of experimental testing of the method with the large Pulkovo radio telescope (at the wavelength of 6.6 cm) are given. The sufficiently high precision of the method (about 0.01λ) allows for setting the antenna feed on the focal point determined when observing in the millimeter range.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью антенны переменного профиля (АПП) является изменение фокусного расстояния главного зеркала (отражателя переменного профиля) при изменении угла места объекта наблюдений [1]. Приблизительно положение фокальной точки (фокуса) определяют из геометрических параметров антенны, а затем экспериментально проверяют по максимуму величины антенной температуры, наблюдая некоторый опорный источник радиоизлучения (высота которого точно известна) в нескольких сечениях диаграммы направленности (ДН) АПП. При таком методе определения положения фокуса АПП время, необходимое для измерений, составляет 8—10 дней, так как источник может регистрироваться только один раз в сутки, при прохождении его через меридиан наблюдателя.

Можно предложить значительно более быстрый способ отыскания точного положения фокальной точки АПП. Для этого надо распространить используемый в оптике метод Гартмана [2] на зеркальные антенны сантиметрового диапазона.

§ 1. МЕТОД ГАРТМАНА В ОПТИКЕ И ЕГО АНАЛОГ ДЛЯ АНТЕНН ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

Метод Гартмана в применении к оптическим системам подробно описан в литературе [3—7] и состоит в следующем (см. рис. 1). Перед фокусируемой оптической системой 1 устанавливают непрозрачный экран 2 с отвер-

стями 3, расположенными симметрично относительно центра (так называемая диафрагма Гартмана). Оптическую систему направляют на источник света, дающий параллельный пучок (например, на звезду) и делают два снимка диафрагмы Гартмана, помещая фотопластинку во внутрифо-

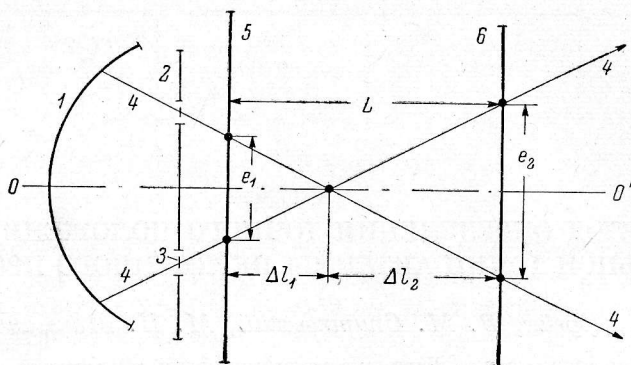


Рис. 1. Схема метода Гартмана в оптическом диапазоне.

1 — фокусируемая оптическая система; 2 — диафрагма Гартмана; 3 — отверстие в диафрагме; 4 — световые пучки, выходящие из отверстий диафрагмы; 5, 6 — фотопластинки.

кальной 5, а затем во внефокальной 6 плоскости, перпендикулярной к оптической оси OO' фокусируемой системы 1. Расстояние L между этими плоскостями точно измеряется. Если определить теперь расстояния e_1

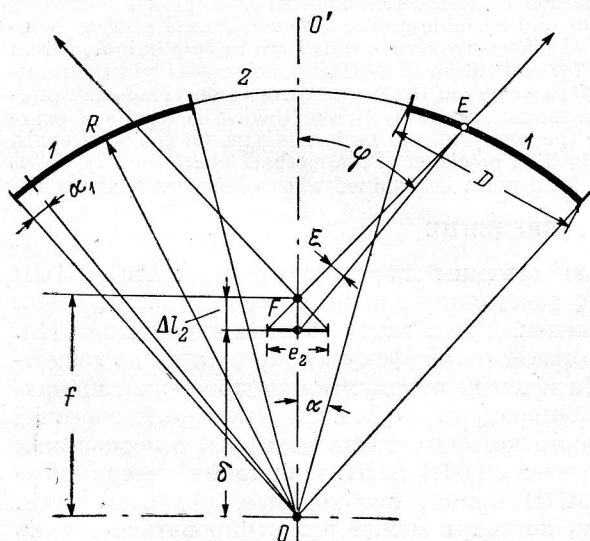


Рис. 2. Схема работы антенны переменного профиля в режиме диафрагмы Гартмана.

1 — участки отражающей поверхности главного зеркала антенны, направленные на источник радиоизлучения; 2 — центральная часть отражателя, отведенная от направления на источник.

и e_2 на снимках между изображениями отверстий диафрагмы Гартмана, через которые прошли световые пучки 4, пересекающиеся с оптической осью системы, то можно вычислить точное положение фокуса оптической системы относительно одной из плоскостей 5 или 6 по формуле

$$\Delta l_{1,2} = \frac{e_{1,2}}{e_1 + e_2} L. \quad (1)$$

Очевидно, что аналогичный метод может быть применен для отыскания точного положения фокуса зеркальных антенн. Реализация его для АПП исключительно проста (см. рис. 2), так как для проведения измерений

версиям в диафрагме Гартмана. Центральная группа щитов 2 соответствует непрозрачным участкам диафрагмы и исключается из установки АПП на источник путем простого отведения щитов по одной из угловых координат.

Таким образом, посредством самого отражателя переменного профиля автоматически формируется «диафрагма Гартмана». Поскольку в действительности никакой диафрагмы нет, то правильнее говорить о работе АПП в режиме диафрагмы Гартмана.

§ 2. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ АПП, РАБОТАЮЩЕЙ В РЕЖИМЕ ДИАФРАГМЫ ГАРТМАНА

2.1. Для выяснения принципиальной возможности применения метода необходимо получить расчетную формулу условия разрешения двух дифракционных максимумов, соответствующих двум частям АПП, при вынесении облучателя из фокуса. Для грубых оценок условие разделения максимумов может быть найдено, исходя из следующих рассуждений.

Ширина главного максимума d дифракционного пятна от каждой из направленных на источник частей главного зеркала приблизительно определяется выражением $d \approx \lambda/D$, где λ — длина волны, D — линейные размеры используемой части отражателя (см. рис. 2). Так как регистрируются внефокальные картины прохождения источника через ДН, то необходимо учитывать расширение максимума из-за выноса Δl облучателя из фокуса. Тогда условие разрешения дифракционных максимумов можно написать в виде

$$d_1 \approx \frac{\lambda}{D} a(\Delta l), \quad (2)$$

где коэффициент $a(\Delta l) \geq 1$ ($|\Delta l| \geq 0$) учитывает расширение максимума при смещении облучателя. Очевидно, что измерения становятся возможными, когда расстояния между максимумами (e_1 или e_2) удовлетворяют условию

$$e_{1,2} \geq d_1. \quad (3)$$

Далее, если принять, что направление из фокуса F на эффективный центр E (центр тяжести кривой амплитудного распределения поля) работающей части отражателя проходит также и через соответствующий максимум внефокальной картины, то расстояние между дифракционными максимумами для любого Δl может быть вычислено из простых геометрических соотношений (см. рис. 2)

$$e_{1,2} = \frac{2\Delta l}{\rho} \operatorname{tg} \varphi \text{ [радиан]}, \quad (4)$$

где $\rho = R - f_0$, f_0 — приближенно известное фокусное расстояние АПП для угла места опорного источника, φ — угол между осью OO' антенны и направлением из фокуса на точку E . Итак, из (2), (3) и (4) получаем

$$\frac{2\Delta l}{R - f_0} \operatorname{tg} \varphi \geq \frac{\lambda}{D} a(\Delta l). \quad (5)$$

Стоящая в правой части неравенства (5) величина $a(\Delta l)$ выражает в неявной форме тот факт, что разрешение максимумов дифракционной картины зависит от выноса облучателя из фокуса. Приведем более точный расчет этой величины.

В результате осевого смещения облучателя из фокуса на раскрыве антенны прежде всего появляется квадратичная фазовая ошибка, величина которой на краю зеркала ψ_2 может быть вычислена по формуле [8]

$$\psi_2 = 4\pi \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{\tau^2}{1 + \tau^2}, \quad (6)$$

где δ — величина осевого смещения облучателя, а τ , в свою очередь, определяется через фокусное расстояние f и диаметр раскрыва зеркала d следующим образом:

$$\tau = \frac{d}{4f}. \quad (7)$$

Для АПП типа Большого пулковского радиотелескопа (БПР), у которого облучатель главного зеркала передвигается вдоль поверхности земли, осевое смещение для эквивалентного параболоида [9] определяется выражением

$$\delta = \Delta l \cos h, \quad (8)$$

h — угол места наблюдаемого источника.

Оценим величину фазовой ошибки ψ_2 для самого неблагоприятного случая — установки АПП на высоту $h=0^\circ$; в этом случае [1]

$$f = \frac{R}{2} (1 - \sin^2 \Phi/2), \quad (9)$$

где Φ — половина рабочего угла отражателя АПП из центра исходной окружности. Используя (7)–(9), получаем следующее выражение для величины квадратичной фазовой ошибки на криволинейном раскрыве АПП:

$$\psi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Delta l}{1 + (1 + \sin^2 \Phi/2)}. \quad (10)$$

Для БПР ($\Phi \approx 40^\circ$) можно получить, в частности, более простую приближенную формулу

$$\psi_{2 \text{ БПР}} \approx \frac{4}{5} \pi \frac{\Delta l}{\lambda}. \quad (11)$$

Теперь, когда вычислена максимальная квадратичная фазовая ошибка на раскрыве АПП, интересующая нас диаграмма направленности может быть рассчитана следующим образом. При $h=0^\circ$ раскрыв АПП — прямоугольный (см. рис. 3). ДН антенны в плоскости zy при наличии фазовой ошибки ψ_2 может быть рассчитана по формуле (распределение поля по апертуре — равномерное) [10]

$$\int_{-D/2}^{+D/2} e^{-j\frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{y_s^2}{R}} e^{jk y_s \sin \vartheta} dy_s = \\ = \sqrt{\frac{\lambda R}{2}} \{ [C(\eta) - C(\xi)] - j[S(\eta) - S(\xi)] \} e^{j\pi \frac{\lambda R}{4} k^2 \sin^2 \vartheta}, \quad (12)$$

где

$$\eta = \frac{1}{2} (\sqrt{\lambda R} k \sin \vartheta + D/\sqrt{\lambda R}), \\ \xi = \frac{1}{2} (\sqrt{\lambda R} k \sin \vartheta - D/\sqrt{\lambda R}). \quad (13)$$

В (12) и (13) величина R — расстояние от центра фронта волны (или от источника радиоизлучения) до отверстия (раскрыва антенны). Определим R из следующих рассуждений.

Согласно выражению (12), квадратичное изменение фазы вдоль апертуры в зависимости от координаты y_s определяется по формуле

$$\Psi_2 = -\frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{y_s^2}{R}.$$

Ψ_2 достигает своего максимального значения на краю отверстия, где $y_s = D/2$. Для этого случая имеем

$$\Psi_{2\max} = \psi_2 = -\frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{D^2}{4R}. \quad (14)$$

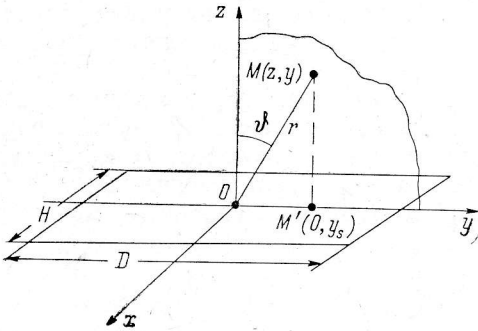


Рис. 3. Система координат для расчетов диаграммы направленности прямоугольного отверстия в плоскости zy при выносе облучателя из фокуса антенны.

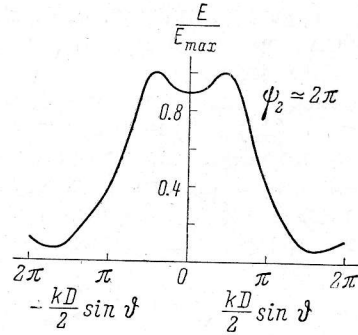


Рис. 4. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости для прямоугольного отверстия при выносе облучателя из фокуса на величину порядка 3λ . (Распределение амплитуды поля по апертуре — равномерное).

Из сравнения формул (10) и (14) получаем

$$|R| = \frac{D^2}{16} \cdot \frac{1 + \left(1 + \sin^2 \frac{\Phi}{2}\right)^2}{\Delta l}. \quad (15)$$

Окончательно из (12) и (15) получаем исходный интеграл для диаграммы направленности АПП, работающей со смещенным вдоль оси антенны облучателем, при $h=0^\circ$ (квадратичная фазовая ошибка максимальна)

$$F(\vartheta; \Delta l) = \int_{-D/2}^{+D/2} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Delta l}{1 + \sin^2(\Phi/2)^2}} e^{jk y_s \sin \vartheta} dy_s. \quad (16)$$

И, в частности, для БПР

$$F(\vartheta; \Delta l)_{\text{БПР}} = \int_{-D/2}^{+D/2} e^{-j\frac{4}{5}\pi \frac{\Delta l}{\lambda}} e^{jk y_s \sin \vartheta} dy_s \approx \approx D \sqrt{\frac{\lambda}{6\Delta l}} \{ [C(\eta) - C(\xi)] - j[S(\eta) - S(\xi)] \} e^{j\pi \frac{\lambda}{12} \cdot \frac{D^2}{\Delta l} k^2 \sin^2 \vartheta}, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(D \sqrt{\frac{\lambda}{3\Delta l}} k \sin \vartheta + 1 / \sqrt{\frac{\lambda}{3\Delta l}} \right), \\ \xi &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(D \sqrt{\frac{\lambda}{3\Delta l}} k \sin \vartheta - 1 / \sqrt{\frac{\lambda}{3\Delta l}} \right).\end{aligned}\quad (18)$$

На рис. 4 для примера показано рассчитанное по формулам (17) и (18) горизонтальное сечение диаграммы направленности для $\Delta l = 3\lambda$ и равномерного распределения амплитуды поля по апертуре. Так как реальное распределение поля по отражателю сильно отличается от равномерного [11, 12], то ДН антенны симметрично расширяется, что может быть учтено количественно по известным формулам [8, 13, 14]. Соответствующие вычисления были проделаны для фактического распределения амплитуды поля по отражателю для волны 6.6 см. Результаты расчета представлены в виде графиков на рис. 5, б. На рис. 5, а для сравнения приведены аналогичные кривые для главного зеркала АПП без исключенных отражающих элементов.

Таким образом, из (6)–(18) можно сделать вывод, что влияние множителя a (Δl) в (5) на ширину ДН антенны при выносах облучателя на величину порядка 3λ проявляется в том, что дифракционные максимумы от каждой из работающих частей главного зеркала расширяются вдвое (см. рис. 4 и 5, б). С учетом этого обстоятельства условие (5) можно записать следующим образом:

$$\frac{\Delta l}{R - f_0} \operatorname{tg} \varphi \geq \frac{\lambda}{D}, \quad \lambda \leq \Delta l \leq 3\lambda. \quad (19)$$

Из (19) может быть вычислено количество щитов, которое необходимо исключить из центра антенны для выполнения условия разделения дифракционных максимумов. Перепишем (19) в виде

$$\varphi \geq \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{\lambda}{D} \cdot \frac{R - f_0}{\Delta l} \right). \quad (20)$$

При больших угловых размерах источника ($\theta_0 > \lambda/D$) вместо (20) используется аналогичное соотношение

$$\varphi \geq \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\theta_0 \frac{R - f_0}{\Delta l} \right), \quad (20a)$$

где θ_0 — угловой размер источника в радианах.

Заметим, что условия (20) и (20a) представляют собой критерий разрешения Рэля работающих частей АПП для точечного и протяженного источников соответственно.

Угол φ связан с угловым размером α диафрагмы Гартмана из центра O исходной окружности следующим соотношением (см. рис. 2):

$$\alpha = \varphi - \operatorname{arc} \sin \left[\left(1 - \frac{f_0}{R} \right) \sin \varphi \right]. \quad (21)$$

Легко показать, что также имеет место приближенное равенство

$$\alpha \approx \operatorname{arc} \sin \left[\frac{f_0}{\Delta l} \theta_0 \left(1 - \frac{f_0}{R} \right) \right]. \quad (22)$$

Результаты расчета α по обеим формулам практически тождественны, так как погрешность приближенной формулы (22) не превышает десятых долей градуса, что при угловых размерах щита $\alpha_1 \approx 1^\circ$ (см. рис. 2) из центра

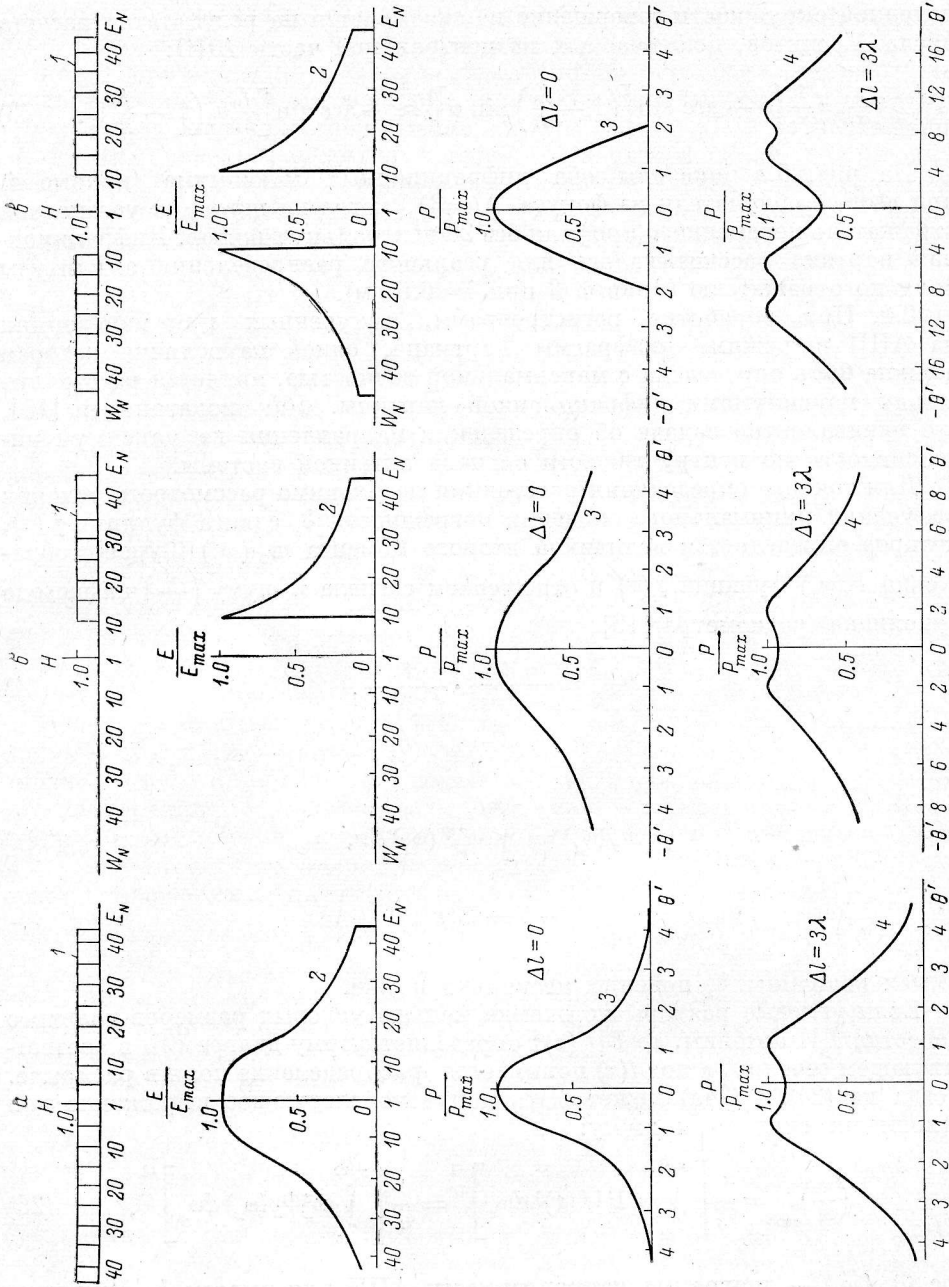


Рис. 5. Распределение амплитуды поля и соответствующие горизонтальные диаграммы направленности для различных вариантов работы антенны переменной профиля.

а — все щиты отражателя направлены на источник; б — на источник направлена одна группа крайних щитов отражателя; в — на источник направлены две группы крайних щитов отражателя.

1 — работающие (направленные на источник) участки поверхности главного зеркала антенны; 2 — распределение амплитуды поля по отражателю, соответствующее заданному варианту установки антенны; 3 — горизонтальная диаграмма направленности при облучателе, расположенном в фокусе АПШ; 4 — горизонтальная диаграмма направленности при выносе облучателя из фокуса на величину 3λ .

H — относительный вертикальный размер антенны. Расчеты выполнены для $\lambda = 6,6$ см и $h = 0^\circ$.

исходной окружности совершенно не сказывается на результатах расчета числа N_0 щитов, исключаемых из центральной части АПП:

$$N_0 \geq \frac{a}{a_1} = \frac{1}{a_1} \left\{ \varphi - \arcsin \left[\left(1 - \frac{f_0}{R} \right) \sin \varphi \right] \right\} \approx \frac{1}{a_1} \arcsin \left[\frac{f_0}{\Delta l} \theta_0 \left(1 - \frac{f_0}{R} \right) \right]. \quad (23)$$

На рис. 5,в показаны оба дифракционных максимума (кривые 4) при выносе облучателя из фокуса $\Delta l = 3\lambda$, когда на источник установлен отражатель переменного профиля без 20 центральных щитов. Дифракционная картина рассчитывалась для реального распределения амплитуды поля по отражателю (кривые 2 при $\lambda = 6.6$ см).

2.2. При обработке регистрограмм, полученных при измерениях на АПП в режиме диафрагмы Гартмана, одной из величин, которая должна быть определена с максимальной точностью, является расстояние между максимумами дифракционной картины. Как показано в [15], это эквивалентно задаче об определении направления на максимум интенсивности по центру тяжести сигнала антенной системы.

Для точного определения расстояния необходимо рассмотреть условия получения минимального значения погрешности δ_x сдвига функции $f(x)$, которое определяется величиной второго момента $m_2(\omega_x)$ Фурье-отображения $F(\omega_x)$ функции $f(x)$ и отношением сигнала к шуму $\left(\frac{c}{\Pi}\right)$ на выходе приемника (радиометра) [16]

$$\delta_x = \frac{1}{m_2(\omega_x)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{c}{\Pi}\right)_{\text{вых}}}, \quad (24)$$

где

$$m_2(\omega_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega_x^2 F(\omega_x) dx, \quad (24a)$$

$$F(\omega_x) = \mathbf{F}[f(x)].$$

Смысл величины δ_x поясним несколько позже.

Если угловые размеры источника меньше угловых размеров главного лепестка ДН антенны, то $\mathbf{F}[f(x)]$ определяет форму диаграммы в соответствующем сечении, а под $f(x)$ понимается распределение поля в раскрыве. Тогда из (24) и (24a) может быть получено следующее выражение для отношения сигнала к шуму:

$$\left(\frac{c}{\Pi}\right)_{\text{вых}} = \frac{1}{\delta_x} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \omega_x^2 \mathbf{F}[f(x)] d\omega_x \right]^{-1} = \frac{1}{\delta_x} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \omega_x^2 \Phi_h(\omega_x) d\omega_x \right]^{-1}, \quad (25)$$

где $\Phi_h(\omega_x)$ — диаграмма направленности АПП для высоты h . Для приближенных расчетов главный лепесток ДН можно аппроксимировать гауссовой кривой, для которой

$$m_2(\omega_x) = \frac{\sqrt{\pi}}{\theta_{0.46}}, \quad (26)$$

$\theta_{0.46}$ — ширина главного лепестка ДН на уровне 0.46 по мощности. Учитывая (26), из (25) получаем

$$\left(\frac{c}{\Pi}\right)_{\text{вых}} = 0.562 \frac{\theta_{0.46}}{\delta_x}. \quad (27)$$

Оценка отношения сигнала к шуму по формуле (27) справедлива при отклике антенны, содержащем один максимум.

Как показано в предыдущем разделе этого параграфа, реальный отклик антенны на радиоизлучение источника при выносе облучателя из фокуса и исключении центральной группы щитов АПП из наблюдений имеет два перекрывающихся главных максимума. Если ξ — уровень мощности, по которому перекрываются главные максимумы (иначе ξ называется коэффициентом перекрытия), то для отношения сигнала к шуму справедливо выражение (см. [15])

$$\left(\frac{c}{\Pi}\right)_{\text{ВЫХ. МИН}} = \frac{\left(\frac{c}{\Pi}\right)_{\xi}}{\left(\frac{c}{\Pi}\right)_{\xi=0}} 0.562 \frac{\theta_{0.46}}{\delta_x} = a_{\xi} \left(\frac{c}{\Pi}\right)_{\text{ВЫХ}}, \quad (28)$$

где a_{ξ} — безразмерный коэффициент, зависящий от ξ . Значения его для различных ξ таковы [15]:

ξ	0	0.80	0.90	0.95	0.99
a_{ξ}	1	1.70	2.20	3.20	7.10

Вернемся теперь к величине δ_x . В нашем случае, при измерениях на регистрограмме с двумя максимумами, она определяет положение одного максимума относительно другого. Обе величины $\theta_{0.46}$ и δ_x в формулах (27) и (28) должны быть выражены в одних и тех же единицах. Например, если при ширине максимума $\theta_{0.46} = 10'$ и $\xi = 0.8$ мы хотим обеспечить точность вычисления положения одного максимума

относительно другого $\delta_x = 1'$, то для этого случая $\left(\frac{c}{\Pi}\right)_{\text{ВЫХ. МИН}} \approx 9.5$.

2.3. Когда известно отношение сигнала к шуму, то нетрудно определить минимальную антенную температуру $T_{A \text{ мин}}$, которая необходима для обеспечения измерений. Если $\delta T_{\text{мин}}$ — флуктуационная чувствительность радиометра, то

$$T_{A \text{ мин}} = \left(\frac{c}{\Pi}\right)_{\text{ВЫХ. МИН}} \delta T_{\text{мин}} = 0.5620 a_{\xi} \frac{\theta_{0.46}}{\delta_x} \alpha T_{\text{ш}} \sqrt{\frac{2\Delta F}{\Delta f}}, \quad (29)$$

где $T_{\text{ш}}$ — шумовая температура приемника; ΔF — эквивалентная ширина полосы пропускания низкочастотной части приемника; Δf — эффективная ширина полосы высокочастотной части приемника до детектора; α — безразмерный коэффициент, зависящий от типа радиометра и вида модуляции и демодуляции ($1 \leq \alpha \leq 2.83$). Если в качестве интегратора используется RC-цепочка, то (29) можно записать так:

$$T_{A \text{ мин}} = (0.562 \div 1.59) a_{\xi} \frac{\theta_{0.46}}{\delta_x} \cdot \frac{T_{\text{ш}}}{\sqrt{\tau \Delta f}}, \quad (30)$$

где $\tau = RC$.

При работе АПП в режиме диафрагмы Гартмана температура $T_{A \text{ мин}}$ должна обеспечиваться N_1 крайними щитами отражателя. Вклад крайних групп щитов в общую температуру антенны может быть оценен, если известна схема облучения вторичного зеркала первичным облучателем и соответствующее распределение амплитуды поля по главному зеркалу.

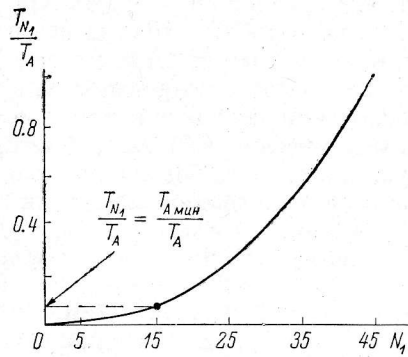


Рис. 6. Относительный вклад отдельных крайних групп из N_1 щитов отражателя в общую антенную температуру. $\lambda = 6.6$ см.

Эти вопросы исследованы в работах [11, 12, 17]. На рис. 6 приведен график, отображающий вклад группы из N_1 краевых щитов в общую антенную температуру T_A для длины волны 6.6 см. Когда известно $T_{A \text{ мин}}$, то минимальное число краевых щитов N_1 , необходимое для наблюдений, легко определить из графика на рис. 6, полагая

$$T_{N_1} = T_{A \text{ мин}}, \quad (31)$$

где T_{N_1} — антенная температура группы из N_1 краевых щитов.

Зная число щитов N_0 , исключаемых из центральной части отражателя, и минимальное число щитов N_1 в краевой группе, можно записать условие реализуемости метода

$$N_0 + N_1 \leq N, \quad (32)$$

т. е. общее число N щитов АПП должно быть не меньше суммы числа щитов, которые необходимо исключить из центра отражателя для обеспечения разрешения максимумов дифракционной картины, и минимально необходимого числа щитов на краю антенны для обеспечения необходимого отношения сигнала к шуму при заданной чувствительности радиометра. Если условие (32) выполняется с запасом, то на источник может быть установлено любое количество щитов N_2 на краю АПП из промежутка, определяемого неравенствами

$$N_1 \leq N_2 \leq N - N_0. \quad (33)$$

§ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА НА БОЛЬШОМ ПУЛКОВСКОМ РАДИОТЕЛЕСКОПЕ

Изложенные в предыдущих параграфах теоретические соображения и расчетные формулы были проверены экспериментально на БПР. В качестве источника радиоизлучения бралась Крабовидная туманность (ЗС 144). Угловой размер источника $\theta'_{0.5} = 3.5$, высота $h = 52^\circ 14'$. Наблюдения проводились на длине волны 6.6 см с помощью радиометра чувствительностью 0.06° К при $\tau = 3$ сек. Число щитов для каждого крыла антенны, которое необходимо исключить из центра антенны, оценивалось по формулам (21)–(23) и оказалось равным 7. Минимальное отношение сигнала к шуму, вычисленное по (28), составило примерно 10. Соответствующее значение $T_{A \text{ мин}}$ равно примерно 1° К . При антенной температуре источника ЗС 144 на БПР $T_A \approx 20^\circ \text{ К}$ необходимо установить для наблюдений минимум 15 щитов на каждом краю главного зеркала. Эксперимент проводился при 18 исключенных из центра АПП щитах главного зеркала. На рис. 7 приведены регистрограммы прохождения источника через диаграмму направленности БПР. Положение максимумов на записях определялось как среднее середин трех—пяти отрезков, соединяющих равносигнальные зоны. Расстояние между дифракционными максимумами b_i для i -й регистрограммы определялось из выражения

$$b_i = 15 \frac{e_i}{v} \cos \delta \text{ [радиан]}, \quad (34)$$

где e_i — расстояние между максимумами на записи, δ — склонение источника, v — скорость движения ленты самописца (мм/мин.).

В табл. 4 приведены экспериментальные данные для четырех внефокальных регистрограмм, а также рассчитанные значения их параметров, без учета влияния фазовой ошибки при смещении облучателя. Из сравнения экспериментальных и расчетных данных видно, что для расстояния между максимумами имеет место хорошее совпадение. Это до-

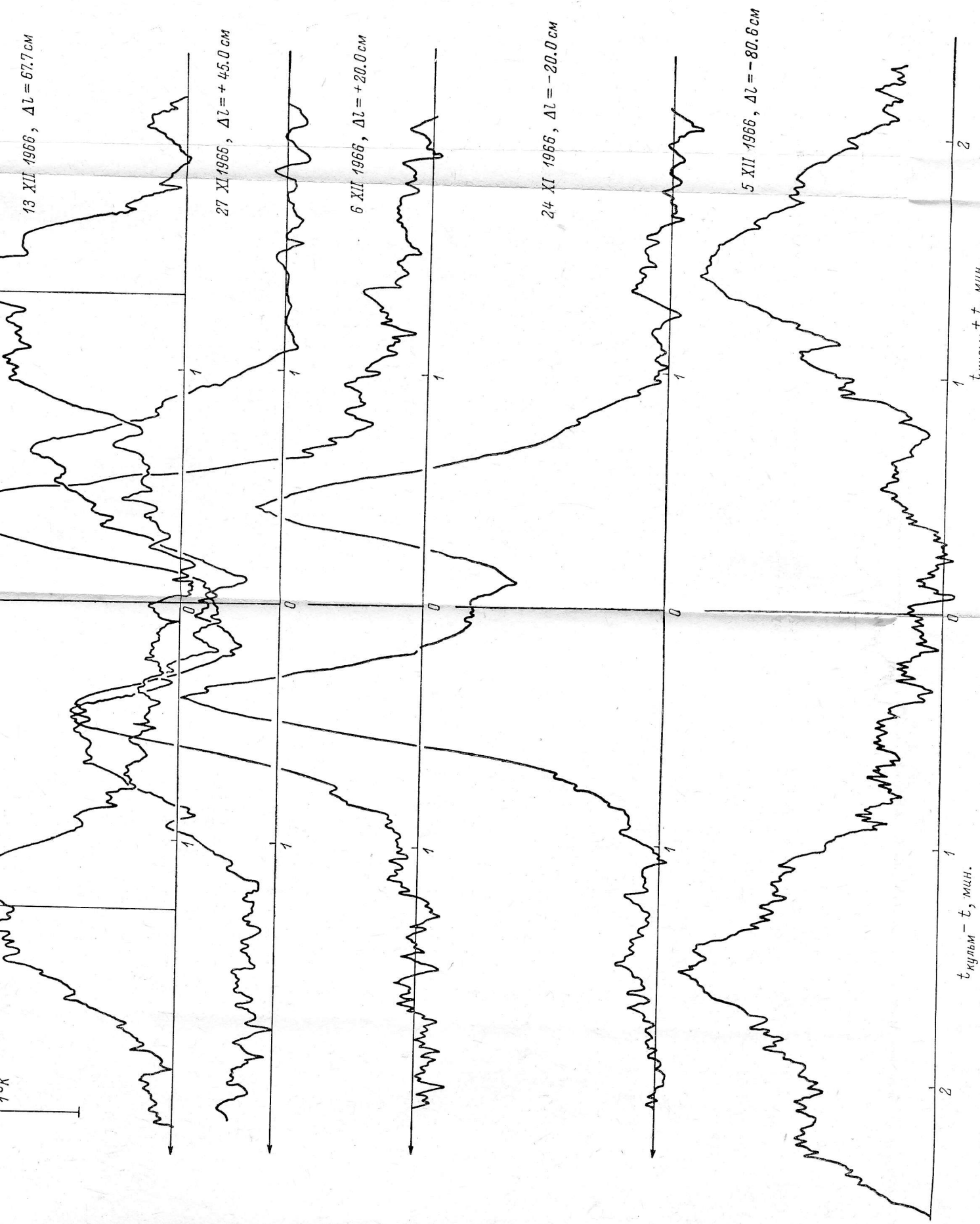


Рис. 7. Экспериментальные регистрограммы прохождения источника ЗС 144 через диаграмму направленности ВПР при различных выносах облучателя из фокуса и установке на источнике двух крайних групп по 35 щитов в каждой.

ТАБЛИЦА 1

Номер эксперимента	Дата	Вынос из фокуса, (см)	Расстояние между максимумами (см)		Ширина первого максимума (минуты дуги). Эксперимент	Ширина второго максимума (минуты дуги). Эксперимент	Ширина максимумов ($\psi_2 = 0$). Расчет	T_A первого максимума (% калибровки). Эксперимент	T_A второго максимума (% калибровки). Эксперимент	T_A максимумов (% калибровки). $\psi_2 = 0$. Расчет
			эксперимент	расчет						
1	13 XII 1966	+67.7	35.0±0.5	35.4	10.4±0.8	10.6±0.8	~4.5	72	82	275
2	6 XII	+19.7	11.0±0.3	11.5	6.6±0.3	5.8±0.3	~4.5	123	182	275
3	24 XI	-21.0	11.5±0.5	11.5	5.5±0.3	5.4±0.3	~4.5	178	151	275
4	5 XII	-80.6	41.5±0.5	42.0	15.1±0.3	13.0±1.7	~4.5	79	79	275

стигается благодаря тому, что при определении направления максимального излучения работающих частей АПП принималось во внимание реальное распределение поля по отражателю из [12]. Для ширины дифракционных максимумов и величины антенной температуры получаются большие ошибки, которые могут быть устранены, если рассчитывать ширину ДН согласно формуле (25). Уменьшение антенной температуры может быть учтено расчетом коэффициента направленного действия антенны в присутствии квадратичной фазовой ошибки (в первом приближении) по формулам, приведенным в [18]. Рассчитанные значения ширины максимумов и антенной температуры для смещения облучателя на величину порядка 3λ ($\Delta l \approx 20$ см) с учетом квадратичной фазовой ошибки для этого случая приведены в табл. 2 и удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента.

ТАБЛИЦА 2

Номер эксперимента	Вынос облучателя из фокуса (см)	Эксперимент				Расчет	
		ширина первого максимума	ширина второго максимума	T_A первого максимума	T_A второго максимума	ширина максимумов (минуты дуги). $\psi_2 \approx 2\pi$	T_A максимумов (% калибровки). $\psi_2 \approx 2\pi$
		(минуты дуги)		(% калибровки)			
2	+19.7	6.6±0.3	5.8±0.3	123	182	6.0	11.5
3	-21.0	5.5±0.3	5.4±0.3	178	151	6.2	110

Чтобы определить поправку к положению фокальной точки, необходимо получить минимум две регистрограммы, точно измерить расстояние L между положениями облучателя и определить расстояния b_1 и b_2 между максимумами дифракционной картины по формуле (34). Величина смещения $\Delta l_{1,2 \text{ вст}}$ облучателя от точного положения фокальной точки вычисляется по формуле

$$\Delta l_{1,2 \text{ вст}} = \frac{e_{1,2} \cos \delta_{1,2}}{v_{1,2}} \left(\frac{e_1}{v_1} \cos \delta_1 + \frac{e_2}{v_2} \cos \delta_2 \right)^{-1} L. \quad (35)$$

Поскольку скорость движения ленты самописца и склонение источника одинаковы для обеих регистрограмм, из (35) получаем более простую формулу

$$\Delta l_{1,2 \text{ вст}} = \frac{e_{1,2}}{e_1 + e_2} L, \quad (36)$$

которая по форме записи совпадает с (1) для метода Гартмана в оптике.

Величина поправки Δ к приближенно известному положению фокальной точки вычисляется из выражения

$$\Delta = \Delta l_{1,2} - \Delta l_{1,2 \text{ вст.}} \quad (37)$$

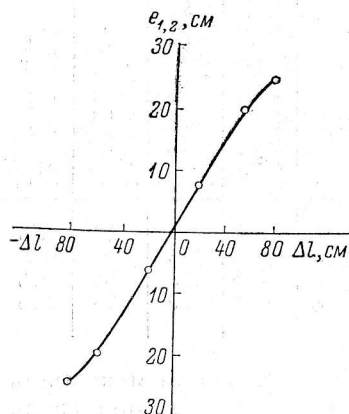


Рис. 8. Экспериментальный график зависимости расстояния между максимумами на регистрирующей диаграмме от величины выноса облучателя из фокуса.

В табл. 3 приведены поправки Δ , вычисленные для различных пар регистрирующей диаграммы (см. рис. 7 и табл. 2).

Данные табл. 3 нуждаются в пояснении. Проследим зависимость расстояния между максимумами на регистрирующей диаграмме от величины смещения облучателя из фокуса (рис. 8). Экспериментальные данные (показаны на рисунке точками) хорошо ложатся на прямую в пределах $\Delta l_{1,2} \approx 10\lambda$. Значительное отклонение от прямой можно объяснить кубической фазовой ошибкой, которая тоже возникает в АПП при выносе облучателя, но не принималась нами во внимание при расчетах. Так как кубическая ошибка имеет разные знаки при смещении облучателя в противоположные стороны относительно фокальной точки, то влияние ее на расчеты при работе с симметричными смещениями минимально, но весьма существенно,

когда расчет ведется по несимметричным регистрирующим диаграммам. Две последние строки табл. 3 содержат результаты, соответствующие сильно асимметричным регистрирующим диаграммам с большой погрешностью из-за кубической ошибки.

Рассмотренная в данной работе теория и проведенная на БПР практическая проверка модифицированного метода Гартмана показывают, что время фокусировки больших зеркальных антенн с отражателем переменного профиля может быть сокращено в несколько раз. Полученная точность позволяет обеспечить установку облучателя АПП для наблюдений на значительно более коротких волнах, чем волна измерений.

Авторы выражают благодарность В. Гольневу за предоставленную возможность использовать для измерений высокочувствительный радиометр, а также Н. Гольневой за расчеты диаграмм направленности на вычислительной машине «Минск-22».

ТАБЛИЦА 3

Эксперимент	Расстояние между двумя положениями облучателя L (см)	Поправка к приближенно известному положению фокуса Δ (см)
1+4	148.4 ± 0.1	0.0
2+3	40.7 ± 0.1	+0.3
1+3	88.7 ± 0.1	+1.7
2+4	100.3 ± 0.1	-1.4

Примечание. Знак (+) в третьем столбце соответствует перемещению облучателя (для точной фокусировки) в сторону отражателя АПП, а знак (-) — по направлению к центру антенны.

Литература

1. С. Э. Хайкин и др., Изв. Гл. astron. obs. в Пулкове, № 164, 3, 1960.
2. J. Hartmann, Z. f. Instr., XXIV, S. 1, 33, 97, 1904.
3. М. Ф. Романова, Тр. ГОИ, 4, № 35, 1927.
4. В. Ронки. Испытание оптических систем. ГТТИ, 1933.
5. Г. Ивонн. Методы контроля оптических поверхностей. Оборонгиз, 1939.
6. P. Janna, Vistas in Astronomy, 6, 93, 1965.
7. J. Gardner, A. Venet, J. Opt. Soc. Amer., 11, No. 4, 441, 1925.
8. Р. Кюн. Микроволновые антенны. Судостроение, 1968.
9. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский. Радиоастрономия. Парижский симпозиум. ИЛ, 1961, стр. 165.

10. А. З. Фрадкин. Антенны сверхвысоких частот. Изд. «Советское радио», 1957.
11. В. М. Спитковский, Астрофиз. иссл. (Изв. САО), 1, 68, 1969.
12. Г. Б. Гельфрейх, В. М. Спитковский, Астрофиз. иссл. (Изв. САО), 1, 82, 1969.
13. А. А. Харкевич. Спектры и анализ. ГИТТЛ, 1952.
14. С. С. Allen, JRE Conv. Res., pt. 2, 9, 1953.
15. А. Е. Башаринов и др. Измерение радиотепловых и плазменных излучений. Изд. «Советское радио», 1968.
16. Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров. Изд. «Советское радио», 1963.
17. В. Н. Боровик, Н. Г. Петерова, В. М. Спитковский, Г. М. Тимофеева, Изв. Гл. астрон. обс. в Пулкове, № 187 (в печати).
18. М. С. Жуки, Ю. Б. Молочков. Проектирование антенно-фидерных устройств. Изд. «Энергия», 1966.

Январь 1969 г.