

УДК 520.2.01

## **АВТОКОЛЛИМАЦИОННАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЮСТИРОВКА И КОНТРОЛЬ КПД ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600**

**В. Б. Хайкин, Н. Н. Бурсов**

**Специальная астрофизическая обсерватория РАН**

Статья поступила в редакцию 12 октября 2016 г.

**Аннотация.** Автоколлимационный (АК) метод юстировки был предложен для антенны переменного профиля в конце 60-х годов и до настоящего времени является наиболее востребованным методом юстировки радиотелескопа РАТАН-600. Приводятся особенности методики и результаты автоматической автоколлимационной юстировки (привязки) щитов Северного сектора радиотелескопа РАТАН-600 с использованием юстировочной аппаратуры нового поколения на волне 8 мм. С целью диагностики состояния антенны, эффективности работы щитов и контроля качества юстировки предложен способ автоматического измерения КПД (вклада) щитов. По результатам автоматической юстировки, контроля КПД щитов и последующих наблюдений делается вывод о высокой эффективности предложенного метода. Достигнутую точность привязки элементов антенны после автоматической автоколлимационной юстировки в нынешнем состоянии кинематики и АСУ радиотелескопа можно оценить на уровне 0.15 мм (СКО) при времени юстировки одного щита по трем координатам 1.5-2 минуты. Время выполнения автоколлимационной автоматической юстировки Северного сектора (225 элементов) — 6.5-7 часов, автоматическое измерения КПД щитов сектора занимает 3.5 часа. Результаты выполненных измерений показывают необходимость модернизации кинематических механизмов элементов радиотелескопа для повышения эффективности самой юстировки радиотелескопа и антенной эффективности коротковолновых наблюдений.

**Ключевые слова:** радиотелескоп, автоматическая автоколлимационная юстировка, антенная эффективность, КПД элементов радиотелескопа.

**Abstract.** Autocollimation adjustment method has been proposed for the variable profile antenna in the end of the 1960s; it is the most popular method of adjustment of the RATAN-600 radio telescope up to the present time. We give a particular methodology and results of the automatic autocollimation adjustment (alignment of panels) of the Northern sector of RATAN-600 using a new generation of adjustment equipment on a wavelength of 8 mm. A method of an automatic measurement of panel efficiency (contribution) is proposed to diagnose the condition of the antenna, the performance of panels operation and the quality control of the adjustment. The results of the automatic adjustment, panel efficiency control and subsequent observations demonstrate the high efficiency of the proposed method. With the current condition of the kinematics and ACS of the radio telescope, accuracy of the antenna element alignment achieved after an automatic autocollimation adjustment can be estimated at the level of 0.15 mm (r.m.s), while the time of three-coordinates adjustment of the panel is 1.5-2 minutes. Automatic autocollimation adjustment of the Northern sector (225 elements) takes 6.5-7 hours, the automatic measurement of the efficiency of panels — 3.5 hours. The results of measurements show the need for the modernization of the kinematic mechanisms of the radio telescope elements in order to improve the performance of the alignment procedure itself, and the efficiency of short-wavelength observations.

**Key words:** radio telescope, automatic autocollimation adjustment, antenna efficiency, panel efficiency and contribution

## **Введение**

Автоколлимационный метод юстировки был предложен для антенны переменного профиля (АПП) в конце 60-х годов на БПР [1] и до настоящего времени является наиболее востребованным методом юстировки и антенных измерений на радиотелескопе РАТАН-600, что связано с легкостью перестройки АПП из юстировочного состояния в рабочее. Несмотря на полную автоматизацию Главного зеркала радиотелескопа в 80-х годах, переход на современную компьютерную базу и новую архитектуру управления верхнего

уровня АСУ [2], штатная автоколлимационная юстировка РАТАН-600 до последнего времени выполнялась оператором с нижней галереи Главного зеркала радиотелескопа с помощью шкал сельсинов. Процесс юстировки сектора (225 элементов) занимал 4-5 дней и требовал перевода антенны в режим полуавтоматики с переключкой 3х225 разъемов и установкой специальных плат (нуль-органов) в шкафы управления щитов для реализации режима полуавтоматики. Исключения составляли попытки выполнения радиоголографической юстировки сектора радиотелескопа, где измерения проводились с помощью каретки облучателя без движения элементов Главного зеркала, а результаты юстировки вводились в виде юстировочных поправок автоматически с использованием АСУ [3].

После введения в штатную эксплуатацию нового высокостабильного автоколлимационного юстировочного комплекса с цифровой записью юстировочного сигнала [4] удалось отказаться от режима полуавтоматики и перейти к управлению элементами Главного зеркала во время юстировки с помощью АСУ по команде оператора с ПК на облучателе радиотелескопа. Полноценная АК автоматическая юстировка радиотелескопа в безлюдном режиме требовала не только иного уровня надежности аппаратуры и ее автоматизации, но и отладки программных алгоритмов управления АСУ и обработки данных. Для контроля качества юстировки был также необходим способ автоматического измерения КПД (вклада) щитов.

В настоящей работе приводится методика и результаты АК юстировки и контроля КПД элементов радиотелескопа в полностью автоматическом (безлюдном) режиме работы, дается оценка эффективности предложенных методов.

### **Способ автоматической АК юстировки и контроля КПД щитов радиотелескопа РАТАН-60**

В работе [4] описан автоколлимационный юстировочный комплекс нового поколения на волне 8 мм/18.8 мм, кратко изложена методика АК юстировки и

требования к юстировочной аппаратуре. В процессе юстировки находятся оптимальные положения щитов по трем координатам, дающие максимум АК сигнала относительно опорного щита. С этой целью юстируемый щит отклоняется в небольших пределах в обе стороны от своего исходного положения (АК-нуля), что позволяет пройти максимум сигнала от щита. Окончательная юстировка ведется на волне 8 мм, волна 18.8 мм может использоваться для предварительной юстировки антенны и при больших значениях поправок к положению элементов для устранения неоднозначности величиной в длину волны.

Остановимся подробнее на процедуре и методике автоматической юстировки. В процессе подготовки автоматической юстировки был предложен и отлажен алгоритм и программа управления щитами по трем координатам, а также алгоритм автоматической обработки результатов измерений. На рис.1 показан автоколлимационный двухчастотный юстировочный комплекс нового поколения [4], установленный в центре подвижной каретки облучателя тип 2. Схема АК юстировки с пространственным разнесением излучаемого и отраженного от антенны сигналов показана на рис. 2. При этом, строго говоря, автоколлимация не осуществляется. Однако вследствие использования общего вторичного зеркала АПП метод обладает всеми особенностями, присущими автоколлимационному методу [1]. В нашем случае фазовые центры первичных облучателей фактически оказываются в двух фокусах формируемого эллипса  $F_1$  и  $F_2$ . Вследствие малого расстояния между фокусами  $l = F_1F_2$  в сравнении с радиусом окружности  $R_0$  и малого эксцентриситета, эллипс практически не отличается от окружности с центром посередине между фокусами.

Вследствие малого расстояния между фокусами  $l = F_1F_2$  в сравнении с радиусом окружности  $R_0$  и малого эксцентриситета, эллипс практически не отличается от окружности с центром посередине между фокусами. Отличие эллипса от окружности в нашем случае:

$$\Delta R = \frac{R_0 * \sqrt{R_0^2 + l^2}}{\sqrt{R_0^2 * \cos^2(\varphi) + (R_0^2 + l^2) * \sin^2(\varphi)}} - R_0$$

что для  $l < 600$  мм не превышает 0.1 мм на краю сектора антенны ( $\varphi_0=45^\circ$ ) и не приводит к сколь-нибудь значимой систематической погрешности формы профиля юстируемой антенны для наблюдений на волне 8 мм. Обычное расстояние между рупорами не превышает 100 мм - 600 мм.



Рис. 1. Автоколлимационный юстировочный комплекс нового поколения, установленный в центре подвижной каретки облучателя тип 2 РАТАН-600

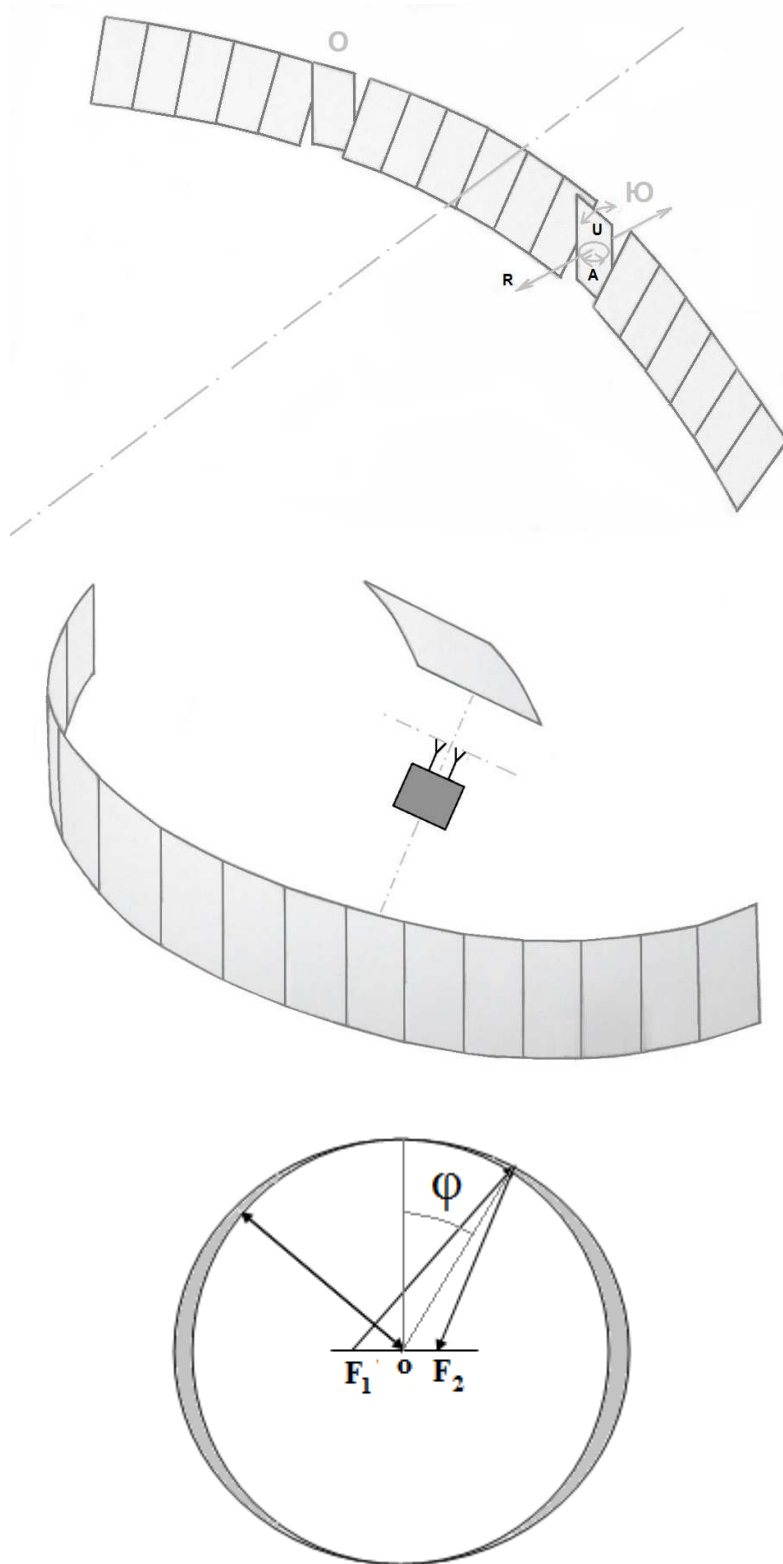


Рис. 2. Схема АК юстировки с пространственным разнесением передающего и приемного рупоров

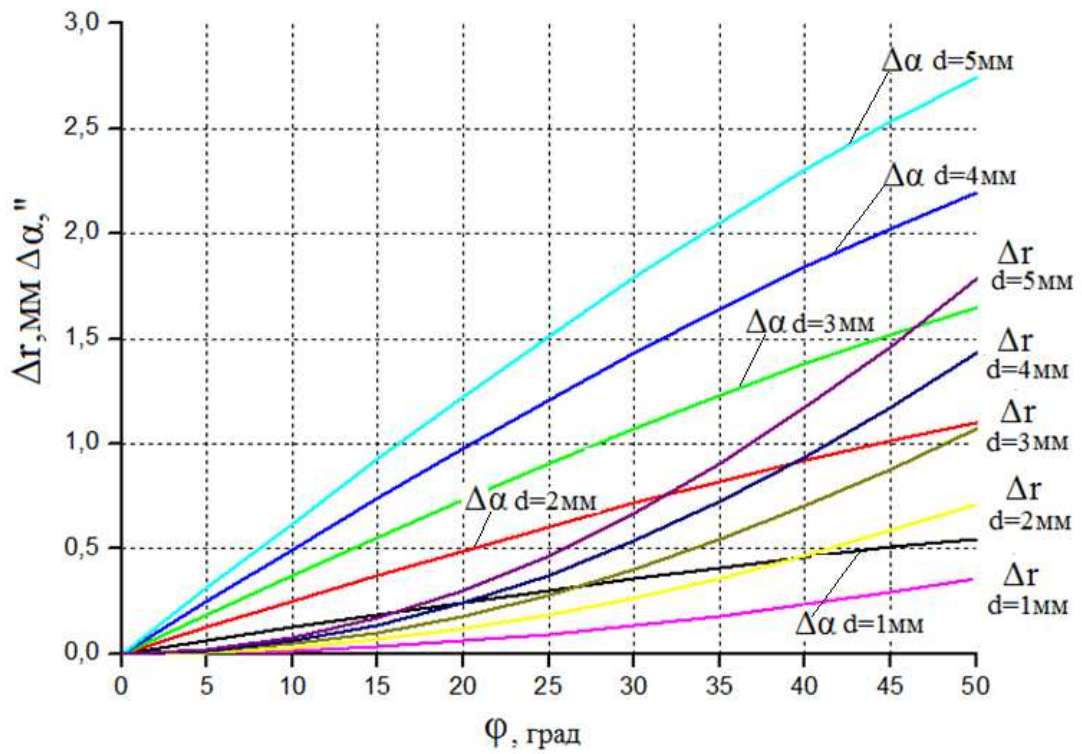
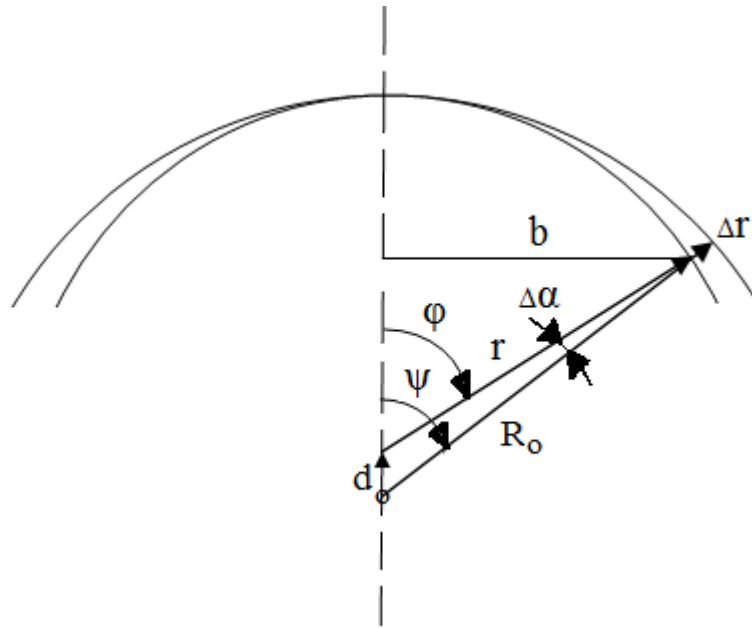


Рис.3.Окружность другого радиуса  $R'_0 < R_0$  при смещении облучателя из центра в сторону антенны на величину  $d$  (вверху) и возникающая поправка по азимуту  $\Delta\alpha$  и радиусу  $\Delta r$  (внизу)

Существенно более значимые систематические радиальные ошибки возникают на краю сектора, если облучатель продольно смещен на величину  $d$  относительно центра исходной окружности с радиусом  $R_0 = 288000$  мм. В этом случае в процессе юстировки получается окружность другого радиуса  $r$  (рис.3). С учетом теоремы синусов:

$$\frac{d}{\sin \Delta \alpha} = \frac{r}{\sin \psi}$$

а также:

$$r = R_0 - d$$

$$b = (R_0 - \Delta r) \sin \psi = r \sin \varphi$$

$$\cos \alpha = \cos^2 \frac{\Delta \alpha}{2} - \sin^2 \frac{\Delta \alpha}{2}$$

получаем азимутальные и радиальные поправки к местам АК-нулей:

$$\Delta \alpha_i = \arcsin \left( \frac{\sin(\varphi_i)}{\frac{R_0}{d} - 1} \right)$$

$$\Delta r_i = d \left( 1 - \cos \varphi_i + \sin \varphi_i \operatorname{tg} \frac{\Delta \alpha_i}{2} \right)$$

где  $\varphi_i$  - угол между осью антенны и направлением на  $i$ -й щит,  $d$ - продольное смещение от центра исходной окружности. Как следует из рис. 3 азимутальная поправка незначительна, а радиальная поправка равна 0.5 мм на краю сектора ( $\varphi_i = 45^\circ$ ) при продольном смещении фокуса на 2 мм, что в 5 раз больше отклонения эллипса от исходной окружности на краях сектора при поперечном разнесении фазовых центров рупоров на 600 мм.

Юстируемые щиты, центры которых образуют исходную окружность радиуса  $R_0 = 288000$  мм, в процессе автоматической юстировки последовательно устанавливаются в вертикальное положение, перемещаются по трем координатам (углу места  $U$ , радиусу  $R$  и азимуту  $A$ ) вблизи своих



АК-нулей, а затем отводятся в исходное наклонное положение. Полученные результаты измерений оперативно обрабатываются и вводятся в АСУ антенны. Кроме сигнала, отраженного от юстируемого и опорного щитов, в процессе юстировки существует паразитное поле рассеяния от остальных отвернутых по углу щитов, от их фундаментов, а также местных предметов. Это паразитное поле рассеяния определяется боковыми дифракционными лепестками, возникающими при рассеянии на всей рабочей поверхности щита, щелях и неоднородностях отражающей поверхности щитов, а также на структуре фундаментов из железобетона. Вклад дифракционных лепестков снижается по мере отведения неюстируемых щитов на большие углы и при спадающем облучении щита по вертикали, вклад фундаментов и местных предметов сильно снижается при использовании широкополосного шумового сигнала. В целом, в сравнении с импульсно-временным способом разделения узкополосных сигналов, традиционно применяемым в АК режиме [1], способ пространственного разделения с шумовым сигналом показал достаточно высокую развязку излучаемого и принимаемого сигналов, допустимый уровень паразитного рассеяния и значительный выигрыш в чувствительности и стабильности метода за счет большего времени интегрирования и широкой полосы приемника. Это в значительной степени позволило выполнять длительную юстировку антенны в автоматическом безлюдном режиме без какой-либо подстройки аппаратуры в условиях переменного уровня сигнала и рассеянного фона в процессе АК юстировки. При этом достигнута высокая повторяемость результата автоматической АК юстировки и измерения КПД (вклада) щитов на волне 8 мм.

На рис.4 представлена запись сигнала 5 щитов в процессе автоматической АК юстировки: видны движения щитов по трем координатам вблизи исходных АК- нулей по заданной программе. В процессе юстировки юстируемый щит после наведения на АК-нули последовательно отклоняется от них на  $\pm 10$  делений точного сельсина (д.т.с.) по радиусу и углу и  $\pm 20$  д.т.с. по азимуту. Если при установке щита в первое или во второе положение уровень сигнал от

щита не падает, а растет в сравнении с исходным положением (АК-нулем), щит программно направляется дальше на  $-20$  д.т.с.,  $+20$  д.т.с и т.д., пока измеряемый сигнал не начнет падать и не будет прописан максимум сигнала щита. Управление щитом с помощью АСУ, измерение, запись и обработка сигнала от щита, выполняется с помощью одного ПК в режиме сетевого доступа, что позволяет синхронизовать все процессы.

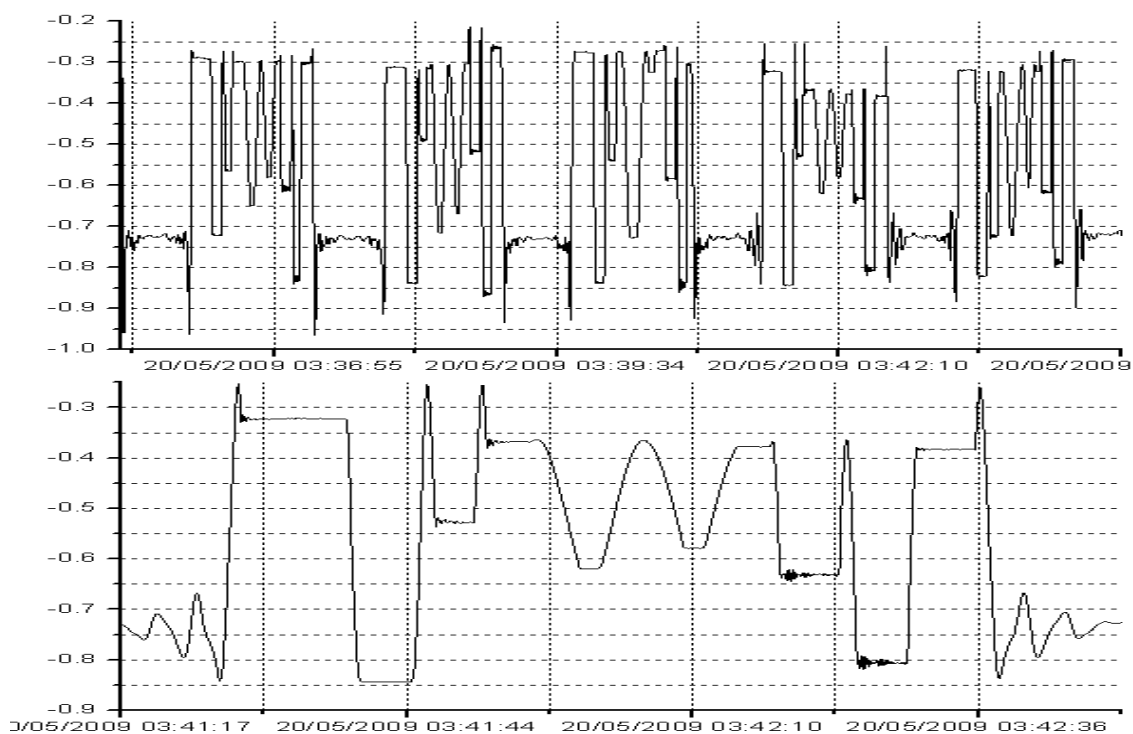


Рис. 4. Пример записи сигнала 5 щитов (вверху) и одного из пяти щитов (внизу) в процессе автоматической АК юстировки Северного сектора

Наглядный пример обработки результатов автоматической юстировки с помощью вписывания в измеренные значения сигнала от щита полинома 2-й степени методом наименьших квадратов (МНК) приведен на рис. 5. Искомая поправка в положении щита соответствует положению экстремума полинома.

Практически положение щита в максимуме сигнала проще и быстрее находить по трем измеренным точкам уровня сигнала, через которые можно провести единственную параболу без вписывания параболы МНК. Положение ее максимума и, следовательно, искомые координата щита определяются с

помощью простых формул, вытекающих из свойств полинома второй степени.

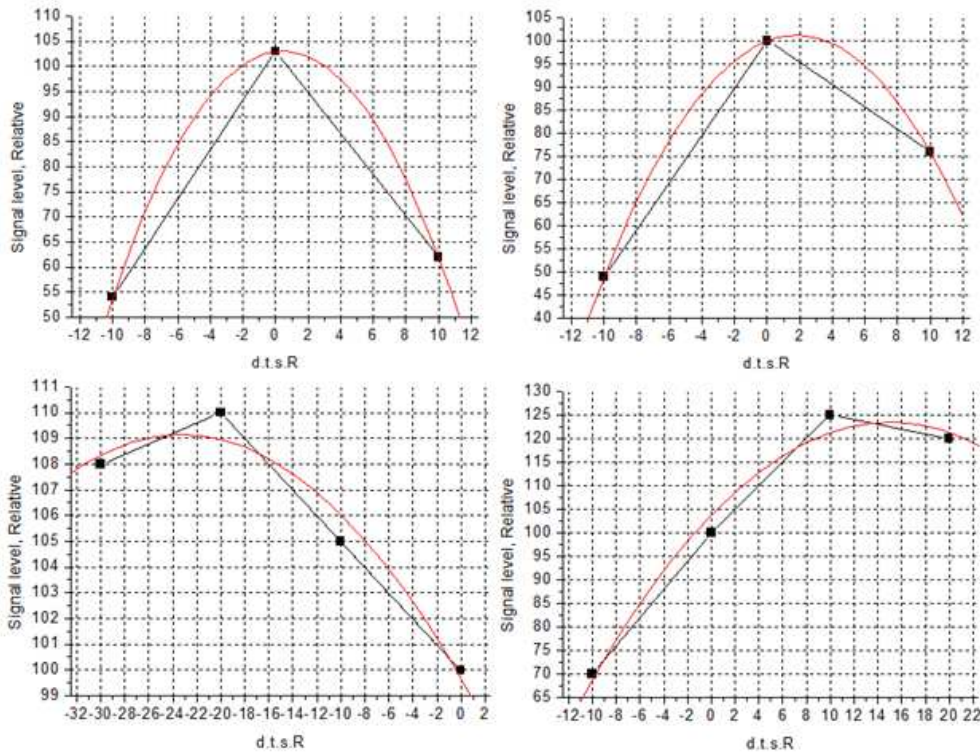


Рис. 5. Пример обработки результатов автоматической юстировки с помощью вписывания в измеренные значения сигнала полинома методом наименьших квадратов

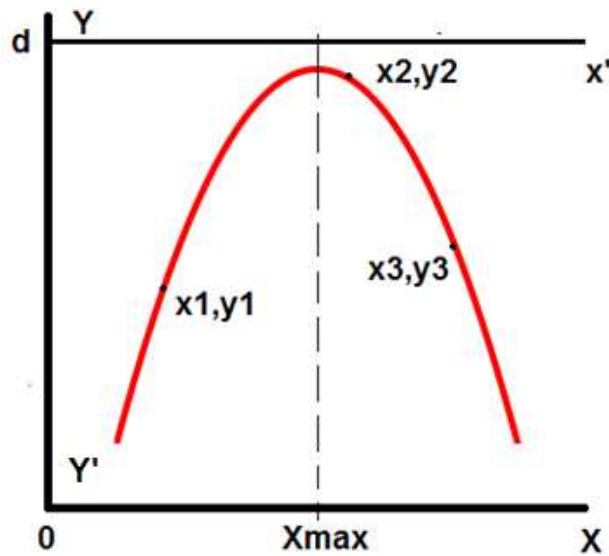


Рис. 6. Пример параболы, проходящей через 3 измеренные точки

На рис.6 приведен пример перевернутой параболы, проходящей через 3 измеренные точки  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ , где  $(x_2, y_2)$  соответствует точке с максимальным значением по оси  $Y$ :  $y_1 < y_2$ ,  $y_2 > y_3$ . Если  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  — координаты измеренных точек в исходной системе координат  $X-Y$  ( $y$  — уровень сигнала,  $x$  — отклонение щита в д.т.с.), а  $(x'_1, y'_1)$ ,  $(x'_2, y'_2)$ ,  $(x'_3, y'_3)$  — координаты измеренных точек в новой системе координат относительно линии  $X'-Y'$ , где  $y'_1 = d - y_1$ ,  $y'_2 = d - y_2$ ,  $y'_3 = d - y_3$ ,  $d$  — константа (заведомо больше уровня  $Y_{\max}$ ) можно однозначно найти координаты вершины стандартной (растущей) параболы через коэффициенты полинома второй степени:

$$y = ax^2 + bx + c;$$

$$X_{\min} = -\frac{b}{2a}; \quad Y_{\min} = -\frac{D}{4a},$$

где

$$D = b^2 - 4ac.$$

Тогда коэффициенты полинома второй степени, выраженные через значения измеренных координат находятся как

$$a = \frac{y'_3 - \frac{x'_3(y'_2 - y'_1) + x'_2 y'_1 - x'_1 y'_2}{x'_2 - x'_1}}{x'_3(x'_3 - x'_1 - x'_2) + x'_1 x'_2}; \quad b = \frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1} - a(x'_1 + x'_2).$$

Искомые координаты максимума:  $X_{\max} = X_{\min}$ ,  $Y_{\max} = d - Y_{\min}$ , и нас интересует в основном  $X_{\max}$ , а  $Y_{\max}$  показывает рост КПД (вклада) щита в процессе юстировки.

Для оценки качества антенны до и после автоматической юстировки предложено выполнять автоматический контроль КПД (вклада) щитов с помощью их последовательного наведения на АК-нули — в этом случае последовательно измеряется вклад каждого щита. В предложенном алгоритме

автоматического измерения КПД (вклада) щитов сектора все щиты сначала отводятся в заданное положение по углу места кроме опорного, а потом последовательно наводятся на АК-нули по углу места, что позволяет оценивать не только мощностной вклад щита, но и его фазировку с опорным щитом. На рис. 7 приведен пример автоматического измерения КПД (вклада) 10 щитов Северного сектора. В процессе наведения щитов на АК-нули на фоне опорного возникают интерференционные лепестки разного знака, на пятом слева щите видны «усы», вызванные ошибкой установки щита по углу места.

Автоматическая юстировка Северного сектора после отладки процесса длится 6.5–7 часов в ночное время. Контроль вклада щитов выполнялся до и после юстировки и минимально занимал 3.5 часа в ночное время. В ночное время наблюдаются наименьшие амплитудно-фазовые искажения сигнала из-за неоднородностей и турбулентности атмосферы приземного слоя и различий электрических длин пути волны из фокуса до щитов и обратно. Днем, как правило, влияние атмосферы приземного слоя выражается в дрожании и смещении максимума АК фокального пятна, особенно на волне 8 мм.

### **Результаты автоматической АК юстировки и контроля КПД щитов Северного сектора РАТАН-600**

На рис. 8–11 приведены результаты автоматической АК юстировки Северного сектора РАТАН-600, КПД щитов, измеренные поправки в положении щитов и АК фокальные пятна на волне 8 мм до и после автоматической юстировки. Как видно из рис. 8, КПД многих щитов после юстировки существенно (в несколько раз) возрастает, особенно в центральной части антенны. Как видно из рис. 9, поправки носят как случайный характер с малым радиусом корреляции, так и систематический с характерным масштабом порядка одной группы щитов (25 щитов) и более, некоторые поправки по радиусу превышают 1-2 мм, по углу 3', по азимуту 1'. Амплитуда АК фокальных пятен сразу после юстировки возросла на 30-40%, боковые лепестки симметрировались, их уровень уменьшался в 2-3 раза (рис. 10).

Устойчивое повышение амплитуды АК фокальных пятен Северного сектора на волне 8 мм на 35% при введении поправок по результатам автоматической АК юстировки через два дня после ее выполнения демонстрирует рис. 11.



Рис.7. КПД 10 щитов Северного сектора до АК юстировки

Многочисленные измерения КПД щитов Северного сектора показали наличие ошибок установки, вызванных несовершенством существующих кинематических механизмов радиотелескопа РАТАН-600, а также плохим состоянием механизмов выборки люфта и отсутствием контр-грузов у ряда элементов. Так автоматическое измерение КПД Северного сектора в сентябре 2015 г показало, что ряд щитов (более 10%) имеет на волне 8 мм низкий (менее 30%) КПД. После наладки механизмов выборки люфта у большинства щитов КПД поднялся до среднего уровня.

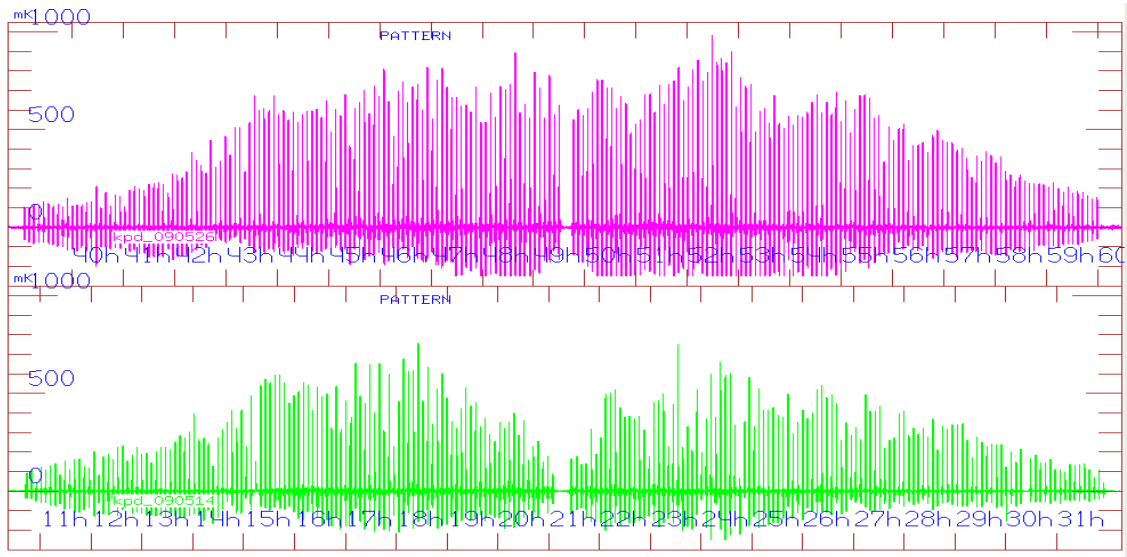


Рис. 8. Результаты автоматической АК юстировки Северного сектора РАТАН-600 на волне 8 мм в мае 2009 г, КПД (вклады) щитов до (внизу) и после (вверху)

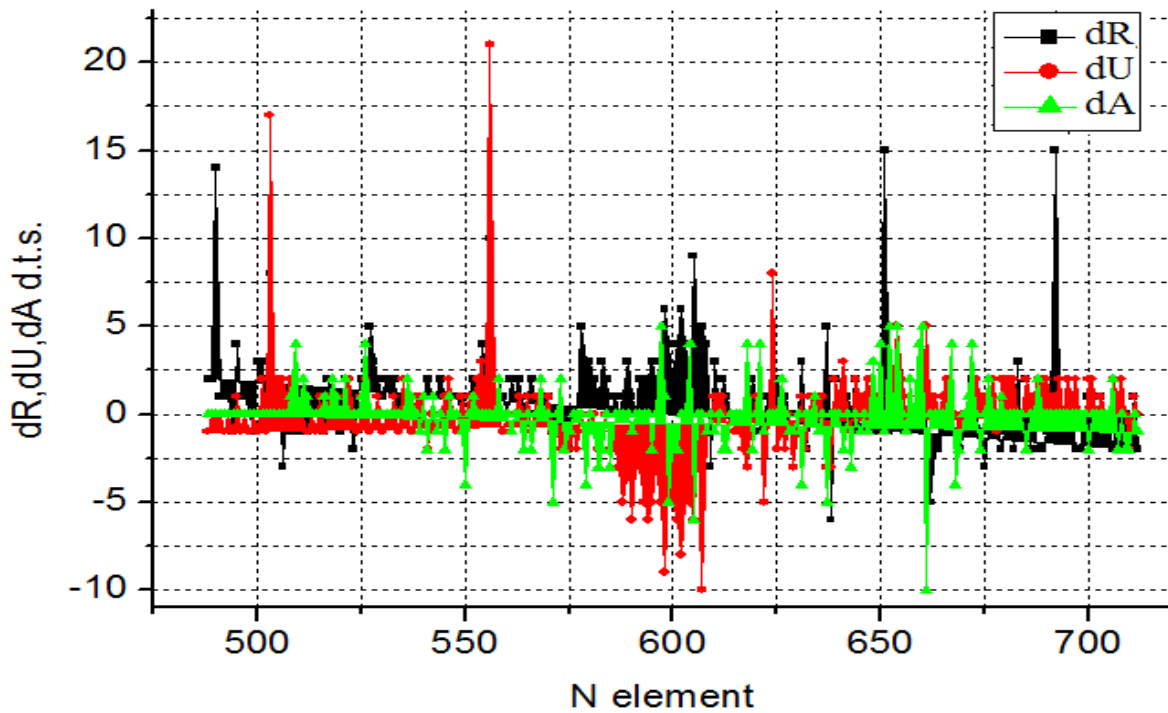


Рис. 9. Поправки  $dR$ ,  $dU$ ,  $dA$  в делениях точного сельсина (d.t.s.) по результатам автоматической АК юстировки 26.05.2009, 1 d.t.s.=0.166 мм (R), 25" (U), 10" (A)

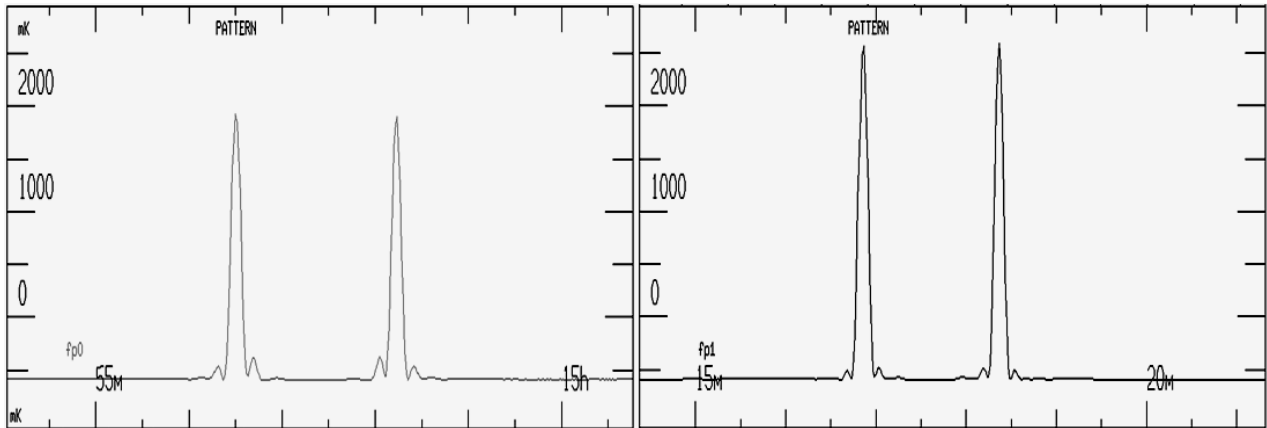


Рис. 10. АК фокальные пятна Северного сектора до (слева) и после (справа) введения поправок, полученных по результатам автоматической АК юстировки

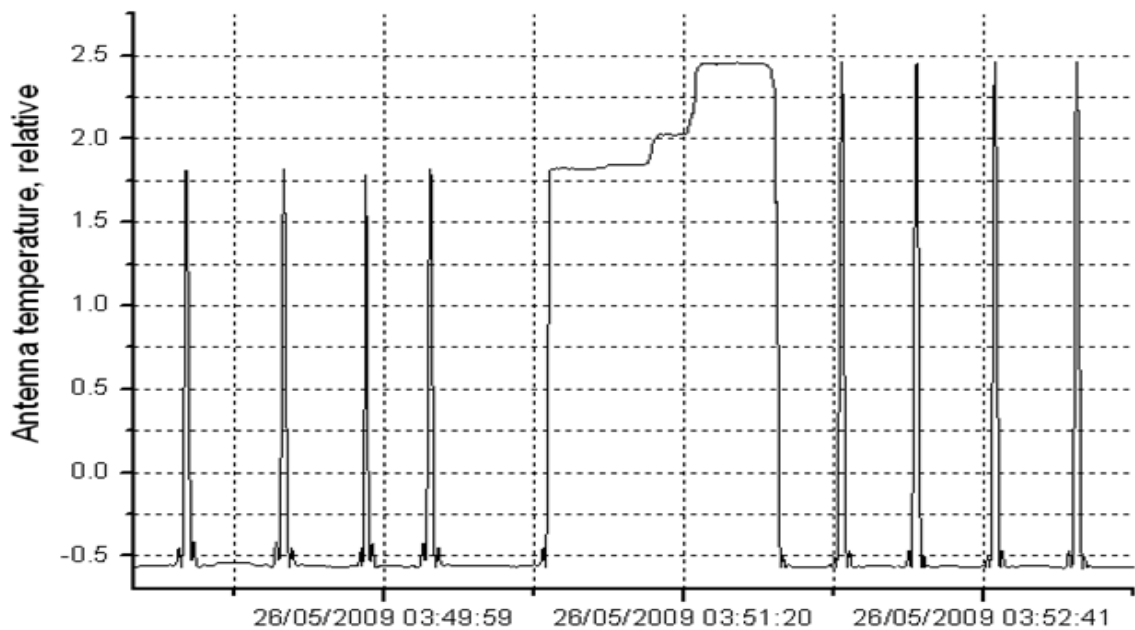


Рис. 11. АК фокальные пятна Северного сектора на волне 8 мм до и после коррекции антенны (в центре) по результатам автоматической АК юстировки через два дня после ее выполнения

По результатам измерений относительная точность (повторяемость) автоматической АК юстировки (привязки) элементов радиотелескопа в нынешнем состоянии кинематики и АСУ составляет 0.15 мм (СКО) при



времени юстировки одного щита 1.5-2 минуты. Время измерений КПД и юстировки щитов одного сектора (225 элементов) составляет 3.5 и 7 часов соответственно. Достижимая точность метода определяется возможностями АСУ и после модернизации кинематических механизмов и приводов может составить 0.05 мм при скорости юстировки 2 щита в минуту. Способы модернизации кинематических механизмов и приводов элементов радиотелескопа были предложены и испытаны в [10].

Настоящая работа демонстрирует высокую эффективность разработанных методов автоматической АК юстировки и контроля КПД элементов радиотелескопа в режиме автоматики. В то же время результаты выполненных измерений показывают необходимость модернизации кинематических механизмов элементов радиотелескопа [10] с целью повышения эффективности самой юстировки радиотелескопа и антенной эффективности коротковолновых наблюдений.

### **Литература**

1. Ходжамухамедов Н., Стоцкий А.А., Боровик В.Н. Автоколлимационный метод юстировки и контроля антенны переменного профиля // Радиотехника и электроника. Т. 15. №2, 1970. С. 258.
2. Жеканис Г.В. Состояние и перспективы развития автоматизированной системы управления антенной РАТАН-600 / В сб. тезисов конференции Радиотелескопы РТ-2002. Антенны, аппаратура, методы. 9-11 октября 2002.
3. Pinchuk G.A., Sinyanskii V.I., Stotskii A.A., Khaikin V.B. Use of autocollimation radioholographic method for the RATAN-600 radio telescope testing / Proc. Int. Workshop Holography testing of large radio telescopes. N. Arkhyz, 1990.
4. Хайкин В.Б., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Шлензин С.В. Двухчастотный автоколлимационный юстировочный комплекс для радиотелескопа РАТАН-600 // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. № 5, 2014. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/4/text.pdf>.

5. Хайкин В.Б., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Закамов В.Р. Компактные высокочувствительные радиометрические модули ММ диапазона для решения различных прикладных задач / В сб. докладов 9-го Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Н. Новгород, март 2013.

6. Chernobrovkin R., Popenko N., Khaikin V., Granet Ch.. Compact Efficient Feed-Horn at 30–38 GHz for a Multi-beam Radio Telescope // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz waves. V. 31. № 7, July 2010. PP. 840-851.

7. Госачинский И.В., Майорова Е.К., Парийский Ю.Н. Результаты исследования радиотелескопа РАТАН-600 на волне 3.2 мм по наблюдениям Солнца, Луны и Юпитера // Сообщения Специальной астрофизической обсерватории. Вып. 63, 1989. С. 38-47.

8. Хайкин В.Б., Майорова Е.К., Чухлебов М.И., Венгер А.П., Бахтеев Р.Р., Коржавин А.Н., Нагнибеда В.Г. Методические результаты наблюдений Солнца на волне 3.2 мм на обновленной отражающей поверхности Северного сектора РАТАН-600 / XXVII Радиоастрономическая конференция, СПб, 1997. Т. 3. С. 38-39.

9. Парийский Ю.Н., Бурсов Н.Н., Берлин А.Б., Мингалиев М.Г., Нижельский Н.А., Столяров В.А., Цыбулев П.Г., Семенова Т.А., Хайкин В.Б., Гречкин А.А. Обзор околоразенитной области неба на частоте 30 ГГц с 32-элементной матрицей радиометров РАТАН-600 // Астрофизический бюллетень. Т 68. № 2, 2013.

10. Богод В.М., Рябуха В.С., Хайкин В.Б., Призов П.В., Лебедев М.К., Стороженко А.А., Хенталов А.В., Рябуха Ю.В., Яковлев С.В. Результаты поисковых исследований по улучшению кинематических характеристик отражательных элементов радиотелескопа РАТАН-600. / Тр. Ин-та прикладной астрономии РАН, 2012. С. 46-56.