

АНТЕННА ДЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ ТИПА КРУГОВОЙ ПЕРИСКОП

Н. Л. Кайдановский

Рассмотрена возможность существенного упрощения антенны переменного профиля (АПП) путем применения первичного облучателя — линейной фазированной решетки.

A possibility is considered of essential simplification of the variable profile antenna (VPA) by using the primary feed — linear phased array.

Антенна переменного профиля АПП представляет собой двухзеркальную систему, у которой таутохронность собираемых в фокусе волн достигается только вследствие геометрических свойств зеркал.

Главное зеркало, составленное из многочисленных отражающих элементов, преобразует падающую на него плоскую волну в цилиндрическую с вертикальной образующей. Вторичное зеркало преобразует цилиндрическую волну в сферическую, в центре которой расположен первичный облучатель [1, 2]. Подобно обычным зеркальным полноповоротным антеннам АПП диапазоны, позволяют вести длительные наблюдения источников с сопровождением [3, 4], а также картографировать их за счет движения диаграммы направленности при смещении облучателя [5]. АПП пригодны также для поляризационных наблюдений [6].

К их особым достоинствам относятся:

1. Большая приемная площадь при избыточном разрешении [7].
2. Высокая двумерная синтезированная разрешающая сила, отвечающая горизонтальному размеру антенны, при сплошном спектре пространственных частот [7].
3. Диапазонность при одновременной регистрации в режиме прохождения спектра волн, отличающихся по длине в десятки раз.
4. Многолучевость, позволяющая наблюдать одновременно несколько источников в различных направлениях.
5. Сбор излучения со всего кольцевого главного зеркала от источников призенитной области.
6. Расположение приемной (или локационной) аппаратуры вблизи земли в комфортных условиях.

Недостатком АПП является сложность расчлененного первичного зеркала, каждый отражающий элемент которого имеет три степени свободы, требующие применения трех приводов с механизмами и трех отсчетно-установочных устройств.

Сложность конструкции первичного зеркала порождает соответственно высокие затраты, сложность и трудоемкость обслуживания, а также трудности автоматизации инструмента. С целью упрощения АПП рассмотрена возможность использования расчлененного главного зеркала с отражающими элементами, расположенными на окружности постоянного радиуса и имеющими только одну степень свободы — поворот вокруг горизонтальных осей.

ТАБЛИЦА 1
Значения $\psi(\varphi, h)$

φ	h				
	10°	20°	40°	60°	80°
5°	9°55'	9°42'	8°50'	7°30'	5°52'
10	19 51	19 24	17 42	14 59	11 44
15	29 46	29 05	26 36	22 26	17 35
20	39 41	38 45	35 35	29 51	23 24
30	59 30	58 02	52 31	44 29	34 59
40	77 16	77 09	69 30	58 45	46 25

Поворот отражающих элементов по углу места должен обеспечить горизонтальность перископически отраженных лучей, идущих ко вторичному зеркалу. Поскольку профиль такого зеркала не эллиптический, а круговой, оно будет создавать aberrации отраженных пучков, которые должны быть скомпенсированы вторичным зеркалом и первичным облучателем. В таком упрощенном варианте АПП могут сохраняться перечисленные выше достоинства, за исключением широкой диапазонности, которую трудно обеспечить в облучателе, компенсирующем aberrации главного зеркала. Преимуществом рассмотренного варианта АПП по сравнению с обычной является простота в изготовлении и обслуживании, а также в задаче автоматизации управления антенной. Некоторое усложнение должен претерпеть первичный облучатель.

Отражающая поверхность главного зеркала. Форма отражающей поверхности главного зеркала определяется значениями углов наклона $n(\varphi, h)$ отражающих элементов к вертикали в зависимости от их азимута φ и высоты источника h . Для определения углов $n(\varphi, h)$ и $\psi(\varphi, h)$ между отраженным горизонтальным лучом и направлением наблюдения (рис. 1) рассмотрим сферические треугольники прямоугольные — ACB , DEB , DEC и косоугольный ADC . Из треугольников ACB и DEB имеем:

$$\cos \psi = \cos 2\alpha / \cos h; \quad (1)$$

$$\cos(\psi - \varphi) = \cos \alpha / \cos n. \quad (2)$$

Исключая угол падения α , с помощью (1) получим

$$\cos^2 n = (\cos \psi \cos h + 1) / [2 \cos^2(\psi - \varphi)]. \quad (3)$$

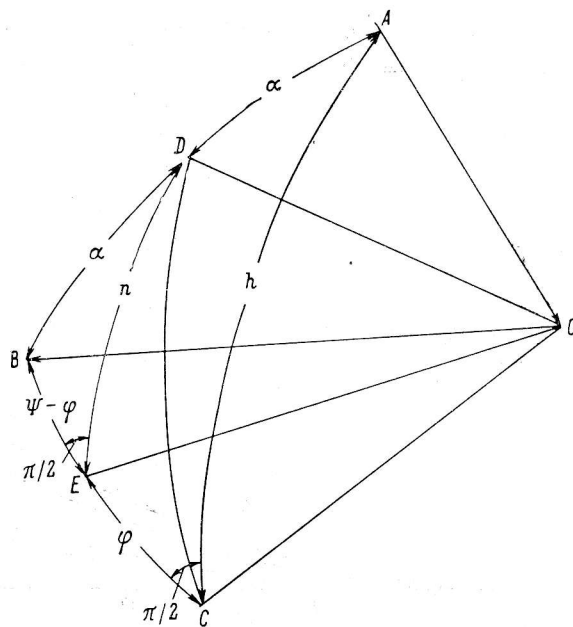


Рис. 1. Отражение лучей от элементов главного зеркала.

O — точка отражающего элемента; AO — падающий луч; OB — отраженный луч; OD — нормаль отражающего элемента; OE — проекция нормали OD на горизонтальную плоскость BOC ; OC — проекция падающего луча AO на горизонтальную плоскость — направление наблюдения; α — углы падения и отражения.

ТАБЛИЦА 2
Значения $n(\varphi, h)$

φ	h				
	10°	20°	40°	60°	80°
0°	5°00'	10°00'	20°00'	30°00'	40°00'
10	5 04	10 08	20 12	30 11	40 04
15	5 10	10 19	20 26	30 26	40 10
20	5 19	10 35	20 46	30 46	40 18
25	5 29	10 56	21 24	31 12	40 28
30	5 45	11 22	22 03	31 43	40 33
40	6 30	12 45	23 48	33 04	41 09

Для определения угла $\psi(\varphi, h)$ рассмотрим треугольники DEC и ADC , из которых получим:

$$\cos \varphi \cos n = \cos h \cos \alpha + (\sin^2 h \cos \psi) / (2 \cos \alpha); \quad (4)$$

исключая $\cos \alpha$, с помощью (2) имеем

$$\cos^2 n = (\sin^2 h \cos \psi) / \{2 \cos(\psi - \varphi) [\cos \varphi - \cos h \cos(\psi - \varphi)]\}. \quad (5)$$

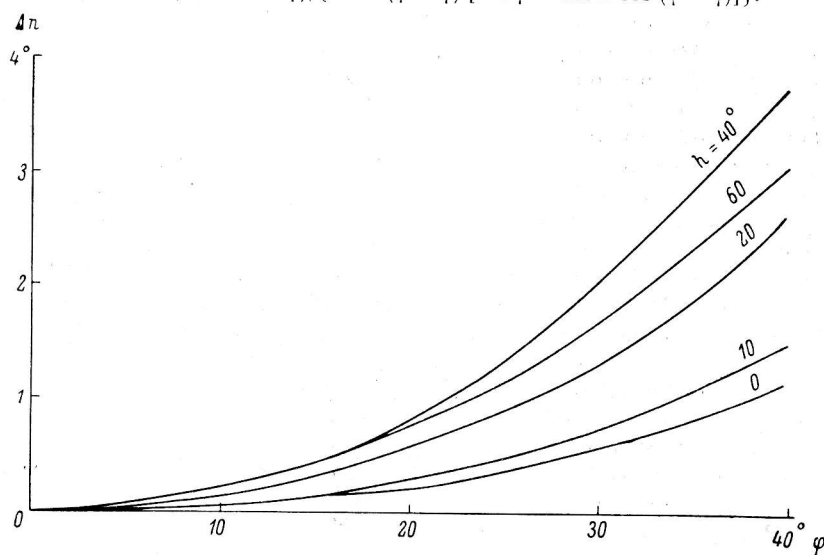


Рис. 2. Разность углов наклона отражающих элементов $\Delta n = n(\varphi) - n(0)$ в зависимости от азимута φ и угла места h .

Из выражений (3) и (5) после преобразований получим для $\cos \psi$ квадратное уравнение

$$\cos^2 \psi + 2 \sin^2 \varphi \cos h \cos \psi + \sin^2 \varphi \cos^2 h - \cos^2 \varphi = 0, \quad (6)$$

из которого определяется угол $\psi(\varphi, h)$. Некоторые значения углов $\psi(\varphi, h)$, определенные из уравнения (6), помещены в табл. 1.

После нахождения $\psi(\varphi, h)$ можно определить значения $n(\varphi, h)$ из уравнения (3). Значения $n(\varphi, h)$ для некоторых углов места h и азимутов отражающих элементов φ представлены в табл. 2, а график $\Delta n(\varphi, h) = n(\varphi, h) - n(0, h)$ — на рис. 2.

Из табл. 2 и рис. 2 видно, что угол наклона образующей отражающего элемента к вертикали $n(\varphi, h)$ увеличивается по мере увеличения азимута φ . При этом изменение углов наклона Δn , также растущее с азимутом, максимально при углах места, близких к $h = 40^\circ$. Изменение наклона Δn при угловой апертуре отражателя $2\varphi_{\max} < 60^\circ$ лежит в пределах 2° .

Отражающие элементы главного зеркала должны принадлежать конусу, образующие которого повернуты относительно плоскости, проходящей через центр в азимуте φ , на угол

$$\varepsilon = \arctg [\operatorname{tg}(\psi - \varphi) \sin n] \quad (7)$$

(рис. 3). Некоторые значения угла ε представлены в табл. 3.

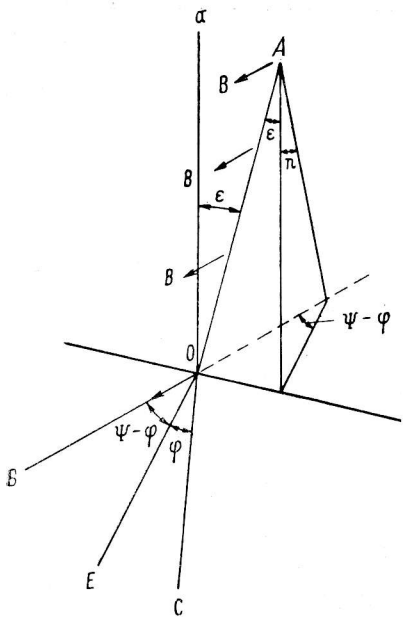


Рис. 3. Угол ε между образующими конического и цилиндрического отражающих элементов.

OC — направление наблюдения; OE — проекция нормали на горизонтальную плоскость BOC ; OB, B — отраженные лучи, лежащие в вертикальной плоскости BOA ; ε — угол между образующими.

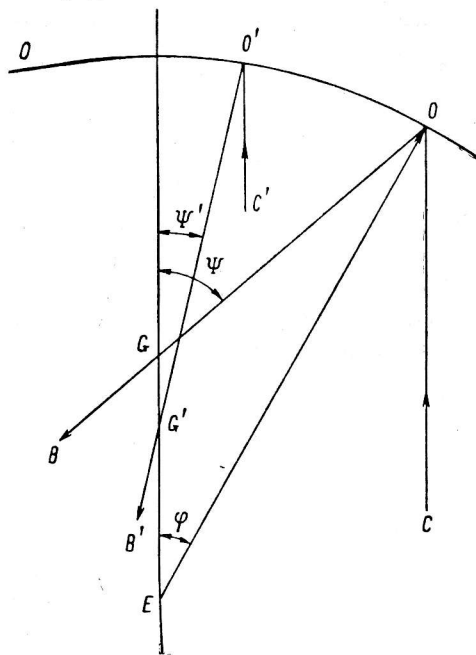


Рис. 4. Продольная абберация главного зеркала.

OO — главное зеркало; OE — радиус зеркала $R=1$; $CO, C'O'$ — проекции падающих лучей на горизонтальную плоскость; $OB, O'B'$ — отраженные лучи; $EG=f=\cos \varphi - \sin \varphi / \operatorname{tg} \psi$.

Как видно из табл. 3, углы $\varepsilon(\varphi, h)$ достаточно малы даже на краях апертуры, что позволяет не поворачивать отражающие элементы на этот угол вокруг нормали и заменить конические элементы цилиндрическими с постоянным радиусом кривизны. Такая замена обеспечивает возможность наблюдения во всех направлениях, однако она ограничивает размеры цилиндрических отражающих элементов.

Оценка линейных размеров и радиуса кривизны по значениям $\Delta n(\varphi, h)$ и $\varepsilon(\varphi, h)$ показывает, что они практически не отличаются от таковых для АПП [8, 9].

Вторичное зеркало. Первичное зеркало, у которого отражающие элементы установлены в соответствии с выражением (3), создает продольную абберацию, вследствие чего горизонтальные пучки, отраженные различными отражающими элементами, пересекают осевую вертикальную плоскость на различных относительных расстояниях $f(\varphi, h)$ от центра E (рис. 4).

Как следует из рис. 4, при радиусе $R=1$

$$f(\varphi, h) = \cos \varphi - \sin \varphi / \operatorname{tg} \psi; \quad (8)$$

$$f(0, h) = 1 - 1/(1 + \cos h). \quad (9)$$

ТАБЛИЦА 3
Значения угла $\varepsilon(\varphi, h)$

φ	h		
	20°	40°	60°
25°	$4^\circ 36'$	$5^\circ 03'$	$4^\circ 18'$
30	$4\ 49$	$6\ 05$	$5\ 35$

ТАБЛИЦА 4
Значения $f(\varphi, h)$

φ	h					
	0°	10°	20°	40°	60°	80°
0°	0.5000	0.4962	0.4845	0.4338	0.3333	0.1479
5	0.5019	0.4981	0.4863	0.4353	0.3342	0.1480
10	0.5077	0.5038	0.4917	0.4385	0.3360	0.1487
15	0.5176	0.5139	0.5006	0.4453	0.3390	0.1492
20	0.5321	0.5275	0.5135	0.4545	0.3437	0.1493
25	0.5517	0.5466	0.5357	0.4669	0.3495	0.1506
30	0.5773	0.5715	0.5540	0.4828	0.3569	0.1515
40	0.6527	0.6440	0.6194	0.5268	0.3757	0.1543

Значения $f(\varphi, h)$ для некоторых φ и h помещены в табл. 4. Из табл. 4 видно, что параксиальные лучи ($\varphi \rightarrow 0$) пересекают ось ближе к центру, чем периферийные ($\varphi > 0$).

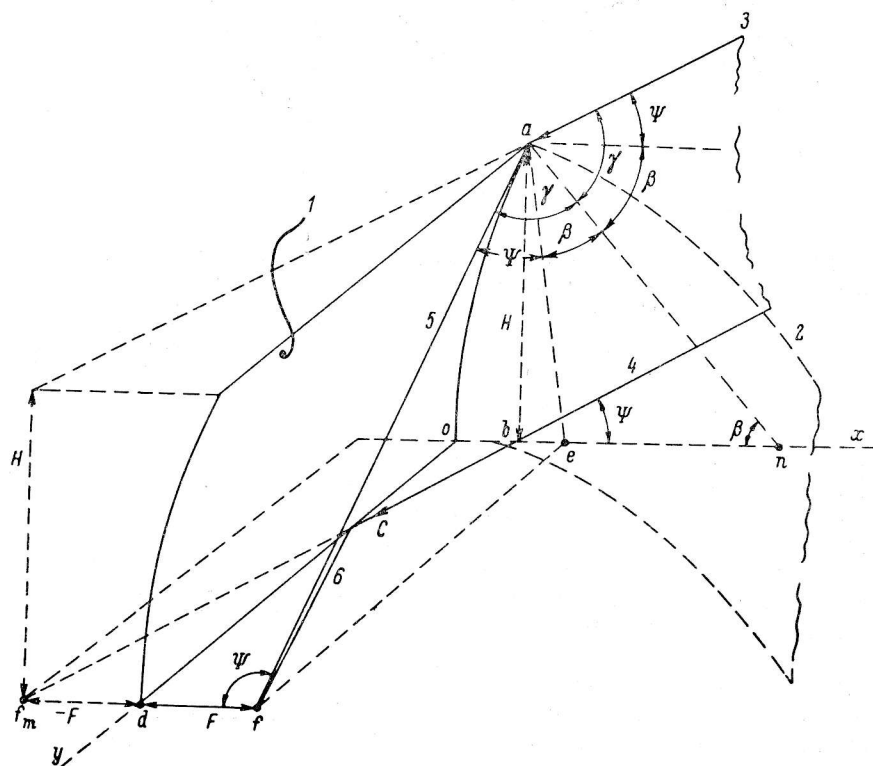


Рис. 5. Отражение волны от параболического цилиндра.

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

Вторичное зеркало может быть установлено в зонах, где лучи, отраженные главным зеркалом, не пересекаются друг с другом, т. е. при $f_{обл} > f_{max}(\varphi_{max}, h)$ (предфокальное расположение) или при $f_{обл} < f_0(0, h)$ (зафокальное расположение) [10].

При изменении высоты h и, следовательно, профиля главного зеркала будет меняться и величина aberrации $f_{\max} - f_0$ от максимальной на горизонте до нуля в зените.

В соответствии с этим должна меняться и компенсация aberrации. Так как изменять профиль вторичного зеркала при изменении h практически невозможно, предлагается использовать в качестве компенсирующего устройства линейную фазированную антенную решетку с регулирующими линиями задержки, расположенную в горизонтальной плоскости на фокальной линии вторичного зеркала. Роль вторичного зеркала сводится к фокусированию на фокальной линии горизонтальных отраженных лучей каждого азимута и принадлежащих к одной плоскости вертикального сечения фронта отраженной волны.

Для этого вертикальные сечения вторичного зеркала должны иметь параболический профиль. От профиля его горизонтальных сечений будет зависеть форма, расположение и размеры фокальной линии.

Простейшим вторичным зеркалом может служить параболический цилиндр с горизонтальными образующими. Не исключена возможность применения зеркал иной формы. В случае параболического цилиндра горизонтальные лучи, принадлежащие одной плоскости вертикального сечения, например 3 и 4 (рис. 5), после отражения от него (лучи 5 и 6) складываются в равных фазах в точке фокальной прямой с координатами

$$x = F; \quad y = od = (H^2/4F + F) \operatorname{tg} \psi, \quad (10)$$

так как

$$\begin{aligned} af &= ae / \cos \psi = (H^2/4F + F) / \cos \psi = \\ &= (ob + df) / \cos \psi = bc + cf = bf_m. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, после отражения от параболического цилиндра горизонтальные лучи, лежащие в различных вертикальных сечениях падающего фронта и пересекающие осевую плоскость антенны в различных местах и под различными углами ψ , будут фокусироваться в различных точках фокальной прямой ef (рис. 5). При этом фаза сфокусированных волн будет функцией координаты фокальной прямой [11].

Горизонтальный размер параболического цилиндра L определяется его фокусным расстоянием F , угловой апертурой главного зеркала $2\varphi_{\max}$ и расстоянием $f_{\text{обл}}$ мнимой фокальной прямой $\cdot x = -F \cdot$ от центра круга.

В случае предфокального расположения облучателя $f_{\text{обл}} > f(\varphi_{\max}, h)$ его мнимая фокальная прямая $\cdot x = -F \cdot$ должна лежать вне области пересечения отраженных лучей, что либо сильно ограничивает апертуру $2\varphi_{\max}$, либо требует очень большого горизонтального размера вторичного зеркала L , тем более что при таком расположении $L > 2y_{\max}$ — длины фокальной прямой.

Предпочтительнее использовать зафокальное расположение $f_{\text{обл}} \leq f(0, h)$. Рассчитанная для этого случая координата фокального пятна на фокальной прямой равна

$$y(\varphi, h) = (f - f_{\text{обл}}) \operatorname{tg} \psi \quad (12)$$

(рис. 6).

Некоторые значения $y(\varphi, h)$ представлены в табл. 5. Из табл. 5 видно, что по мере увеличения высоты h координата фокального пятна $y(\varphi, h)$,

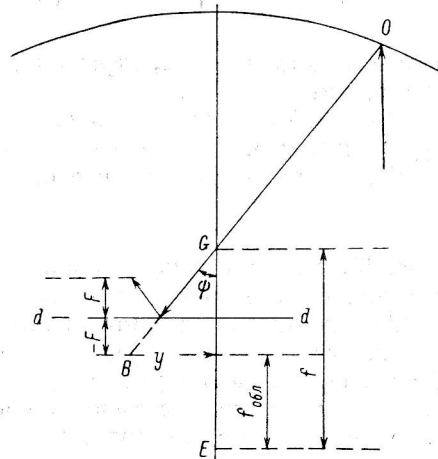


Рис. 6. Координата фокального пятна y .

E — центр окружности главного зеркала; OGB — отраженный луч; dd — вершина параболического цилиндра; F — фокусное расстояние.

ТАБЛИЦА 5
Значения $y(\varphi, h)$

φ	$f_{обл}$					
	0.5	0.4962	0.4844	0.4338	0.3316	0.1420
	$h = 0^\circ$	$h = 10^\circ$	$h = 20^\circ$	$h = 40^\circ$	$h = 60^\circ$	$h = 80^\circ$
5°	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
10	0.0028	0.0027	0.0025	0.0015	0.0012	0.0014
15	0.0102	0.0098	0.0090	0.0057	0.0030	0.0023
20	0.0269	0.0260	0.0233	0.0146	0.0072	0.0032
25	0.0616	0.0593	0.0525	0.0318	0.0136	0.0048
30				0.0640	0.0248	0.0066
40					0.0726	0.0129
50						0.0246

образованного пучком, отраженным элементом главного зеркала с азимутом φ , уменьшается.

На рис. 7 представлен ход угловой апертуры главного зеркала $2\varphi_{\max}(h)$ при двух значениях длины линейного облучателя: $2y_{\max}=0.06$ и $2y_{\max}=0.12$.

Горизонтальный размер вторичного зеркала

$$L = 2(y_{\max} - F \operatorname{tg} \psi) \quad (13)$$

(рис. 6). Принимая из условия удовлетворительного облучения по вертикали $F=0.012$, получим $L=0.035$ при $y_{\max}=0.03$ и $L=0.082$ при $y_{\max}=0.06$.

Таким образом, как это видно из рис. 6, даже при больших размерах вторичного зеркала облучателя апертура $2\varphi_{\max}$ относительно невелика, причем она медленно растет с увеличением размеров вторичного зеркала. Разность хода лучей в точке с координатой y и в середине первичного линейного облучателя (рис. 8)

$$\Delta(\varphi, h) = \sin \varphi / \sin \psi + f / \cos \psi + f_{обл}(1 - 1/\cos \psi) - (1 - \cos \varphi) \cos h - 1. \quad (14)$$

Некоторые значения разности хода $\Delta(\varphi, h)$ помещены в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6
Значения $\Delta(\varphi, h)$

φ	$f_{обл}$					
	0.5	0.4962	0.4844	0.4338	0.3316	0.1420
	$h = 0^\circ$	$h = 10^\circ$	$h = 20^\circ$	$h = 40^\circ$	$h = 60^\circ$	$h = 80^\circ$
10°	0.00073	0.00072	0.00066	0.00035	0.00021	0.00016
15	0.00393	0.00377	0.00336	0.00194	0.00082	0.00041
20	0.01356	0.01308	0.01099	0.00658	0.00254	0.00070
30					0.01369	0.00243
40						0.00654

Для синфазного сложения волн, принятых элементами линейного первичного облучателя, необходимо вносить временные задержки, соответствующие выражению (14).

График хода $\Delta(y)$ для высот $h < 80^\circ$ представлен на рис. 9. Как видно из рис. 9, разность хода $\Delta(y)$ существенно растет с увеличением y и при соответствующем выборе положения облучателя $f_{обл}$ слабо зависит от высоты источника h , по крайней мере до значений $y \approx 0.03$. Это позволяет применять при установке радиотелескопа на разные высоты h линии задержки, регулируемые в малых пределах, что облегчает задачу его автоматизации.

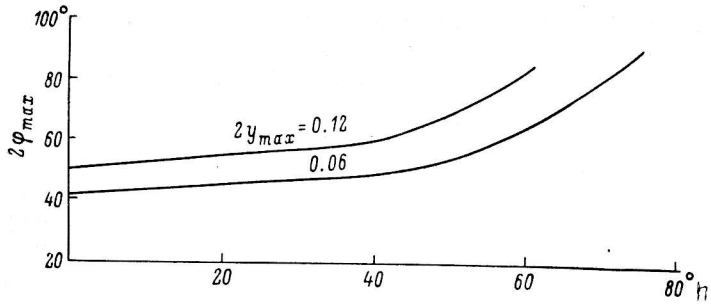


Рис. 7. Зависимость угловой апертуры главного зеркала $2\varphi_{\max}$ от высоты h при $2y_{\max}=0.06$ и 0.12 .

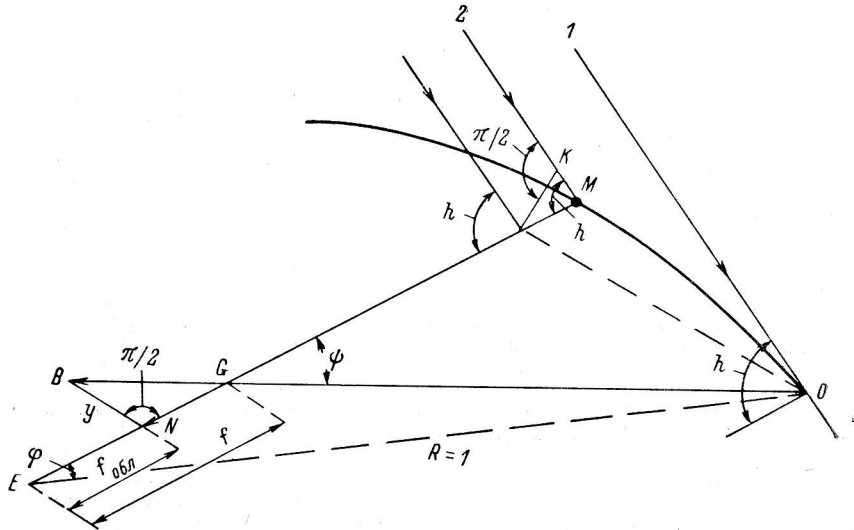


Рис. 8. Разность хода лучей OGB и KMN .

1, 2 — падающие лучи.

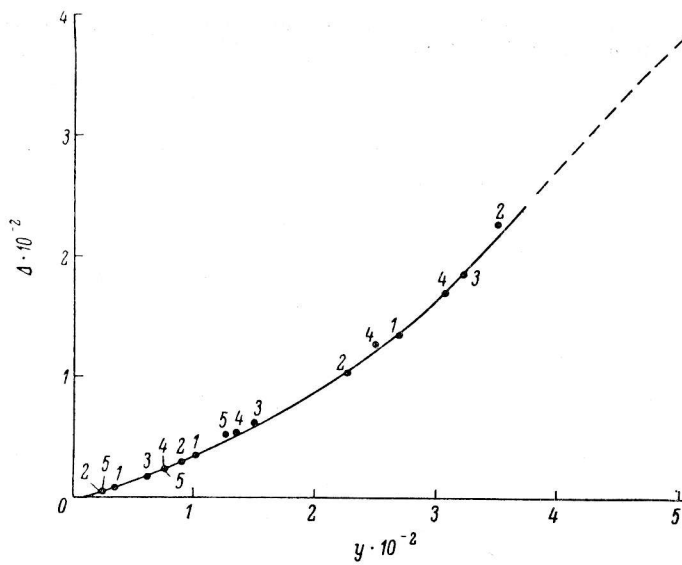


Рис. 9. Зависимость разности хода Δ от координаты фокального пятна y .

	h	$f_{обл}$
1	0°	0.5
2	20	0.484454
3	40	0.433761
4	60	0.331646
5	80	0.12400

Недисперсионная регулируемая линия задержки может быть использована в различных диапазонах волн.

Для высот $h > 80^\circ$ размер облучателя $2y_{\max}$ и разность хода Δ быстро падают, достигая нуля при $h=90^\circ$.

Первичный облучатель в виде антенной решетки способен компенсировать паразитную круговую поляризацию, присущую круговому перископу, так же как и антенне переменного профиля [6]. Для этого поляризация элементарных излучателей решетки должна поворачиваться на угол, обратный углу поворота вектора поляризации на плоскости раскрыва.

Список литературы

1. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л. Новый радиотелескоп высокой разрешающей силы. — ПТЭ, 1959, № 2, с. 19.
2. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А., Шиврис О. Н. Большой пулковский радиотелескоп. — Изв. ГАО, 1960, XXI, 5, 164, с. 3.
3. Кайдановский Н. Л. Сопровождение источников радиоизлучения при наблюдениях с помощью антенны переменного профиля (АПП). — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1975, 7, с. 214.
4. Кайдановский Н. Л. Сопровождение источников радиоизлучения радиотелескопом РАТАН-600 при облучателе, находящемся на радиальном пути. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1976, 8, с. 120.
5. Стоцкий А. А. Аберрации главного зеркала антенны переменного профиля и сканирование диаграммы направленности путем смещения облучателя. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 63.
6. Бахвалов Н. С., Васильева Н. А., Есепкина Н. А., Соболева Н. С., Темирова А. В. Поляризационные характеристики антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1973, 5, с. 135.
7. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1975, с. 111—121.
8. Шиврис О. Н., Парийский Ю. Н. О возможности увеличения разрешающей способности большого пулковского радиотелескопа. — Изв. ГАО, 1970, 185, с. 191.
9. Брауде Б. В., Есепкина Н. А., Кайдановский Н. Л., Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. Выбор размеров отражающих элементов и расчет электрических характеристик радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 40.
10. Вавилова И. В. К вопросу расчета корректирующего зеркала в двухзеркальных антеннах круговой симметрии. — В кн.: Антенны. Вып. 5. М., «Связь», 1969, с. 72—81.
11. Кайдановский Н. Л. Коррекция аберраций зеркала с круговой симметрией. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1978, 10, с. 93.