

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ВТОРИЧНОМ ЗЕРКАЛЕ И ЭЛЕМЕНТАХ ОТРАЖАТЕЛЯ АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

*В. М. Спитковский*

Описывается методика расчета распределения поля на вторичном зеркале и отражателе антенны переменного профиля в приближении геометрической оптики. Учитываются диаграммы направленности первичных облучателей. Проведено сравнение расчета с данными экспериментов на различных длинах волн.

Для улучшения распределения облучения предлагается оптимизация конструкции вторичного зеркала и приведен способ расчета развертки оптимизированной отражающей поверхности.

The method is described of calculations of the field distribution over the secondary mirror and the reflector of the variable profile antenna as a geometrical optics approximation. Allowance is made for the directivity diagrams of primary feeds. A comparison of the calculations with the data of experiments at different wavelengths is made.

For refining the distribution of illumination an optimum design of the secondary mirror is suggested and a method of calculating the evolvent of the optimum reflecting surface is given.

1. В антеннах переменного профиля (АПП) для получения лучшего распределения поля на щитах главного зеркала (отражателя переменного профиля) применяются вторичные зеркала типа параболического цилиндра [1]. Из конструктивных соображений (для размещения нескольких приемников в фокусе вторичного зеркала) оказывается целесообразным применять полуцилиндр. Такое зеркало уже в течение многих лет используется в системе Большого пулковского радиотелескопа (БПР).

Разнообразие радиоастрономических приемников с индивидуальными первичными облучателями, установленных на БПР, привело к необходимости более детального изучения системы первичный облучатель—вторичное зеркало. Основанием для проведения подробных расчетов послужили эксперименты по снятию распределения поля на щитах отражателя переменного профиля.

Расчет проводился в приближении геометрической оптики, в предположении, что поле первичного облучателя на интересующих нас расстояниях убывает пропорционально  $1/R^2$  и, следовательно, диаграмму направленности (ДН) первичного облучателя можно считать сформировавшейся.

Основные геометрические характеристики вторичного зеркала БПР:

Фокусное расстояние . . . . .	1.05 м
Длина дуги параболы . . . . .	3.8 »
Ширина зеркала . . . . .	5.1 »
Высота верхней кромки параболического цилиндра от горизонтальной плоскости, проходящей через фазовый центр первичного облучателя . . . . .	3.0 »

Положение первичного облучателя относительно поверхности вторичного зеркала показано на рис. 1.

Поле вычислялось для 540 точек развернутой на плоскость поверхности вторичного зеркала. Сетка для расчетов была выбрана равномасштабной, поэтому расчетные точки располагались на одинаковом расстоянии друг от друга по обеим координатам плоскости развертки. Рис. 2 поясняет порядок вычислений для  $i$ -й расчетной точки.

Исследование распределения облучения на отражающей поверхности вторичного зеркала проводилось в два этапа: сначала вычислялось распределение поля для некоторых идеализированных первичных облучателей, затем вычислялось распределение поля для каждого из применяемых в настоящее время на БПР первичных облучателей. Полученные результаты сравнивались и в конечном итоге представлены в графической форме, удобной для быстрого получения картины распределения облучения вторичного зеркала для вновь устанавливаемого на антенне первичного облучателя.

В качестве идеализированных первичных облучателей для первого этапа расчета были выбраны:

а) точечный источник (изотропный облучатель);  
 б) источник с распределением поля, близким к гауссовскому, с исходным расположением гауссианы в плоскости  $Q$  (рис. 3, а), и обеспечивающим при сканировании вертикальную ножевую диаграмму направленности;

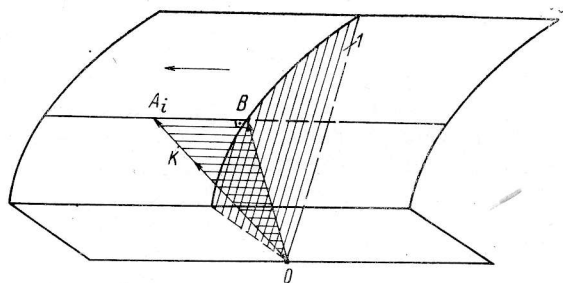


Рис. 2. К расчету поля для текущей точки поверхности вторичного зеркала.

1 — меридиональное сечение через фазовый центр первичного облучателя.

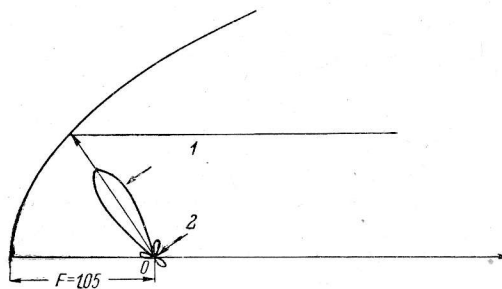


Рис. 1. Положение первичного облучателя в фокусе вторичного зеркала.

1 — ДН первичного облучателя, 2 — фазовый центр ДН первичного облучателя.

в) источник, аналогичный б), но с исходным распределением в плоскости  $P$  (рис. 3, а), обеспечивающим при сканировании горизонтальную ножевую диаграмму направленности;

г) источник, полученный небольшим сглаживанием экспериментально снятой диаграммы направленности первичного облучателя параметрического приемника для длины волны 3.02 см (открытый конец почти квадратного волновода сечением  $23 \times 20$  мм) (рис. 3, б).

Результаты расчета представлены в виде изофот на развертке на плоскость поверхности вторичного зеркала соответственно типу облучателя (рис. 4).

2. Второй этап расчета был проведен для первичных облучателей радиометров, регулярно применяемых для наблюдений на Большом пулковском радиотелескопе. При расчете использовались экспериментально снятые диаграммы направленности первичных облучателей для длин волн 2.0, 3.2, 4.5 и 8.8 см.

Результаты этих вычислений можно представить в компактной форме. Для этого рассматривается распределение уровней облучения от различных типов первичных облучателей вдоль характерных горизонтальных образующих параболического цилиндра. Геометрические места равных уровней облучения (при различных первичных облучателях) образуют в системе координат  $\eta, r_x$  ( $\eta$  — уровень облучения, нормированный к максимуму амплитуды,  $r_x$  — расстояние изофоты от центра вторичного зеркала) семейства кривых, одно из которых показано на рис. 5. Это семейство кривых построено для горизонтальной образующей вторичного зеркала,

Опорные точки первичных облучателей приемников, установленных на БПР

$\lambda$ (см)	$r_x^E,$ $r_x^H$	Уровень облучения				
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
2.0	$r_x^E$	82	50	33	22	11
	$r_x^H$	74	50	33	22	11
3.2	$r_x^E$	203	136	91	59	24
	$r_x^H$	180	140	87	51	12
4.5	$r_x^E$	—	—	—	—	—
	$r_x^H$	164	104	70	45	15
8.8	$r_x^E$	—	—	—	—	—
	$r_x^H$	132	84	55	35	12

Примечание.  $r_x^E$  — расстояние (см) от центра вторичного зеркала до соответствующего уровня облучения для  $E$ -плоскости первичного облучателя;  $r_x^H$  — расстояние (см) от центра вторичного зеркала до соответствующего уровня облучения для  $H$ -плоскости первичного облучателя.

Для этого поступают следующим образом. Экспериментально снимается диаграмма направленности первичного облучателя, желательно непосредственно в месте его установки в отражателе. Перестроенная в координатах  $\eta, r_x$  и нормированная к своему максимуму, эта диаграмма направленности накладывается на график (рис. 5), на котором в качестве примера нанесена пунктиром диаграмма направленности первичного облучателя радиометра для длины волны 3.02 см. Опуская перпендикуляры на ось  $r_x$  из точек пересечения накладываемой диаграммы с вспомогательными кривыми, получают координаты соответствующих уровней облучения на исследуемой горизонтальной образующей вторичного зеркала. Эти точки впредь будем называть опорными. Из изофот выбирают качественно подходящую, по диаграмме направленности, для исследуемого облучателя; на сетку развертки вторичного зеркала наносят по оси  $r_x$  координаты пересечения изофот с горизонтальной образующей и, используя изофоты в качестве шаблона, строят исходное распределение.

Для применяемых в настоящее время на БПР первичных облучателей данные для опорных точек приведены в таблице.

Оси первичных облучателей на БПР установлены под углом  $64^\circ$  к плоскости горизонта. Необходимость изменить угол наклона повлечет за собой смещение изолиний на вторичном зеркале. Изменение облучения меридионального сечения элементов отражателя в этом случае имеет характер, показанный на рис. 6, а величина смещения центра изофот в зависимости от угла наклона первичных облучателей к горизонту приведена на рис. 7.

С помощью приведенной методики могут быть построены довольно точные детали в расположении изофот на вторичном зеркале, а в конечном

проходящей через точку пересечения оси первичного облучателя с поверхностью вторичного зеркала.

Имея набор построенных изофот (рис. 4) и вспомогательных кривых (рис. 5), можно для широкого класса первичных облучателей (открытые концы волноводов, рупоры различных типов) быстро решить обратную задачу — построить распределение облучения на вторичном зеркале.

Для этого поступают следующим образом. Экспериментально снимается диаграмма направленности первичного облучателя, желательно непосредственно в месте его установки в отражателе. Перестроенная в координатах  $\eta, r_x$  и нормированная к своему максимуму, эта диаграмма направленности накладывается на график (рис. 5), на котором в ка-

итоге — и в распределении облучения на щитах отражателя антенны переменного профиля.

3. Основные параметры — диаграмма направленности (ДН) и коэффициент использования площади (КИП) антенны переменного профиля — в конечном счете определяются амплитудно-фазовым распределением облучения на отражающих элементах главного зеркала.

Рассмотренное в п. п. 1, 2 параболо-цилиндрическое вторичное зеркало обеспечивает оптимальное решение проблемы формирования веерообразного пучка, необходимого для правильного облучения систем типа АПП, антенн, протяженных преимущественно в горизонтальном направлении.

Зная распределение поля на отражающей поверхности вторичного зеркала, можно, с учетом оптических свойств параболического цилиндра, получить картину облучения главного зеркала АПП.

Оптические свойства параболического цилиндра характеризуются следующими особенностями.

Поверхность вторичного зеркала образуется плоскопараллельным перемещением параболы  $A_0B_0C_0$  (рис. 8, а), называемой профильной линией. Любая прямая на полученной поверхности, параллельная горизонтальной оси зеркала, называется образующей линией.

Луч  $r_0$ , падающий параллельно главной оптической оси  $A_0x_0$  отражается в точку фокуса  $A'$  меридионального сечения  $ABC$ . Параллельные ему лучи  $r_1$  и  $r_2$ , лежащие в том же сечении  $ABC$ , также сойдутся в точке  $A'$ . Угол  $c$  называется углом сходимости элемента дуги поверхности  $B_1B_2$ . Расстояние от точки отражения до точки фокуса обозначим через  $p$ . Тогда имеем

$$p \operatorname{tg} \frac{c}{2} = BB_1 \cos \frac{a}{2} = BB_2 \cos \frac{a}{2}, \quad (1)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  — смежные точки на профильной линии.

Падающий луч  $r_0$  совпадает с линией пересечения горизонтальной плоскости  $B_0Br_0$  и вертикальной плоскости, секущей поверхность по профильной линии  $ABC$ . После отражения в точке  $B$  луч  $r_0$  лежит в наклонной плоскости, определяемой образующей линией  $B_0B$  и радиус-вектором  $p$ .

Если луч  $r_0$  (рис. 8, б) повернуть в горизонтальной плоскости на угол  $e$ , то отраженный луч повернется на тот же угол  $e$  в наклонной плоскости и пройдет через точку  $A_0'$ . Подобно этому падающие лучи  $r_1$  и  $r_2$ , сходящиеся в точке  $A'$ , будучи повернутыми в своих горизонтальных плоскостях на тот же угол  $e$ , пройдут после отражения через  $A_0'$ . Этот эффект

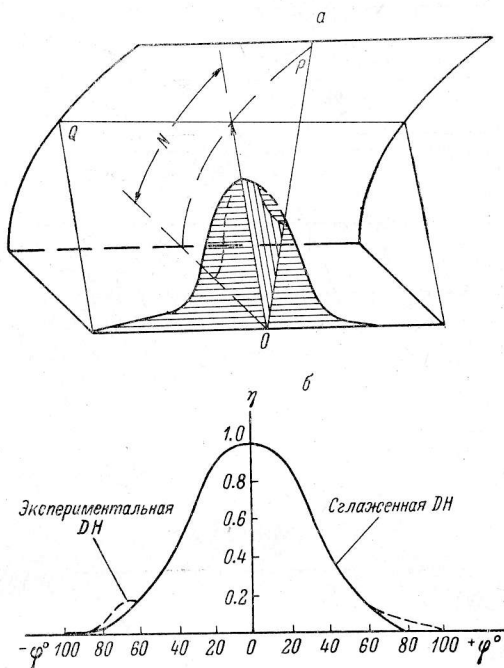


Рис. 3. К расчету распределения облучения на поверхности вторичного зеркала БПР.

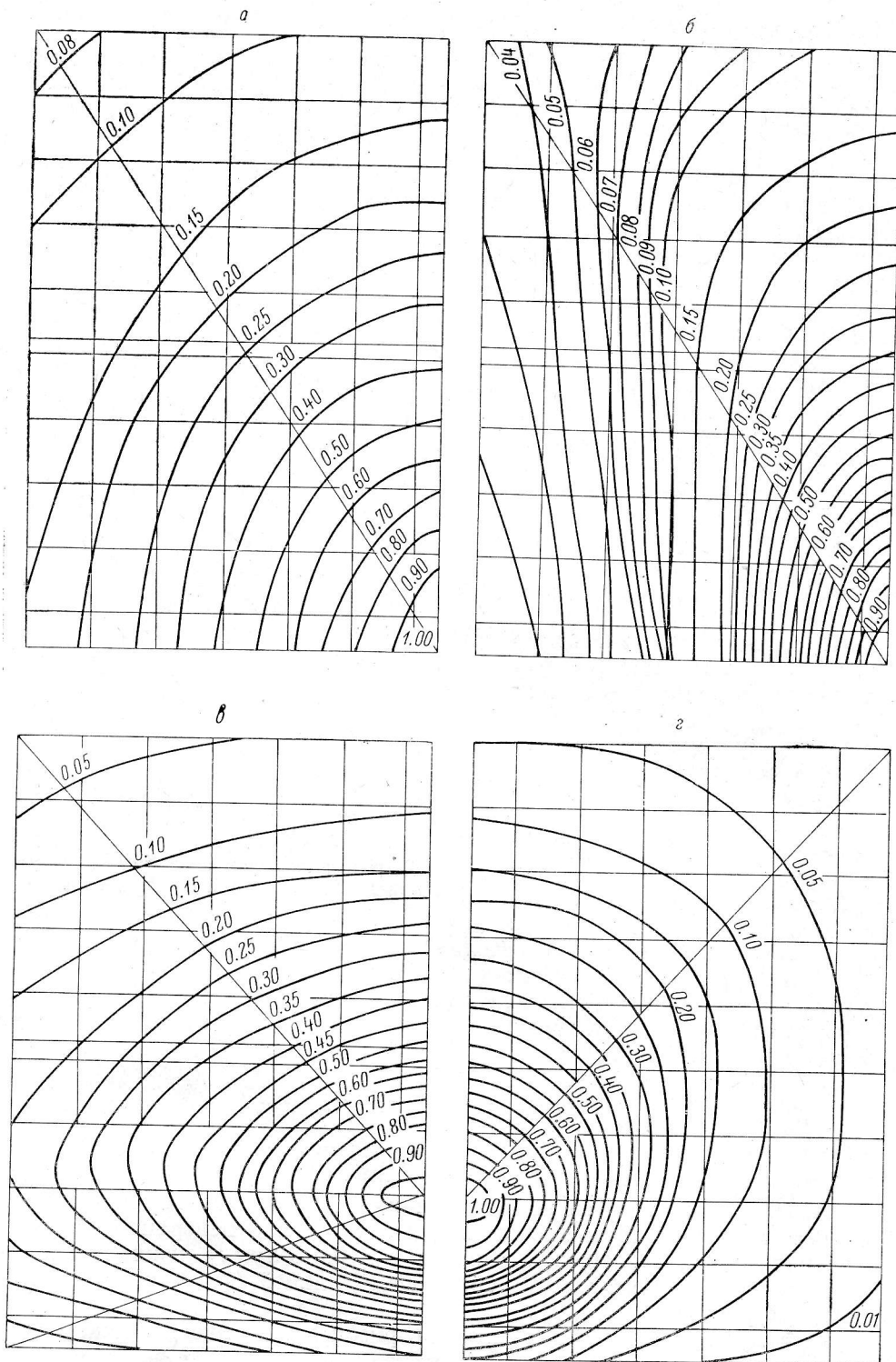


Рис. 4. Распределение поля на поверхности вторичного зеркала БПР.  
 а — изотропный облучатель; б — вертикальная полевая диаграмма направленности; в — горизонтальная полевая диаграмма направленности; г — эталонный облучатель  $23 \times 20$  мм.

строго соблюдается для дифференциальных соотношений (когда дуги  $B_1B$  и  $BB_2$  — бесконечно малые). Для конечных разностей равенство углов справедливо в широких пределах с достаточной точностью. При повороте парциальных лучей  $r_1, r_0, r_2$  на угол  $e$  в соответствующих горизонтальных плоскостях меняется угол схождения в соответствующей плоскости.

Длина радиус-вектора от  $A'$  до  $B$  равна

$$p = F \sec^2 \frac{a}{2}. \quad (2)$$

Радиус-вектор от  $A_0'$  до  $B$  равен

$$p_e = F \sec^2 \frac{a}{2} \sec e. \quad (3)$$

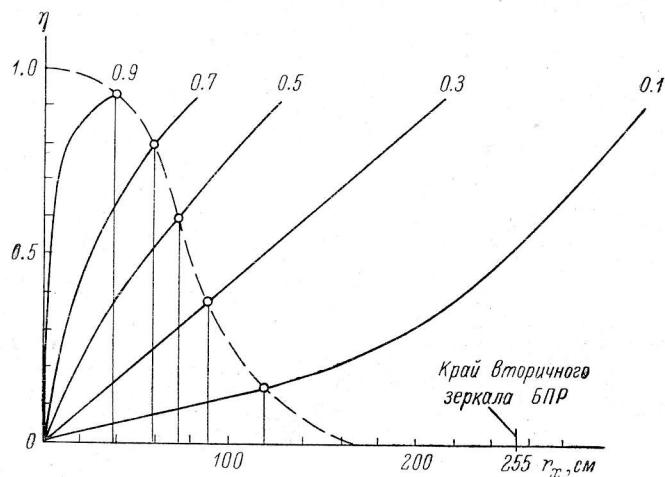


Рис. 5. К расчету распределения поля на поверхности вторичного зеркала с учетом диаграммы направленности первичного облучателя.

Поэтому

$$p_e = p \sec e. \quad (4)$$

Одновременно (рис. 8)

$$p \operatorname{tg} \frac{c}{2} = p_e \operatorname{tg} \frac{d}{2}, \quad (5)$$

где  $d$  — новый угол схождения лучей. Отсюда

$$\operatorname{tg} \frac{c}{2} = \frac{p_e}{p} \operatorname{tg} \frac{d}{2} = \sec e \operatorname{tg} \frac{d}{2}. \quad (6)$$

Окончательно для малых углов выражение для нового угла схождения имеет вид

$$d = \frac{c}{\sec e}, \quad (7)$$

где  $e$  — угол поворота,  $c$  — угол схождения до поворота,  $d$  — угол схождения после поворота.

При расчете распределения облучения на главном зеркале АПП использовались уравнения (5)–(7), физическая интерпретация которых

состояла в том, что лучи, исходящие из фазового центра первичного облучателя под различными углами и падающие на какую-либо из образующих, после отражения распространяются в одной плоскости, параллельной основанию вторичного зеркала.

4. Напряженность поля, распространяющегося от первичного облучателя, фазовый центр которого лежит на фокальной линии параболоцилиндрического отражателя, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. После отражения от вторичного зеркала пучок рассеивается только по одной — горизонтальной — координате, определяя веерообразный характер облучения главного зеркала. Изменение напряженности поля на этом участке распространения происходит обратно пропорционально расстоянию (цилиндрическая волна).

Каждый луч, после отражения, кажется исходящим из фо-

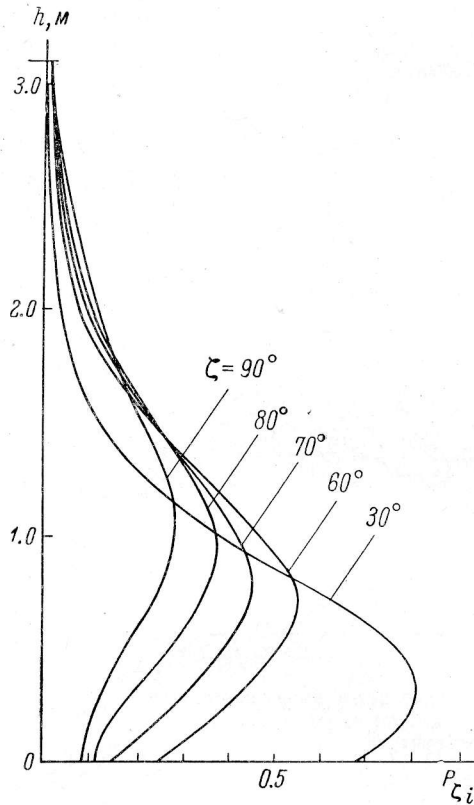


Рис. 6. Изменение облучения меридионального сечения элементов отражателя при различном наклоне первичного облучателя.

$h$  — высота щита отражателя главного зеркала БПР.

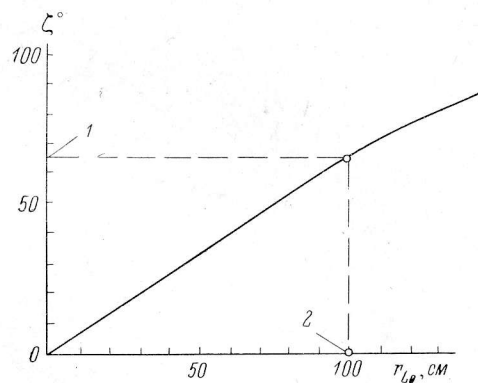


Рис. 7. Смещение центра изофот в зависимости от угла наклона первичного облучателя.

1 —  $\zeta_{\text{БПР}} = 64^\circ$ ; 2 — положение центра изофот на развертке вторичного зеркала.

куса вторичного зеркала. Для изотропного облучателя напряженность поля в некоторой точке плоскости, нормальной к направлению распространения до отражения, равна

$$E_n = \frac{1}{p_e^2} = \frac{1}{F^2} \cos^4 \frac{\alpha}{2} \cos^2 e. \quad (8)$$

После отражения напряженность поля  $E'_n$  на нормальной поверхности (на некотором расстоянии  $D$  от мнимого фокуса до освещаемой поверхности) должна удовлетворять соотношению

$$\frac{E'_n}{E_n} = \frac{p_e}{D}. \quad (9)$$



Откуда

$$E'_n = E_n \frac{p_e}{D} = \frac{1}{p_e D} \cdot \quad (10)$$

Если нужно определить напряженность поля на поверхности, составляющей угол  $\beta$  с падающим облучением, то соответствующее выражение

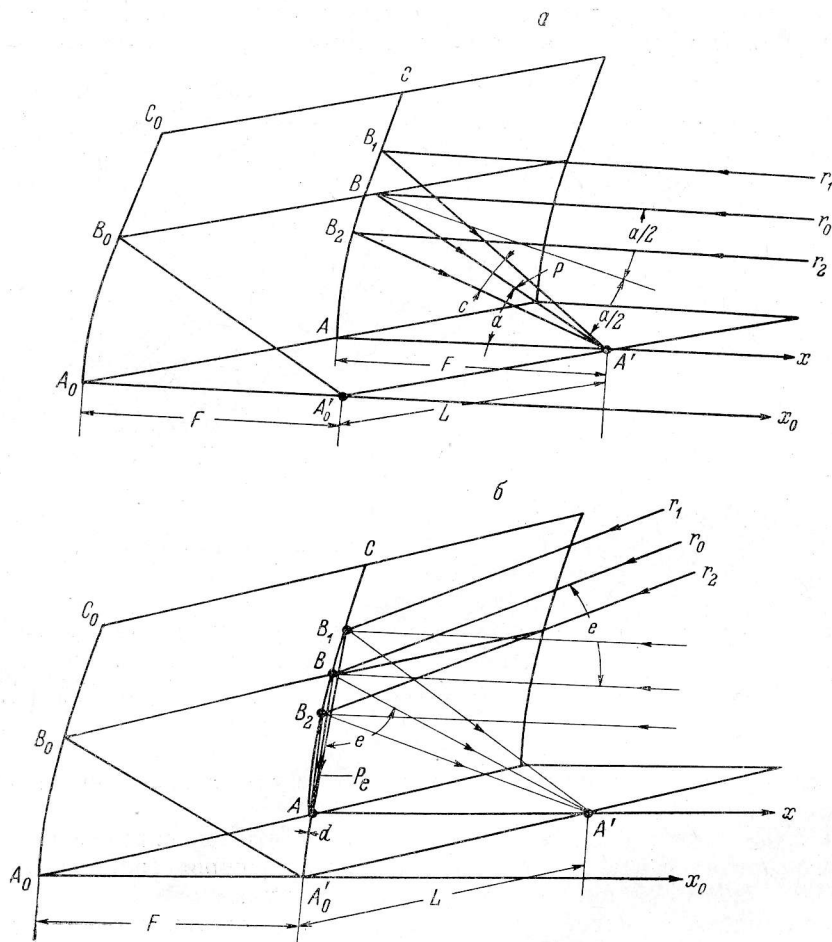


Рис. 8. Излучающие свойства вторичного зеркала.

$A_0B_0C_0$  — парабола;  $A_0A$  — поперечная ось (нижний край вторичного зеркала);  $C_0C$  — верхний край вторичного зеркала;  $A_0x_0$  — главная оптическая ось системы;  $B_0B$  — образующая линия;  $ABC$  — профильная линия.

приобретает вид

$$E'_s = \frac{\cos \beta}{p_e D} \cdot \quad (11)$$

В действительности, когда диаграмма направленности первичного облучателя равна  $F(\theta)$ , выражение для напряженности поля имеет вид

$$E'_s = \frac{\cos \beta}{p_e D} F(\theta). \quad (12)$$



Расчеты облучения главного зеркала БПР проведены для наблюдений на горизонте, т. е. для прямоугольного раскрыва и отражающих поверхностей элементов отражателя, нормальных к плоскости горизонта.

Расчетные сечения вторичного зеркала плоскостями, проходящими через мнимый фокус и середину щита отражателя, строились по трем точкам для каждого элемента одной из симметричных половин БПР.

Для вычисления распределения методом изофот расчетные сечения спроектированы на развертку вторичного зеркала и показаны на рис. 9. Распределение облучения на щитах отражателя БПР показано на рис. 10.

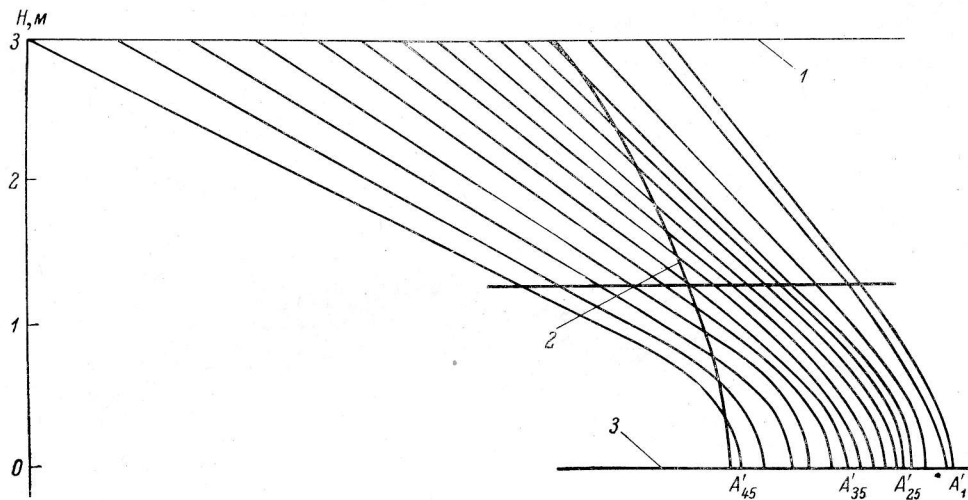


Рис. 9. Расчетные сечения отражающей поверхности вторичного зеркала.

1 — верхний край параболического цилиндра; 2 — границная линия для действующих частей сечений отражателя вторичного зеркала; 3 — нижний край параболического цилиндра. Индекс при точке А означает номер элемента отражателя, через середину которого проведено сечение

На этом же рисунке приведены изофоты поля на раскрыве при наблюдениях на горизонте.

На БПР проведен ряд экспериментов по снятию распределения облучения на щитах главного зеркала. Эксперименты производились на волнах 3.02, 3.2 и 4.5 см. Использовались различные методы измерения: с перемещением шумового генератора по щитам отражателя и записью на выходе приемника — на волне 3.02 см; на монохроматической волне 3.2 см с записью на выходе приемника; с размещением генератора в фокусе вторичного зеркала и измерениями с детекторной секцией — на волне 4.5 см.

Результаты экспериментов дают хорошее совпадение с расчетом в пределах метода. Соответствующие картины распределения облучения приведены на рис. 11. Некоторые расхождения с расчетом объясняются тем, что эксперименты проводились при установках главного зеркала, отличных от установки на горизонт, а также различиями в диаграммах направленности первичных облучателей. Напомним, что расчет проводился для эталонного первичного облучателя с раскрывом  $23 \times 20$  мм.

Ступеньки на верхних концах графиков облучения щитов 37–45 (рис. 12) обусловлены выходом пучка за торцевой край отражающей поверхности вторичного зеркала.

Число полностью облучаемых щитов не является независимым от установки БПР для наблюдений на тот или иной угол места. Зависимость числа

полностью облучаемых щитов от угла места наблюдаемого источника представлена на рис. 13.

5. Неполное облучение крайних щитов обусловлено недостатком в конструкции отражающей поверхности вторичного зеркала.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Определим зависимость угла расхождения  $e$  в горизонтальной плоскости (по щитам отражателя) от размеров параболического цилиндра.

На рис. 14, *a* луч, исходящий из  $A'_0$  и отражающийся в точке  $B$ , принимает направление  $Br'_0$ . Угол расхождения есть угол между  $Br_0$  и  $Br'_0$ .

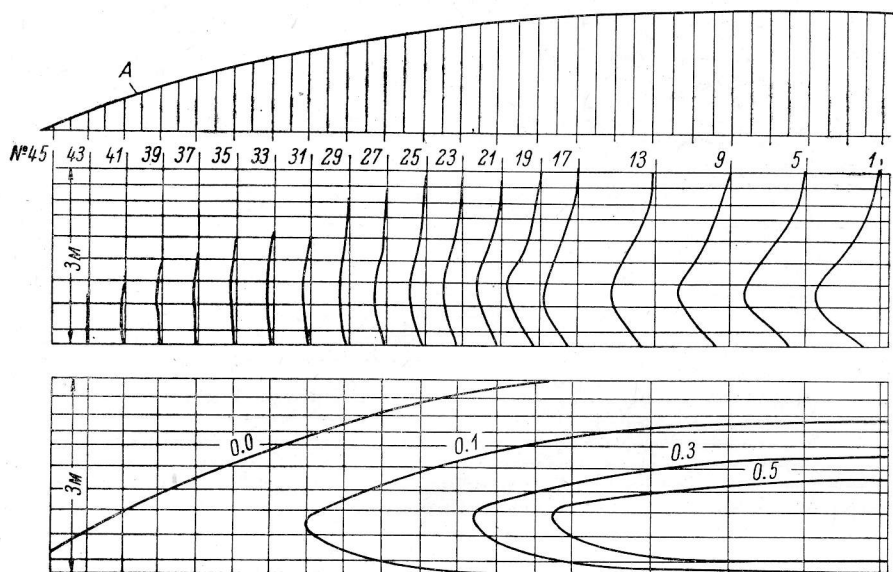


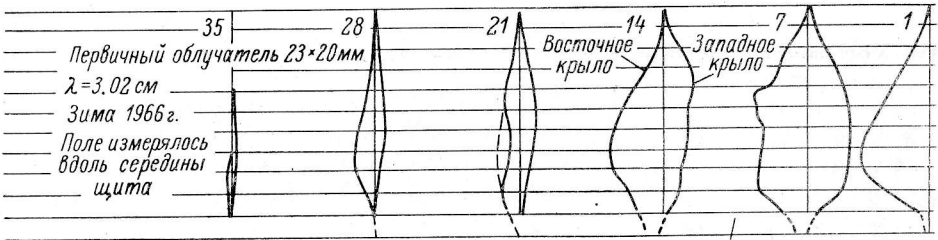
Рис. 10. Распределение облучения на щитах отражателя (расчет для  $\lambda = 3.02$  см).

*A* — вид на отражатель БПР сверху при установке на горизонт; № — номер отражающего элемента (щита).

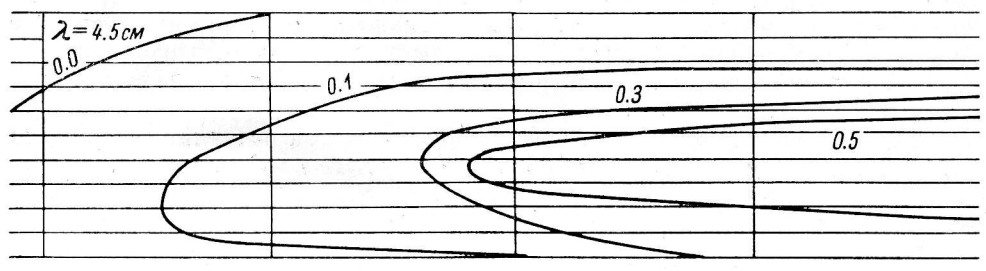
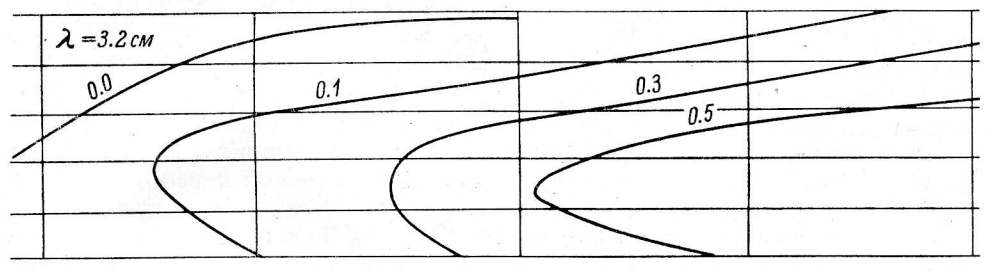
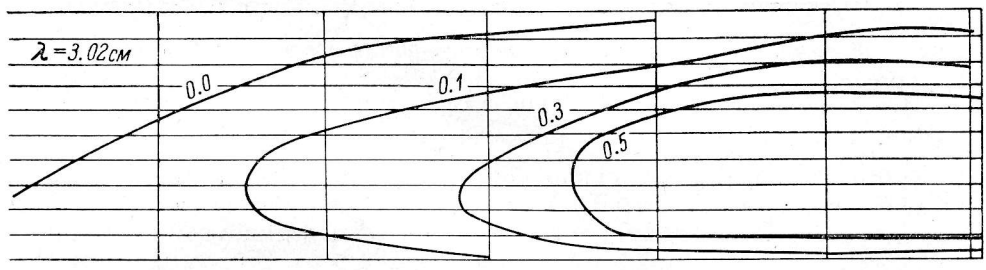
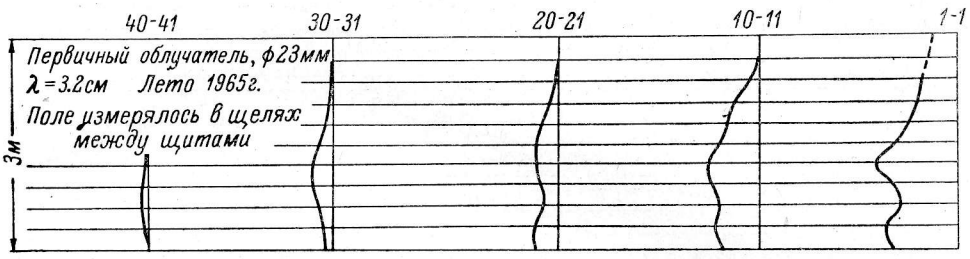
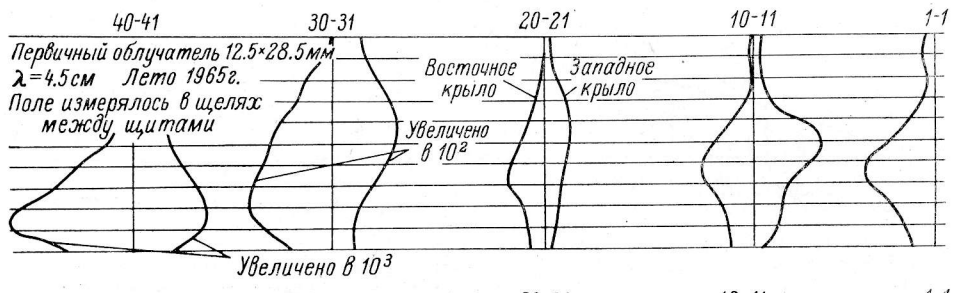
Выясним, каким образом нужно обрезать край цилиндра, чтобы получить во всех точках края одинаковый заданный угол расхождения  $e$ . Повернем треугольник  $A'_0A'B$  вниз вокруг оси  $A'_0A'$  до совпадения с горизонтальной плоскостью. Точка  $B$  при этом спроектируется в  $B_1$ . Из точки  $B$  опустим перпендикуляр на горизонтальную плоскость. Точка  $X$  — основание этого перпендикуляра. Длина радиус-вектора  $A'B$  равна  $A'A + AB_1$ . Поскольку  $A'A$  — фокусное расстояние, можно показать, что  $AB_1 = AX$ .

Для удобства дальнейших рассуждений рассмотрим треугольник  $A'_0B_1A'$  отдельно (рис. 14, *b*). Если линию  $A_0A$  рассматривать как плоское зеркало, тогда  $B_1$  есть изображение точки  $X$ . Продолжим  $A_1r''_0$  назад. Она пересечет ось  $A'_0A_0$  в точке  $A''_0$ . Эта точка является точкой пересечения всех лучей, отраженных в той же горизонтальной плоскости, и поэтому  $A''_0$  есть мнимое изображение точки  $A'_0$ . Любой луч, падающий из  $A'_0$  на отражающую поверхность вторичного зеркала в той же горизонтальной плоскости, в которой лежит  $B$ , будет проходить то же самое расстояние  $XA$ , и из построения (на рис. 14, *b* — пунктиром) видно, что при любом угле  $f$ , отличном от  $e$ , мнимое изображение точки  $A'_0$  будет попадать в одну и ту же точку.

Таким образом, мы можем рассматривать  $A''_0$  как источник излучения и, если мы хотим распределить облучение по дуге в  $\Phi^0$ , то эта дуга около



Распределение облучения под нижним краем щита



точки  $A_0$  должна заключать в себе необходимую поверхность отражения по  $\Phi^\circ/2$  с каждой стороны и края вторичного зеркала образуются верти-

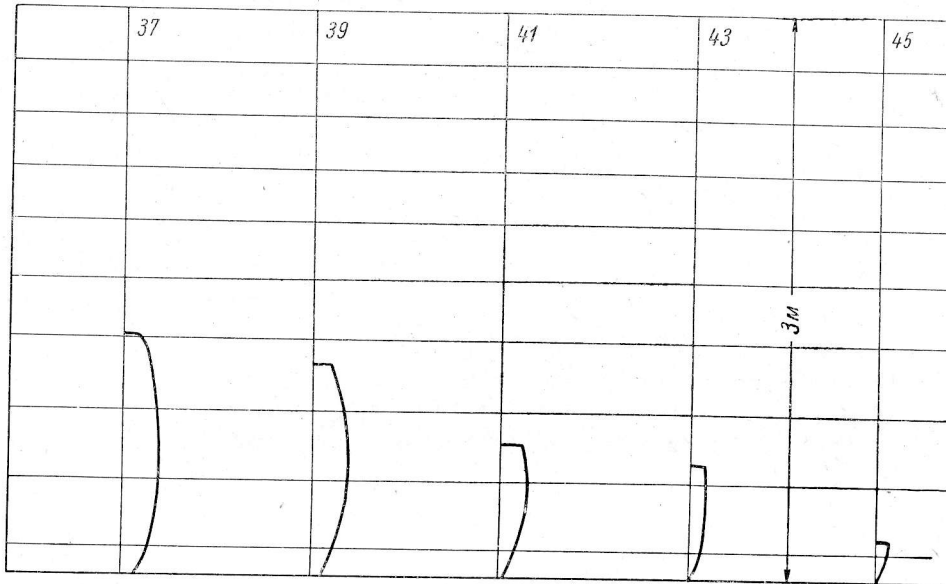


Рис. 12. Плохо облучаемые элементы отражателя переменного профиля.

37, 39, 41, 43, 45 — номера щитов.

кальными (не меридиональными) плоскостями, секущими параболический цилиндр под углами в  $\Phi^\circ/2$  по обе стороны от главной оптической оси системы.

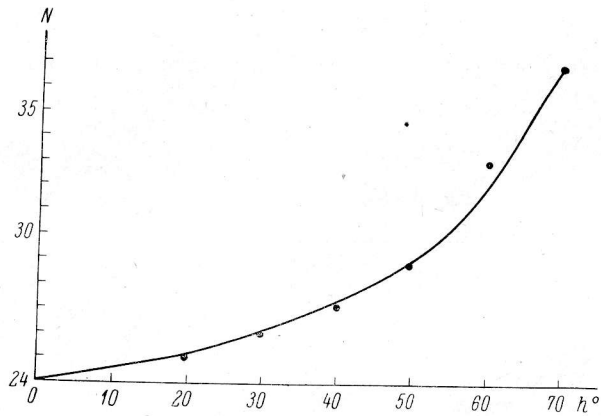


Рис. 13. Зависимость числа ( $N$ ) полностью облучаемых щитов отражателя БПР от угла места ( $h$ ) наблюдаемого источника.

Для антенн переменного профиля значение угла расхождения для вторичного зеркала определяется при проектировании и является для заданного числа щитов максимальным для наблюдений на горизонте.

Рис. 11. Распределение облучения на щитах отражателя (эксперимент).

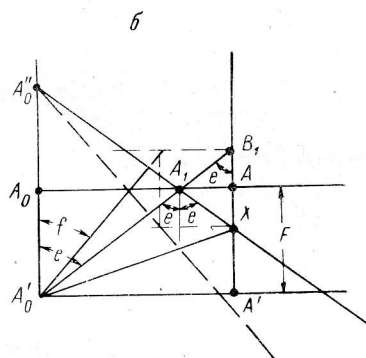
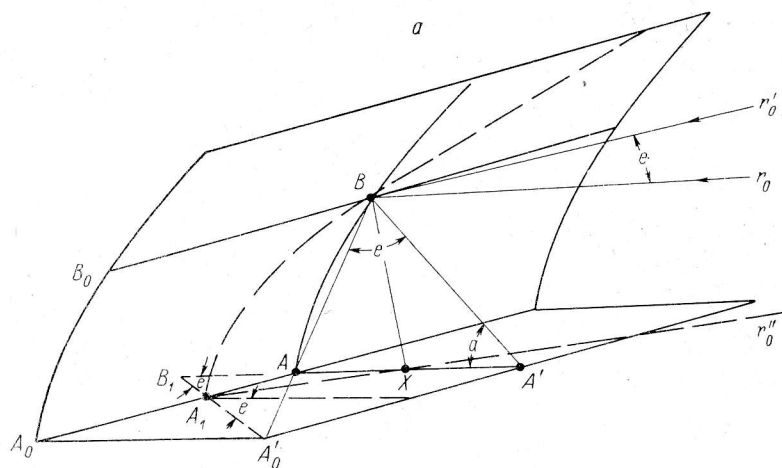


Рис. 14. К расчету оптимальной поверхности вторичного зеркала.

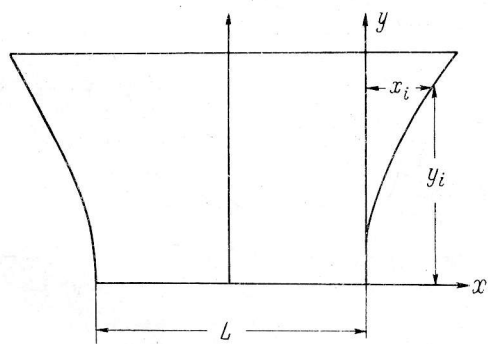


Рис. 15. Развертка оптимальной поверхности вторичного зеркала.

Если параболический цилиндр определяется уравнением  $y^2=4Fx$ , а требуемый угол охвата  $\Phi^\circ$ , то торцевая линия есть парабола, определяемая уравнением

$$y^2 = \left(4F \cos \frac{\Phi}{2}\right)x, \quad (13)$$

однако развертка края отражателя не будет параболой (рис. 15).

Точки  $y_i$  развертки определяются как длины развернутых дуг параболы, заданной уравнением (13)

$$y_i = \sqrt{x \left(x + F \cos \frac{\Phi}{2}\right)} + F \cos \frac{\Phi}{2} \operatorname{arcs} h \sqrt{\frac{x}{F \cos \frac{\Phi}{2}}}. \quad (14)$$

Точки  $x_i$  есть точки исходной профильной линии, умноженные на  $\operatorname{tg} \frac{\Phi}{2}$

$$x_i = x \operatorname{tg} \frac{\Phi}{2}. \quad (15)$$

Длина вторичного зеркала  $L$  определяется в зависимости от фокусного расстояния  $F$  и применяемых первичных облучателей из технических условий на уровень облучения на краях с помощью картины изофот.

Автор выражает благодарность Ю. Н. Парийскому и Г. Б. Гельфрейху за неоднократное обсуждение работы, а также Г. М. Тимофеевой, Н. Г. Петеровой и В. Н. Боровик за предоставленный экспериментальный материал, использованный для сравнения с результатами расчета облучения на главном зеркале АПП. Автор благодарит Н. Л. Кайдановского за сделанные замечания при редактировании рукописи.

#### Л и т е р а т у р а

1. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Н. А. Есепкина, О. Н. Шиврис, Изв. ГАО в Пулкове, № 164, 1960.

Декабрь 1967 г.