

Модернизированное устройство съёма угловых координат РТ-32

© В. Ю. Быков

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Устройство съёма угловых координат (УСУК) обеспечивает съём данных об угловом положении радиотелескопа с первичных датчиков угла. УСУК входит в состав системы наведения антенной системы радиотелескопа РТ-32 и во многом определяет её точностные характеристики. Действующее УСУК главного зеркала было установлено более 10 лет назад, УСУК вторичного зеркала (контррефлектора) (УСУК КР) — более 17 лет назад. УСУК имеет следующие основные характеристики, определяющие точность измерения угловых координат: разрешение измерения угловой координаты главного зеркала 20 бит, контррефлектора — 14 бит; амплитуда характеристики нелинейности индуктосинов — (20–40)"; частота обновления координат — 35 Гц. Указанные параметры удовлетворяют требованиям по точности при наблюдениях на основных рабочих длинах волн радиотелескопа РТ-32, однако для успешных наблюдений на более коротких длинах волн требуется улучшение указанных параметров. Необходимо увеличить разрешение измерения координат для обоих зеркал, уменьшить амплитуду характеристики нелинейности индуктосина и увеличить частоту измерения координат.

В последние годы проведены исследования особенностей работы УСУК. Выявлены недостатки схемотехнических решений, ограничивающие реализацию потенциальной точности измерения координат с помощью штатных датчиков угла радиотелескопа РТ-32, и проработаны пути их устранения. Полученные результаты позволили провести глубокую модернизацию аппаратно-программных средств УСУК и УСУК КР.

В результате модернизации УСУК и УСУК КР достигнуты следующие основные характеристики: разрешение измерения угловой координаты увеличено до 24 бит для основного зеркала и до 16 бит для вторичного; уменьшена амплитуда характеристики нелинейности индуктосинов до (7–10)"; частота измерения координат увеличена до 125 Гц. Модернизированные УСУК и УСУК КР установлены на все радиотелескопы РТ-32 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Ключевые слова: радиотелескоп, датчик положения, преобразователь «угол – код», индуктосин, вращающийся трансформатор.

Контакты для связи: Быков Владимир Юрьевич ([bvuv@iaaras.ru](mailto:bvu@iaaras.ru)).

Для цитирования: Быков В. Ю. Модернизированное устройство съёма угловых координат РТ-32 // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 58. С. 3–10.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.58.3-10>

Modernized Device for Reading Angular Coordinates of RT-32

V. Yu. Bykov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

Angular coordinates taking device (DACT) provides taking of the angular position from primary angle sensors of the RT-32. DACT is a part of the pointing system of the RT-32 antenna system and largely determines its accuracy. The last update of the DACT was more than 10 years ago for main reflector and more than 17 years ago for subreflector. DACT measures the angular coordinate with a resolution of 20 bits for the main reflector and 14 bits for the subreflector. The amplitude of the inductosyn nonlinearity characteristic is about (20 ÷ 40)". The coordinate update rate is 35 Hz. These parameters meet the accuracy requirements for observations at the main operating wavelengths of the RT-32 radio telescope, however, for successful observations at shorter wavelengths, these parameters need to be improved. It is necessary to increase the coordinate measurement resolution for reflectors, decrease the amplitude of the inductosyn nonlinearity characteristic, and increase the coordinate measurement frequency.

Studies of the features of the DACT operation have been carried out. The problems of technical solutions that limit the realization of the potential accuracy of measuring coordinates using standard angle sensors of the RT-32 are identified, and ways to eliminate them are worked out. Based on the results obtained, a deep modernization of the DACT hardware and software was carried out.

As a result of the modernization of the DACT, the following characteristics were achieved: the angular coordinate resolution was increased to 24 bits for the main reflector and up to 16 bits for the sub reflector; the amplitude of the inductosyn nonlinearity characteristic is reduced to (7 ÷ 10)"; coordinate update rate increased to 125 Hz. The upgraded DACT are installed on all radio telescopes of the VLBI network Quazar.

Keywords: radio telescope, position sensor, angle-to-code converter, 5-BVT, inductosyn, rotating transformer.

Contacts: Vladimir Yu. Bykov ([bvuv@iaaras.ru](mailto:bvu@iaaras.ru)).

For citation: Bykov V. U. Modernized device for reading angular coordinates of RT-32 // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 58. P. 3–10.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.58.3-10>

Введение

Устройство съёма угловых координат является одной из важных составляющей системы наведения антенной системы радиотелескопа (РТ-32) (Финкельштейн, 2005, Быков, 2010, Кайдановский, 2012). УСУК вместе с датчиками углового положения обеспечивает рабочую станцию контроля и управления (РСКУ) данными о текущих значениях координат главного зеркала и контррефлектора радиотелескопа. Главное зеркало позиционируется по двум координатам — азимуту и углу места. Вторичное зеркало — контррефлектор (КР) — позиционируется по 4 координатам: 3 линейные декартовы координаты и одна угловая. Измерение координат главного зеркала осуществляется по схеме с двумя шкалами: «точной» и «грубой». В качестве датчика «точной» шкалы используется многополюсный вращающийся трансформатор — индуктосин (Бычатин, 1969), в качестве датчика «грубой» шкалы — бесконтактный вращающийся трансформатор 5-БВТ. Применение индуктосина с электрической редуцией равной 256 позволяет измерять значение координаты с точностями до нескольких угл. сек. В качестве датчиков угла КР используются 5-БВТ. Датчик типа вращающегося трансформатора состоит из первичной (статорной) обмотки и двух вторичных (роторных) обмоток, сдвинутых друг относительно друга на 90° (синусная и косинусная обмотки), закреплённых на валу датчика. При подаче на первичную обмотку синусоидального сигнала возбуждения огибающая сигнала на вторичных обмотках является функцией углового положения вала. УСУК РТ-32 представляет собой устройство, преобразующее аналоговые сигналы вторичных обмоток датчика углового положения в цифровой код угла с последующей передачей этого значения потребителю.

Приведём основные факторы, снижающие точность позиционирования, антенны радиотелескопа, обусловленные УСУК РТ-32:

— наличие ошибки измерения угловой координаты системой индуктосин-УСУК в пределах сектора индуктосина (до $1^\circ 24'$ в штатной системе УСУК «Салгир-М») (Михайлов, 2006), связанной с нелинейным характером преобразования координат;

— конечное разрешение системы по угловой координате;

— конечная частота обновления координат или интервал неопределённости момента измерения координаты.

Действующее на данный момент времени УСУК было установлено более 10 лет назад в результате масштабной модернизации электропривода радиотелескопа РТ-32, в ходе которой штатное УСУК «Салгир-М» было заменено на УСУК на основе устройства преобразования координат (УПК) (Быков, 2010). УПК было реализовано на базе преобразователя «угол – код» AD2S1200 фирмы ANALOG DEVICES. Данная микросхема преобразует сигналы датчика в цифровой код с разрешением 12 бит, что при использовании двухотсчётной схемы обеспечивает измерение угла с разрешением в 20 бит или $1.2''$. УПК позволило улучшить основные технические характеристики УСУК и повысило эксплуатационные показатели за счёт упрощения аппаратного комплекса и сокращения количества линий связи.

С одной стороны опыт эксплуатации УПК показал высокую надёжность системы, с другой — выявил следующие недостатки:

— амплитуда характеристики нелинейности индуктосина достигает $(20..30)''$;

— относительно низкая частота обновления значения угла не более 35 Гц;

— периодически возникающий «дребезг» значения угла, достигающий величины $\pm 1'$, устраняется кратковременным выключением питания УСУК;

— невозможность одновременного подключения к РСКУ информации от основного и резервного комплекта датчиков.

Модернизация УСУК КР выполнена в 2003 г. В качестве УСУК КР установлен преобразователь «угол – код» ПК.ПТ.5 ДНИЯ.469655.488. Преобразователь обеспечивает измерение координаты с разрешением 14 бит. ПК.ПТ.5 выполнен в виде платы расширения с шиной ISA-8, которая устанавливается в компьютер РСКУ на расстоянии более 100 м от датчиков положения. При этом кабельная трасса проходит через подвижные петли радиотелескопа РТ-32. За 17 лет эксплуатации ПК.ПТ.5 показал свою высокую надёжность, однако на данный момент он морально устарел и не вписывается в современную архитектуру системы автоматического управления радиотелескопом, что сдерживает модернизацию последней.

Однако для успешных наблюдений на коротких волнах требуется увеличить разрешение и точность измерения координат как основного, так и вторичного зеркал антенны радиотелескопа. Таким образом, возникла необходимость модернизации оборудования УСУК и УСУК КР с целью обеспечить выполнение следующих требований:

- разрешение по координатам:
 - основное зеркало — 24 бит;
 - вторичное зеркало — 16 бит;
- частота обновления координат — не менее 100 Гц;
- минимизация амплитуды характеристики нелинейности индуктосина;
- устранение выявленных недостатков действующего УСУК и УСУК КР, приведённых выше.

Разработка УПК-М и УПК-КР

В настоящее время для использования в составе УПК оптимальным является преобразователь AD2S1210B фирмы ANALOG DEVICES ([Data Sheet AD2S1210](#)). Преобразователь позволяет измерять угол с разрешением до 16 бит. Точность преобразования угла достигает $\pm 2.8'$ — типичное значение и $\pm 5.3'$ — максимальное. При использовании индуктосина с редукцией 256 максимальная ошибка измерения угла составляет $\pm 1.24''$, разрешение измерения координаты основного зеркала составит 24 бит или $0.08''$. В дополнение к приведённой внутренней ошибке измерения угла, обусловленной алгоритмом работы преобразователя, имеют место ошибки, вызванные следующими внешними причинами:

- фазовым сдвигом между сигналами вторичных обмоток датчика угла;
- неравенством амплитуд сигналов вторичных обмоток датчика угла.

AD2S1210B имеет встроенный генератор сигнала возбуждения с изменяемой частотой (от 2 до 20) кГц и схему компенсации фазового сдвига, которая эффективно работает при условии, что величина фазового сдвига между сигналом возбуждения датчика угла и сигналами выходных обмоток не превышает $\pm 44^\circ$.

Опытным путём установлено, что для AD2S1210B ошибка измерения угла ($\Delta\alpha$), вызванная неравенством амплитуд сигналов вторичных обмоток датчика угла (ΔK), имеет следующий вид:

$$\Delta\alpha [^\circ] = 0.33 [^\circ/\%] \cdot \Delta K [\%],$$

с учётом редукции 256:

$$\Delta\alpha ['] = 4.6 ["/\%] \cdot \Delta K [\%].$$

Таким образом, если ограничить величину $\Delta\alpha \leq 1.24''$, то $\Delta K \leq 0.27\%$. При $\Delta K \leq 0.27\%$ суммарная ошибка измерения угла (с учётом максимальной ошибки преобразователя $1.24''$) не превышает $2.5''$ (без учёта ошибок индуктосина).

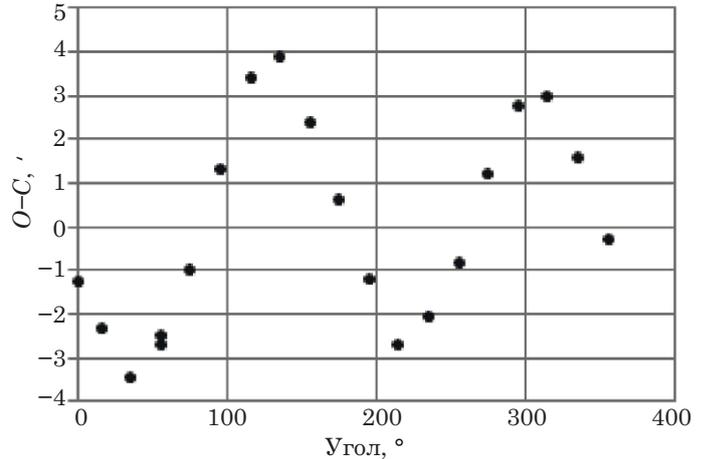


Рис. 1. Ошибка измерения угла системой 5-БВТ с УПК-М

В процессе разработки УПК-М была проведена экспериментальная оценка величины ошибки измерения угла при использовании микросхемы преобразователя AD2S1210B. Сигналы вторичных обмоток датчика положения 5-БВТ подавались на микросхему через буферные усилители. В качестве усилителей применены полностью дифференциальные усилители LTC1992-1CMS8. Данная микросхема имеет предустановленный $K_u = 1.000 \pm 0.001$ (типичное значение в лабораторных условиях). Таким образом, рассогласование между двумя каналами $\Delta K \leq 0.2\%$. Та же микросхема использована в качестве усилителя мощности сигнала возбуждения датчика. Измерение амплитуды ошибки происходило сличением показаний исследуемой системы УПК-М с опорной системой — на основе оптического датчика ЛИР-ДА190А, оснащённого собственной системой сбора данных ЛИР-916. Датчик ЛИР-ДА190А измеряет угол с разрешением 24 разряда с точностью $\pm 5''$. Оба датчика (5-БВТ и ЛИР-ДА190А) соединяются общим валом.

На рис. 1 приведены результаты исследования в виде зависимости ошибки измерения УПК-М от углового положения вала.

Из рис. 1 видно, ошибка $|\Delta\alpha| \leq 4'$, что меньше максимальной ошибки для AD2S1210B, следовательно, схемы масштабирования сигналов не вносят существенных искажений в измерение угла, по крайней мере, при $\Delta K \leq 0.2\%$. С учётом редукции 256 ошибка $|\Delta\alpha| \leq 1''$.

Оптимальный, с точки зрения минимизации рассогласования амплитуд вторичных сигналов, способ подключения датчика к преобразователю — подключение обмоток напрямую к контактам микросхемы. Такое подключение может быть осуществлено только для датчиков типа 5-БВТ, у которых коэффициент передачи на частотах (2..10) кГц равен 0.4..0.9. Коэффициент передачи индуктосина относительно невелик и составляет $K_{\text{инд}} = (0.008..0.02)$ в зависимости от частоты сиг-

нала возбуждения (f) (с ростом частоты растёт коэффициент передачи) и величины зазора между роторной и статорной обмотками (σ). При $f = 10$ кГц, $\sigma = 0.4$ мм, $K_{\text{инд}} \approx 0.01$. Нетрудно видеть, что при амплитуде сигнала возбуждения 8 В амплитуда сигнала на вторичных обмотках не превысит 80 мВ. Оптимальный диапазон амплитуд сигнала на входе преобразователя «угол – код» составляет (3.12 ± 0.85) В. Таким образом, при работе с индуктосином необходимо использовать предварительный двухканальный усилитель с $K_y = (60..100)$ и малым ΔK .

Одним из недостатков действующего УПК указано ограничение частоты измерения угла, которое составляет не более 35 Гц. При сопровождении космического источника, движущегося со скоростью более $30''/с$, неопределённость в измерении координаты составит ± 5 единиц младшего разряда для УСУК разрядностью 24 бит. Максимальная частота в УПК ограничена необходимостью осреднения результата измерения угла по 8 точкам, проводимой с целью уменьшения шума измерения угла. Без осреднения амплитуда шума составляет 2–3 младших разряда. Шум вызван недостаточным отношением сигнал/шум сигналов с вторичных обмоток датчика угла.

Преобразователь AD2S1210В способен измерять угол с частотой до 125 Гц. Для реализации максимальной частоты измерения в устройстве недопустимо накопление измерений. Необходимо увеличить отношение сигнал/шум сигналов с вторичных обмоток датчика угла. Отношение сигнал/шум определяется несколькими факторами: качеством сигнала возбуждения, амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) датчика положения, параметрами элементов тракта выходных сигналов датчика и внешними наводками. Для генерации сигнала возбуждения используется встроенный в микросхему преобразователя цифро-аналоговый преобразователь с разрядностью 8 бит. Вследствие невысокой разрядности в сигнале присутствуют выраженные высокочастотные шумы квантования. При работе с датчиком 5-БВТ шумы квантования подавляются, так как датчик является фильтром низких частот. Индуктосин в противоположность датчику 5-БВТ — фильтр высоких частот и подавляет сигнал на основной частоте больше, чем высокочастотные шумы квантования, что существенно снижает отношение сигнал/шум. Добавление фильтра низких частот с полосой 87 кГц и единичным коэффициентом передачи в пределах 10 кГц, в тракт сигнала

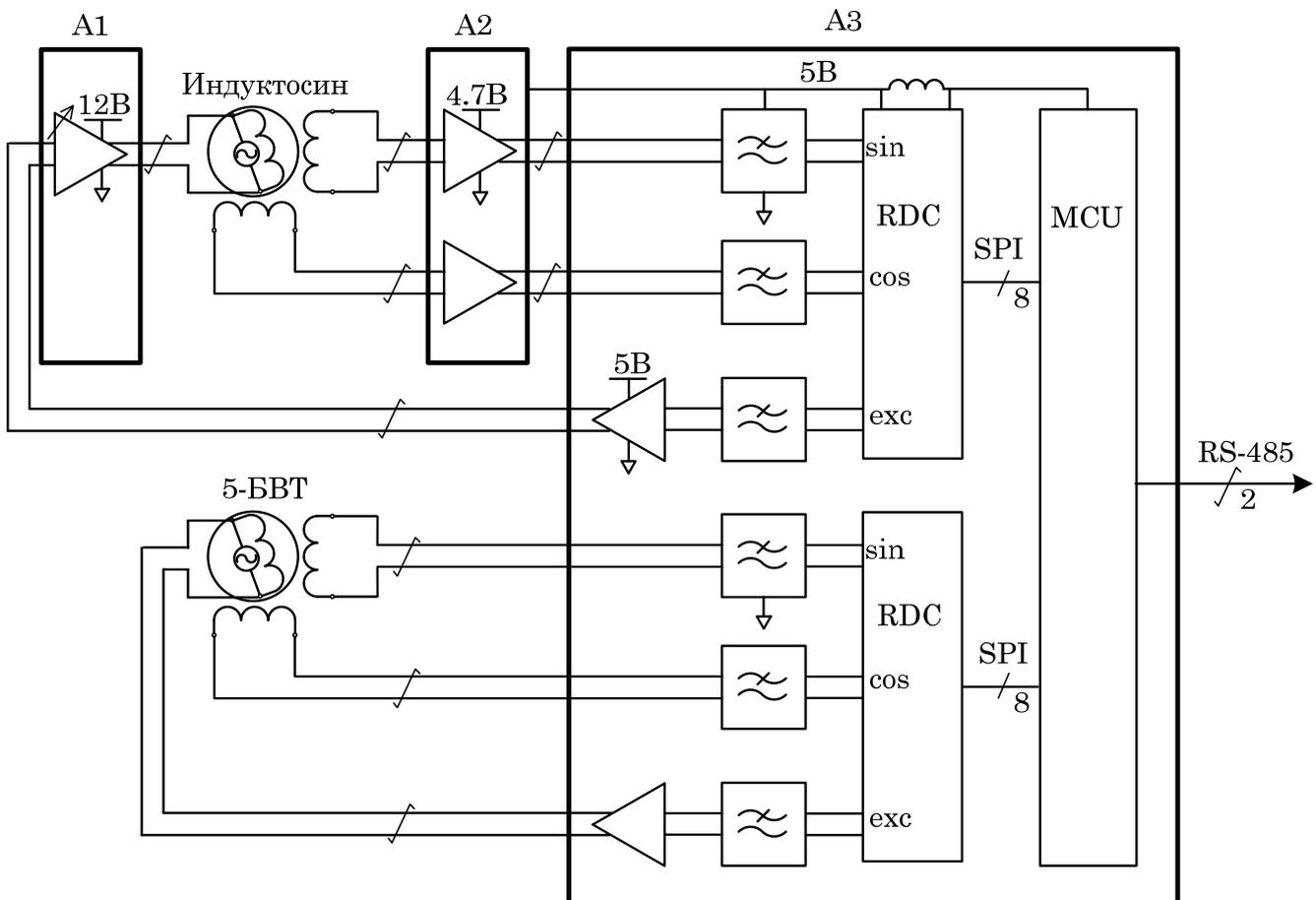


Рис. 2. Функциональная схема УПК-М главного зеркала АС РТ-32

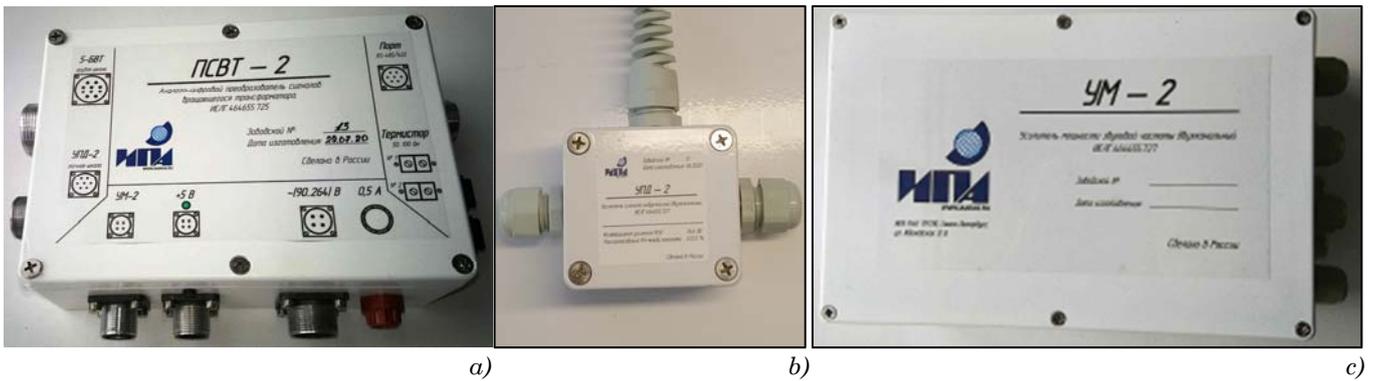


Рис. 3. Блоки в составе УПК-М УСУК антенной системы радиотелескопа РТ-32: а) блок ПСВТ-2; б) блок УПД-2; в) блок УМ-2



Рис. 4. Блок ПСВТ-4 из состава УПК-КР УСУК антенной системы радиотелескопа РТ-32

возбуждения и в тракт выходных сигналов снижает уровень шумов и повышает отношение сигнал/шум. Полоса пропускания фильтра выбирается как компромисс между эффективностью подавления высокочастотных составляющих сигнала и сдвигом фазы сигнала, вызываемым фильтром. При частоте среза $f_{cp} = 87$ кГц сдвиг фазы на частоте 10 кГц составляет $\phi_{10} = 10^\circ$. Моделирование и расчёт параметров фильтра низких частот проводилось в программе FilterPro Desktop фирмы Texas Instruments ([Filter Design Tool](#)). Тип АЧХ фильтра — Butterworth, реализован на полностью дифференциальных усилителях AD8139 ([Data Sheet AD8139](#)) по схеме с множественной обратной связью.

Внешние наводки эффективно устраняются уменьшением длины тракта, а также использованием в качестве линии передачи сигналов с вторичных обмоток датчика экранированной витой пары со средним шагом скрутки. Например, микрофонного кабеля СМК234.

Возникновение «дребезга» значения угла в УПК, вероятно, вызвано самовозбуждением выхода дифференциальных усилителей, стоящих в тракте сигналов вторичных обмоток датчика и

выполняющих функцию масштабирования сигнала ($K_y = 80$) перед поступлением его на вход микросхемы «угол – код». В качестве усилителей в УПК использованы полностью дифференциальные усилители AD8132. Данные усилители имеют полосу единичного усиления (300–350) МГц. И могут самовозбуждаться при отсутствии резистивной развязки между выходом усилителя и нагрузкой. Решением проблемы в данном случае является установка резисторов номиналом (15..20) Ом на выходе усилителей.

В результате проведённых исследований и решения вышеуказанных проблем предложена функциональная схема УПК-М, показанная на рис. 2. Схема приведена для УПК-М, работающего с датчиками главного зеркала антенны радиотелескопа РТ-32. В состав УПК-М входят следующие узлы: А1 — усилитель мощности сигнала возбуждения; А2 — предварительный усилитель; А3 — преобразователь сигналов вращающегося трансформатора двухканальный. А3 является основным узлом УПК-М, он включает в себя два идентичных канала преобразования «угол – код», микроконтроллер, реализующий функционал блока и интерфейс RS-485 для передачи данных. Схема узла А3 включает в себя цепи фильтрации сигналов и регулировки амплитуды сигнала возбуждения. А3 может быть подключён напрямую к двум датчикам типа 5-БВТ. Для подключения к индуктосину необходимы узлы А1 и А2, как показано на рис. 2.

УПК-КР построен на базе двух узлов А3, что обеспечивает работу с 4 датчиками положения КР АС РТ-32.

Аппаратура УПК-М, соответствующая схеме на рис. 2, реализована в виде трёх отдельных блоков:

- 1) А1 — блок УМ 2 ИЕЛГ.464655.728;
- 2) А2 — УПД-2 ИЕЛГ.464655.727;
- 3) А3 — входит в состав блока ПСВТ-2 ИЕЛГ.464655.725.

Вид блоков приведён на рис. 3. УПК-КР выполнен в виде блока ПСВТ-4 ИЕЛГ.464655.726, включающегося в себя два АЗ (рис. 4).

В лабораторных условиях были проведены измерения значений ΔK всех блоков УПД-2. Типичное значение $\Delta K = 0.035\%$, минимальное $\Delta K_{\text{мин}} = 0.008\%$, максимальное $\Delta K_{\text{макс}} = 0.047\%$. Характеристики всех блоков УПД-2 гарантируют, что дополнительная ошибка измерения координаты, обусловленная трактом усиления и фильтрации сигналов не превысит $0.2''$.

Установка УСУК на РТ-32

В течение 2020 г. все радиотелескопы РСДБ-сети «Квазар-КВО» были оборудованы новым УСУК на основе УПК-М. Блоки УПК-М для измерения координат основного зеркала установлены на тех же местах, что и демонтированные блоки УПК, — вблизи индуктосинов. Блок УПД-2 расположен на поверхности ротора индуктосина, что обеспечивает кратчайший путь сигналов с вторичных обмоток индуктосина до усилителя.

Блок УПК-КР установлен в надзеркальной кабине. Благодаря этому длина кабелей до датчиков положения КР сократилась более чем в 2 раза.

Для иллюстрации взаимодействия блоков УСУК друг с другом и с аппаратурой РТ-32 на рис. 5 и 6 показаны схемы подключения блоков УСУК.

Проведённые настройка и объектовые испытания УСУК подтвердили работоспособность и характеристики изделия. В процессе настройки бло-

ков УСУК на объекте проведены измерения амплитуды нелинейности характеристики индуктосина — основного критерия качества работы УСУК. Измерение нелинейности выполнено по принятой в ИПА РАН методике (Михайлов, 2006), являющейся вариацией известного метода равных промежутков (Бычатын, 1969). Измерения показали, что на всех комплектах УПК-М размах амплитуды нелинейности не превышает $7''$. Исключение — комплект УПК-М при работе с основным угломестным датчиком РТ-32 в обсерватории «Зеленчукская». Для данного УПК-М размах амплитуды нелинейности не превышает $10''$, что обусловлено техническим стоянием индуктосина. На рис. 7 показана типичная характеристика нелинейности индуктосина, на рис. 8 показана характеристика индуктосина в обсерватории «Зеленчукская». Красным обозначена характеристика для УПК-М, синим — для УПК предыдущего поколения. Следует отметить, что характеристика нелинейности индуктосина программно учитывается. При этом методика измерения и учёта характеристик даёт остаточную ошибку измерения координаты на уровне $\pm 3''$. Учёт характеристики с амплитудой менее $7''$ с практической точки зрения не оправдан. На всех комплектах УПК-М, кроме установленного на угломестной оси в обсерватории «Зеленчукская», приняты нулевые поправки характеристики нелинейности.

Для наглядности в табл. 1 и 2 показаны характеристики, отражающие эволюцию УСУК радиотелескопа РТ-32.

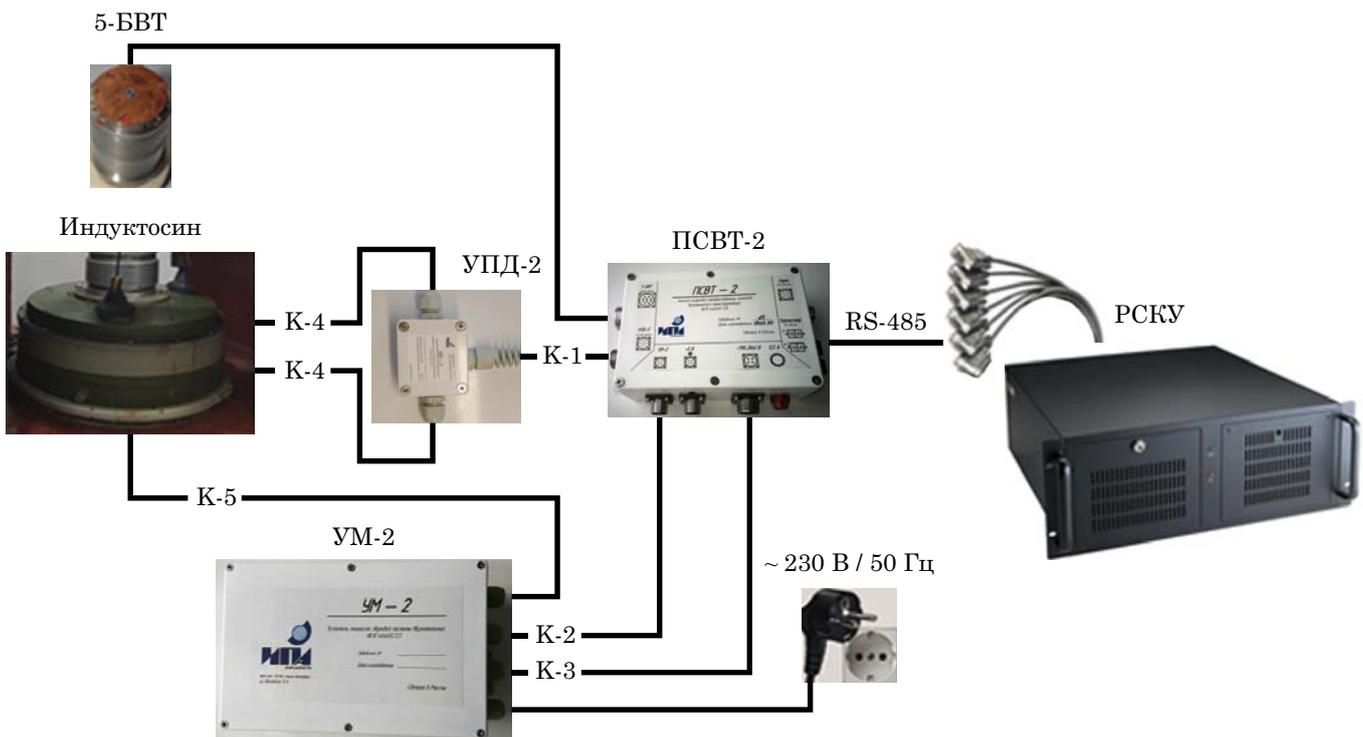


Рис. 5. Схема подключения УПК-М

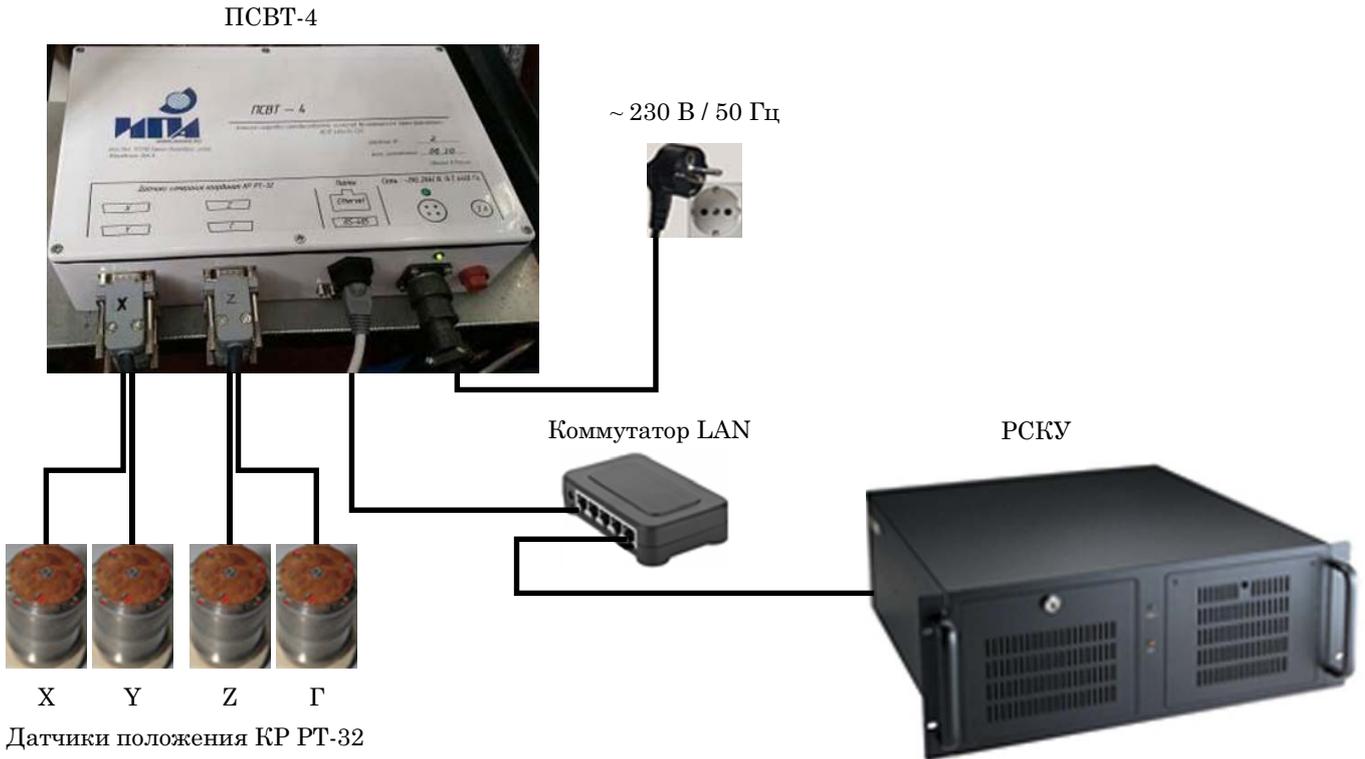


Рис. 6. Схема подключения УПК-КР

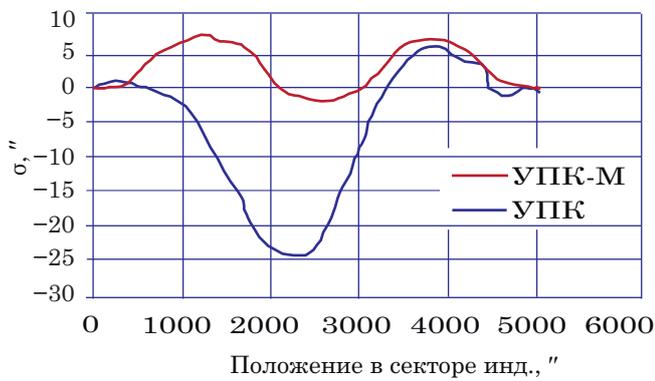


Рис. 7. Типичная нелинейность УПК-М и УПК при работе с датчиками РТ-32

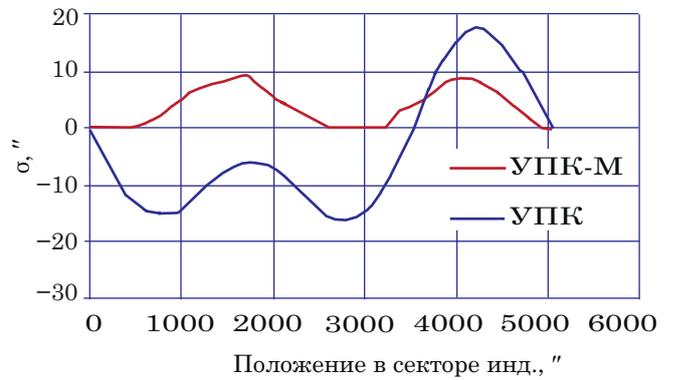


Рис. 8. Нелинейность УПК-М и УПК при работе с основным угломестным комплектом датчиков РТ-32 в РАО «Зеленчукская»

Таблица 1

Основные характеристики УСУК РТ-32. Главное зеркало

УСУК	Дата эксплуатации, г./гг.	Разрядность, бит/''	Ампл. нелинейности, ''	Частота обновления данных, Гц	Интерфейс передачи данных в РСКУ	Масса, кг	Питание
Салгир-М	до 2007	20/1.24	< 60	50	параллельный 21 бит	600	230 В / 400 Гц
УПК	с 2007 по 2020	20/1.24	< 40	35	параллельный 21 бит	16	230 В / 50 Гц
УПК-М	с 2020	24/0.08	< 10	125	RS-485	9	230 В / 50 Гц

Основные характеристики УСУК РТ-32. Вторичное зеркало

УСУК-КР	Дата эксплуатации, г./гг.	Разрядность, бит/''	Частота обновления данных, Гц	Интерфейс передачи данных в РСКУ	Масса, кг	Питание
ПК.ПТ.5	с 2003 по 2020	14/79	—	ISA-8	0.2	5 В / 12 В
УПК-КР	с 2020	16/20	125	Ethernet	4	230 В / 50 Гц

Заключение

В результате выполненных работ все радиотелескопы РТ-32 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» оснащены модернизированным УСУК как для съёма данных с датчиков положения осей главного зеркала, так и с соответствующих датчиков вторичного зеркала. Модернизированное УСУК позволило решить основные проблемы предыдущих систем:

— увеличило разрешение измерения угловой координаты до 24 бит для основного зеркала и до 16 бит — для вторичного;

— уменьшило амплитуду характеристики нелинейности индуктосинов до 7'' (приняты нулевые поправки);

— повысило эксплуатационные характеристики системы за счёт устранения дребезга младших разрядов и проблемы самовозбуждения;

— увеличило частоту обновления координат до 125 Гц;

— модульный принцип построения УСУК позволяет комплектовать подобными приборами электроприводы антенн любых типов, при условии использования ими в качестве датчиков положения вращающихся трансформаторов.

Литература

Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Кайдановский М. Н. и др. Модернизация аппаратуры электропривода антенной системы радиотелескопа РТ-32 // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 270–281.

Быков В. Ю., Ильин Г. Н. Устройство съёма угловых координат радиотелескопа РТ-32 // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 294–303. Upgraded device for reading angular coordinates of RT-32.

Бычатын Д. А., Гольдман И. Я. Поворотный индуктосин. Л.: «Энергия», 1969.

Кайдановский М. Н., Белоусов Н. Ю., Быков В. Ю. и др. Система наведения радиотелескопа РТ-32 // Приборы и техника эксперимента. 2012. Вып. 3. С. 63–74.

Михайлов А. Г. Программная компенсация ошибок датчиков положения антенны РСДБ-сети «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2006. Вып. 15. С. 38–59.

Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Кайдановский М. Н. и др. Радиоинтерферометрическая сеть «Квазар-КВО» — базовая система фундаментального координатно-временного обеспечения // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 13. С. 104–138.

Data Sheet AD2S1210 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad2s1210.pdf> (дата обращения 04.04.2021).

Data Sheet AD8139 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8139.pdf> (дата обращения 04.04.2021).

Filter Design Tool [Электронный ресурс]. URL: <https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-type> (дата обращения 04.04.2021).