

КОРРЕКЦИЯ АБЕРРАЦИЙ ЗЕРКАЛА С КРУГОВОЙ СИММЕТРИЕЙ

Н. Л. Кайдановский

Показана возможность компенсации aberrаций кругового цилиндра при помощи вторичного зеркала — параболического цилиндра и первичного линейного облучателя с распределенной задержкой.

A possibility of aberration compensations of the circular symmetry mirror using parabolic cylinder supplied with a linear feed of a distributed time delay is considered.

Проектом радиотелескопа РАТАН-600 предусмотрена возможность сопровождать источники излучения в течение $\pm 1-2$ час. от верхней кульминации с помощью перископа и облучателя, движущегося по круговому пути [1].

Главное зеркало радиотелескопа (южный сектор РАТАН-600) — цилиндр с вертикальной образующей — может иметь параболическое или круговое сечение. При параболическом сечении сопровождение источников требует, помимо движения облучателя и наклона перископа в соответствии с высотой источника, также поворота оси параболического отражателя при изменении азимута источника.

При круговом сечении сопровождение источников осуществляется проще, так как не требует изменения профиля отражателя.

Аберрации зеркала с круговой симметрией при радиусе радиотелескопа 288 м ограничивают его раскрыв величиной $A_m \approx 35 \sqrt[4]{\lambda}$ см, что значительно меньше апертуры отражателя параболического сечения (325 м). Для увеличения апертуры главного зеркала с круговой симметрией была рассчитана форма специального вторичного зеркала облучателя, корректирующего его aberrацию [2].

Корректирующее зеркало при горизонтальном размере ~ 12 м, глубине ~ 4 м и фокусном расстоянии ~ 6 м позволяло расширить апертуру отражателя до ~ 200 м.

Технологические трудности изготовления точной корректирующей поверхности двойной кривизны вынудили к поискам других технических решений.

С этой целью рассмотрена возможность использования типового облучателя РАТАН-600 в виде несимметричного параболического цилиндра с горизонтальной образующей [3], снабженного линейным первичным облучателем на его фокальной прямой, компенсирующим aberrации. Одномерность такого компенсатора aberrаций должна значительно уменьшить трудности его изготовления.

Преобразование волн параболическим цилиндром. Рассмотрим преобразование цилиндрической волны с вертикальной образующей зеркалом облучателя — параболическим цилиндром с горизонтальной фокальной прямой (рис. 1). Из равенства углов падения и отражения $\gamma = \gamma_1$, а также углов $\beta = \beta_1$, образованных нормалью an с фокальным радиусом-векто-

ром ae и диаметром параболы bn , следует, что $\alpha = \alpha_1$, плоскость ae перпендикулярна к вертикальной плоскости aen и углы ae и fen — прямые.

Отсюда и исходя из свойств параболы имеем:

$$af = ae / \cos \alpha = (h^2/4F + F) \cdot 1/\cos \alpha = (Ob + df) \cdot 1/\cos \alpha = bc + cf = bf_m. \quad (1)$$

Таким образом, горизонтальные лучи, принадлежащие одному вертикальному сечению плоскости фронта волны, например 3 и 4, после отражения от параболического цилиндра (лучи 5 и 6) складываются в равных фазах в точке фокальной прямой с координатами:

$$x = F; \quad y = Od = (h^2/4F + F) \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

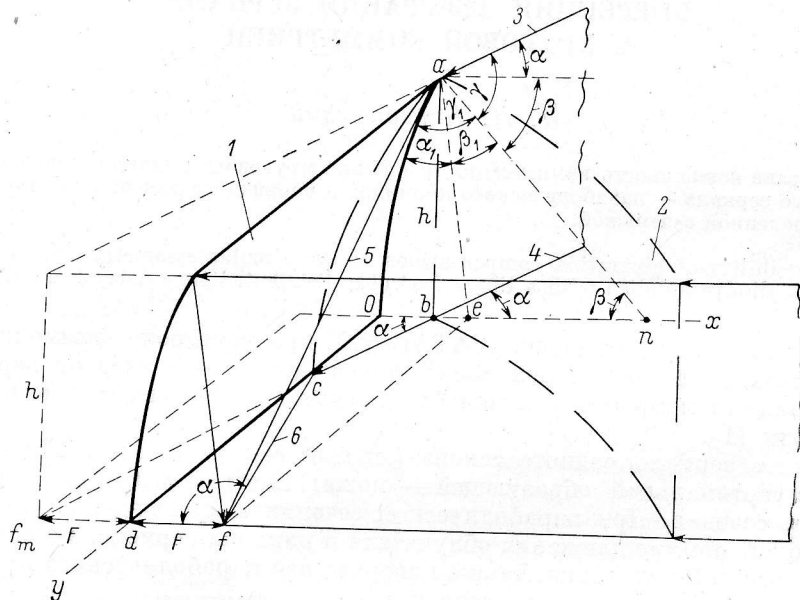


Рис. 1. Отражение волны с цилиндрическим фронтом от параболического цилиндра.

1 — вторичное зеркало радиотелескопа — параболический цилиндр; 2 — фронт падающей волны с вертикальными образующими; 3, 4 — падающие лучи; 5, 6 — отраженные лучи; Od — вершина параболического цилиндра; F — фокусное расстояние; ef — фокальная прямая; ae — фокальный радиус-вектор; an — нормаль к параболе; γ и γ_1 — углы падения и отражения луча 3, α — угол падения луча 4.

Если горизонтальные сечения фронта волны 2 — окружности с центрами, лежащими на вертикали в точке мнимого фокуса f_m с координатами:

$$x = -F; \quad y = (h^2/4F + F) \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

т. е. фронт волны — круговой цилиндр, то он после отражения от параболического цилиндра 1 преобразуется в сферический с центром в точке f , где все лучи сложатся в одной фазе [4]. Фронт волны в виде кругового цилиндра с вертикальной осью образуется после отражения плоской волны от поверхности эллиптического конуса [5]. При отражении плоской волны от кругового цилиндра форма фронта отраженной волны будет изменяться по мере распространения, однако его сечения плоскостями, параллельными образующим зеркала, будут оставаться прямыми.

Поэтому горизонтально распространяющаяся плоская волна после отражения от главного зеркала РАТАН-600 — кругового цилиндра будет иметь изменяющийся фронт 2 с некруговыми горизонтальными сечениями, а плоскости его вертикальных сечений при разных углах α будут пересекать мнимую фокальную прямую в различных точках.

После отражения от параболического цилиндра лучи, лежащие в плоскостях различных вертикальных сечений падающего фронта, будут фокусироваться в различных точках фокальной прямой ef . При этом фаза сфокусированных волн будет функцией координаты y в отличие от случая падения на параболический цилиндр плоской волны, когда волны, сфокусированные на фокальной прямой, синфазны.

Волны, сфокусированные на фокальной прямой, можно принять с помощью линейного облучателя.

Для синфазного сложения волн, падающих на различные точки линейного облучателя, необходимо ввести зависящие от координаты y временные задержки.

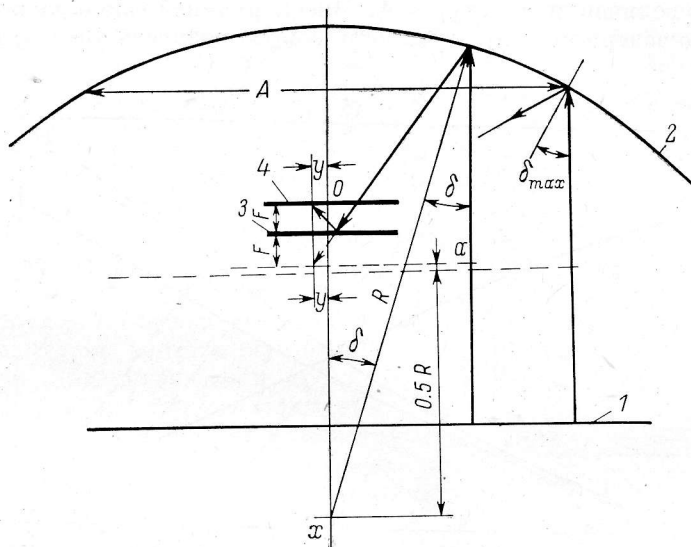


Рис. 2. Фокусировка волн, отраженных перископом и круговым цилиндром на фокальной прямой параболического цилиндра.

1 — перископ; 2 — главное зеркало — круговой цилиндр; 3 — вершина вторичного зеркала — параболического цилиндра; 4 — линейный облучатель на фокальной прямой параболического цилиндра; F — фокальное расстояние параболического цилиндра; R — радиус главного зеркала; a — смещение мнимой фокальной прямой параболического цилиндра от параксиального фокуса главного зеркала — $0.5 R$; δ — угол падения на главное зеркало лучей, отраженных перископом; y — координата фокуса лучей, падающих на главное зеркало под углом δ .

Аберрации кругового цилиндра и компенсация разности фаз в линейном облучателе вторичного зеркала. Для нахождения зависимостей координаты y (δ) и разности хода Δ (δ) лучей, падающих на главное зеркало под углом δ , с аксиальным лучом достаточно рассмотреть ход лучей в горизонтальной плоскости, проходящей через вершину параболического цилиндра и фокальную прямую (рис. 2). Из рис. 2 следует:

$$y/R = \operatorname{tg} 2\delta (\cos \delta - b) - \sin \delta, \quad (4)$$

где $b = 0.5 + a/R$. Выберем значение b из условия, что $y = 0$; при $\delta = \delta_{\min} = c/R$, определяемом затенением главного зеркала вторичным зеркалом облучателя шириной $2C$,

$$b = \cos \delta_{\min} - \sin \delta_{\min} / \operatorname{tg} 2\delta_{\min}. \quad (5)$$

Если смещение облучателя относительно параксиального фокуса $a = 0$, то $b = 0.5$ и средняя часть фокальной прямой длиной

$$2y_{\min} = 2R [\sin \delta_{\min} - \operatorname{tg} 2\delta_{\min} (\cos \delta_{\min} - 0.5)] \quad (6)$$

не будет облучаться.

Из рис. 2 следует также, что относительная разность хода лучей, падающих на главное зеркало под углом δ , и осевым лучем ($\delta=0$):

$$\Delta/R = \cos \delta - 2 + b + (\cos \delta - b)/\cos 2\delta. \quad (7)$$

Уравнения (4) и (7) выражают в параметрической форме зависимость разности хода Δ от координаты y . Графически эта зависимость для радиотелескопа РАТАН-600 с радиусом $R=288$ м представлена на рис. 3, на котором нанесены также предельные углы δ_{\max} и апертура главного зеркала A , соответствующие наибольшим значениям ширины линейного облучателя $2y_{\max}$.

На графике рис. 3 виден быстрый рост разности хода при относительно медленном увеличении апертуры A . Внеся в линейный облучатель распределенную задержку $l(y)$, компенсирующую разность хода лучей $\Delta(y)$,

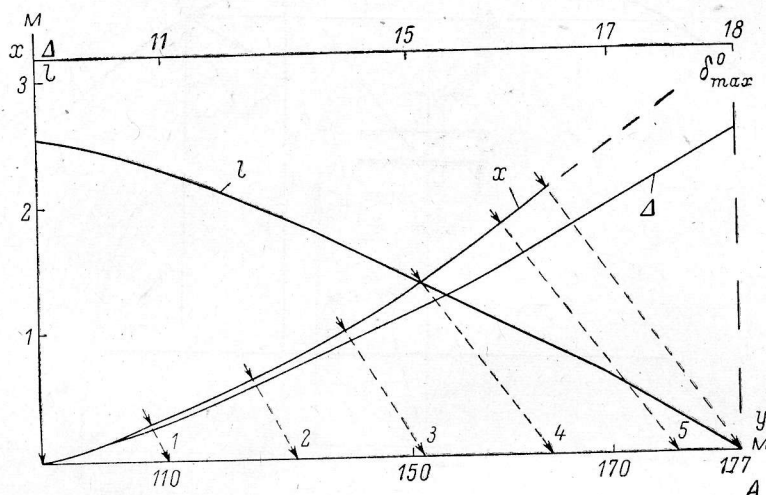


Рис. 3. Зависимость от координаты y на фокальной прямой: разности хода Δ , м, задержки в первичном облучателе l , м.

$x(y)$ — сечение фронта волны, падающей на первичный облучатель.

можно синфазно сложить падающие на облучатель волны с фронтом $x(y)$, также изображенным на рис. 3. В режиме излучения линейный облучатель с распределенной задержкой l должен создать фронт волны в виде поверхности от вращения кривой $x(y)$ вокруг фокальной прямой. При облучении несимметричного параболического цилиндра максимум диаграммы направленности первичного линейного облучателя должен быть направлен в область среднего горизонтального сечения вторичного зеркала.

Фронт волны $x(y)$, преобразованный параболическим цилиндром и изменяющийся по мере распространения, станет плоским после отражения от главного зеркала кругового цилиндра.

Одномерный компенсатор aberrации кругового цилиндра. Линейный облучатель с распределенной задержкой, создающий необходимый профиль фронта волны $x(y)$, можно выполнить многими способами, например при помощи фазовых антенных решеток (ФАР), отрезков целевых волноводов, создающих наклонный фронт и соединенных между собой через сосредоточенные задержки, и, наконец, с помощью сегментной антенны со специальным профилем отражателя (рис. 4).

Длина входной щели сегментной антенны определяется выбранной величиной апертуры главного зеркала A и равна максимальному значению координаты y_{\max} на фокальной прямой. Ширина щели b соответствует поперечному размеру фокального пятна, она определяет отношение длин

волн в сегментной антенне и свободном пространстве $-\lambda_b/\lambda_0$. Координаты точки на конце отражающей поверхности:

$$x_{c. \max} = y_{\max} (\cos \psi_{\max} \cos \epsilon_{\max}) / \sin (\psi_{\max} - \epsilon_{\max}); \quad (8)$$

$$y_{c. \max} = y_{\max} [1 + \cos \psi_{\max} \sin \epsilon_{\max}] / \sin (\psi_{\max} - \epsilon_{\max}), \quad (9)$$

где ψ_{\max} , ϵ_{\max} и y_{\max} — соответственно максимальные значения угла облучения ψ , угла преломления $\epsilon = \arcsin (\lambda_b/\lambda_0 \sin 2\delta)$ и координаты y на фокальной прямой.

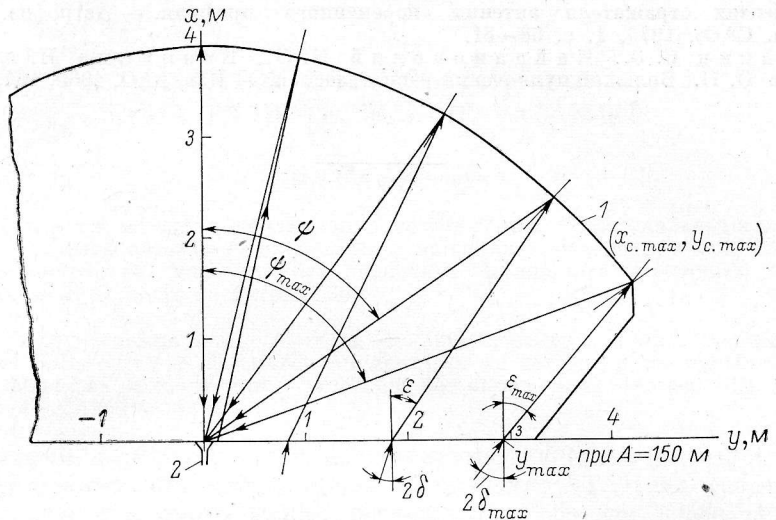


Рис. 4. Прием волн, сфокусированных параболическим цилиндром на фокальной прямой с помощью сегментной антенны.

1 — профиль отражающей поверхности сегментной антенны; 2 — приемный рупор; ψ — угол облучения рупора; 2δ — угол падения; ϵ — угол преломления; y — координата точки на фокальной прямой.

Профиль отражающей поверхности можно определить из условия компенсации разности хода

$$\Delta/\lambda_0 + x_c/\lambda_b (1/\cos \epsilon + 1/\cos \psi) = 2x_{c. o}/\lambda_b, \quad (10)$$

откуда

$$[x_c = [(2x_{c. o} - \Delta\lambda_b/\lambda_0)^2 - y^2]/2 [y \operatorname{tg} \epsilon + (2x_{c. o} - \Delta\lambda_b/\lambda_0)/\cos \epsilon]; \quad (11)$$

$$y_c = y + x_c \operatorname{tg} \epsilon, \quad (12)$$

где глубина сегментной антенны

$$x_{c. o} = 0.5 [\Delta_{\max} \lambda_b/\lambda_0 + x_{c. \max} (1/\cos \epsilon_{\max} + 1/\cos \psi_{\max})]. \quad (13)$$

Профиль сегментной антенны, изображенный на рис. 4, получен для апертуры главного зеркала $A=150$ м, ширина сегментной антенны $b=0.8 \lambda_0$ и угла облучения $2\psi_{\max}=140^\circ$.

Как видно из рис. 4, глубина сегментной антенны, даже для $A=150$ м, достигает значения $x_{c. o}=4$ м, что влечет технические трудности изготовления и размещения его на фокальной прямой параболического цилиндра, особенно несимметричного, так как в последнем случае необходим поворот плоскости приемной щели вокруг фокальной прямой на значительный угол.

Заключение. Линейные облучатели типа ФАР и сегментная антенна могут иметь близкие значения полосы частот и энергетических потерь, но ФАР имеет меньшие поперечные размеры и более гибка в настройке. Параметры обоих облучателей не зависят от фокусного расстояния параболического цилиндра.

Список литературы

1. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Парийский Ю. Н., Есепкина Н. А. Радиотелескоп РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 3—12.
 2. Вавилова И. В. К вопросу расчета корректирующего зеркала в двухзеркальных антеннах круговой симметрии. — В кн.: Антенны. М., «Связь», 1969, вып. 5, с. 72—81.
 3. Амстиславский А. З., Копылов А. И., Просмушкин М. И. Конструкция отражающих элементов и облучателя радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 89—96.
 4. Спитковский В. Н. Распределение облучения на вторичном зеркале и элементах отражателя антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1970, 1, с. 68—81.
 5. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А., Шиврис О. Н. Большой пулковский радиотелескоп. — Изв. ГАО, 1960, 164, с. 3—25.
-