

СОПРОВОЖДЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПОМ РАТАН-600 ПРИ ОБЛУЧАТЕЛЕ, НАХОДЯЩЕМСЯ НА РАДИАЛЬНОМ ПУТИ

Н. Л. Кайдановский

Рассмотрены возможности сопровождения источников за счет изменения профиля отражателя и движения облучателя по радиальному пути. Оценен выигрыш в чувствительности радиотелескопа РАТАН-600 по сравнению с режимом прохождения источника через неподвижную диаграмму направленности.

A possibility of tracking radio sources by means of altering the primary mirror profile and moving the feed along the radial way is considered. The gain in sensitivity of the RATAN-600 as compared to the regime of the source transit across the antenna pattern is evaluated.

1. Введение

Способ длительного сопровождения источников радиоизлучения радиотелескопом РАТАН-600 [1] с помощью облучателя, расположенного в его центре, хотя и позволяет наблюдать при любом азимуте, однако имеет следующие недостатки.

а. Угол облучения отражателя сильно зависит от высоты источника, что требует применения первичных облучателей с изменяемым в процессе наблюдения углом облучения.

б. Геометрическая площадь отражателя уменьшается по сравнению с площадью при оптимальном фокусном расстоянии в 5—6 раз, а при эшелонировании отражателя — в 1.5—2.5 раза.

Эшелонирование отражателя затрудняет автоматизацию управления и ведет к сужению полосы частот до долей процента, что ухудшает чувствительность приемной аппаратуры для наблюдения в сплошном спектре.

В работах [1, 2] было указано на возможность ограниченного сопровождения источников за счет изменения профиля отражателя, располагая облучатель на одном из радиальных путей. При этом использовано предложение Ю. Н. Парийского и О. Н. Шивриса применить часть поверхности отражателя для наблюдения в неосевых направлениях [3].

Рассмотрим эту возможность и определим ожидаемое время сопровождения и выигрыш в чувствительности радиотелескопа.

2. Геометрия отражающей поверхности и координаты облучателя при сопровождении

Сечение отражающей поверхности антенны переменного профиля представляет собой эллипс (рис. 1), определяемый уравнением

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

где P — фокальный параметр, h — высота источника, ψ — полярный угол из фокуса F относительно направления наблюдения [4]. При оптимальном выборе параметр

$$P = r (1 - k \cos h), \quad (2)$$

где r — радиус исходной окружности,

$$k = \sqrt{2l_1/r - l_1^2/r^2}, \quad (3)$$

l_1 — максимальное радиальное смещение точек эллипса от исходной окружности, определяемое значением угла облучения $2\psi_{\text{макс}}$, который может обеспечить облучатель. При таком выборе параметра l_1 имеет наименьшее значение при данном угле облучения. Расчет показывает, что для всех высот $h \geq 10^\circ$ и угла облучения $2\psi_{\text{макс}} = 120^\circ$ отношение $l_1/r \leq 2.8 \cdot 10^{-3}$.

Механизмы радиального перемещения отражающих элементов РАТАН-600 обеспечивают значение $l/R = 3.48 \cdot 10^{-3}$, где R — радиус начальной окружности, на которой располагаются середины поверхности отражающих элементов в крайнем заднем положении; l — максимальное радиальное перемещение, обеспечиваемое механизмами.

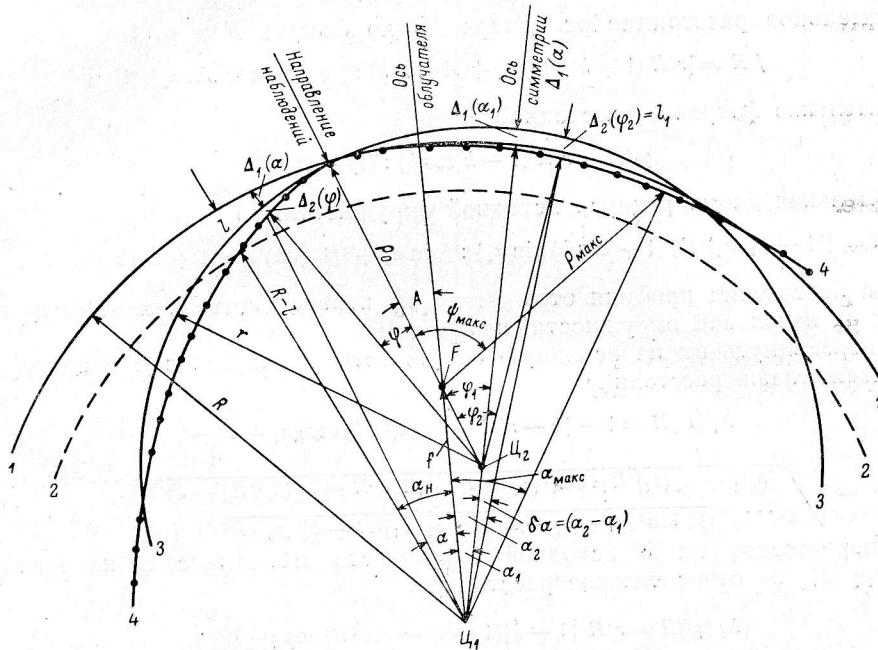


Рис. 1. Построение профиля отражателя.

1—1 — начальная окружность с радиусом R и центром $Ц_1$; 2—2 — конечная окружность с радиусом $R-l$ и центром $Ц_1$; 3—3 — исходная окружность с радиусом r и центром $Ц_2$; 4—4 — эллипс с фокусом F .

Для сопровождения источника можно использовать ту часть эллипса с большой осью, совпадающей с азимутом наблюдения, которая лежит внутри круговой полосы с радиусами R и $R-l$ при условии, что требуемый угол поворота нормалей отражающих элементов по азимуту относительно направления на центр $Ц_1$ (рис. 1) будет меньше предельного угла, допускаемого механизмами азимутального поворота.

Оптимальное построение отражающей поверхности предполагает, что внутри круговой полосы размещается дуга эллипса возможно большей длины.

Эллипс в сечении отражателя строится, как обычно [2, 4], относительно исходной окружности, центр которой $Ц_2$ лежит на пересечении прямой, проходящей в азимуте наблюдений A через фокус облучателя F , с радиусом начальной окружности R , идущим под углом α_1 и являющимся осью симметрии взаимного расположения этих окружностей (рис. 1). В азимуте наблюдений A эллипс касается исходной окружности и далее с увеличением φ отходит от нее на максимальное расстояние $\Delta_2(\varphi_2) \leq l_1$ при φ_2 , зависящем

от высоты h , после чего вновь приближается к ней, пересекая как исходную, так и при положительном φ начальную окружность. Углы φ_2 соответствует полярный угол α_2 из центра Π_1 . Смещение точек эллипса относительно начальной окружности равно геометрической сумме смещений

$$\Delta = \Delta_1(\alpha) + \Delta_2(\varphi) \quad (4)$$

от начальной окружности к исходной $\Delta_1(\alpha)$ и от нее к эллипсу $\Delta_2(\varphi)$.

Оптимизация длины дуги эллипса достигается надлежащим построением исходной окружности, т. е. выбором направления α_1 — оси симметрии $\Delta_1(\alpha)$ (или углового смещения $\delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$), а также величины радиального смещения $\Delta_1(\alpha_1)$ на этой оси (рис. 1).

При таком построении углы φ и α связаны соотношением

$$\varphi = \alpha + A - \{[1 - r/R - \Delta_1(\alpha_1)/R] \sin(\alpha_1 - \alpha)\} : r/R, \quad (5)$$

относительное расстояние от центра Π_1 до фокуса F

$$f/R = [r/R(1+k) \sin(\alpha_1 + A) \cos h] : [(1 + \cos h) \sin \alpha_1], \quad (6)$$

относительное фокусное расстояние

$$\rho_0/R = r/R(1 - k \cos h) : (1 + \cos h), \quad (7)$$

относительная длина радиуса исходной окружности

$$r/R = \{[1 - \Delta_1(\alpha_1)/R](1 + \cos h) \sin \alpha_1\} : \{\sin \alpha_1 + [(1+k) \sin A + \sin \alpha_1] \cos h\}. \quad (8)$$

Для построения профиля отражателя из отражающих элементов, находящихся на начальной окружности, необходимо:

а) передвинуть их на исходную окружность в направлении к центру Π_1 на относительное расстояние

$$\begin{aligned} \Delta_1(\alpha)/R = 1 - [1 - r/R - \Delta_1(\alpha_1)/R] \cos(\alpha_1 - \alpha) - \\ - \sqrt{\frac{[r/R + \Delta_1(\alpha_1)/R]^2 \cos^2(\alpha_1 - \alpha) + \{2[r/R - \Delta_1(\alpha_1)/R] - 1\} \times \dots \rightarrow}{\dots \rightarrow \times \sin^2(\alpha_1 - \alpha) - 2r/R \cdot \Delta_1(\alpha_1)/R - \Delta_1^2(\alpha_1)/R^2}} \dots \rightarrow; \quad (9) \end{aligned}$$

б) переместить их с исходной окружности на эллипс в направлении к центру Π_2 на относительное расстояние

$$\begin{aligned} \Delta_2(\varphi)/R = r/R \{1 - \{[(1-q) - \cos^2 h] \cos \varphi + \\ + \sqrt{q^2 - [(1-q)^2 - \cos^2 h] \sin^2 \varphi}\}\} : (1 - \cos^2 h \cos^2 \varphi), \quad (10) \end{aligned}$$

где $q = P/r = (1 - k \cos h)$;

в) повернуть отражающие элементы по азимуту так, чтобы между нормалью и направлением на центр Π_2 образовался угол

$$\beta = \psi - \varphi - \arctg [(\cos h \sin \psi) : (1 + \cos h \cos \psi)]. \quad (11)$$

Так как конструкция антенны допускает только радиальные смещения в направлении к центру Π_1 , то вместо смещения $\Delta_2(\varphi)$ нужно выполнить смещение отражающего элемента на

$$\Delta_2(\alpha) = [\Delta_2(\varphi) \cos \beta] : \cos(\beta - \gamma), \quad (12)$$

где

$$\gamma = -\arcsin [1 - r/R - \Delta_1(\alpha_1)/R] : r/R \quad (13)$$

— угол между радиусами r и R в точке с координатой α (см. рис. 1 и 2). При этом отражающий элемент должен быть повернут по азимуту относительно направления на центр Π_1 на угол $\gamma \rightarrow \beta$. При такой установке поверхность отражающего элемента займет предписанное положение, но будет сдвинута в касательном направлении на

$$a = [\Delta_2(\varphi) \sin \gamma] : \cos(\beta - \gamma), \quad (14)$$

что при почти плоской отражающей поверхности элемента [5] не вызовет дополнительной фазовой ошибки в отраженной волне.

Для наблюдений в режиме сопровождения может быть использована часть дуги эллипса, во всех точках которой

$$0 \leq \Delta \leq l \quad (15)$$

и азимутальный поворот

$$\gamma - \beta \leq \beta_m \quad (16)$$

— угла, обеспечиваемого механизмами РАТАН-600, при условии, что облучатель в состоянии полностью облучить эту дугу.

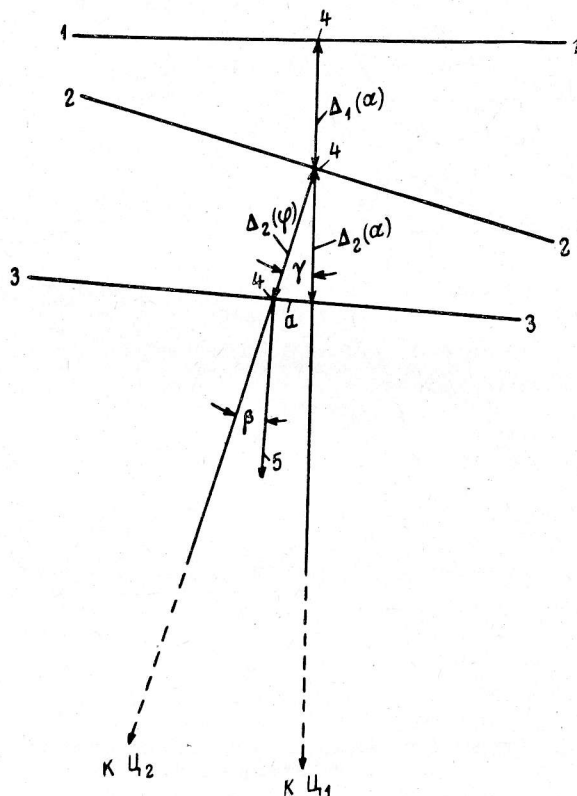


Рис. 2. Радиальное смещение отражающего элемента.

1—1 — касание с начальной окружностью; 2—2 — касание с исходной окружностью; 3—3 — касание с эллипсом; 4 — точка касания; 5 — нормаль.

Фактически облучатель РАТАН-600, поступательно перемещаемый по радиальным путям, не может облучить отражатель за пределами $\psi = \pm 60^\circ$, чем и ограничивается угол

$$\alpha_{\text{макс}} = \psi_{\text{макс}} - \arcsin(f/R \cdot \sin \psi_{\text{макс}}) \quad (17)$$

конца дуги отражателя (рис. 1).

Выражения (5)—(13) могут служить основанием для выработки программы расчета на ЭВМ координат отражающих элементов, изменяемых в соответствии с изменениями азимута и высоты источника.

Кривые, изображающие относительные радиальные смещения $\Delta_1(\alpha)/R$, $\Delta_2(\alpha)/R$ и их сумму $\Delta(\alpha)/R = [\Delta_1(\alpha) + \Delta_2(\alpha)] : R$ для угла высоты $h = 40^\circ$ и азимутов наблюдения от 1 до 10° , представлены на рис. 3. Выбранные значения $\delta\alpha$ и $\Delta_1(\alpha_1)/R$ на кривых рисунка приближают это построение к оптимальному. Высота h считалась постоянной для всего времени сопровождения. Такое допущение оправдано при наблюдениях вблизи меридиана,

так как в случае склонений в пределах $\pm 30^\circ$ высота h изменяется меньше чем на 1° при изменениях азимута от 0 до 10° . При реальном расчете профиля отражателя изменения h надо учитывать, но это не должно вызвать пересмотра сделанных ниже выводов.

Из кривых рис. 3 видно, что конец используемой дуги лежит в пределах $32 \div 36^\circ$, а ее начало, где $\Delta(\alpha_n)/R = 3.5 \cdot 10^{-3}$, существенно зависит от азимута наблюдений A . При $A = 10^\circ$, $\alpha_n = 3^\circ 5'$; при $A = 1^\circ$, $\alpha_n = -13^\circ 5'$; а при $A = 0$, $\alpha_n = -36^\circ$ вся дуга в пределах угла облучения $2\phi_{\text{макс}} = 120^\circ$ может быть использована. При изменении знака азимута после прохода $A = 0$ профиль

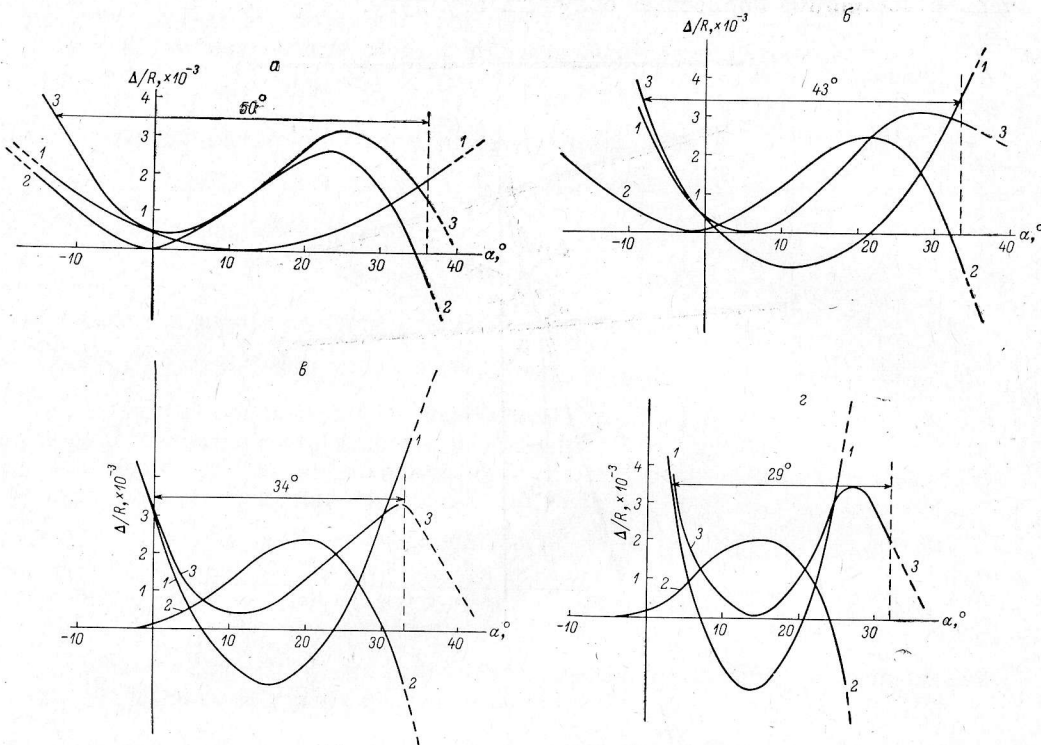


Рис. 3. Кривые относительных радиальных смещений при $h = 40^\circ$ и различных A .

1—1 — $\Delta_1(\alpha_1)/R$; 2—2 — $\Delta_2(\alpha)/R$; 3—3 — $\Delta(\alpha)/R = 1/R[\Delta_1(\alpha) + \Delta_2(\alpha)]$; а — $A = 1^\circ$, $\Delta_1(\alpha_1)/R = 0$, $\delta\alpha = 10^\circ$; б — $A = 3^\circ$, $\Delta_1(\alpha_1)/R = -1.1 \cdot 10^{-3}$, $\delta\alpha = 10^\circ$; в — $A = 5^\circ$, $\Delta_1(\alpha_1)/R = -1.5 \cdot 10^{-3}$, $\delta\alpha = 5^\circ$; г — $A = 10^\circ$, $\Delta_1(\alpha_1)/R = -2 \cdot 10^{-3}$, $\delta\alpha = 1^\circ$.

отражателя и координата облучателя изменяются зеркально, так как $\Delta_1(\alpha)$, $\Delta_2(\alpha)$ и $f(A)$ — четные функции от A и α .

Кривые Δ/R были построены также для высот $h = 20$ и 60° . Они имеют качественно тот же вид, что и изображенные на рис. 3. Значения Δ/R плавно изменяются при изменении азимута и могут быть автоматически обработаны при существующей скорости привода отражающих секций РАТАН-600 [6].

Геометрическая площадь апертуры отражателя РАТАН-600 S_A (м^2), которая может быть использована при наблюдении на высоте $h = 40^\circ$ в азимуте A , представлена ниже

| A° , | 0 | 1 | 3 | 5 | 10 |
|-------------------|------|------|------|------|-----|
| $S_A, \text{м}^2$ | 2425 | 1650 | 1424 | 1132 | 875 |

а кривая относительной площади в зависимости от A изображена на рис. 4.

Движение облучателя при изменении азимута должно происходить с почти постоянной скоростью порядка 1 м/мин. (рис. 5).

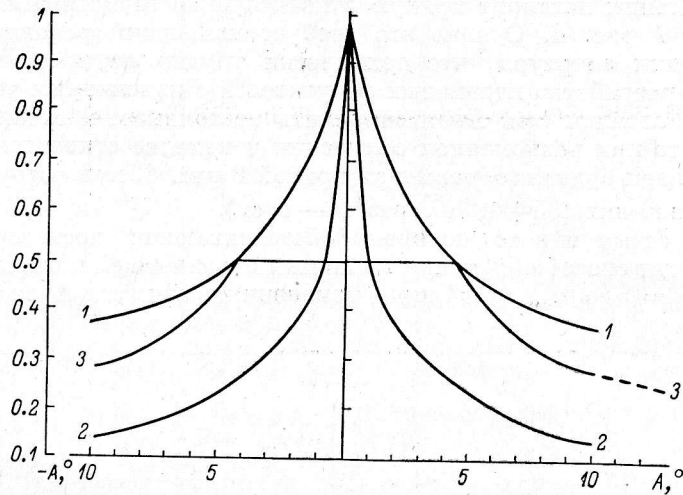


Рис. 4. Кривые относительной эффективной площади отражателя S_A/S_{\max} .

1—1 — при переменном угле облучения, согласованном с возможной апертурой; 2—2 — при постоянном облучении всего отражателя; 3—3 — при постоянном облучении соответствующей половины отражателя.

3. Выигрыш в чувствительности РАТАН-600 при сопровождении

Относительный выигрыш в чувствительности РАТАН-600 при сопровождении по сравнению с режимом прохождения, обусловленный увеличением времени накопления сигнала, может быть оценен только приблизительно

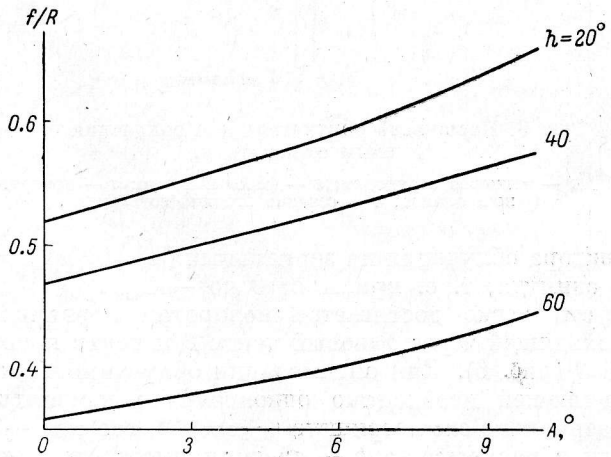


Рис. 5. Относительное расстояние от фокуса до центра f/R в зависимости от A и h .

вследствие существенного различия в форме диаграммы направленности и кривой изменения относительной площади антенны при сопровождении.

Применение различных методов приближенных оценок дает максимальный выигрыш (кривая 1 рис. 4) при сопровождении в интервале $A_{\max} = \pm 10^\circ$ в пределах $(70 \div 80)/\sqrt{\lambda}$ (λ — в см). Этот максимальный выигрыш будет иметь место при условии, что коэффициент использования площади (КИП)

антенны сохраняется при сопровождении и равен значению КИП при режиме прохождения. Только в таком случае кривая относительной эффективной площади антенны повторит кривую относительной геометрической площади отражателя 1 рис. 4. Однако это требует изменений условий облучения при изменении апертуры, что технически трудно осуществимо, так как необходима разработка первичных облучателей с изменяемым углом облучения и направлением оси. Если сохранить постоянным максимальный угол облучения, то при равномерном облучении изменение относительной эффективной площади будет изображаться кривой 2 рис. 4, для которой выигрыш упадет до значения $(35 \div 40)/\sqrt{\lambda}$ раз (λ — в см).

Более простым и в то же время обеспечивающим достаточно большой выигрыш будет способ облучения половины отражающей поверхности в пределах от $\alpha_n = 0$ до $\alpha_{\max} = 35^\circ$ при изменениях азимута A от 0 до A_{\max} и

4 ————— 4

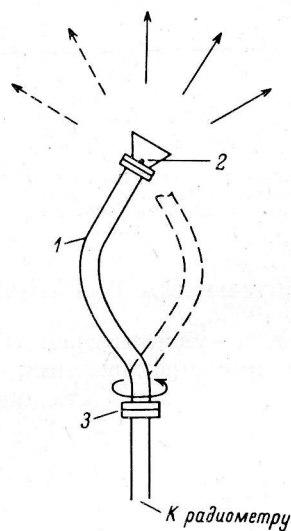


Рис. 6. Первичный облучатель для облучения половины отражателя.

1 — волновод с рупором; 2 — фазовый центр; 3 — поворотный фланец; 4 — сечение вторичного зеркала.

с переменной сектора облучения на зеркальный ($\alpha_n = 0$, $\alpha_{\max} = -35^\circ$) при изменении знака азимута, т. е. при A от 0 до $-A_{\max}$.

Технически это легко достигается поворотом первичного облучателя вокруг оси, проходящей через фазовый центр 2 и центр поворотного волноводного фланца 3 (рис. 6). Для оптимизации облучения по кросс-поляризационной составляющей необходимо одновременно изменять поляризацию облучателя на зеркально-симметричную $(\pm \epsilon(h)/2)$, где $\epsilon(h)$ — угловая длина облучаемой дуги в раскрыве, а h — средняя высота источника. При этом максимальная используемая площадь отражателя уменьшится в два раза, но переоблучение будет незначительным и кривая относительной эффективной площади приблизится к кривой геометрической площади 3 на рис. 4.

Выигрыш при сопровождении и таком способе облучения будет приблизительно равен $(60-70)/\sqrt{\lambda}$ (λ — в см). Фактический выигрыш при сопровождении будет ниже приведенного расчетного, так как часть времени необходимо использовать для контроля параметров аппаратуры. Помимо режима сопровождения с образованием неподвижного изображения источника возможен режим сопровождения со скольжением. При этом изображение источ-

ника будет перемещаться относительно первичных облучателей. Выигрыш в чувствительности при таком режиме будет меньше, но зато он позволит измерить распределение яркости протяженного источника и одновременно получить его спектр на ряде волн. Вместо сложного программного сопровождения со скольжением тот же результат можно получить, используя перемещение каретки первичных облучателей относительно неподвижного изображения источника. Выигрыш для каждого из диапазонов будет при этом уменьшаться по сравнению с приемом на неподвижном облучателе в соответствии с уменьшением времени накопления сигнала.

Литература

1. К а й д а н о в с к и й Н. Л. Сопровождение источников радиоизлучения при наблюдениях с помощью антенны переменного профиля (АПП). — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1975, 7, с. 214—222.
2. К а й д а н о в с к и й Н. Л. Формирование многолучевых диаграмм направленности у антенн переменного профиля (АПП). — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1975, 7, с. 207—213.
3. П а р и й с к и й Ю. Н., Ш и в р и с О. Н. Методы радиоастрономического использования РАТАН-600. — Изв. ГАО в Пулкове, 1972, № 188, с. 13—39.
4. Х а й к и н С. Э., К а й д а н о в с к и й Н. Л., Е с е п к и н а Н. А., Ш и в р и с О. Н. Большой пулковский радиотелескоп. — Изв. ГАО в Пулкове, 1960, № 164, с. 3—25.
5. Б р а у д е Б. В., Е с е п к и н а Н. А., К а й д а н о в с к и й Н. Л., Ш и в р и с О. Н., П а р и й с к и й Ю. Н. Выбор размеров отражающих элементов и расчет электрических характеристик радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО в Пулкове, 1972, № 188, с. 40—53.
6. А м с т и с л а в с к и й А. З., К о п ы л о в А. И. Конструкция отражающих элементов и облучателя радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО в Пулкове, 1972, № 188, с. 89—96.