

(рис. 1), отраженных щитами, расположенными на концах большой оси эллипса $-2a$, должна компенсироваться смещением облучателя из центра на $of=c$, так что $2a \sin z = (a+c) - (a-c) = 2c$ и, следовательно,

$$c/a = e = \sin z. \quad (2)$$

Параметр эллипса $p = b^2/a$, где b — малая полуось, зависит от способа размещения эллипса или его дуг в кольце шириной $R - r$.

Весь эллипс можно разместить внутри кольца при условии, что центры эллипса и кольца совпадают и что $a \leq R$ и $b \geq r$.

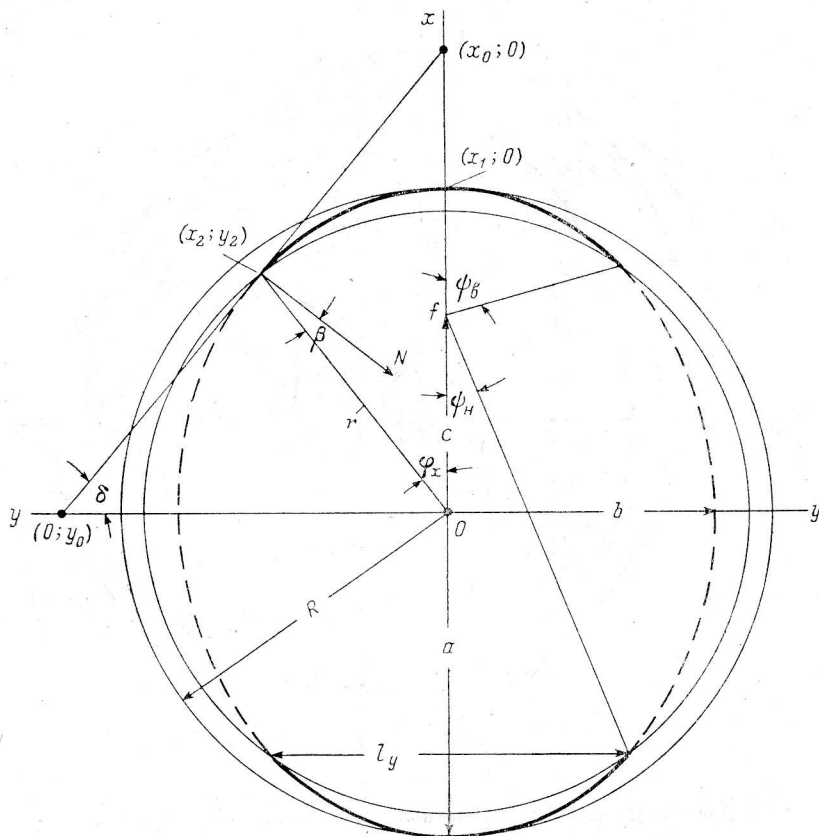


Рис. 2. Первый способ расположения эллипса внутри кольца.

Наибольшее значение зенитного расстояния z_{\max} соответствует случаю, когда $a=R$ и $b=r$, при этом

$$z_{\max} = \arcsin c/a = \arcsin \sqrt{1 - (r/R)^2}. \quad (3)$$

Для РАТАН-600 $r/R=0.9965$ и, следовательно, $z_{\max}=4^{\circ}46'$.

При увеличении зенитного расстояния $z > 4^{\circ}46'$ эксцентриситет будет расти и эллипс начнет частично выходить за пределы кольца $R - r$, что поведет к уменьшению геометрического коэффициента использования площади зеркала $N = s/2\pi R < 1$, где s — периметр дуг эллипса, заключенных внутри кольца.

Использование облучателя типа VI за пределами $z \geq 4^{\circ}46'$ может оказаться целесообразным, несмотря на уменьшение $N < 1$ и некоторую декомпенсацию паразитной круговой поляризации, так как позволяет расширить область неба, доступную для наблюдений при высокой разрешающей силе в перпендикулярных плоскостях.

Рассмотрены следующие три основные возможности размещения дуг эллипса внутри кольца $R - r$:

1) центры эллипса и кольца совпадают, большая полуось эллипса $a = R$, а малая полуось $b < r$ (рис. 2);

- 2) центры эллипса и кольца совпадают, малая полуось $a > R$ и $b=r$ (рис. 3);
 3) центр кольца смещен относительно центра эллипса в сторону его фокуса на величину Δ . Большая полуось эллипса $a=R+\Delta$, эллипс касается внутренней окружности и затем пересекает внешнюю окружность (рис. 4).

В некоторых случаях возможно использовать комбинации описанных выше основных способов установки отражателя.

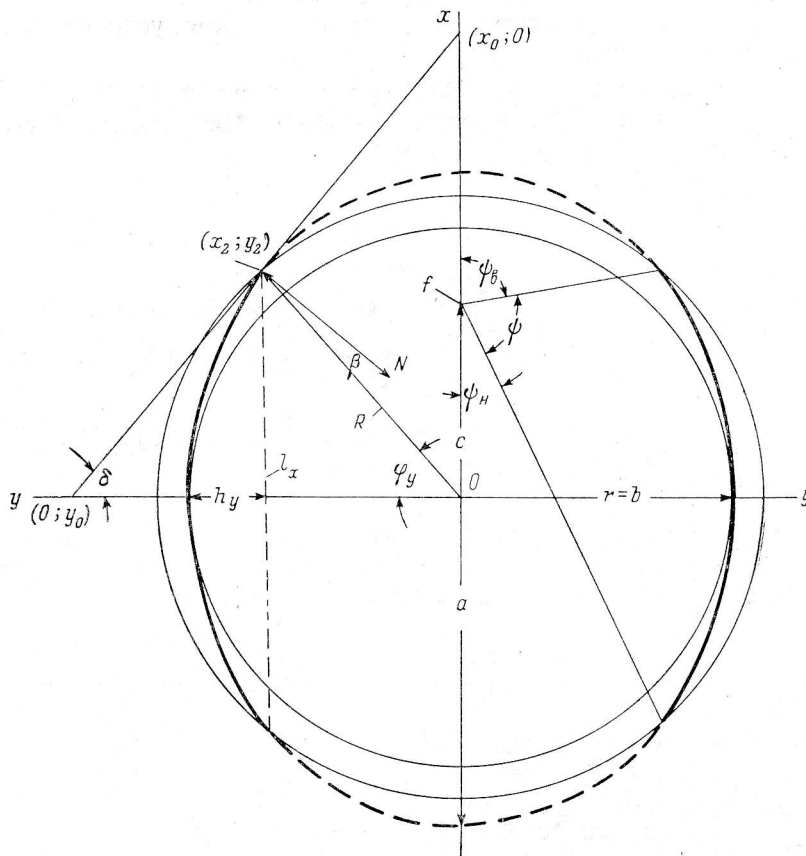


Рис. 3. Второй способ расположения эллипса в кольце.

Характеристики РАТАН-600 при основных способах размещения дуг эллипса внутри кольца. 1. При первом способе установки отражателя, когда $a=R$ и $b < r$ (рис. 2), параметр эллипса

$$P = b^2/a = R \cos^2 z, \quad (4)$$

так как $c^2 = a^2 - b^2$ и $b/a = \cos z$.

Вписанные в кольцо дуги эллипса при одновременном их облучении из фокуса f представляют собой интерферометр с проекцией базы на плоскость фронта падающей волны

$$d_x = 2R \cos z. \quad (5)$$

Антенны интерферометра имеют раскрыт

$$\left. \begin{aligned} l_y &= 2r \sin \varphi_x \\ h_x &= (R - r \cos \varphi_x) \cos z \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

и стрелку

где φ_x — угол из центра, под которым видна половина дуги эллипса, определяется из выражения

$$\cos \varphi_x = \pm \sqrt{1 - (R/r)^2 \cos^2 z} / \sin z. \quad (7)$$

Выражение (7) получено при совместном решении уравнения эллипса и внутренней окружности с целью определения координат точки их пересечения. Геометрический коэффициент использования площади антенны

$$N\% = (4\varphi_x^{\circ}/360) \cdot 10^2. \quad (8)$$

Угол наклона отражающих элементов к вертикали α увеличивается по мере роста φ и достигает при $\varphi_x = 180^{\circ}$ максимального значения

$$\alpha_{\max} = 45^{\circ} + z^{\circ}/2. \quad (9)$$

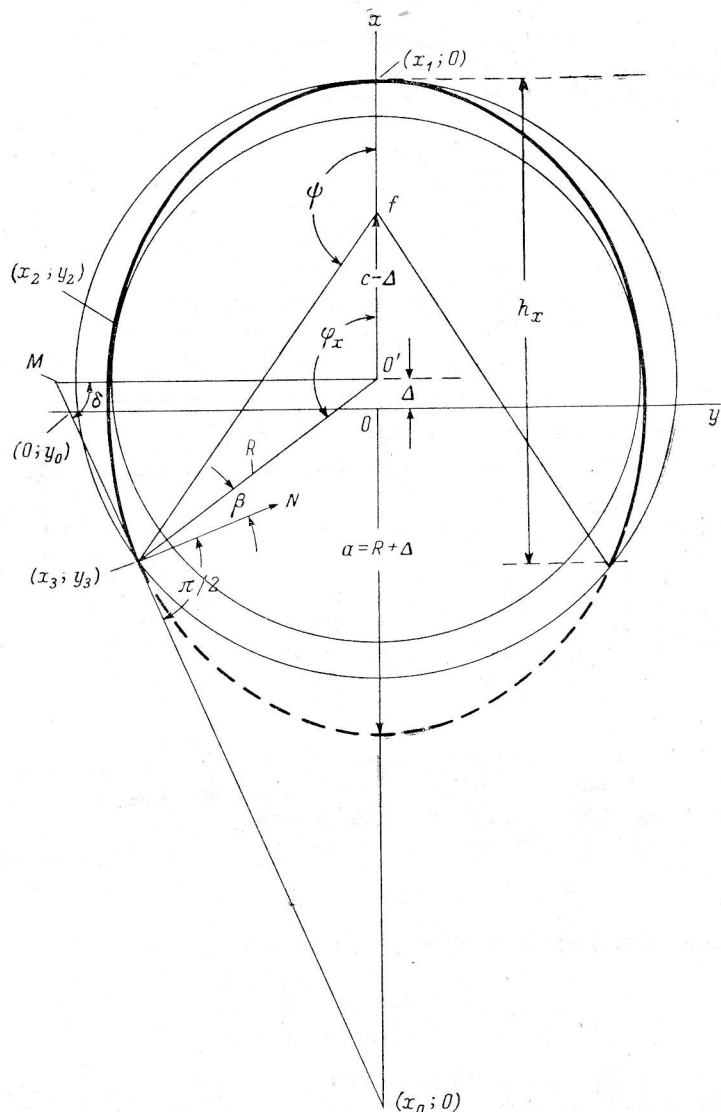


Рис. 4. Третий способ установки отражателя.

Так как на РАТАН-600 $\alpha_{\max} = 53^{\circ}$, то значение предельного зенитного расстояния, при котором возможна установка отражателя по первому способу, $z_{\max} = 16^{\circ}$.

Поворот отражающих элементов по азимуту β увеличивается с ростом φ и достигает максимального значения β_{\max} в точке пересечения эллипса с внутренней окружностью.

Угол β между нормалью к эллипсу и радиусом окружности определяется из треугольника $(0; x_2; y_2; 0; y_0)$, в котором угол

$$\delta = \arctg x_0/y_0, \quad (10)$$

а $x_0 = a^2/x_2$ и $y_0 = b^2/y_2$, как это следует из уравнения касательной к эллипсу

$$\frac{xx_2}{a^2} + \frac{yy_2}{b^2} = 1 \quad (11)$$

через точку $(x_2; y_2)$.

Учитывая, что $b = R \cos z$; $x_2 = r \cos \varphi_x$; $y_2 = r \sin \varphi_x$, имеем:

$$\delta = \arctg [\operatorname{tg} \varphi_x / \cos^2 z]. \quad (12)$$

Зная угол δ , найдем наибольшее значение угла

$$\beta_{\max} = \delta - \varphi_x. \quad (13)$$

Расстояние от центра кольца до фокуса f

$$c = R \sin z. \quad (14)$$

Углы облучения секторов $2\psi_{\text{в}}$; $2\psi_{\text{н}}$ определяются из выражения

$$\operatorname{tg} \psi_{\text{в, н}} = \frac{\sin \varphi_x}{\cos \varphi_x \mp (R/r) \sin z}. \quad (15)$$

Значения величин $2\varphi_x$, α_{\max}° , β_{\max}° , $2\psi_{\text{в}}^\circ$, $2\psi_{\text{н}}^\circ$, $N\%$, а также c/R , d_x , l_y , h_x в зависимости от зенитного расстояния помещены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

z	$2\varphi_x$	α_{\max}	β_{\max}	$2\psi_{\text{в}}$	$2\psi_{\text{н}}$	c/R	$N, \%$	$d_x, \text{ м}$	$l_y, \text{ м}$	$h_x, \text{ м}$
4.8°	180°						100	575	575	287.5
5	145	47°	7.5	155°	136°	0.09	81	574	548	201
6	105						58	573	456	113
7	86						48	572	392	77
8	73						41	571	342	57
9	64						36	570	304	44
10	57	50	44'	68	48	0.17	31	568	272	35
16	34	53	1°18'	46	27	0.28	19	555	168	13

Из табл. 1 видно, что предельное значение $z_{\max} = 16^\circ$ ограничивается максимальным углом наклона отражающих элементов $\alpha_{\max} = 53^\circ$, в то время как достигаемые значения β и c/R меньше предельных.

2. При втором способе установки отражателя, когда $b = r$ и $a > R$ (рис. 3), параметр эллипса

$$p = b^2/a = r \cos z. \quad (16)$$

Дуги эллипса образуют интерферометр с базой $d_y = 2r$ и двумя антеннами с раскрывом

$$\left. \begin{aligned} l_x &= 2R \sin \varphi_y \cos z \\ h_y &= r - R \cos \varphi_y \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

и стрелкой

где φ_y — угол из центра, под которым видна половина дуги эллипса (рис. 3).

Угол φ_y может быть найден при совместном решении уравнений эллипса и внешней окружности для определения координат точки их пересечения:

$$\sin \varphi_y = \pm \sqrt{1 - (r/R)^2} / \sin z. \quad (18)$$

Геометрический коэффициент использования площади антенны

$$N\% = (4\varphi_y/2\pi) \cdot 10^2. \quad (19)$$

Углы из фокуса $\psi_{\text{в}}$ и $\psi_{\text{н}}$ между осью x и направлением на точки пересечения эллипса и внешней окружности ($\pm x_2$; $\pm y_2$) определяются из выражения

$$\operatorname{tg} \psi_{\text{в, н}} = \frac{\cos \varphi_y}{\sin \varphi_y \pm c/R}, \quad (20)$$

где относительное расстояние от центра до фокуса

$$c/R = (a/R) \sin z = (r/R) \operatorname{tg} z. \quad (21)$$

Так как у РАТАН-600 максимальное значение $c/R = 0.54 = (r/R) \operatorname{tg} z$, то

$$z_{\max}^{\circ} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 0.54 (R/r) = 28^{\circ}45'. \quad (22)$$

Угол облучения дуг эллипса

$$\psi = \pi - (\psi_{\text{в}} + \psi_{\text{н}}). \quad (23)$$

Максимальный угол наклона отражающих элементов к вертикали α_{\max} достигается в точках пересечения эллипса с внешней окружностью с координатами $(-x_2; \pm y_2)$, где угол из фокуса между направлением на эти точки и осью x равен $\psi_{\text{н}}$.

Как это следует из [5], угол

$$\alpha_{\max} = \operatorname{arc} \sin \left[\frac{\cos z}{\sqrt{2(1 + \cos \psi_{\text{н}} \sin z)}} \right]. \quad (24)$$

Максимальный поворот отражающих элементов по азимуту

$$\beta_{\max} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} [1/(\operatorname{tg} \varphi_y \cos^2 z)] - (\pi/2 - \varphi_y). \quad (25)$$

Значения величин $2\varphi_y^{\circ}$, α_{\max}° , β_{\max}° , ψ° , $N\%$, а также c/R , d_y , l_x , h_y представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

z	$2\varphi_y$	α_{\max}	β_{\max}	ψ	c/R	$N, \%$	$d_y, \text{м}$	$l_x, \text{м}$	$h_y, \text{м}$
4.8°	180°	45°	0	180°	0	100	575	575	287.5
5	145	43	7'5	145	0.09	80	575	548	200
10	57	42	44'	56	0.18	32	575	271	34
15	37	40	1°10'	35	0.27	21	575	177	14
20	28	38	1°40'	24	0.36	15.5	575	131	7.6
28.45	20	33	2°14'	15.5	0.54	11	575	88	3.4

3. При третьем способе установки отражателя центр кольца смещен относительно центра эллипса на величину Δ (рис. 4).

Величину Δ можно найти из условия, что эллипс с большой полуосью $a = R + \Delta$ касается внутренней окружности. Решая совместно уравнения эллипса и окружности и потребовав, чтобы в точке касания $(x_2; y_2)$ корни уравнений совпадали, получим:

$$\Delta = R \operatorname{tg}^2 z (1 - \sqrt{1 - (r/R)^2} / \sin z). \quad (26)$$

Параметр эллипса в этом случае

$$p = b^2/a = (R + \Delta) \cos^2 z = R (1 - \sqrt{1 - (r/R)^2} \sin z). \quad (27)$$

Координаты общих точек эллипса с внешней окружностью, а также угол φ_x из центра кольца между осью x и направлением на точки пересечения $(x_3; y_3)$ найдем при совместном решении уравнений эллипса и наружной окружности:

$$\begin{aligned} x_{1,3} &= \Delta (1 \pm \cos^2 z) / \sin^2 z \mp R; \\ y_{1,3} &= \pm \sqrt{R^2 - (x - \Delta)^2}. \end{aligned} \quad (28)$$

При нижних знаках $x_1 = R + \Delta$; $y_1 = 0$, что соответствует точке касания эллипса с внешней окружностью в конце полуоси a , верхним знакам соответствуют точки пересечения с ней. Координата x точки пересечения относительно центра кольца

$$x'_3 = x_3 - \Delta = 2\Delta \operatorname{ctg}^2 z - R = R (1 - 2\sqrt{1 - (r/R)^2} / \sin z); \quad (29)$$

$$\cos \varphi_x = x'_3/R = 1 - 2\sqrt{1 - (r/R)^2} / \sin z. \quad (30)$$

Геометрический коэффициент использования поверхности отражателя

$$N\% = (2\varphi_x^\circ/360) \cdot 10^2. \quad (31)$$

Угол ψ из фокуса между осью x и направлением на точку пересечения эллипса с внешней окружностью $(x_3; y_3)$ определяется выражением

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{R \sin \varphi_x}{R \cos \varphi_x + (c - \Delta)} = \frac{\sin \varphi_x}{\cos \varphi_x + (1 + \Delta/R) \sin z - \Delta/R}, \quad (32)$$

так как относительное расстояние от центра кольца до фокуса равно

$$(c - \Delta)/R = (1 + \Delta/R) \sin z - \Delta/R. \quad (33)$$

Относительное расстояние $(c - \Delta)/R$ растет с зенитным углом z и может превысить предельное для РАТАН-600 значение, равное 0.54.

Угол облучения эллипса из фокуса

$$2\psi = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\sin \varphi_x}{\cos \varphi_x + (1 + \Delta/R) \sin z - \Delta/R}. \quad (34)$$

Наклон отражающих элементов максимальный в точках $(x_3; y_3)$ и определяется выражением [5]

$$\alpha_{\max} = \operatorname{arc} \sin \frac{\cos z}{\sqrt{2(1 + \cos \psi \sin z)}}. \quad (35)$$

Наибольший поворот отражающих элементов по азимуту β_{\max} также наступает в точках $x_3; y_3$.

Угол β_{\max} находится с помощью треугольника $o'; (x_3; y_3); M$ (рис. 4), в котором x_0 и y_0 — координаты точек пересечения касательной к эллипсу в точке $(x_3; y_3)$ с осями координат.

В треугольнике $o'; (x_3; y_3); M$ угол

$$\delta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (x_0/y_0) = \operatorname{arc} \operatorname{tg} [y_3/(x_3 \cos^2 z)]. \quad (36)$$

Угол

$$\beta = \varphi_x - \delta. \quad (37)$$

Разрешающая сила антенны в плоскости, содержащей источник и ось ou , определяется как

$$l_y = 2R \sin \varphi_x \text{ при } \varphi_x \leq \pi/2; \quad (38)$$

$$l_y = 2b = 2(R + \Delta) \cos z \text{ при } \varphi_x > (\pi/2 + \operatorname{arc} \sin \Delta/R), \quad (39)$$

а в вертикальной плоскости она определяется стрелкой

$$h_x = R(1 - \cos \varphi_x) \cos z. \quad (40)$$

Основные характеристики отражателя, установленного третьим способом [$2\varphi_x^\circ$, α_{\max}° , β_{\max}° , $2\psi^\circ$, $(c - \Delta)/R$, $N\%$, l_y , h_x], помещены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3

z	$2\varphi_x$	α_{\max}	β_{\max}	2ψ	$\frac{c - \Delta}{R}$	$N, \%$	$l_y, \text{ м}$	$h_x, \text{ м}$
5°	310°	47°	0.2°	314°	0.09	86	575	547
10	175	45	0.7	193	0.16	49	575	271
20	118	39	1.39	149	0.28	33	494	131
40	84.5	29	2.06	130	0.42	23	388	57
60	72	17	2.2	125	0.50	20	339	27.5
80	68	6	2.6	124	0.54	19	322	8.5

Заключение. Как видно из табл. 1 и 2, при небольших зенитных углах ($z < 10^\circ$) положение облучателя для первого и второго способа установки отражателя можно совместить, создавая таким образом крестообразный интерферометр. Это позволяет улучшить симметрию диаграммы направленности и повысить геометрический коэффициент использования площади отражателя.

Применение рассмотренных выше способов установки отражателя требует разработки специальных первичных облучателей, которые могли бы обеспечить достаточно высокий коэффициент использования площади антенны.

Для работы в призенитной области ($z \leq 4.8$) можно использовать обычный первичный облучатель, например скалярный рупор [6]. Вертикальное распределение облучения отражающего элемента, которое получается при этом первичном облучателе, изображено на рис. 5. Как видно из графика, облучение несимметрично. Максимум облучения — на высоте 1.5 м от нижнего края. Уровень облучения нижнего края (~ 0.375) слишком велик, что приведет к переоблучению отражателя и увеличению шумового фона от излучения земли.

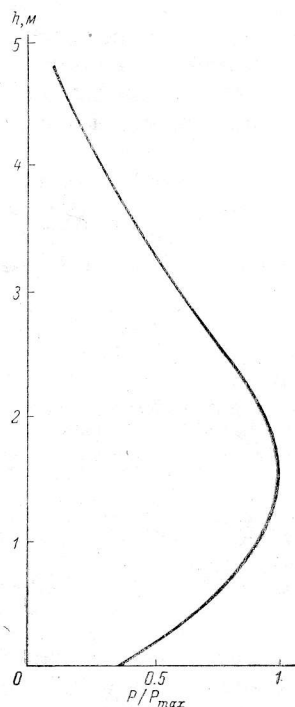


Рис. 5. Вертикальное распределение облучения отражающего элемента при первичном облучателе — «скалярный» рупор.

Поэтому и для наблюдений в призенитной области целесообразно разработать специализированный облучатель, создающий симметричное облучение.

Литература

1. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Парийский Ю. Н., Есепкина Н. А. Радиотелескоп РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 3—12.
2. Есепкина Н. А., Парийский Ю. Н. Особенности работы антенн переменного профиля при наблюдении вблизи зенита. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 58—62.
3. Бахвалов Н. С., Васильева Л. Г., Есепкина Н. А., Соболева Н. С., Темирова А. В. Поляризационные характеристики антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1973, 5, с. 135—149.
4. Амстиславский А. З., Копылов А. И., Просмушкин М. И. Конструкция отражающих элементов и облучателя радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 89—96.
5. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л. Новый радиотелескоп высокой разрешающей силы. — ИТЭ, 1959, 2, с. 19—24.
6. Парийский Ю. Н., Темирова А. В., Тимофеева Г. М. Повышение эффективности Большого Пулковского радиотелескопа с помощью «скалярного» рупора. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1973, 5, с. 132—134.

Поступила в редакцию 01.04.81