

## СОПРОВОЖДЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ (АПП)

*Н. Л. Кайдановский*

Рассмотрены технические возможности сопровождения источников при наблюдениях на АПП. Оценен выигрыш в температурной чувствительности при различных способах сопровождения, в том числе при закреплении облучателя в центре исходной окружности.

A method of automatic source tracking in observations with the variable profile antenna (VPA) is considered. An increase of temperature sensitivity using different methods of tracking has been estimated.

### Введение

Сопровождение источников излучения служит главным образом для увеличения температурной чувствительности радиотелескопа, оно может быть также использовано для исследования быстропеременных источников и необходимо при связи с искусственными космическими объектами. Увеличение температурной чувствительности радиотелескопа за счет времени накопления сигнала особенно существенно для спектральных наблюдений, при которых для улучшения чувствительности не может быть использовано расширение полосы частот, так как она определяется шириной спектральной линии, часто весьма узкой.

Поэлементное сопровождение протяженного источника радиоизлучения с целью последующего синтезирования его распределения яркости нецелесообразно, так как оно эквивалентно повторным наблюдениям его на проходе неподвижной диаграммы направленности, что технически проще.

При радиоастрономических наблюдениях можно увеличить время накопления сигнала за счет:

а) длительного удержания источника в пределах движущейся диаграммы направленности;

б) многократного повторения наблюдений источника при проходе им неподвижной диаграммы направленности.

Оба метода при решении различных радиоастрономических задач могут оказаться эквивалентными.

При наблюдениях с подвижной диаграммой направленности выигрыш в чувствительности может оказаться существенно меньше расчетного за счет непостоянства излучения Земли, попадающего в боковые лепестки и поле рассеяния диаграммы направленности антенны. Это излучение может порождать низкочастотные флуктуации выходного уровня, снижающие чувствительность. Фактический выигрыш в чувствительности

будет зависеть от относительного уровня боковых лепестков и рассеянного поля, температуры, физических свойств и однородности площадки под антенной, а также от принятого метода модуляции. При спектральных наблюдениях — независимо от метода модуляции — излучение Земли не должно понизить чувствительность, так как оно однородно по спектру. Кроме того, чувствительность радиотелескопа по антенной температуре при спектральных наблюдениях относительно низка из-за узости полосы спектральных линий.

Метод увеличения времени накопления сигнала за счет многократного повторения наблюдений источника свободен от влияния излучения Земли на чувствительность. Изменением уровня излучения за короткое время прохода источника через диаграмму направленности обычно можно пренебречь, а различия, связанные с дискретным изменением направления диаграммы, могут быть скомпенсированы перед началом каждого наблюдения. Повторение наблюдений источника на проходе диаграммы направленности должно быть достаточно частым, чтобы оставались стационарными не только излучение источника и его позиционный угол, но и условия наблюдения, а именно диаграмма направленности, форма полосы частот приемных устройств, условия распространения в атмосфере и т. д. Применение методов увеличения времени накопления сигналов должно быть особенно результативно для радиотелескопов с узкой диаграммой направленности  $\Delta\theta_0$ , какими являются АПП [1—3], из-за того что время наблюдения источника  $\tau$  при однократном его прохождении мало и падает с увеличением протяженности антенны  $D$ , так как

$$\tau < \Delta\theta_0/\omega = \lambda/D \cdot \omega,$$

где  $\omega$  — угловая скорость движения источника через диаграмму.

#### Возможности применения методов накопления сигналов в АПП

Длительное сопровождение источников в течение всего времени пребывания их на небе или многократное наблюдение их на проходе при любом азимуте с помощью АПП представляют собой сложную техническую

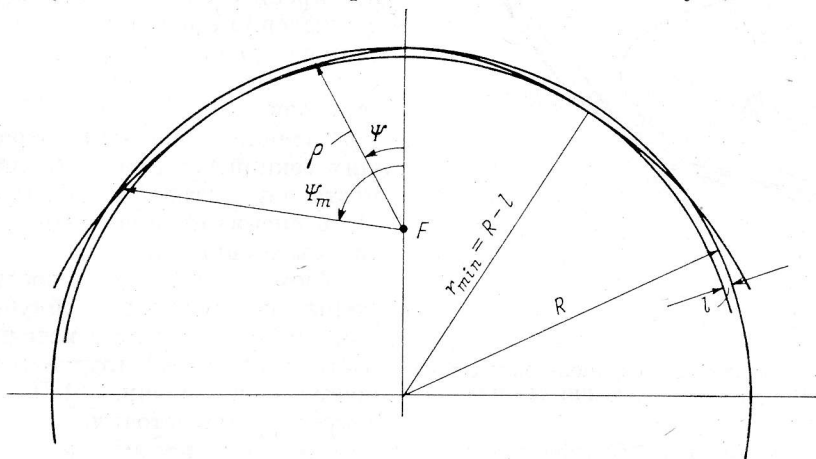


Рис. 1. Профиль отражателя АПП при оптимальном расположении облучателя.

задачу. Она решается по-разному в зависимости от требования к фокальному параметру  $P$ , принятому в антенной системе. В АПП типа БПР или радиотелескопа РАТАН-600 [3] переменный фокальный параметр

$$P = R - \sqrt{R^2 - r_{\text{мин}}^2} \cos h \simeq R - \sqrt{2Rl} \cos h, \quad (1)$$

где  $R$  — радиус исходной окружности, на которой располагаются все отражающие секции при наблюдении в зените,  $l = R - r_{\text{мин}}$  — максимально возможное радиальное перемещение отражающих секций, допускаемое конструкцией механизмов,  $h$  — высота источника.

Выбранный таким образом параметр удовлетворяет требованию максимума горизонтальной протяженности апертуры при заданном значении  $l$  [2]. В такой системе сопровождение источника может быть достигнуто программной установкой секций отражателя по дуге эллипса

$$\rho = P / (1 + \cos h \cos \psi) \quad (2)$$

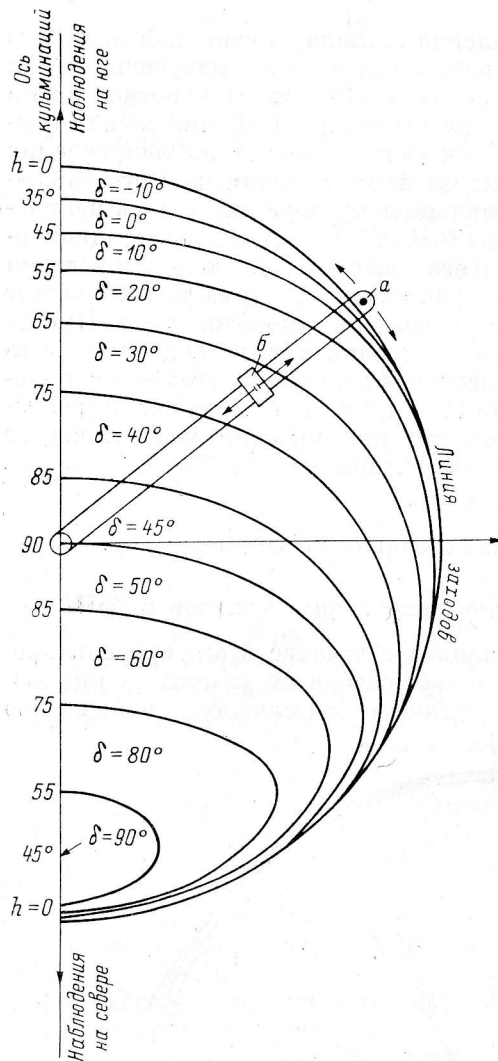


Рис. 2. Траектории движения облучателя АПП при сопровождении светила.

простом вращении облучателя, закрепленного в центре исходной окружности, в соответствии с изменением азимута источника.\* При этом отражающие секции с помощью автоматической системы управления должны перемещаться, образуя бегущий по кольцу профиль главного зеркала с эллиптическим центральным сечением.

(рис. 1) при одновременном программном перемещении облучателя на антенной площадке по сложной кривой (рис. 2) и ориентировании его по азимуту наблюдения. Такая сложная траектория движения облучателя может быть реализована при перемещении облучателя (б) по вращающемуся радиальному мосту (а) длиной больше половины радиуса исходной окружности главного зеркала (рис. 2).

Вместо сплошного радиального моста можно также использовать несколько движущихся по круговым рельсовым путям соединяемых платформ, по которым перемещается в радиальном направлении облучатель. Эта система не препятствует одновременным наблюдениям источников в режиме сопровождения в других направлениях с использованием свободных секторов главного зеркала. Для управления приводами отражающих секций, а также облучателя моста или платформы должна служить специализированная автоматическая система.

Громоздкость и сложность системы перемещения облучателя для сопровождения источников заставляет искать другие пути решения этой задачи. АПП может сопровождать источник также при

\* На эту возможность впервые указал сотрудник САО О. Н. Шиврис.

Так как эксцентриситет эллипса  $\varepsilon = \cos h$  [2], а фокусное расстояние постоянно и равно  $R$ , то для этого случая параметр эллипса

$$P = R(1 + \cos h). \quad (3)$$

Семейство эллипсов с такой зависимостью параметров от высоты  $h$  охватывает исходную окружность с радиусом  $R$  и касается ее в точке, лежащей на азимуте наблюдения. Профиль зеркала при наблюдении на горизонте ( $h=0$ ) — парабола с параметром  $P=2R$ , в зените ( $h=\pi/2$ ), где  $P=R$ , отражающие секции лежат на исходной окружности с радиусом  $R$  (рис. 3). Кривая, на которой должны лежать центры отражающих секций, может быть реализована только в части, заключенной между окружностями с радиусами  $R$  и  $R+l$ , где  $l$  — максимальное радиальное

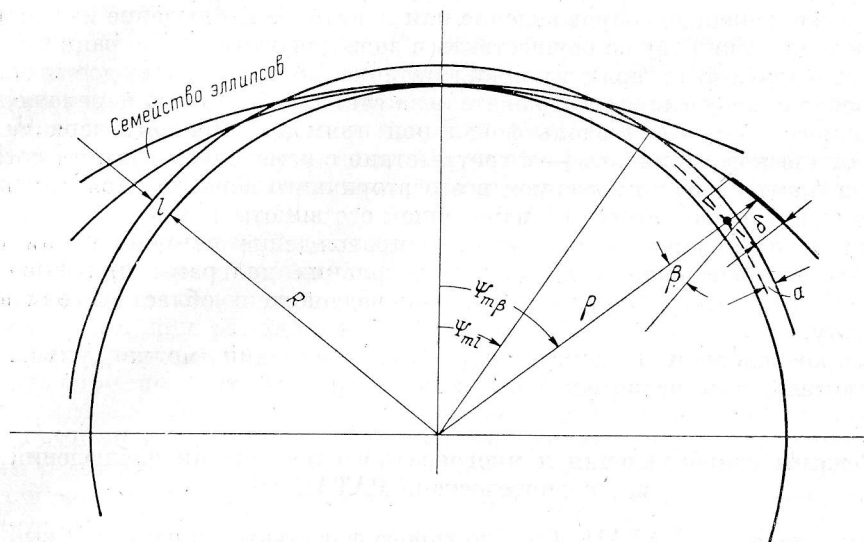


Рис. 3. Профиль зонированного отражателя АПП при облучателе в центре исходной окружности.

смещение, допускаемое конструкцией, при условии, что механизмы отражающих секций позволяют поворачивать их по азимуту на угол  $\geq \beta_m$ , требуемый для крайней секции.

Ограничение угла облучения  $2\psi_{mi}$  за счет максимального радиального смещения, когда  $\rho - R = l$ , определяется выражением

$$\cos \psi_{mi} = (1 - l/R \cdot \sec h)/(1 + l/R). \quad (4)$$

Наибольшее ограничение угла  $2\psi_{mi}$  имеет место при наблюдении на горизонте ( $h=0$ ), где

$$\operatorname{tg}^2 (\psi_{mi}/2) = l/R. \quad (5)$$

Ограничение максимального угла облучения за счет допускаемого механизмом наибольшего азимутального поворота отражающей секции  $\beta$  определяется выражением (см. [2])

$$\operatorname{tg} \beta = (\cos h \sin \psi)/(1 + \cos h \cos \psi). \quad (6)$$

На горизонте ( $h=0$ ), когда

$$\psi_{m\beta} = 2\beta_m \quad (7)$$

имеет место наибольшее ограничение  $\Psi_{m\beta}$ .

Из выражений (4) и (6) следует, что длительное сопровождение источников — при помещении облучателя в центре исходной окружности — достигается ценой ограничения протяженности апертуры и, следовательно, эффективной площади антенны.

Помимо двух описанных способов длительного сопровождения источников с помощью АПП, можно осуществить еще два режима сопровождения ограниченной длительности, которые не требуют технически сложного перемещения облучателя по антенной площадке и его ориентирования.

Сопровождение источников в интервале нескольких градусов по азимуту, т. е. в течение порядка десяти минут, можно осуществить за счет программного изменения профиля главного зеркала и перемещения облучателя по радиальному пути, управляемых автоматической системой. Это достигается ценой некоторой потери эффективной площади.

Кратковременное сопровождение или повторное наблюдение источника на проходе можно также осуществить в зоне допустимой аберрации главного зеркала при потерях усиления антенны до  $\approx 50\%$ . Это достигается при неподвижном главном отражателе за счет программного перемещения первичного облучателя вдоль фокальной прямой вторичного зеркала — параболического цилиндра — в соответствии с изменением азимута источника и программным смещением всего вторичного зеркала в радиальном направлении в соответствии с изменением его высоты [4].

Таким путем можно обеспечить сопровождение источника или его повторное наблюдение в пределах нескольких диаграмм при высотах  $h < 60^\circ$  и десятков диаграмм при наблюдениях в областях, близких к зениту.

Сопровождением в зоне допустимой аберрации можно улучшить чувствительность радиотелескопа в несколько раз.\*

#### Режимы сопровождения и многократного повторения наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600

Радиотелескоп РАТАН-600, у которого фокальный параметр  $P$  выбран из условия максимума угла облучения при  $l/R = 3.5 \cdot 10^{-3}$ , не имеет системы перемещения облучателя, обеспечивающей возможность его установки в любом месте фокальной площадки. Азимут наблюдения можно изменять только дискретно через  $30^\circ$  путем перевода облучателя с одних рельсовых путей на другие. Такая дискретность азимута, в большинстве случаев достаточная для восстановления распределения яркости источника методом апертурного синтеза [5], не позволяет, однако, непрерывно и длительно сопровождать источник или повторять наблюдения при любом азимуте достаточно часто, сохраняя апертуру.

Только в области углов  $\pm 30^\circ$  от юга — при использовании перископа и круговых путей для облучателя — возможно непрерывное изменение азимута наблюдений [3].

В этой области возможны два режима длительного сопровождения в течение порядка 3—4 час. Отражающие секции главного зеркала устанавливаются вертикально и образуют отражающую поверхность, фокусирующую на облучателе волну, приходящую от перископа. Отражающие элементы перископа должны быть установлены по углу места в соответствии с координатами источника. При первом режиме сопровождения отражающие элементы главного зеркала образуют параболический цилиндр. Облучателем может служить обычный параболический цилиндр с горизонтальной образующей, используемый на радиальных путях.

\* Этот метод при наблюдении в меридиане экспериментально проверен Н. М. Липовкой на БПР.

На автоматическую систему управления радиотелескопом возложено управление перископом по углу места, элементами главного отражателя по радиальному смещению и азимуту, а также облучателем при его движении по дуговым рельсовым путям, обеспечивающее слежение за источником [6]. В этом режиме сопровождения и при угле облучения  $2\phi = 110^\circ$  горизонтальная протяженность апертуры достигает  $\approx 275$  м, а геометрическая площадь  $\approx 2035$  м<sup>2</sup>. При втором режиме сопровождения отражающие элементы главного зеркала образуют круговой цилиндр и не управляются в процессе наблюдения. Сопровождение обеспечивается только за счет автоматического управления наклоном перископа и движения облучателя по круговому рельсовому пути.

В случае применения специального облучателя, компенсирующего сферическую аберрацию, протяженность апертуры главного зеркала уменьшается до  $\approx 200$  м [7].

Без применения специального корректирующего облучателя апертура радиотелескопа уменьшится до значения  $D \leq \sqrt[4]{2R^3\lambda}$  [8], при котором ошибка отражающей поверхности на краях главного зеркала достигает  $\lambda/4$ . При  $\lambda = 10$  см  $D \approx 93$  м, а при  $\lambda = 1$  см  $D \approx 50$  м.

Вне области  $\pm 30^\circ$  от юга, когда облучатель расположен на радиальных рельсовых путях, возможны два режима ограниченного сопровождения источника.

При первом режиме источник прослеживается в зоне допустимой аберрации неподвижного главного зеркала. Для слежения по азимуту используется смещение первичного облучателя вдоль фокальной прямой параболического цилиндра, для чего в конструкции облучателя предусмотрена каретка с приводом, обеспечивающим слежение за источником.

Слежение по высоте, если за время наблюдения она существенно изменяется по сравнению с шириной вертикальной диаграммы, может быть обеспечено перемещением всего облучателя по радиальным рельсовым путям с помощью соответствующего привода. Этот режим сопровождения в зависимости от высоты светила может улучшить чувствительность по потоку от 3 до 10 раз.

Второй режим сопровождения осуществляется за счет изменения профиля главного зеркала и движения облучателя по радиальному пути, управляемых автоматической системой. Этот режим ограниченного слежения в пределах нескольких градусов по азимуту, хотя и достигается ценой уменьшения эффективной площади, все же может улучшить чувствительность по потоку в десятки раз по сравнению с чувствительностью радиотелескопа при наблюдении на проходе.

Оба режима ограниченного сопровождения не могут обеспечить наблюдения источника в любом азимуте и в течение всего времени пребывания источника на небе.

В связи с этим интересно исследовать возможность длительного сопровождения источника с помощью облучателя, расположенного в центре и поворачивающегося в соответствии с изменением азимута светила.

Технически это может быть выполнено с помощью поворотного круга, служащего для перевода облучателя с одного радиального пути на другой. При этом горизонтальный размер апертуры отражателя будет ограничен углом  $2\phi_{ml}$  или  $2\phi_{ms}$  в соответствии с выражениями (4) и (6). Значения углов  $2\phi_{ml}$ , число облучаемых секций  $N$ , горизонтальный размер отражателя  $D$  и площадь отражателя  $S$  для ряда высот  $h$  представлены в табл. 1.

Необходимые для слежения за источником максимальные скорости движения у крайних отражающих секций по радиальному смещению  $d\rho/dt \leq 1.1$  мм/сек. и по азимутальному повороту  $d\beta/dt \leq 7''$  сек.<sup>-1</sup> меньше скоростей, обеспечиваемых механизмами отражающих секций

ТАБЛИЦА 1

$h^\circ$	$2\psi_{ml}^\circ$	$N$	$D, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$h^\circ$	$2\psi_{ml}^\circ$	$N$	$D, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$
0	9.6	24	48	355	75	20.8	52	104	600
30	10.4	26	52	370	80	23.2	58	116	655
60	13.6	34	62	396	85	36.8	92	184	1000

РАТАН-600, которые соответственно равны 1.4 мм/сек. и 42'' сек.<sup>-1</sup>. Следовательно, режим слежения можно осуществить без переделок приводов механизмов отражающих секций. Значения углов  $2\psi_{m\beta}$ , а также  $N$ ,  $D$  и  $S$ , определяемые максимальным азимутальным поворотом отражающих секций  $\beta_m = \pm 6^\circ$ , помещены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

$h^\circ$	$2\psi_{m\beta}$	$N$	$D, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$n_{\text{макс. при}} \lambda = 10 \text{ см}$
0	24.0	60	120	890	41
30	26.0	65	130	920	46
60	36.4	91	180	1150	61
75	61.0	152	288	1740	96
80	89.2	223	404	2520	134
82	116.8	292	490	3300	179

Для сравнения в табл. 3 сведены величины  $N$ ,  $D$  и  $S$  для РАТАН-600 в оптимальном режиме использования при  $P=R(1-\sqrt{2l/R \cos h})$  и угле облучения  $2\psi=110^\circ$ .

ТАБЛИЦА 3

$h^\circ$	$2\psi^\circ$	$N$	$D, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$
0	110	144	275	2035
30	110	154	294	2287
60	110	188	352	2500
75	110	222	402	2670
90	110	276	472	2898

Из сравнения табл. 1 и 3 следует, что горизонтальный размер и геометрическая площадь радиотелескопа РАТАН-600 в режиме сопровождения из центра для средних углов места  $h < 60^\circ$  приблизительно в 5–6 раз меньше, чем в случае, когда облучатель находится на оптимальном расстоянии от отражателя. При этом угол облучения существенно зависит от высоты светила.

Апертуру РАТАН-600 можно увеличить до значений, определяемых табл. 2, если зонировать отражающую поверхность, поступательно сместив отражающие секции, находящиеся на расстояниях  $\rho > R+l$ , вдоль отраженных лучей без изменения их углов по высоте и азимуту (рис. 3) на величину

$$\delta = n\lambda / (1 + \cos h \cos \psi),$$

где целые числа

$$\begin{aligned} n &> [\rho - (R + l)] (1 + \cos h \cos \psi) \lambda^{-1}, \\ (n - 1) &< [\rho - (R + l)] (1 + \cos h \cos \psi) \lambda^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

При этом смещенные отражающие секции окажутся между окружностями с радиусами  $R$  и  $R+l$  на расстояниях, меньших длины волны  $\lambda$  от большей окружности. Максимальные значения числа волн  $n$  в разности хода у крайних отражающих секций для длины волны  $\lambda=10$  см представлены в последней колонке табл. 2.

Наличие разности хода в лучах, сходящихся в фокусе, на целое число длин волн ограничивает относительную полосу частот  $\Delta f/f(\%) \leq 25/n$ . При этом ограничение по полосе могут внести только далекие, слабооблученные периферийные секции отражателя. Расположение отражающих секций, рассчитанное для некоторой волны  $\lambda$ , будет пригодно также для приема волн

$$\lambda_k = \lambda/k,$$

где  $k$  — целое число. Допустимая относительная полоса частот для этих волн будет сокращаться, но абсолютное значение ширины полосы  $\Delta f$  сохранится, так как  $\Delta f \approx f$ , а  $n \approx f$ . При полосе частот  $\Delta f/f(\%) > 25/n$  пространственная разрешающая сила радиотелескопа будет ограничиваться, так как периферийные отражающие секции будут работать менее эффективно.

Если условия наблюдения позволяют вести прием в достаточно узкой полосе частот, например, при исследовании спектра или при космической связи, горизонтальная протяженность антенны будет ограничена только предельным углом поворота отражающих секций по азимуту  $\beta$ , допускаемым конструкцией (табл. 2). Сравнение табл. 2 и 3 показывает, что горизонтальная протяженность и геометрическая площадь антенны в режиме зонирования всего  $\approx$  в 2,5 раза меньше, чем в оптимальном случае, а угол облучения меняется менее, чем в 2 раза на средних высотах  $h < 60^\circ$ .

Зонированную отражающую поверхность удобно использовать для частых многократных повторений наблюдений при малых дискретных изменениях азимута. Радиальные смещения отражающих секций при изменении азимута малы ( $\approx \lambda/2$ ) и могут быть достаточно быстро обработаны автоматической системой управления. Зонированную отражающую поверхность можно также использовать в режиме непрерывного слежения за источником. Однако при дискретном изменении числа  $n$  в разности хода соответствующая отражающая секция должна совершить возвратное радиальное смещение. Так как оно не может быть совершено мгновенно, то в течение обратного хода фаза отраженной волны будет изменяться в пределах  $2\pi$ , что создает флюктуацию принимаемой в фокусе мощности порядка  $p/N$ , где  $p$  — число секций, одновременно совершающих возвратный ход.

### Заключение

Наличие автоматической системы управления отражателем и облучателем позволит использовать радиотелескоп РАТАН-600 в режимах сопровождения и быстрого многократного повторения наблюдений при любых координатах источника.

При расположении облучателя на радиальных рельсовых путях режим ограниченного сопровождения в пределах нескольких градусов по азимуту с уменьшенной площадью апертуры позволит все же улучшить чувствительность в десятки раз по сравнению с однократным наблюдением на проходе.

В зоне  $\pm 30^\circ$  от юга станет возможным сопровождение источников в течение 3—4 часов с полной апертурой  $\approx 275$  м и геометрической площадью  $\approx 2035$  м<sup>2</sup>.

Сопровождение в любой точке в течение всего времени пребывания источника на небе становится возможным при помещении облучателя в центр исходной окружности.



Геометрическая площадь отражателя в этом режиме будет достигать: а) в средней не зонированной части — 360—500 м<sup>2</sup>; б) вместе с периферийной зонированной частью — 1000—1500 м<sup>2</sup>.

Чувствительность радиотелескопа при спектральных наблюдениях может быть существенно повышена.

Радиотелескоп при центральном облучателе станет пригодным для исследования быстрых процессов на нестационарных источниках и для решения некоторых задач космической связи не только в области азимутов  $\pm 30^\circ$  от юга, но и в любом направлении.

#### Литература

1. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Приборы и техника эксперимента, № 2, 19, 1959.
2. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Н. А. Есепкина, О. Н. Шиврис, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 164, 3, 1960.
3. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, Н. А. Есепкина, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 188, 3, 1972.
4. А. А. Стоцкий, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 188, 63, 1972.
5. Ю. Н. Парийский, О. Н. Шиврис, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 188, 13, 1972.
6. Г. С. Голубчин, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), (наст. сб.).
7. И. В. Вавилова. В кн.: Антенны, вып. 4. М., «Связь», 1969.
8. Д. Д. Максудов. Астрономическая оптика. М., Огиз, 1946.