

ДВУХЧАСТОТНЫЙ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ ЮСТИРОВОЧНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

В. Б. Хайкин¹, В. Н. Радзиховский², С. Е. Кузьмин², С. В. Шлензин²

¹ Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН
² НПФ «Айсберг-НТ»

Статья получена 18 мая 2014 г.

Аннотация. Сообщается о завершении разработки и испытаний двухчастотного автоколлимационного юстировочного комплекса с пространственным разделением излучаемого и принимаемого сигналов 8 мм и 2 см диапазонов. Рассмотрены требования к чувствительности, динамическому диапазону приемника и мощности источника шума для автоколлимационной юстировки радиотелескопа РАТАН-600. Приведены особенности конструкции СВЧ узлов автоколлимационного юстировочного комплекса и их характеристики. Тестовые испытания на РАТАН-600 показали надежную работу юстировочного комплекса и возможность юстировки (привязки) элементов антенны с погрешностью не хуже 0.1 мм.

Ключевые слова: радиотелескоп, автоколлимационная юстировка, автоколлимационный юстировочный комплекс.

Abstract. Reported the completion of development and testing of a dual frequency autocollimating adjusting complex with spatial separation of emitted and received signals at 8 mm and 2 cm ranges. The requirements for sensitivity, dynamic range of the receiver and the power of noise source for autocollimating adjustment of RATAN-600 radio telescope are considered. The features of the design of microwave parts of autocollimating adjusting complex and their characteristics are given. Test runs on the RATAN-600 showed reliable operation and the ability to provide an adjustment (alignment) antenna elements with an accuracy not worse than 0.1 mm.

Key words: autocollimation adjustment, autocollimation adjusting complex, radio telescope.

Введение

Автоколлимационный (АК) метод [1] является наиболее востребованным на радиотелескопе РАТАН-600, что связано с легкостью перестройки антенны из юстировочного состояния в рабочее. Традиционно АК юстировочная аппаратура разрабатывалась на радиотелескопе РАТАН-600 в 3 см диапазоне с использованием монохроматического генератора и временного способа разделения излучаемого и принимаемого сигналов с помощью импульсного стробирования по дальности. Это обеспечивало необходимую развязку передатчика и приемника (не менее 50 дБ) и подавление сигнала, отраженного от местных предметов. При этом паразитным сигналом оставался рассеянный фон от отражающих элементов (щитов) главного зеркала, его опор (фундаментов) и подстилающей поверхности под опорами. Борьба с рассеянным фоном антенны в основном сводилась к отведению всех элементов по углу места на достаточный угол и наведению в вертикальное положение только юстируемого элемента наряду с опорным. Для снижения вклада рассеянного фона от фундаментов и подстилающей поверхности под опорами иногда приходилось прибегать к увеличению числа опорных щитов.

В настоящей работе описан двухчастотный АК юстировочный комплекс с пространственным разделением излучаемого и принимаемого сигналов. Основная волна 8 мм используется для высокоточной юстировки – привязки отражающих элементов (щитов) к окружности заданного радиуса и настройки их угловых координат (угол места и азимут), 2 см диапазон используется для предварительной юстировки и устранения неоднозначности, вызванной потенциальной возможностью привязки элементов с ошибкой π л. В новом юстировочном комплексе также предусмотрена возможность измерения АК КПД на волне 8 мм, что осуществляется сравнением мощностей излучаемого в антенну и отраженного от антенны сигналов.

1. Особенности формирования автоколлимационного юстировочного сигнала

На рис.1 приведена схема АК юстировки, где юстируемый щит наводится в вертикальное положение и настраивается на максимум сигнала по трем координатам (радиусу $-R$, углу места $-U$, азимуту $-A$) относительно опорного. Относительно опорного щита выполняется настройка юстируемого щита по фазе (радиусу), при настройке угловых координат опорный щит увеличивает уровень сигнала юстируемых щитов и показывает, что юстируемый щит находится в фазе с опорным. Для пространственного разделения сигналов в новом юстировочном комплексе приемный и передающий рупора размещаются вдоль фокальной линии вторичного зеркала максимально близко друг к другу, в традиционной однорупорной схеме используется волноводный ферритовый циркулятор на входе [1]. В случае пространственного разнесения приемного и передающего рупоров в процессе АК юстировки, строго говоря, формируется не окружность, а эллипс с очень малым эксцентриситетом, в фокусах которого располагаются фазовые центры приемного и передающего рупоров, но отличие его от окружности с центром между рупорами составляет не более 0.6 мм на краях антенны, имеющей средний радиус 288000 мм, что допустимо. При этом достигается развязка более 60 дБ, а влияние местных предметов и рассеянного фона антенны менее существенно при использовании широкополосного источника и приемника сигнала в сравнении с монохроматическим.

Характерной особенностью АК способа юстировки многоэлементной антенны является малая мощность, отраженная от одного щита в сравнении с отраженным сигналом от всей антенны. Особенно критической ситуация становится для периферийных щитов, где имеется естественное спадание облучения. Мощность P_i , поступающая на вход АК приемника после отражения от i -го щита при облучении N щитов Главного зеркала может быть найдена как [1]:

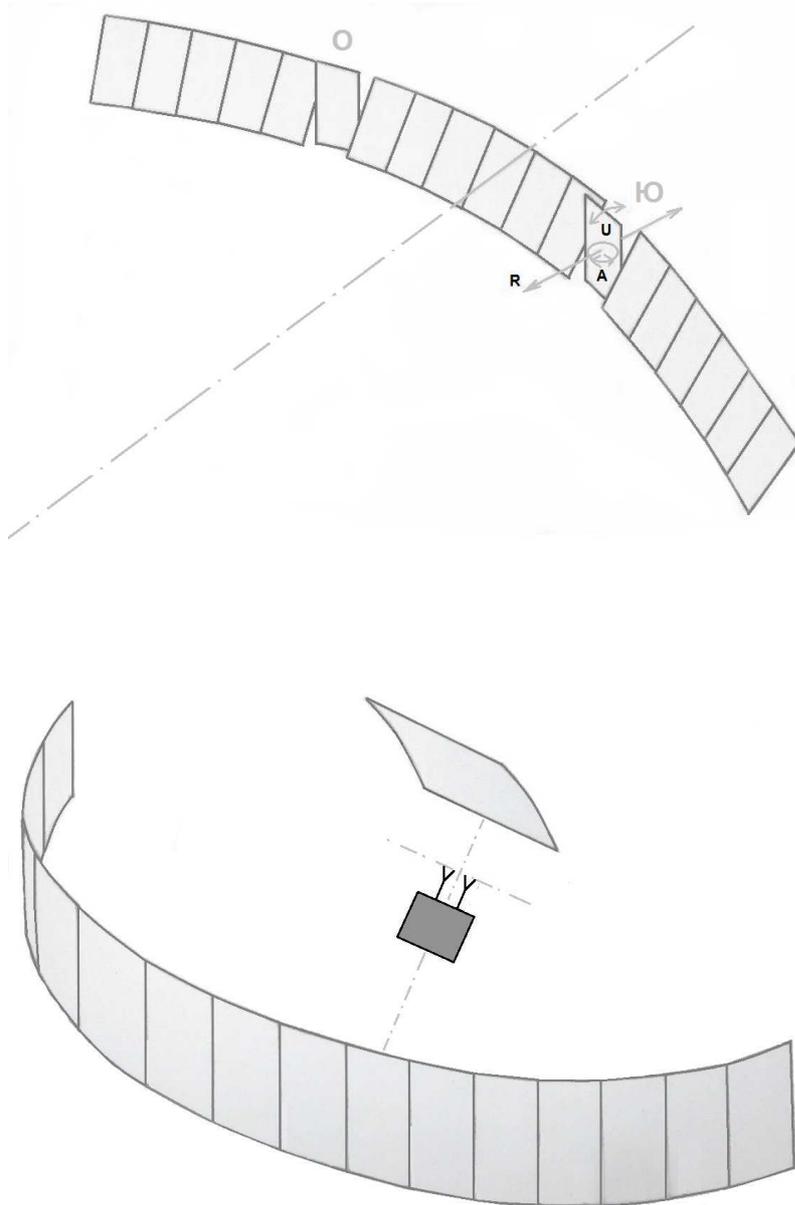


Рис.1. Схема АК юстировки с пространственным разделением сигналов

$$P_i = P_0 \left[\frac{\int_{\phi_i - \Delta\phi/2}^{\phi_i + \Delta\phi/2} K(\phi) F^2(\phi) \eta(\phi) d\phi}{\int_0^{2\pi} F^2(\phi) d\phi} \right]^2,$$

где P_0 – полная мощность, излучаемая источником

$F^2(\Phi)$ – нормированная диаграмма направленности первичного облучателя

Φ_i – координата центра i -го щита

$\Delta\Phi_i$ - угловой размер i -го щита из центра окружности

$\eta(\Phi)$ – КПД перископической системы в вертикальной плоскости

K - коэффициент использования вертикального размера щита

Учитывая, что $F^2(\Phi)$ мало изменяется в пределах щита, $\Delta\Phi_i = \text{const}$, $\eta(\Phi) = \text{const}$, вводя эффективную ширину диаграммы направленности первичного облучателя $\Delta\Phi_{эф}$, используя оценки $\eta(\Phi)$, K_i для правильно спроектированной перископической системы из N облучаемых щитов в [1] получено важное соотношение для мощности ожидаемого сигнала на входе приемника:

$$P_i = P_0 \left[\frac{K_i F^2(\Phi_i) \Delta\Phi_i \eta}{\Delta\Phi_{эф}} \right]^2 \approx P_0 \left[\frac{F^2(\Phi_i)}{N} \right]^2$$

Таким образом, P_i обратно пропорционально квадрату числа облучаемых щитов и для периферийного щита на краю апертуры примерно в 100 раз меньше чем для центрального, что требует большого запаса мощности передатчика, широкого динамического диапазона приемника и достижения высокой стабильности приемника для работы с очень малым сигналом от периферийного щита.

Понимая под шумом флуктуации выходного сигнала, обусловленные как собственными шумами приемника так и паразитным сигналом передатчика, проникающим в приемник, получим требуемую флуктуационную чувствительность приемника $\Delta P_{пр}$ и допустимый уровень паразитного сигнала передатчика $P_{пар}$:

$$P_{пар} \cong \Delta P_{пр} \cong \frac{P_0}{M} \left[\frac{F^2(\Phi_i)}{N} \right]^2$$

Для $N=225$, $M=200$ (достижимое отношение С/Ш), $F^2(\Phi_i)=0.1$ на крайних элементах антенны получаем $P_{пар}/P_0 \approx \Delta P_{пр}/P_0 = 1 \cdot 10^{-9}$, что требует повышения

чувствительности при одновременном расширении динамического диапазона приемника что трудно достижимо. Учет потери на рассеяние в неидеальной антенной системе. Автоколлимационный КПД антенной системы (сектора РАТАН-600) на волне 8 мм, когда ошибки привязки элементов и фокусировки системы входят дважды, обычно не лучше 6-10 дБ, т.е. возвращенная из антенны мощность $P_{\text{ант}} = 0.25-0.1 P_0$ и тогда необходимый динамический диапазон приемника составит: $P_{\text{ант}}/\Delta P_{\text{пр}} = (0.25-0.1) P_0/10^{-9} * P_0 = (2.5-1.25) * 10^8$ более 80 дБ, что невозможно реализовать на практике. Поэтому на входе приемника обычно вводят калиброванный аттенюатор, который закрывают на 30-40 дБ для приема сигнала от всей антенны и открывают для работы с одним или парой щитов.

Зададимся практически реализуемой температурной чувствительностью приемника $\Delta T = 100$ мК (при времени интегрирования 0.1 сек), которой в полосе 6 ГГц соответствует $\Delta P_{\text{пр}} = 8 * 10^{-15}$ Вт и тогда требуемая мощность источника шума $P_0 \geq 80$ мкВт. Для достижения приемлемого динамического диапазона приемника практически приходится настраивать усиление приемника ниже оптимального, что ухудшает его чувствительность и требует большей мощности источника сигнала. Дополнительный запас мощности нужен и для АК юстировки антенной системы “Юг+Плоский” радиотелескопа РАТАН-600, где из-за короткофокусности системы эффективно действующая апертура в 1.5-2 раза сокращается, а вклад периферийных щитов антенного сектора существенно падает в сравнении с обычным сектором радиотелескопа (Север, Юг и др.) что требует мощности источника шума 8 мм диапазона не менее 0.5 мВт. Дополнительный запас мощности в 8 мм диапазоне позволяет выполнять измерения АК КПД с помощью высокочувствительной широкополосной детекторной секции без МШУ. В 2 см диапазоне, где КПД и рассеянный фон фокусирующей системы существенно выше, на пол-порядка-порядок меньше и требуемая мощность источника шума. Поскольку юстировка щита занимает время порядка одной минуты, а всего сектора - не

менее 6-7 часов, сигнал периферийных щитов сектора обычно не превышает нескольких шум-дорожек высокие требования предъявляются к долговременной стабильности как приемника так и передатчика, применяемого для АК юстировки. Практически, однако, наибольшую нестабильность в процессе АК юстировки вносят неоднородности атмосферы приземного слоя, которые вызывают амплитудные (дрожание) и фазовые (изменение электрической длины пути волны) искажения сигнала и потому АК измерения в 8 мм диапазоне требуют наиболее спокойных атмосферных условий, обычно достигаемых в вечернее и ночное время.

2. Особенности построения СВЧ узлов автоколлимационного юстировочного комплекса

Важнейшей частью нового АК юстировочного комплекса является высокостабильный широкополосный источник шума (ГШ), на котором остановимся подробнее. Для реализации высокостабильного, широкополосного и достаточно мощного ГШ в 8 мм и 2 см диапазонах используется усиление шумового излучения согласованной волноводной нагрузки до необходимого уровня. В качестве усилителя при проектировании источника шумового сигнала 8 мм диапазона использована монолитная микросхема СНА 3093, представляющая собой усилитель средней мощности в диапазоне частот 20...40 ГГц. Структурная схема источника шумового сигнала приведена на рис. 1 [2].

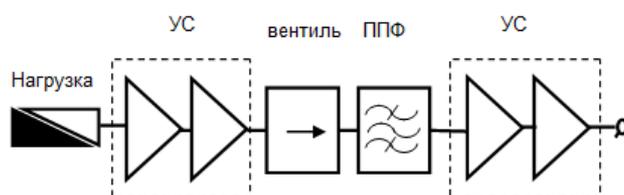
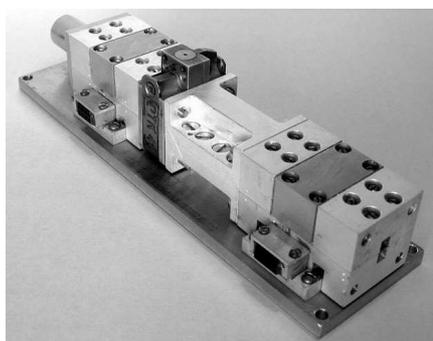


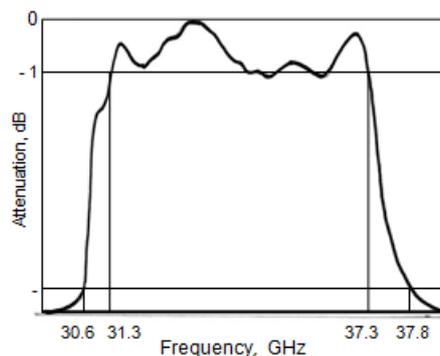
Рис. 2. Структурная схема источника шумового сигнала

Схема содержит две усилительные секции, каждая из которых состоит из двух каскадно-включенных микросхем с коэффициентом усиления (КУ) 40 дБ. Непосредственное последовательное соединение двух усилительных секций

приводит к самовозбуждению, для устранения которого между секциями включен развязывающий вентиль. Доступные вентили не в состоянии обеспечить развязку во всем частотном диапазоне усилительных микросхем из-за чего возникает возбуждение вне рабочей полосы вентиля. Для предотвращения внеполосного возбуждения был спроектирован и изготовлен волноводный septum-фильтр. Это обеспечило устойчивую работу всей усилительной цепи, полный КУ которой в полосе составил 77 дБ с неравномерностью $\pm 1,5$ дБ. Внешний вид источника шумового сигнала и АЧХ septum-фильтра приведены на рис.3. ГШ 2 см диапазона с меньшим требуемым усилением (50-55 дБ) выполнен по упрощенной схеме без septum-фильтра.



А



В

Рис. 3. Внешний вид источника шумового сигнала(а) и АЧХ septum-фильтра (b)

Приемные модули юстировочного комплекса построены по схеме прямого усиления. Каждый радиометрический модуль содержит волноводно-микрополосковый переход, 2 каскада МШУ КУ=42 дБ, квадратичный детектор и выходной малошумящий операционный усилитель. Особенностью исполнения приемных модулей является использование детекторных диодов Шоттки с повышенным динамическим диапазоном (более 35 дБ) и сниженный на 10-15 дБ КУ МШУ в сравнении с оптимальным, что позволило увеличить мощностной порог насыщения при допустимом снижении чувствительности приемников из-за увеличения шумового вклада окончательных каскадов.

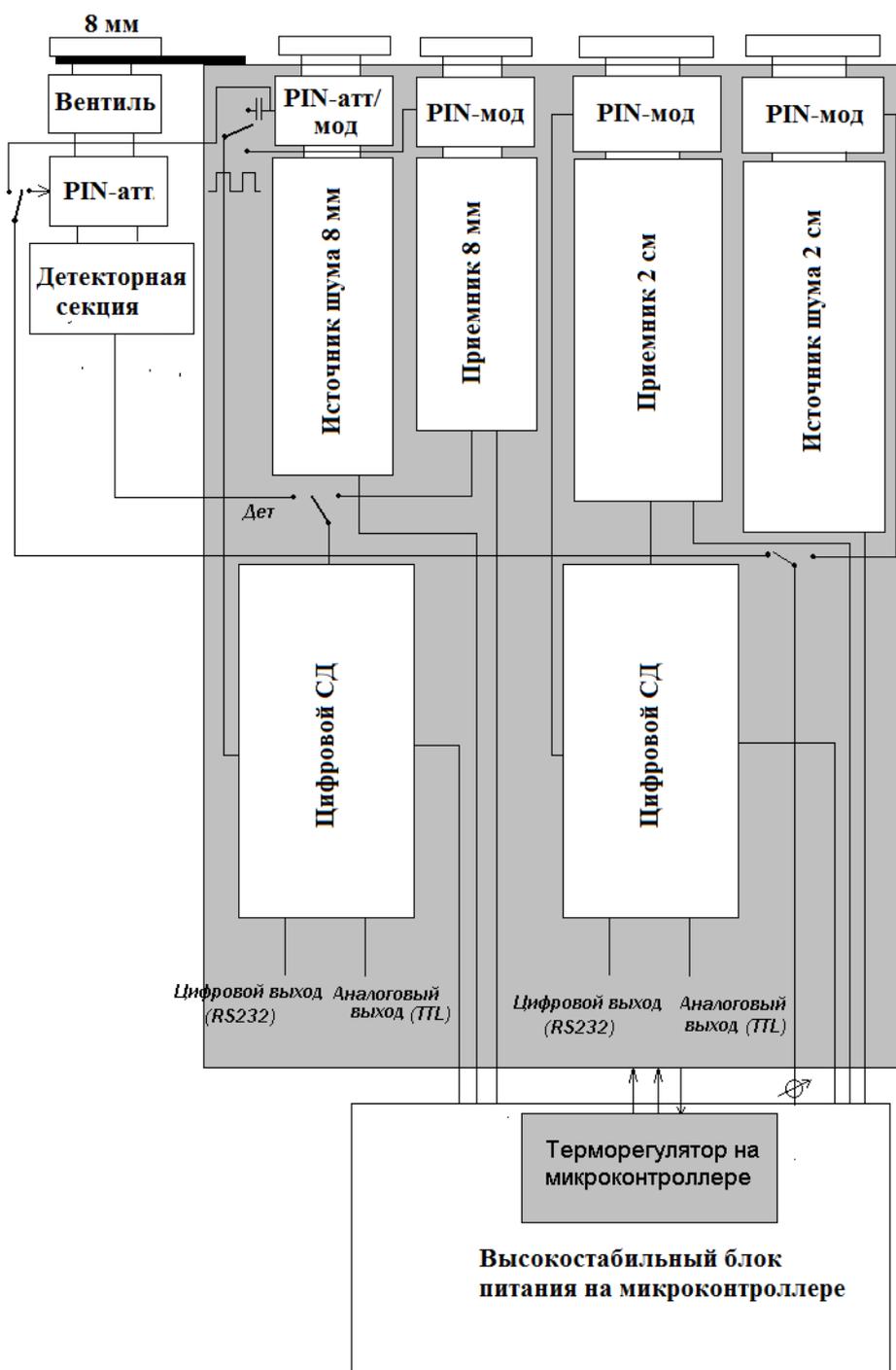


Рис.4. Функциональная схема двухчастотного АК юстировочного комплекса

С целью измерения АК КПД без использования приемника разработана широкополосная высокочувствительная детекторная секция 8 мм диапазона на базе импедансно-согласованного низкобарьерного диода Шоттки [3], способная детектировать сигнал от ГШ и отраженный от всей антенны с отношением СИГНАЛ/ШУМ > 100 , что упрощает процесс измерения АК КПД.

Основные СВЧ устройства, входящие в АК юстировочный комплекс, и их параметры приведены в таблице 1. На рис.4. приведена функциональная схема АК юстировочного комплекса. С целью достижения высокой долговременной стабильности выходного сигнала применен модуляционный режим работы приемников с волноводными PIN-модуляторами на входе и цифровыми синхронными детекторами на выходе, а также реверсивное ПИД-регулирование термостатируемого объема. Реализованная долговременная (суточная) температурная стабильность приемников АК юстировочного комплекса не хуже 0.5 К. В юстировочном комплексе используется контроллерное управление блоком питания, термостатом и режимами работы (рис.4). В качестве облучателей вторичного зеркала радиотелескопа в АК юстировочном комплексе применены псевдо-скалярные и гладкостенные сплайно-профильные рупора [4].

Таблица 1.

Наименование	Параметры
8 мм приемный модуль	$\delta T \approx 25 \text{ мК/Гц}^{1/2}$
8 мм ГШ	$P_{\text{вых}} \approx 2 \text{ мВт}, G \approx 77 \text{ дБ}$
8 мм детекторная секция	Вольт-Ваттная чувствительность 5 мВ/мкВт
2 см приемный модуль	$\delta T \approx 25 \text{ мК/Гц}^{1/2}$
2 см ГШ	$G \approx 50 \text{ дБ}$

Автоколлимационный юстировочный комплект на волны 8 мм/2 см в процессе наладки и на фокальной линии облучателя тип 2 радиотелескопа РАТАН-600 показан на рис.5.

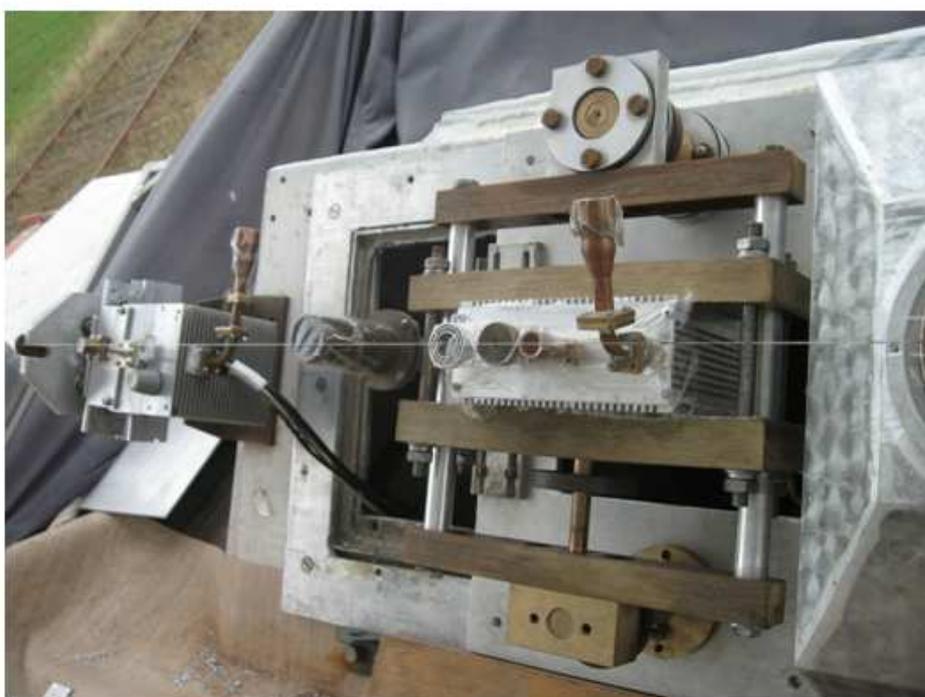


Рис 5. Автоколлимационный юстировочный комплекс на волны 8 мм/2 см в процессе наладки (вверху) и тестирования на фокальной линии облучателя тип 2 радиотелескопа РАТАН-600 (внизу)

Тестовые испытания на радиотелескопе РАТАН-600 показали надежную работу АК юстировочного комплекса, возможность юстировки элементов антенны Главного зеркала с погрешностью не хуже 0.1 мм по радиусу и 25'' по угловым координатам и существенно повысили эффективности последующих наблюдений на волне 8 мм [5].

Литература

1. Н.Ходжамухамедов, А.А.Стоцкий, В.Н.Боровик. Автоколлимационный метод юстировки и контроля антенны переменного профиля. Радиотехника и электроника, т.15, Т2, 258, 1970.
2. Хайкин В.Б., Кузьмин С.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н. ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫЙ 8 ММ ИСТОЧНИК ШУМОВОГО СИГНАЛА ДЛЯ ЮСТИРОВКИ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600. В трудах CRIMICO-2009, Севастополь, сентябрь, 2009.
3. V.B. Khaikin, V.R. Zakamov, V.I. Shashkin, S.E. Kuzmin, V.N. Radzikhovsky. A WIDEBAND RECEIVER-MODULE FOR PASSIVE MM WAVE IMAGING ARRAY: OPTIMIZATION AND TEST RESULTS. In Proceed. of MSMW 2010, June 2010, Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2010.
4. R.Chernobrovkin, N.Popenko, V.Khaikin, Ch.Granet. Compact Efficient Feed-Horn at 30–38 GHz for a Multi-beam Radio Telescope. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz waves, v.31, N7, July 2010.
5. Хайкин В.Б., Бурсов Н.Н., Караваев Д.М., Яковлев С.В., Носов Д.В., Якунин В.В. Результаты антенных измерений и наблюдений на Северном секторе РАТАН-600 на волне 8 мм. В сборнике ВАК-2010.