

## РАБОТА РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 С ПЛОСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

*О. Н. Шиврис*

Приведены формулы для установки перископической системы радиотелескопа РАТАН-600. Рассмотрены законы движения зеркал этой системы при сопровождении радиисточника. Определена область неба, доступная обзору при работе с перископом. Установлена зависимость ориентации диаграммы направленности перископической системы от направления наблюдений.

Formulas are presented for placing of periscopic system of the radio telescope RATAN-600. Laws are considered of movement of the systems mirrors in tracking a radio source. The area of the sky accessible for the survey when operating with the periscope is determined. Dependence is defined of the periscopic system beam orientation on the direction of observations.

В южной части радиотелескопа РАТАН-600 установлено плоское перископическое зеркало, состоящее из 124 плоских отражающих элементов размером  $3.1 \times 8.5$  м, имеющих возможность наклоняться от вертикального положения до  $70^\circ$ . Общая протяженность плоского зеркала 400 м, оно ориентировано точно в направлении восток—запад и отстоит от центра радиотелескопа на 104 м к югу. Между плоским зеркалом и южной частью главного зеркала радиотелескопа проложены кольцевые рельсы, по которым перемещается облучатель в пределах  $\pm 30^\circ$  из центра радиотелескопа. Плоское зеркало вместе с южной частью главного зеркала и облучателем образуют систему, подобную системе «Нансе» [1—3]. Эта перископическая система позволяет технически просто осуществлять достаточно длительное слежение за источником, что нужно для решения ряда астрофизических задач (спектральные исследования, быстропеременные источники, слабые источники, поисковое патрулирование неба).

Плоское зеркало перехватывает поток радиоизлучения от наблюдаемого источника и направляет его, сохраняя фронт волны плоским, на южную часть главного зеркала радиотелескопа. Дальнейшее преобразование волны происходит так, как если бы радиотелескоп работал в обычном режиме при наблюдении источника, находящегося на горизонте. В этом случае часть главного зеркала образует параболический цилиндр либо круговой цилиндр. В фокусе первого находится обычный облучатель, в квазифокусе второго — облучатель с корректировкой сферической аберрации. Для того чтобы направить радиотелескоп в заданную точку неба, нужно установить в соответствующее положение облучатель на круговых рельсовых путях, придать нужный наклон плоскому зеркалу и выставить определенным образом южную часть главного зеркала. Непрерывное слежение за источником потребует непрерывного движения облучателя и в общем случае непрерывного наклона плоского зеркала, а в случае использования обычного облучателя — еще и непрерывной перестройки главного зеркала (азимутального смещения параболического

цилиндра). Понятно, что при работе с коррекционным облучателем главное зеркало не перестраивается. Поскольку азимутальная ориентация плоского зеркала фиксирована, угол наклона его ограничен и ограничено перемещение облучателя по круговым рельсовым путям, область неба, доступная наблюдению с плоским зеркалом, тоже ограничена.

Диаграмма направленности РАТАН-600 при работе с плоским зеркалом сугубо «ножевая», так как синфазный раскрыв в этом случае представляет собой прямолинейную полосу. Ориентация «ножа» диаграммы направленности зависит от направления наблюдений, что может быть использовано при работе в корреляционном режиме перископической части РАТАН-600 с другими его секторами. Ниже будут выведены формулы для установки перископической системы РАТАН-600, определена область неба, доступная обзору при работе с плоским зеркалом, а также установлена зависимость ориентации

«ножа» диаграммы направленности от направления наблюдений. При рассмотрении будем предполагать, что используется коррекционный облучатель, а южная часть главного зеркала выстроена по круговому цилиндру и не изменяет своей формы. Случай с использованием обычного облучателя будет отличаться лишь численным значением линейных величин, поскольку фокусные расстояния кругового и параболического цилиндров различны. Что касается самого параболического цилиндра, то здесь нужно

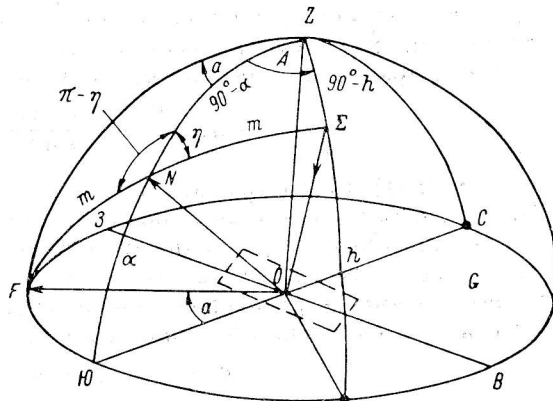


Рис. 1.

знать закон его азимутального смещения; формулы, по которым выставляются элементы главного зеркала, — те же, что и при наблюдении источника, находящегося на горизонте при работе РАТАН-600 в обычном режиме (без использования плоского зеркала) [4].

**1. Формулы для установки плоского зеркала и облучателя.** Поскольку ориентация плоского зеркала фиксирована (направление восток—запад), а отраженная от него плоская волна должна распространяться горизонтально, то направление распространения ее однозначно определяется положением источника на небе и наклоном плоского зеркала.

Для определения указанной зависимости воспользуемся методом геометрической оптики. Обратимся к рис. 1. На рисунке изображена небесная полусфера единичного радиуса, в центре которой  $O$  расположено плоское зеркало, ориентированное в направлении восток—запад ( $B—З$ ). Для простоты будем считать, что в точке  $O$  находится также и центр радиотелескопа. Это допустимо, так как смещение плоского зеркала в направлении север—юг не изменит интересующих нас здесь величин.

Точка  $\Sigma$  изображает источник радиоизлучения с горизонтальными координатами: высотой над горизонтом (или углом места)  $h$  и азимутом  $A$ . Азимут источника  $A$  будем отсчитывать от юга (точка  $Ю$ ) и считать положительным к востоку и отрицательным к западу. Остальные точки, линии и дуги больших кругов на полусфере обозначают:  $Z$  — зенит;  $CZIO$  — меридиан наблюдателя;  $CBIOF3$  — горизонтальный большой круг;  $ON$  — центральная нормаль к плоскому зеркалу;  $OF$  — линия, по которой распространяется отраженный от плоского зеркала центральный луч. На этой линии должен быть расположен фокус соответствующего участка главного зеркала, а в нем — фазовый центр облучателя. Для простоты будем считать, что все это находится в точке  $F$ ;  $a$  — азимут точки  $F$  из центра

радиотелескопа  $O$ . Азимут  $a$  будем отсчитывать, как и азимут источника, от юга, но считать положительным к западу и отрицательным к востоку.

При наклоне плоского зеркала точка  $N$  смещается по дуге большого круга  $CZЮ$  (меридиану наблюдателя). Идущий от источника  $\Sigma$  луч  $\Sigma O$ , нормаль к плоскому зеркалу  $ON$  и отраженный от плоского зеркала луч  $OF$  лежат в одной плоскости  $O\Sigma NF$ , причем дуга  $\Sigma N$  равна дуге  $NF$  (равенство углов падения и отражения). Обозначим эти равные дуги  $m$ . Из сферических треугольников  $FZN$  и  $ZN\Sigma$ , учитывая, что сторона  $FZ = 90^\circ$ , следует: из первого  $\sin m = \sin a / \sin \eta$ , из второго  $\sin m = \sin A (\cos h / \sin \eta)$ . Здесь  $\eta$  и  $\pi - \eta$  — смежные углы этих треугольников при точке  $N$ . Приравнявая полученные выражения для  $\sin m$ , будем иметь:

$$a = \arcsin [\sin A \cos h]. \quad (1)$$

Из тех же сферических треугольников следует: из первого —  $\cos m = \cos a \cos \alpha$ , из второго —  $\cos m = \sin \alpha \sin h + \cos \alpha \cos h \cos A$ . Приравнявая выражения для  $\cos m$ , получаем:

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{\cos a - \cos h \cos A}{\sin h} \right]. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) выражают зависимость азимута облучателя  $a$  и наклона центральной нормали плоского зеркала к горизонту (или наклона плоского зеркала от вертикали)  $\alpha$  от азимута  $A$  и высоты  $h$  источника.

Используя известные из сферической астрономии соотношения между горизонтальными и экваториальными координатами, получаем зависимость  $a$  и  $\alpha$  от склонения источника  $\delta$  и его часового угла  $t$ :

$$a = \arcsin [\sin t \cos \delta]; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \left[ -\frac{\cos t}{\sin \delta} \right] - \frac{\varphi_r}{2}. \quad (4)$$

Здесь  $\varphi_r$  — географическая широта середины плоского зеркала  $O$ . Из формул (3), (4) сразу видно, что если источник находится на небесном экваторе ( $\delta = 0^\circ$ ), то наклон плоского зеркала постоянен, не зависит от часового угла и равен  $\alpha = 45^\circ - \varphi_r/2$ , т. е. половине меридианной высоты  $h_m/2$ , а азимут облучателя равен часовому углу. Заметим, что источник и облучатель будут находиться по разные стороны от меридиана наблюдателя.

**2. Область неба, доступная наблюдению на РАТАН-600 при работе с плоским отражателем.** Ограничение области неба, в которой возможно наблюдение на РАТАН-600 с плоским зеркалом, как сказано выше, определяется фиксированной азимутальной ориентацией плоского зеркала, ограниченным углом его наклона и ограниченным сектором, в котором можно перемещать облучатель.

Найдем предельные значения часовых углов  $t_{np}$  в зависимости от склонения источников радиоизлучения  $\delta$ . Тем самым будет определено и время возможного непрерывного сопровождения, так как время сопровождения численно равно изменению часового угла. Перепишем формулу (3) относительно часового угла:

$$t = \arcsin \left( \frac{\sin a}{\cos \delta} \right).$$

Подставив сюда предельное значение азимута облучателя  $a_{np} = 30^\circ$ , получим предельное значение часового угла  $t_{np}$ :

$$t_{np} = \arcsin \left[ \frac{1}{2 \sin \delta} \right].$$

Эта формула имеет смысл лишь для  $|1/(2 \sin \delta)| \leq 1$ , т. е. для  $|\delta| \geq 60^\circ$ . При  $\delta \geq 60^\circ$  с  $a \leq a_{np}$  и отсутствии ограничения в наклоне плоского зер-

кала возможны были бы круглосуточные наблюдения  $t = \pm 180^\circ$  (для географической широты РАТАН-600  $\varphi_r = 43^\circ 20'$  источники с  $\delta > 46^\circ 40'$  незаходящие).

Установим теперь, какое ограничение на  $t_{np}$  накладывает ограниченный уклон плоского зеркала  $\alpha_{np} = 70^\circ$ . Переписав формулу (4) относительно  $t$ , получим

$$\cos t = -\operatorname{tg}(2\alpha + \varphi_r) \operatorname{tg} \delta.$$

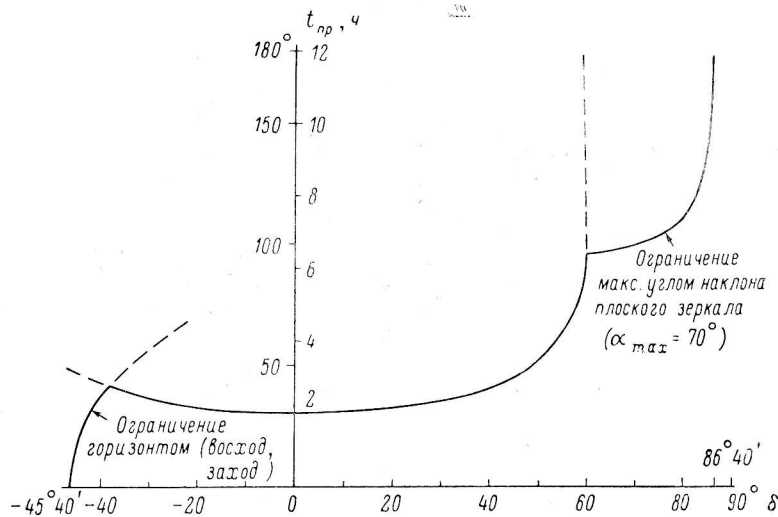


Рис. 2.

Подставив сюда максимально возможное значение  $\alpha_{np} = 70^\circ$  и значение  $\varphi_r = 43^\circ 20'$ , будем иметь

$$\cos t_{np} = -0.0582 \operatorname{tg} \delta.$$

По этой формуле можно вычислить предельные значения часовых углов в зависимости от склонения  $\delta$ . Она имеет смысл лишь для  $0.0582 \times \operatorname{tg} \delta \leq 1$  или  $\operatorname{tg} \delta \leq 1/0.0582$ , т. е.  $\delta < 86^\circ 40'$ . При  $\delta = 86^\circ 40'$   $t_{np} = \pm 180^\circ$ , т. е. возможно круглосуточное наблюдение.

Понятно, что такое наблюдение возможно и для  $\delta > 86^\circ 40'$ , т. е. в приполярной области с радиусом  $3^\circ 20'$ .

Для источников с достаточно большим отрицательным (южным) склонением время наблюдений определяется временем нахождения их над горизонтом. Предельный часовой угол для этого случая можно определить по известной из сферической астрономии формуле

$$\cos t_{np} = -\operatorname{tg} \varphi_r \operatorname{tg} \delta$$

или после подстановки значения географической широты РАТАН-600:

$$\cos t_{np} = -0.943 \operatorname{tg} \delta.$$

$t_{np}$  здесь — значение часового угла при восходе и заходе источника ( $h = 0^\circ$ ). Формула имеет смысл для значений  $\delta \geq -46^\circ 40'$ . Для  $\delta < -46^\circ 40'$  источник вообще не появляется над горизонтом.

На рис. 2 изображена кривая  $t_{np}$  в зависимости от склонения источника  $\delta$ . Область, находящаяся под этой кривой, определяет область неба, доступную наблюдениям на РАТАН-600 с плоским перископическим зеркалом. Следует иметь в виду, что кривая на этом рисунке изображает предельные значения, скажем, восточных часовых углов. Такое же значение из соображений симметрии будут иметь и предельные западные часовые

углы. То есть изменение часового угла, в пределах которого возможно наблюдение источника с данным склонением  $\delta$  или время возможного сопровождения источника, будет в два раза больше указанного на рисунке. Поскольку расчетный горизонт на РАТАН-600 закрыт главным зеркалом и окружающими радиотелескоп горами, наблюдения возможны лишь при высотах источников более  $\sim 2^{\circ}5$ . Это обстоятельство несколько

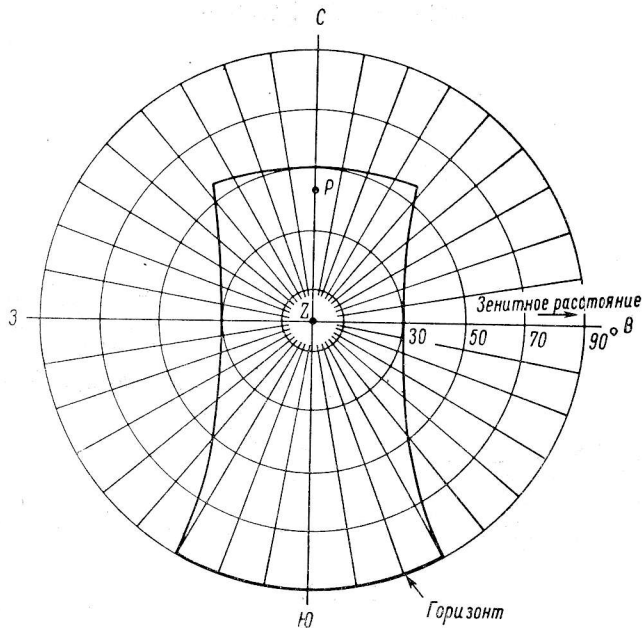


Рис. 3.

уменьшит время сопровождения источников с большими отрицательными склонениями.

На рис. 3 область неба, которую можно наблюдать на РАТАН-600 с плоским отражателем, показана в горизонтальных координатах:  $z = 90^{\circ} - h$  — зенитное расстояние и  $A$  — азимут. Здесь:  $Z$  — зенит,  $P$  — полюс Мира;  $z$  нанесены через  $20^{\circ}$ ,  $A$  — через  $10^{\circ}$ .

**3. Ориентация сечения диаграммы направленности в зависимости от направления наблюдений.** Как сказано выше, при работе радиотелескопа РАТАН-600 с плоским отражателем формируется «ножевая» диаграмма. Ориентация «ножа» диаграммы направленности и его размеры зависят от направления наблюдений.

Диаграмма направленности как бы поворачивается вокруг своего центра при изменении ее положения на небе. Для определения величины этого поворота обратимся к рис. 4. Здесь  $ВОЗ$  — ось плоского зеркала, лежащая в горизонтальной плоскости и ориентированная в направлении восток—запад. На небесной полусфере нанесены:  $P$  — полюс Мира;  $ВЭЭ$  — небесный экватор;  $\Sigma$  — радиоисточник, или центр «ножа» диаграммы направленности, имеющий экваториальные координаты  $t$  — часовой угол и  $\delta$  — склонение;  $P\Sigma$  — дуга круга склонений.

«Нож» диаграммы направленности, для наглядности изображенный на рис. 4, б, всегда перпендикулярен к плоскости  $В\Sigma O$ , поскольку в этой плоскости лежит ось перископа, а следовательно, и ось синфазного раскрытия, представляющего собой неискривленную, как при работе радиотелескопа в обычном режиме, узкую полосу. Будем определять поворот «ножа» диаграммы относительно круга склонений, т. е. углом  $\omega$  между «ножом» и дугой круга склонений  $P\Sigma$ . Для этого рассмотрим сферический треугольник  $P\Sigma B$ , изображенный отдельно на рис. 4, б. В этом

треугольнике  $PB$  — дуга между полюсом  $P$  и экватором,  $P\Sigma = 90^\circ - \delta$  (полярное расстояние до  $\Sigma$ ), угол  $\Sigma PB = 90^\circ - t$ . Как видно из рисунка, угол при  $\Sigma$  равен  $90^\circ + \omega$ . Воспользовавшись формулой четырех рядом лежащих элементов из сферической тригонометрии и учитывая, что сторона  $PB = 90^\circ$ , получим зависимость угла  $\omega$  от  $\delta$  и  $t$ :

$$\operatorname{tg} \omega = \sin \delta \operatorname{tg} t. \quad (5)$$

Из полученной зависимости сразу видно, что в случае  $\delta = 0^\circ$  (источник на экваторе) «нож» диаграммы совпадает с кругом склонений ( $\omega = 0^\circ$ )

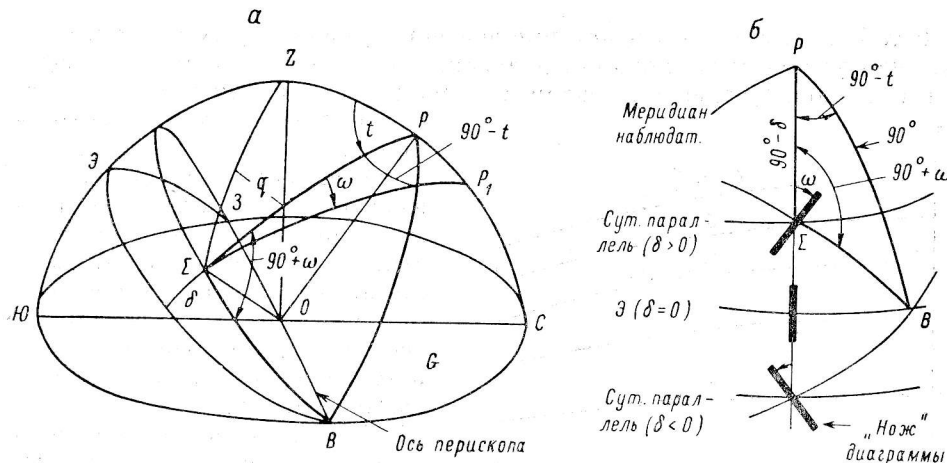


Рис. 4.

при любом значении часового угла  $t$ . При положительных значениях склонения  $\delta$  диаграмма повернута относительно круга склонений по часовой стрелке при западных часовых углах (если смотреть со стороны источника  $\Sigma$ ). По мере приближения к меридиану наблюдателя угол  $\omega$  уменьшается, становясь равным нулю на самом меридиане наблюдателя.

Для отрицательных значений склонения направления разворота «ножа» диаграммы противоположные. Это проиллюстрировано рис. 4, б.

Уместно рассмотреть, как изменяется ориентация «ножа» диаграммы направленности при наблюдениях того же источника соответствующим участком северной половины главного зеркала РАТАН-600. Это может пригодиться в случае одновременных наблюдений (в корреляционном режиме) одного источника на южном секторе с перископом и северном секторе. Так как «нож» диаграммы при работе радиотелескопа в обычном режиме (без перископа) всегда совпадает с кругом высот, то искомым угол  $q$  равен углу между кругом высот и кругом склонений, проходящими через наблюдаемый источник (так называемый параллактический угол). Формулы для его вычисления известны из сферической астрономии:

$$\sin q = - \frac{\cos \varphi_r}{\cos \delta} \sin A \quad (6)$$

или

$$\operatorname{tg} q = \frac{\sin t}{(\operatorname{tg} \varphi_r \cos \delta - \sin \delta \cos t)}. \quad (7)$$

Формула (6) записана в горизонтальных координатах, формула (7) — в экваториальных;  $\varphi_r$  — географическая широта РАТАН-600.

При восточных значениях часового угла  $t$  «нож» диаграммы в этом случае развернут против часовой стрелки, при западных — по часовой. Знак склонения не влияет на направление разворота «ножа» диаграммы, так как склонение  $\delta$  входит в формулы (6) и (7) через косинус.

Значения  $\omega - q$

$t$	$\delta$			
	$-20^\circ$	$0^\circ$	$20^\circ$	$40^\circ$
$10^\circ$	4.6	10.4	20.8	69.2
20	8.6	20.0	38.1	84.1
30	11.7	27.9	51.2	92.1

В таблице приведены некоторые значения разности углов  $\omega$  и  $q$ , т. е. значения угла между «ножами» диаграммы при одновременном наблюдении источника северным сектором и южным с перископом в зависимости от часового угла  $t$  и склонения  $\delta$ .

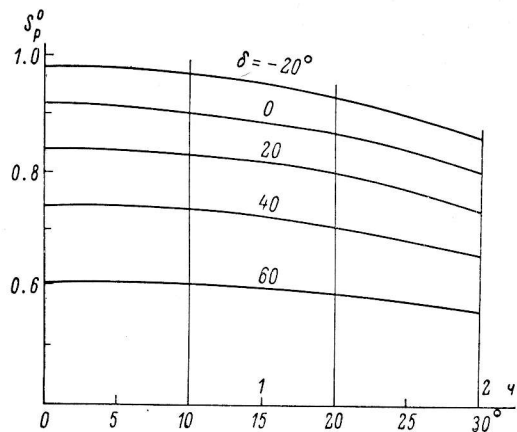


Рис. 5.

От направления наблюдений зависят также и угловые размеры диаграммы направленности, поскольку синфазный раскрыв, оставаясь удлиненным прямоугольником, сокращает свои размеры по мере удаления источника от нормали к плоскому зеркалу.

Здесь мы ограничимся лишь оценкой изменения геометрической площади раскрыва, чтобы показать, что изменение этой площади при слежении за источником в течение нескольких часов не слишком велико,

а следовательно, и размеры диаграммы за это время тоже мало меняются.

Обратимся опять к рис. 1. Геометрическая площадь  $S_p$  раскрыва была бы равна площади плоского зеркала при наблюдении источника, находящегося в меридиане наблюдателя и на горизонте (в точке  $IO$ ). В этом, не реализуемом на РАТАН-600 случае нормаль к плоскому зеркалу  $ON$  и направление на источник  $O\Sigma$  совпадали бы. При наблюдении в других направлениях площадь раскрыва будет уменьшаться пропорционально косинусу угла между  $ON$  и  $O\Sigma$  (угла  $m$  на рис. 1). Зависимость косинуса этого угла от угла наклона плоского зеркала и азимута отраженного от него центрального луча  $a$  мы уже получали в разд. 1. Она выражается формулой  $\cos m = \cos \alpha \cos a$ . Зная, как зависят  $a$  и  $\alpha$  от часового угла  $t$  и склонения  $\delta$  — формулы (3) и (4), — можно установить зависимость  $\cos m$  от  $t$  и  $\delta$  и тем самым получить оценку площади раскрыва в зависимости от этих же величин. На рис. 5 показана эта зависимость. По вертикальной оси отложены относительные значения геометрической площади синфазного раскрыва. За единицу принята площадь плоского зеркала, вернее, работающей ее части. По горизонтальной оси значения часового угла в градусной и часовой мере.

Список литературы

- Хайкин С. Э. и др. Радиотелескоп РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 3—12.
- Гиндилис Л. М. и др. О работе антенны переменного профиля с плоским перископическим отражателем. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 54—56.
- Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1975, с. 93—96, 118—120.
- Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А., Ширис О. Н. Большой пулковский радиотелескоп. — Изв. ГАО, 1960, XXI, 5