

## ИЗМЕНЕНИЯ НУЛЬ-ПУНКТОВ РАДИАЛЬНЫХ ШКАЛ БОЛЬШОГО ПУЛКОВСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА

*Ю. К. Зверев*

Приводятся результаты сравнения между собой данных юстировок Большого пулковского радиотелескопа по радиусу, проводившихся в 1966—1969 гг. Даются некоторые статистические характеристики изменений нуль-пунктов радиальных шкал, обусловленных сезонными подвижками фундаментов отражающих элементов радиотелескопа.

The results are presented of a comparison of the data of radius adjustments of the Large Pulkovo Radio Telescope carried out in 1966—1969 with each other. Some statistical characteristics are given of displacements of the zero-points of the radial scales due to seasonal motions of the foundations of the radio-telescope reflecting elements.

Одним из достоинств антенн переменного профиля (АПП) [1] является то, что их отражающая поверхность формируется из отдельных, не зависящих друг от друга, небольших по сравнению со всей антенной, элементов. Из-за относительно малых размеров отражающих элементов их отражающая поверхность, выполненная с высокой точностью, испытывает минимальные весовые, температурные и другие деформации. Благодаря же независимости элементов оказывается возможным получить отражающую поверхность антенны большой площади (для Большого пулковского радиотелескопа — до 405 м<sup>2</sup>, для РАТАН-600 — до 13 000 м<sup>2</sup> [2]) с малой дисперсией. Отражающая поверхность АПП формируется путем перемещения отражающих элементов по радиусу, поворота их по азимуту и наклона по углу места в зависимости от зенитного расстояния наблюдаемого объекта. Поэтому точность отражающей поверхности АПП будет определяться точностью поверхности отдельных элементов и точностью перемещения их по радиусу, азимуту и углу места. Таким образом, радиотелескопы, имеющие в качестве главного отражателя антенну переменного профиля, обладая многими достоинствами радиотелескопов-рефлекторов, практически лишены недостатков крупных радиотелескопов этого типа, обусловленных искажением их отражающей поверхности весовыми, температурными и другими деформациями [3]. Если принять, что качество поверхности отдельных отражающих элементов АПП во времени изменяется незначительно, то основными причинами искажения отражающей поверхности антенны оказываются смещения фундаментов отражающих элементов АПП, приводящие к изменению нуль-пунктов (мест нулей) шкал или отсчетно-установочных устройств (ОУУ) и, следовательно, к неправильной установке антенны. Однако эти искажения с точки зрения их устранения не существенны, так как для обеспечения нормальной работы радиотелескопа достаточно заново определить места нулей ОУУ отражающих элементов АПП. Если учесть, что подвижки фундаментов носят характер сезонных смещений и что определение мест нулей ОУУ можно про-

известны за 1—3 дня, то преимущества антенн переменного профиля перед другими крупными антеннами рефлекторного типа в отношении точности отражающей поверхности не подлежат сомнению [4, 5].

Величины смещений фундаментов отражающих элементов зависят от геологических и гидрогеологических характеристик грунтов, являющихся основанием фундаментов, и от конструктивных особенностей отражающих элементов, а частота юстировок АПП в течение года зависит от величин этих смещений и от рабочей длины волны радиотелескопа. Отражающие элементы (щиты) Большого пулковского радиотелескопа (БПР) находятся в этих отношениях в крайне неблагоприятных условиях. Грунты на площадке радиотелескопа представлены моренными суглинками, глинами, прослойками песка, супесями. На глубине 4.5—5.1 м залегают собственно грунтовые воды, а на глубине 0.4—1.5 м наблюдается «верховодка». При подъеме уровня грунтовых вод несущая способность указанных грунтов резко снижается, а при промерзании начинают действовать силы морозного выщуривания. Можно предположить, что основной составляющей подвижек фундаментов является вертикальная, а собственно горизонтальные смещения незначительны. При таких условиях неравномерные вертикальные смещения разных точек фундамента щита будут вызывать наклон (крен) всей конструкции. Неравномерность вертикальных смещений точек фундаментов усугубляется тем, что центры тяжести щитов БПР значительно сдвинуты к центру радиотелескопа относительно опор. Все это приводит к существенным смещениям щитов по радиусу и по азимуту. Как показал опыт эксплуатации БПР, изменения нуль-пунктов радиальных шкал в несколько раз больше изменений нуль-пунктов азимутальных шкал. Места нулей угломерного устройства (переносного) при смещении фундаментов практически не изменяются, так как цилиндрический уровень угломерного ОУУ связан не с механизмом наклона щита, а непосредственно с отражающей поверхностью.

Периодические юстировки БПР заключаются в определении мест нулей ОУУ отражающих элементов, т. е. таких отсчетов по ОУУ, при которых щиты занимают исходное положение [6]. Обычно юстировка антенны производится, когда подвижки фундаментов приводят к таким искажениям отражающей поверхности (при пользовании устаревшими значениями мест нулей), при которых нарушается нормальная работа радиотелескопа. Нуль-пункты радиальных шкал щитов БПР определяются при помощи 100-метровой инварной проволоки [6]. Отсчеты по шкалам снимаются с точностью  $\pm 0.1$  мм. Один из щитов принимается за исходный. Для получения более или менее однозначных результатов во всех юстировках в качестве исходного использовался один и тот же щит, который перед юстировкой выставлялся по радиальной шкале в фиксированное положение. Разности нуль-пунктов радиальных шкал отражающих элементов БПР —  $\Delta l_i$  — являются исходным материалом для количественной оценки характера искажений отражающей поверхности радиотелескопа, вызванных подвижками фундаментов АПП. Очевидно, что разности  $\Delta l_i$  зависят как от смещений щитов, так и от смещений исходного щита и центра БПР. Поэтому для дальнейшего численного анализа величины  $\Delta l_i$  должны быть исправлены за смещение центра и изменение исходного радиуса (смещение исходного щита). Учет этих факторов производился по способу наименьших квадратов аналогично вычислению смещения центра БПР [6]. За исходное бралось уравнение ошибок вида

$$e \cos \theta \{1 - \cos (i - 1) \varphi\} + e \sin \theta \sin (i - 1) \varphi + \Delta R - \Delta l_i = v_i. \quad (1)$$

Здесь  $e$  и  $\theta$  — элементы смещения центра,  $\Delta R$  — смещение исходного щита,  $\varphi$  — угловое расстояние между соседними щитами. В этом случае поправки  $v_i$  к разностям  $\Delta l_i$  будут соответствовать «вероятнейшим» сме-

щениям щитов и представлять собой систему центрированных величин.

Ниже приводится анализ результатов сравнений юстировок БПР по радиусу, проводившихся с 1966 по 1969 г. В среднем в течение каждого года проводилось шесть юстировок. Изменение нуль-пунктов радиальных шкал в течение каждого года происходило по-разному, однако удалось выявить некоторые закономерности этого процесса для каждого года и для всего рассматриваемого периода.

Одна из закономерностей заключается в том, что подвижки фундаментов происходят неравномерно в течение года. По каждому году можно довольно четко выделить периоды больших и малых изменений нуль-пунктов радиальных шкал щитов БПР (или периоды больших и малых смещений щитов). Различие в величинах этих изменений, относящихся к разным периодам в течение всех лет, настолько велико, что для дальнейшего выявления закономерностей оказалось целесообразным разделить процесс изменения нуль-пунктов радиальных шкал на два процесса — больших и малых изменений (смещений) и рассматривать их отдельно.

Нуль-пункты радиальных шкал, определенные при различных юстировках, сравнивались между собой двояким образом: 1) каждая юстировка сравнивалась с предыдущей и 2) все юстировки одного года сравнивались с какой-то одной, выполненной в момент наибольшей стабильности фундаментов АПП. В первом случае находились разности

$$\Delta l_i(T_{j+1}, T_j) = l_i(T_{j+1}) - l_i(T_j) \quad (2)$$

и соответствующие им центрированные величины  $v_i(T_{j+1}, T_j)$ ; во втором

$$\Delta l_i(T_j, T_0) = l_i(T_j) - l_i(T_0) \quad (3)$$

и соответствующие им центрированные величины  $v_i(T_j, T_0)$ . Здесь  $T_{j+1}$ ,  $T_j$ ,  $T_0$  — моменты проведения юстировок,  $l_i$  — нуль-пункты радиальных шкал.

Первое же сравнение двух юстировок, выполненных в период больших изменений, показало, что характер смещений щитов в разных частях АПП различен. Эта закономерность прослеживается во все годы. Наиболее резким изменениям подвержены 25—26 крайних западных щитов, причем величины отдельных смещений доходили до 17 мм, а в 1969 г. — до 30 мм. Изменения нуль-пунктов шкал остальных щитов носят более спокойный характер. После построения графиков величин  $v_i(T_j, T_0)$  стала очевидной еще одна закономерность: по каждому году в периоды больших изменений можно выделить узловые точки, вокруг которых как бы происходит колебание линий  $v_i(T_j, T_0)$ , и участки малых дисперсий величин  $v_i$ . От года к году положение узловых точек и участков малых дисперсий меняется, но их наличие свидетельствует о том, что в течение какого-то времени, в данном случае 3—5 месяцев, изменение нуль-пунктов подчиняется определенному закону. Это подтверждает и довольно заметная корреляция линий  $v_i(T_j, T_0)$  при различных  $j$ , отнесенных к одному году. Величины смещений щитов в западной части антенны настолько велики, что это приводит к смещению всей кривой, аппроксимирующей ломаную линию  $v_i(T_j, T_0)$ . Поэтому на участке между щитами 41W и 36W можно в любой год обнаружить узловые точки или участки малых дисперсий (на БПР щиты пронумерованы от меридиана на запад и на восток от 1W, E до 45W, E). Для восточной части антенны характерно частое наличие участков малых дисперсий или даже участков небольших изменений. Все сказанное справедливо и для величин  $v_i(T_{j+1}, T_j)$ , за исключением наличия явной корреляции. Но и она про-

слеживается при  $j \geq 2$ , когда подвижки фундаментов идут на убыль, т. е. когда смещение щитов происходит в одном направлении.

Изменения нуль-пунктов радиальных шкал в периоды малых смещений носят более выраженный случайный характер. В 1966 и 1967 г. периоды малых смещений характеризуются небольшими значениями  $v_i$  (в пределах  $\pm 2$  мм) и слабой корреляцией  $v_i$  при различных  $j$ . Для 1968 и 1969 г.

характерна заметная корреляция величин  $v_i(T_j, T_0)$  при разных  $j$  и малая дисперсия их, хотя значения  $v_i$  иногда достигают значительных — для периода малых изменений — величин (порядка  $\pm 4$  мм). Сравнение между собой юстировок, выполненных в разные годы, показало, что с определенной степенью точности смещения фундаментов можно назвать «упругими», так как нуль-пункты радиальных шкал, определенные в периоды малых изменений в разные годы, например в 1968 и в 1969 г., совпадают друг с другом со средней квадратичной ошибкой, не превышающей  $\pm 1.5$  мм. В то же время это свидетельствует и о наличии необратимых смещений отражающих элементов, появляющихся от года к году. Причем заметна и связь между величинами смещений фундаментов в периоды больших изменений и величинами остаточных смещений. Вероятно, можно считать, что в летнее время и осенью (т. е. в периоды малых изменений) нуль-пункты радиальных шкал с точностью  $\pm 2.0$ — $2.5$  мм будут сохранять свое значение в течение нескольких лет.

По величинам  $v_i(T_j, T_0)$  были вычислены средние квадратичные ошибки отражающей поверхности радиотелескопа, которые возникли бы при использовании в моменты  $T_j$  нуль-пунктов шкал, определенных в момент  $T_0$ . График ошибок  $|m|$  приведен на рис. 1. Из него особенно ясно видно наличие процессов больших и малых изменений нуль-пунктов радиальных шкал. Для 1966—1968 г. период малых смещений начинается в мае и продолжается до декабря включительно. Средние квадратичные ошибки отражающей поверхности АПП не превышают  $\pm 1.0$  мм (за исключением декабря 1966 г., когда  $m = \pm 1.2$  мм). Периоды же больших изменений приходятся на январь—апрель, причем максимальные смещения имеют место в марте. Максимальные значения средних квадратичных ошибок колеблются в разные годы от  $\pm 3.2$  мм до  $\pm 6.1$  мм. Прослеживается общность характера изменения ошибки для периодов

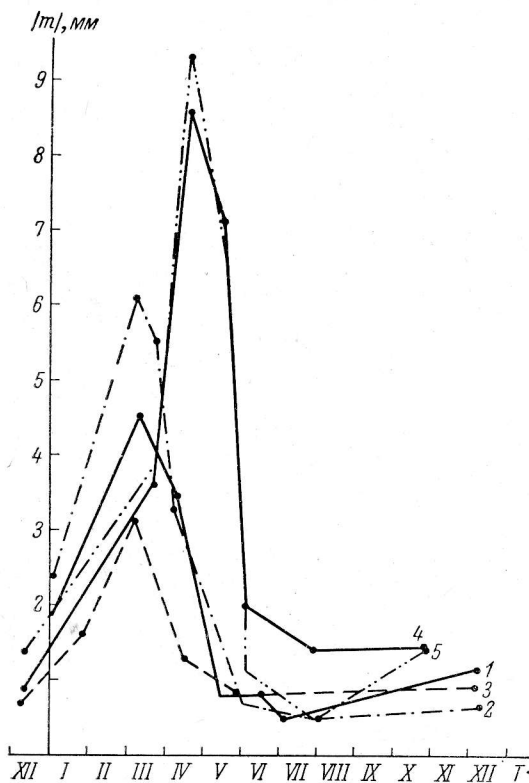


Рис. 1. Средние квадратичные ошибки отражающей поверхности АПП, обусловленные изменениями нуль-пунктов радиальных шкал и вычисленные по величинам  $v_i(T_j, T_0)$ .

1 — юстировки 1966 г.,  $T_0=4$  VII 1966; 2 — юстировки 1967 г.,  $T_0=4$  VIII 1967; 3 — юстировки 1968 г.,  $T_0=4$  VIII 1968; 4 — юстировки 1969 г.,  $T_0=10$  XII 1968; 5 — юстировки 1969 г.,  $T_0=28$  VIII 1969; T — время в месяцах.

больших смещений в 1966—1968 гг. В этом отношении 1969 г. можно признать аномальным. При сравнении юстировок 1969 г. с юстировкой 10 декабря 1968 г. максимальная средняя квадратичная ошибка поверхности

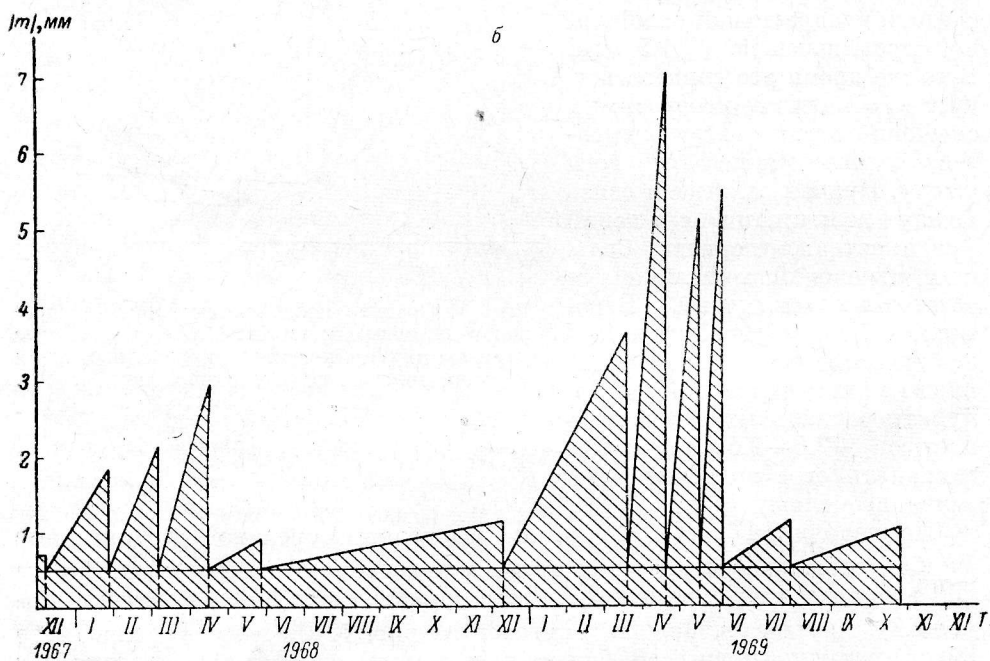
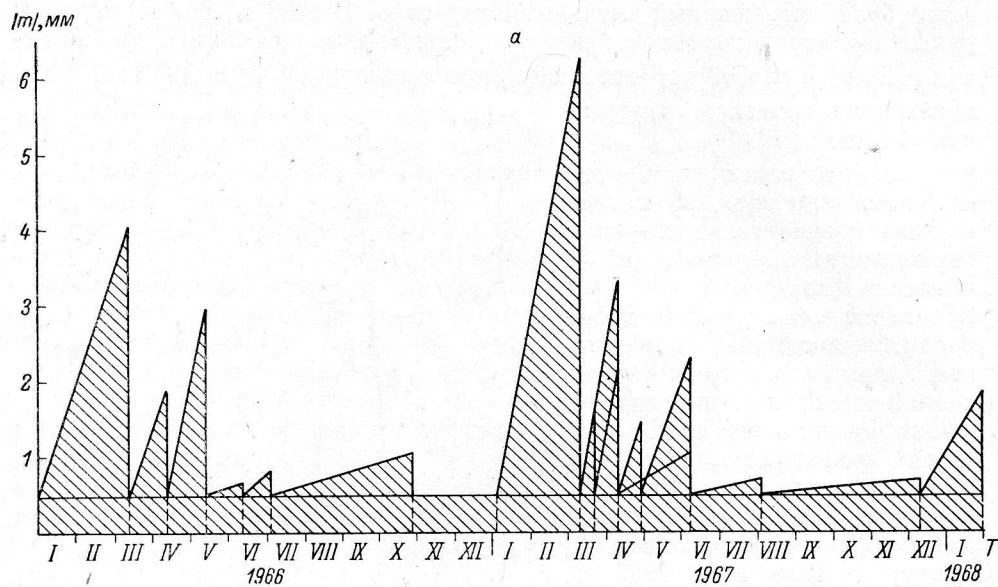


Рис. 2. Средние квадратичные ошибки изменения нуль-пунктов радиальных шкал между двумя последовательными юстировками.

а — 1966—1967 гг., б — 1968—1969 гг.; Т — время в месяцах.

(изменения мест нулей) достигает  $\pm 8.6$  мм, причем максимум сместился с середины марта на вторую половину апреля. В середине мая ошибка равнялась  $\pm 7.1$  мм и лишь в начале июня снизилась до  $\pm 2.0$  мм. Юстировки, выполненные в конце июля и в октябре, свидетельствуют уже об

относительной стабильности фундаментов: ошибки поверхности равны  $\pm 1.4$  и  $\pm 1.5$  мм. Сравнение всех юстировок 1969 г. с юстировкой 28 августа 1969 г. несколько изменило картину. Средние квадратичные ошибки поверхности относительно этой юстировки оказались несколько больше для марта и апреля ( $\pm 3.8$  и  $\pm 9.3$  мм), но уже в июле произошло снижение ошибки до  $\pm 1.2$  мм. Все это подтверждает общий «упругий» характер смещений фундаментов АПП при наличии небольших, но заметных необратимых смещений.

Для уяснения характера изменений нуль-пунктов радиальных шкал за небольшой промежуток времени каждая последующая юстировка сравнивалась с предыдущей. График средних квадратичных ошибок, характеризующих изменение нуль-пунктов радиальных шкал, происшедшее за время между двумя юстировками, приведен на рис. 2а, б. Здесь также довольно четко видна граница периодов больших и малых смещений. На рис. 1 и 2 минимальный уровень средних квадратичных ошибок равен 0.5 мм, что соответствует средней квадратичной ошибке определения разности нуль-пунктов радиальных шкал. Графики на рис. 1 и 2 взаимно дополняют друг друга.

По величинам  $m_j$  ( $T_{j+1}$ ,  $T_j$ ) были вычислены скорости изменения средних квадратичных ошибок отражающей поверхности АПП от юстировки к юстировке. При этом было сделано допущение, что в период между двумя юстировками изменение нуль-пунктов радиальных шкал происходило с постоянной, но индивидуальной для каждого щита скоростью, т. е.

$$d(v_i)/dT = \text{const}_i = v_i/\Delta T. \quad (4)$$

При таком допущении скорость изменения средних квадратичных ошибок равна

$$d(m)/dT = m/\Delta T. \quad (5)$$

График скоростей приведен на рис. 3. Наибольшие скорости в 1966—1968 гг. приходится на февраль—апрель. Максимальная скорость достигла 0.130 мм/сутки. В летние месяцы она, как правило, не превышает 0.020 мм/сутки, а в некоторые моменты держится в пределах 0.010 мм/сутки. Максимум скоростей в 1969 г. приходится на конец мая. В это время скорость достигла величины 0.300 мм/сутки; скорость же в летние месяцы не превышает 0.020 мм/сутки. Используя данные этого графика, можно рассчитать примерное время работы радиотелескопа на выбранной волне или, задавшись определенным промежутком времени между юстировками, выбрать допустимую длину волны.

Системы величин  $v_i(T_{j+1}, T_j)$  и  $v_i(T_j, T_0)$ , определенные за четыре года, можно рассматривать как конкретные реализации четырех различных случайных функций (процессов):  $v(T_{j+1}, T_j)_{\text{max}}$ ,  $v(T_{j+1}, T_j)_{\text{min}}$ ,  $v(T_j, T_0)_{\text{max}}$ ,  $v(T_j, T_0)_{\text{min}}$ , где индексы «max» или «min» показывают, что функция отно-

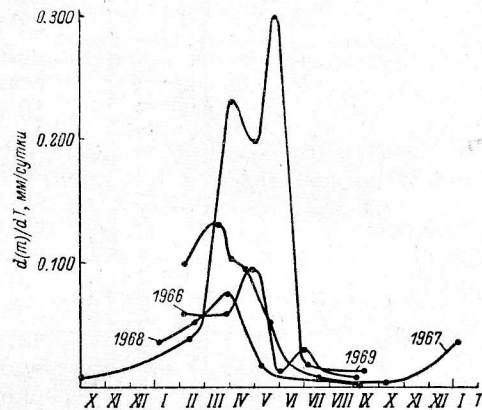
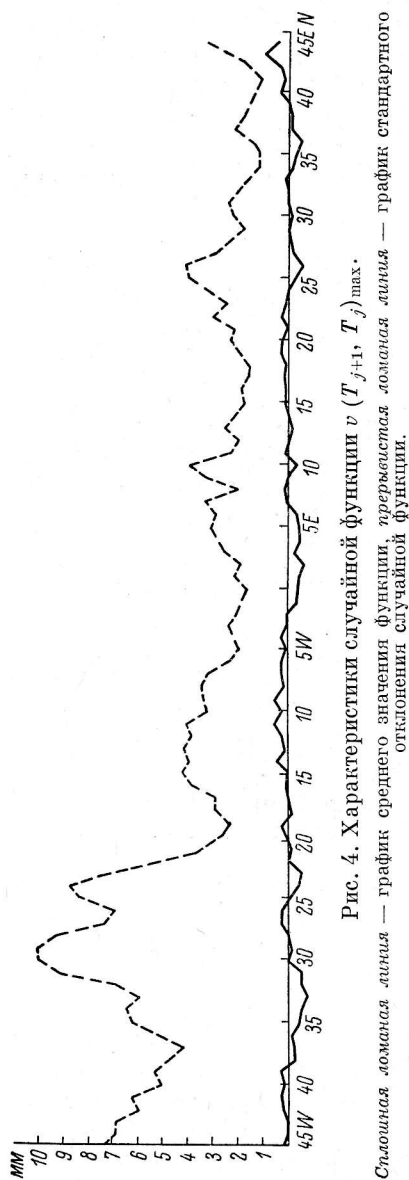


Рис. 3. Скорости изменения средних квадратичных ошибок отражающей поверхности АПП.

$T$  — время в месяцах.

сится к периодам больших или малых смещений. Поэтому процесс изменения нуль-пунктов радиальных шкал можно описать, используя параметры этих случайных функций. Среднее значение случайной функции  $v(T_{j+1}, T_j)_{\max}$  характеризуется незначительными колебаниями отдельных значений  $\bar{v}_i$  вокруг нуля: стандартное отклонение этих колебаний равно 0.3 мм. Стандартное отклонение функции имеет более сложный вид (рис. 4) и дает более полное представление о характере изменения нуль-пунктов радиальных шкал. Как видно из графика, западная часть АПП (до щита 22W) изменяется гораздо сильнее остальной части. Здесь отдельные значения стандартного отклонения достигают 10 мм, а значения меньше 5 мм имеют только два щита. Эти щиты находятся как раз на участке, где в разные годы сосредоточены узловые точки. Значения стандартного отклонения для остальной части антенны колеблются от 1.5 до 4.0 мм, а для щитов 35, 36 и 42E они лишь ненамного больше 1.0 мм. В этой части антенны график стандартного отклонения случайной функции имеет периодический характер (период  $\sim 20$  щитов).



Среднее значение случайной функции  $v(T_j, T_0)_{\max}$  характеризуется колебаниями отдельных значений  $\bar{v}_i$  вокруг нуля с гораздо большей амплитудой: некоторые значения достигают величины 5.8 мм, что подтверждает наличие необратимых смещений. Стандартное отклонение этих колебаний равно 1.9 мм. Особенно резкие колебания приходится на западную часть АПП до щита 22W. Стандартное отклонение этой случайной функции почти совпадает со стандартным отклонением функции  $v(T_{j+1}, T_j)_{\max}$ .

Случайные функции  $v(T_{j+1}, T_j)_{\min}$  и  $v(T_j, T_0)_{\min}$  очень похожи. Их средние значения представляют собой колебания величин  $\bar{v}_i$  вокруг нуля со стандартными отклонениями 0.3 и 0.4 мм. Стандартные отклонения этих функций характеризуются значениями от 0.5 до 2.0 мм.

Для каждой реализации были вычислены нормированные автокорреляционные функции [7]:

$$\rho(\tau) = \left[ \sum_{i=1}^{n-\tau} v(i) v(i + \tau) \right] : \left[ (n - \tau) D \right], \quad (6)$$

(где  $\tau$  — интервал сдвига,  $D$  — дисперсия) и по ним — усредненные автокорреляционные функции  $\rho_{\text{ср}}(\tau)$  для каждого из четырех видов случай-

ных процессов. Для процессов  $v(T_{j+1}, T_j)_{\max}$  и  $v(T_j, T_0)_{\max}$  значения  $\rho_{\text{ср}}(\tau)$  оказываются больше 0.5 при  $3 > \tau > 2$ , а для процессов  $v(T_{j+1}, T_j)_{\min}$  и  $v(T_j, T_0)_{\min}$  — при  $\tau < 1$ . Это значит, что в периоды больших изменений между смещениями по радиусу щитов  $i$  и  $i+2$  существует статистическая

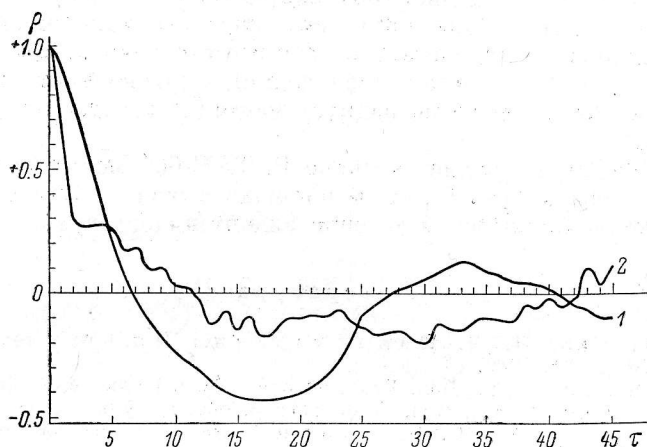


Рис. 5. Усредненная нормализованная автокорреляционная функция процесса  $v(T_{j+1}, T_j)_{\max}$  (1) и процесса  $v(T_{j+1}, T_j)_{\min}$  (2).

$\tau$  — величина сдвига (число щитов).

связь, а в периоды малых изменений такой связи нет и между соседними щитами. На рис. 5 приведены графики функции  $\rho_{\text{ср}}(\tau)$  для процессов  $v(T_{j+1}, T_j)_{\max, \min}$ . Функции  $\rho_{\text{ср}}(\tau)$  были использованы для вычисления нормированной спектральной плотности изучаемых процессов [7]:

$$s(\omega_i) = 2/\pi \cdot \sum \rho(\tau) \cos \omega_i \tau. \quad (7)$$

На рис. 6 приведены графики спектральной плотности процессов  $v(T_{j+1}, T_j)_{\max, \min}$ . Наибольшие значения  $s(\omega_i)$  приходятся для процесса  $v(T_{j+1}, T_j)_{\max}$  на гармоники с номерами 4—7, причем максимум приходится на пятую гармонику. Частоты этих гармоник соответствуют периодам в 22.5—12.75 щитов, период для пятой гармоники равен 18 щитам. Для процесса  $v(T_{j+1}, T_j)_{\min}$  наибольшие значения спектральной плотности приходятся на вторую—пятую гармоники с максимумом на четвертой гармонике.

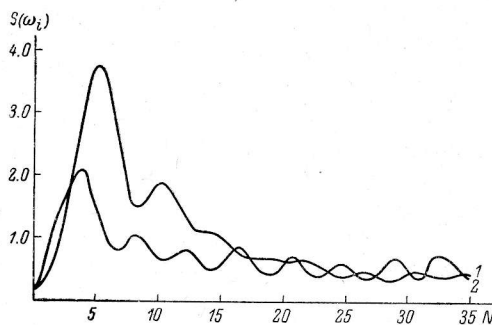


Рис. 6. Спектральная плотность процесса  $v(T_{j+1}, T_j)_{\max}$  (1) и процесса  $v(T_{j+1}, T_j)_{\min}$  (2).

Таковы некоторые статистические характеристики процесса изменений нуль-пунктов радиальных шкал БПР.

Вышеприведенные данные подтверждают, что точность отражающей поверхности антенны переменного профиля в значительной степени зависит от физических свойств грунтов, являющихся основанием фундаментов отражающих элементов АПП. Поэтому при выборе площадок для радиотелескопов типа БПР особое внимание уделяется оценке несущей



способности грунтов. Физические свойства грунтов на площадке радиотелескопа РАТАН-600 очень высоки, глубина промерзания незначительна, а уровень грунтовых вод низок. Кроме того, центр тяжести секции кругового отражателя РАТАН-600 почти совпадает с «продольной» осью фундамента: эксцентриситет в радиальном направлении  $\sim 0.2$  м. Все это позволяет надеяться, что осадка кругового отражателя закончится быстро, а сезонные подвижки фундаментов не превысят нескольких десятых долей миллиметра. По расчетам крен секции кругового отражателя приведет к смещению элемента по радиусу менее 0.1 мм (для средней высоты фундамента).

Таким образом, на радиотелескопе РАТАН-600 может быть получена отражающая поверхность большой площади с очень высокой точностью, которая будет сохраняться в течение значительного времени.

#### Литература

1. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Приборы и техника эксперимента, № 2, 19, 1959.
2. С. Э. Хайкин и др., Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 188, 3, 1972.
3. С. Э. Хайкин и др., Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 164, 3, 1960.
4. Ю. Н. Парийский, С. Э. Хайкин, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 164, 27, 1960.
5. С. Э. Хайкин, Ю. Н. Парийский, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 172, 87, 1964.
6. Ю. К. Зверев, А. И. Копылов, О. Н. Шиврис, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 185, 219, 1970.
7. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. Физматгиз, М., 1958.

Декабрь 1970 г.

М И Т